



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

ANÁLISIS EFECTO EN EL RÉGIMEN HÍDRICO POR CAMBIO EN PATRONES METEOROLÓGICOS

RESUMEN EJECUTIVO

REALIZADO POR:

HÍDRICA CONSULTORES SPA

S.I.T. N° 400

Santiago, Noviembre 2016

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Comercial Sr. Alberto Undurraga Vicuña

Director General de Aguas
Abogado Sr. Carlos Estévez Valencia

Jefe División de Estudios y Planificación
Ingeniero Civil Adrián Lillo Zenteno

Inspector Fiscal
Ingeniero Civil Gustavo Calle Vásquez

HÍDRICA CONSULTORES SPA

Jefe de Proyecto
Ingeniero Civil Félix Pérez Soto

Profesionales

Ingeniero Civil Ximena Vargas M.
Ingeniero Civil Felipe Orellana M. (MEngSc)
Ingeniero Civil Eduardo Rubio A. (MSc)
Ingeniero Civil Mauricio Cartes V. (MSc)
Ingeniero Civil Gonzalo Cortés S. (PhD)
Ingeniero Civil Sergio Duarte M.
Ingeniero Civil Darío Vargas G.
Cartógrafo Salomón Vielma P.

Para citar bibliográficamente este estudio, se recomienda hacerlo de esta forma:

DGA (2016), Análisis Efecto en el Régimen Hídrico por Cambio en Patrones Meteorológicos, SIT N° 400, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios y Planificación, Santiago, Chile, Realizado por: Hídrica Consultores SpA.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2	UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	2
1.3	OBJETIVOS.....	2
CAPÍTULO 2	ANÁLISIS DE ANTECEDENTES.....	4
2.1	ANÁLISIS DE ESTUDIOS.....	4
2.2	BASE DE DATOS DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN DEL CLIMA Y RESILIENCIA CR2.....	4
CAPÍTULO 3	IDENTIFICACIÓN DE CUENCAS PRIORIZADAS POR MACROZONA.....	5
3.1	EVALUACIÓN DE INDICADORES.....	5
3.1.1	C1: Criterio DGA.....	5
3.1.2	C2: Completitud y Registro de la Información Hidrometeorológica.....	5
3.1.3	C3: Estrés Hídrico Superficial.....	5
3.1.4	C4: Completitud y Registro de la Información Subterránea.....	6
3.1.5	C5: Estrés Hídrico Subterráneo.....	6
3.1.6	C6: Acuíferos en Restricción o Prohibición.....	7
3.1.7	C7: Infraestructura.....	7
3.2	CUENCAS PRIORIZADAS.....	8
CAPÍTULO 4	ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE OFERTA HÍDRICA Y DERECHOS DE AGUAS.....	9
4.1	OTORGAMIENTO DE DERECHOS.....	9
4.2	OFERTA HÍDRICA POR CUENCA.....	9
4.3	EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA RELACIÓN ENTRE OFERTA HÍDRICA Y DERECHOS.....	10
CAPÍTULO 5	INFORMACIÓN BASE Y METODOLOGÍA.....	11
5.1	CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE BASE DE DATOS.....	11
5.2	METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS.....	11
CAPÍTULO 6	CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS.....	14
6.1	PRECIPITACIÓN.....	14
6.1.1	Análisis Espacial y Modelos Topoclimáticos.....	14

6.1.2	Análisis Temporal Precipitaciones	14
6.2	TEMPERATURA	20
6.2.1	Análisis Espacial y Modelos Topoclimáticos	20
6.2.1	Análisis Temporal de la Temperatura	20
6.3	CAUDALES	24
6.3.1	Variabilidad en Régimen de Caudales	26
6.3.2	Estacionareidad de Series Fluviométricas	27
6.4	EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	27
6.5	NIEVE	28
6.5.1	Series de tiempo y climatología de Equivalente en Agua.....	28
6.5.2	Análisis de Sequías y de Tendencias	29
6.6	RECARGA Y NIVELES DE POZOS	29
6.6.1	Generación de Estadística de Recarga Anual en Cuencas	30
6.6.2	Análisis de Frecuencia para Recargas Anuales	30
6.7	INDICADOR REGIONAL	30
CAPÍTULO 7	RELACIÓN CON LAS FORZANTES CLIMÁTICAS EXTERNAS.....	33
CAPÍTULO 8	ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE CRECIDAS	35
8.1	ANÁLISIS DE CRECIDAS	35
8.2	RESULTADOS	35
CAPÍTULO 9	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	36
9.1	IDENTIFICACIÓN DE CUENCAS.....	36
9.2	RESULTADOS Y CONCLUSIONES POR CUENCA	36
9.3	COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES GENERALES	41

CUADROS

Cuadro 3.2-1	Ponderación por Criterio	8
Cuadro 3.2-2	Cuencas Seleccionadas	8
Cuadro 4.1-1	Derechos Consuntivos Otorgados (l/s)	9
Cuadro 4.2-1	Oferta Hídrica Superficial (l/s)	10
Cuadro 4.2-2	Oferta Hídrica Subterránea (l/s)	10
Cuadro 9.2-1	Resumen Resultados Análisis de Variación Agregación Anual	40

FIGURAS

Figura 1.3-1	Zona de Estudio.....	3
Figura 6.7-1	Resumen de resultados para la tendencia de la precipitación y temperatura. ...	31

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN GENERAL

Durante los últimos años, Chile ha sufrido una denominada “mega sequía” que se ha extendido desde el año 2008 hasta el 2013. De acuerdo a los resultados preliminares informados por el Centro de Investigación y Resiliencia CR2 de la Universidad de Chile¹, la duración de este fenómeno es atípico en el registro histórico nacional. En otras palabras, si bien han existido sequías emblemáticas como la ocurrida en los periodos 1969-1971, 1982, 1997, la actual no sólo tiene una duración de 5 años, sino que ha tenido una extensión mayor en términos espaciales. Adicionalmente, el número de zonas y personas afectadas por la sequía aumenta progresivamente a medida que crece la población y la concentración en grandes ciudades producto de la migración. Paralelamente a lo anterior, el país ha experimentado un incremento en las zonas geográficas con escasez de agua, entendida ésta como el déficit generado porque la demanda de agua supera los recursos hídricos explotables en condiciones sostenibles.

La escasez de agua y la sequía no son un problema únicamente para los responsables de la gestión del agua, ya que tienen un impacto directo para la ciudadanía y los sectores económicos que utilizan y dependen del agua, tales como la agricultura, el turismo, la industria, la energía, el transporte y muchos otros sectores emergentes como los conservacionistas, recreacionales, aspectos culturales indígenas, etc., que cada vez cobran más relevancia en nuestro continente. La escasez de agua y la sequía tienen, además, un impacto más amplio sobre los recursos naturales en general por sus efectos secundarios negativos para la biodiversidad, la calidad del agua, el aumento del riesgo de incendios forestales y el empobrecimiento del suelo.

Es importante por ello tener conocimiento no solo de los patrones con que se mueve la demanda del recurso hídrico sino también los patrones de la oferta del mismo, es decir cómo se comportan las variables hidrometeorológicas en el tiempo y su influencia en la oferta hídrica, ya que las variaciones de ella van a determinar un cambio en la disponibilidad del recurso hídrico, lo que es clave en los periodos de escasez.

¹ Informe a la Nación: La Megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro, 2015.

La Dirección General de Aguas (DGA) posee en la actualidad un total de 507 estaciones pluviométricas y 683 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de todo el país (contabilizando sólo estaciones vigentes), junto a registros de nivel freático en pozos de observación desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de Los Lagos.

Toda esta información recogida por la red de monitoreo de la DGA, constituye una enorme base de datos, a partir de la cual se puede investigar líneas de trabajo que consideren situaciones y metodologías no habituales en los trabajos de consultoría, de manera de determinar la disponibilidad de los recursos hídricos y así poder satisfacer la demanda de agua a lo largo del país.

1.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

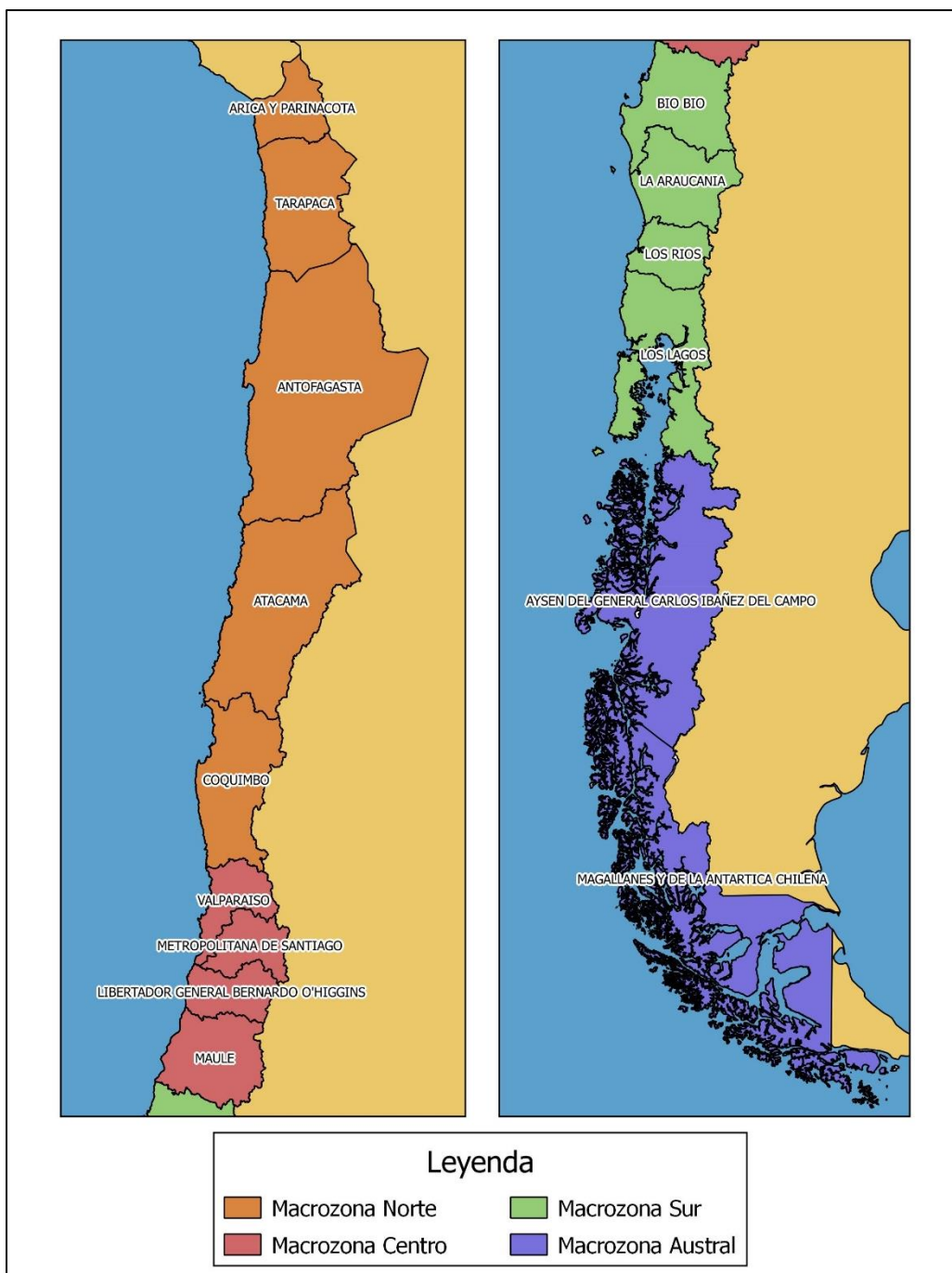
El estudio tiene alcance nacional ya que pretende generar una visión global de los impactos del cambio en los patrones hidrometeorológicos en los recursos hídricos a nivel de macrozonas (Norte, Centro, Sur y Austral). La Figura 1.3-1 muestra las regiones que se encuentran comprendidas en cada una de las macrozonas definidas por la DGA.

1.3 OBJETIVOS

El objetivo principal del estudio fue generar una mirada global de los impactos del cambio en los patrones meteorológicos en los recursos hídricos a nivel de macrozonas (Norte, Centro, Sur y Austral), en cuanto a los posibles cambios en el régimen de escurrimiento de los ríos y en la recarga de los acuíferos, además de los cambios en los patrones de distribución espacial y temporal de lluvias.

Para lograr lo anterior, se definieron los siguientes objetivos específicos:

- Análisis comparativo, por macrozona, de las series hidrológicas en cuencas o subcuencas con el análisis de las series en estaciones pluviométricas.
- Investigar posibles cambios en las probabilidades de excedencia de precipitaciones y caudales, que pueda indicar un cambio en los patrones meteorológicos.
- Investigar posibles cambios en las curvas de variación estacional de precipitaciones y caudales, que puedan indicar un cambio en los patrones meteorológicos y que signifiquen un impacto en la oferta hídrica superficial.
- Investigar la interacción de los patrones de recarga y los niveles en los acuíferos, ver en qué medida estos puedan indicar un cambio en los patrones meteorológicos y que signifiquen un impacto en la oferta hídrica del acuífero.
- Expresar en forma gráfica las posibles variaciones de la oferta hídrica por cuenca/subcuenca a través de mapas temáticos, tanto para aguas superficiales como para aguas subterráneas.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 1.3-1 Zona de Estudio

CAPÍTULO 2 ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

A continuación, se describe en general lo que fue el proceso de recopilación y análisis de los antecedentes.

2.1 ANÁLISIS DE ESTUDIOS

Los estudios revisados fueron utilizados con el fin de obtener la información necesaria para el cálculo de índices que permitieran la priorización de las cuencas de cada macrozona.

En particular, se obtuvo información sobre valores de recarga, balances hídricos, derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas, determinación y recomendación de zonas de agotamiento y restricción, estudios técnicos realizados por el DARH y DEP, caudales de 85% de probabilidad de excedencia asociados a las cuencas con información, etc.

2.2 BASE DE DATOS DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN DEL CLIMA Y RESILIENCIA CR2

El CR2 publicó una base de datos que incluye diferentes fuentes de información como las estadísticas meteorológicas de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) y la Dirección General de Aguas (DGA). La base de datos que se descargó desde el sitio web del CR2 incluye los siguientes registros:

- Datos de Precipitación: acumulados diarios y mensuales, en milímetros para 802 estaciones de Chile (33 DMC y 769 DGA), de enero 1940 a septiembre 2015.
- Datos de Temperaturas Extremas: diarias y mensuales, en grados celsius, para 273 estaciones de Chile (34 DMC y 239 DGA), de enero de 1950 a septiembre de 2015, utilizadas para obtener valores de temperaturas medias.
- Datos de Caudales Medios: diarios y mensuales, en metros cúbicos por segundo, para 716 estaciones de Chile, de enero de 1940 a abril de 2013.

Luego de un proceso de validación de estos datos, y para el desarrollo del presente estudio, se consideró principalmente esta base de datos del CR2.

CAPÍTULO 3 IDENTIFICACIÓN DE CUENCAS PRIORIZADAS POR MACROZONA

Para escoger las cuencas aptas para ser analizadas, se definieron criterios e indicadores, para dicha selección, que se indican a continuación.

3.1 EVALUACIÓN DE INDICADORES

Cada uno de los indicadores, señalados más adelante, se categorizaron en 3 niveles de priorización (o jerarquía), los cuales se mencionan a continuación:

- Nivel 1: Prioridad máxima
- Nivel 2: Prioridad media
- Nivel 3: Prioridad menor

Además, la jerarquía dependerá de las características de cada uno de los indicadores, según se explica a continuación.

3.1.1 C1: Criterio DGA

Este criterio tiene por objetivo responder a la necesidad que tiene la autoridad de priorizar un sistema por motivos estratégicos, técnicos u políticos que hacen necesaria la inclusión de la cuenca en cuestión.

3.1.2 C2: Completitud y Registro de la Información Hidrometeorológica

Este criterio tiene por objetivo caracterizar tanto la cantidad como la calidad de la información en términos de datos registrados y solidez del mismo.

3.1.3 C3: Estrés Hídrico Superficial

Este criterio tiene por finalidad señalar el agotamiento de una cuenca para nuevos derechos de aprovechamiento de aguas superficiales consuntivos y continuos. Se basa en las declaraciones oficiales de agotamiento dictadas por la DGA y en la cantidad de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales pendientes.

A continuación, se detalla la jerarquía para cada macrozona:

Macrozonas Norte y Austral

- Nivel 1: Con zona de agotamiento y más de 100 solicitudes pendientes.
- Nivel 2: Con zona de agotamiento y menos de 100 solicitudes pendientes o Sin zona de agotamiento y más de 100 solicitudes pendientes.
- Nivel 3: Sin zona de agotamiento y menos de 100 solicitudes pendientes.

Macrozonas Centro y Sur

- Nivel 1: Con zona de agotamiento y más de 1.000 solicitudes pendientes.
- Nivel 2: Con zona de agotamiento y menos de 1.000 solicitudes pendientes o sin zona de agotamiento y más de 1.000 solicitudes pendientes.
- Nivel 3: Sin zona de agotamiento y menos de 1.000 solicitudes pendientes.

3.1.4 C4: Completitud y Registro de la Información Subterránea

El objetivo de este criterio es informar de la completitud del registro de los niveles de agua (limnigramas) en los pozos de observación DGA, con información disponible.

La evaluación de este criterio tiene relación con la calidad y cantidad de información de niveles del agua subterránea asociada a cada cuenca, por lo que se ha definido un indicador asociado a la selección de pozos válidos para ser considerados como fuente importante de información. Se considera como pozos válidos aquellos que cumplan con lo siguiente:

- Longitud de registro mayor o igual a 10 años (diferencia entre la primera y la última medición registrada).
- Densidad de registro promedio, de al menos 4 mediciones por año.

Finalmente, se realizó una contabilización de la cantidad de pozos válidos por cuenca, mediante lo cual se asignó el nivel de priorización de acuerdo a la siguiente jerarquía:

- Nivel 1: Mayor o igual a 20 pozos válidos.
- Nivel 2: Entre 1 y 20 pozos válidos.
- Nivel 3: Ningún pozo válido.

3.1.5 C5: Estrés Hídrico Subterráneo

Este criterio tiene por objetivo evaluar el grado de estrés de los acuíferos. Se definió este indicador como la razón entre la demanda del recurso subterráneo y la recarga de renovación del sistema acuífero. Para evaluar este criterio se utilizó la estimación del indicador como el

cociente entre los derechos permanentes constituidos y la recarga estimada en base a estudios disponibles.

La definición del nivel de priorización se obtuvo analizando que un número mayor a 1 implica una cantidad de derechos otorgados mayor a la recarga del acuífero. De este modo, los niveles se definieron de la siguiente manera:

- Nivel 1: Cociente mayor a 3.
- Nivel 2: Cociente entre 1 y 3.
- Nivel 3: Cociente menor a 1.

3.1.6 C6: Acuíferos en Restricción o Prohibición

Este es un criterio espacial que informa del número de sectores acuíferos declarados como zona de prohibición y áreas de restricción en la cuenca, ambas declaradas por la DGA. El objetivo es priorizar aquellos sistemas en donde se encuentren declaradas estas zonas.

Si bien la cantidad de sectores acuíferos con restricción y/o prohibición es variable por cuenca, esto no puede ser utilizado directamente como indicador para definir el nivel de priorización, ya que el tamaño de los sectores es también variable. Por esto que se optó por utilizar el porcentaje de la superficie de la cuenca que se encuentra en restricción y/o prohibición como indicador. De este modo, los niveles se definieron de la siguiente manera:

- Nivel 1: Mayor o igual a 50% del área de la cuenca en restricción, o al menos una zona de prohibición sin importar el área.
- Nivel 2: Menor al 50% del área de la cuenca en restricción.
- Nivel 3: Ningún sector en la cuenca.

3.1.7 C7: Infraestructura

Este criterio se ha definido como el número de obras mayores por cuenca. El objetivo es establecer las cuencas que presentan más obras, a las que se les asignarán una mayor importancia o peso. De acuerdo a los registros disponibles en la DGA, existen actualmente 186 obras mayores a lo largo del país, de las cuales 129 se ubican en alguna de las cuencas consideradas prioritarias. En base a este indicador, se ha definido la evaluación del nivel de priorización de la siguiente manera:

- Nivel 1: Mayor o igual a 5 obras mayores en la cuenca.
- Nivel 2: Entre 1 y 4 obras mayores en la cuenca.
- Nivel 3: Ninguna obra mayor en la cuenca.

3.2 CUENCAS PRIORIZADAS

Los 7 criterios definidos y calculados anteriormente permitieron categorizar las cuencas de estudio en 3 niveles de priorización. Para obtener una evaluación final considerando todos los criterios, es necesario asignarles una ponderación dependiendo de su relevancia en relación a importancia y cantidad de información utilizada para su evaluación y a la localización geográfica.

Debido a que la componente subterránea tiene una relevancia menor en las macrozonas sur y austral, existe una menor cantidad de información en ellas, así como también no existen zonas de restricción o prohibición. Es por esto que los criterios C4, C5 y C6 no son evaluados para estas macrozonas. El Cuadro 3.2-1 muestra los pesos asignados a cada uno de los criterios diferenciando entre macrozonas norte y centro, y macrozonas sur y austral.

Cuadro 3.2-1 Ponderación por Criterio

Criterio	Peso (%)	
	Norte y Centro	Sur y Austral
C1 Criterio DGA	20%	30%
C2 Completitud y Registro de Información Hidrometeorológica	25%	35%
C3 Estrés Hídrico Superficial	10%	25%
C4 Completitud y Registro de Información de niveles Subterráneos	15%	0%
C5 Estrés Hídrico Subterráneo	18%	0%
C6 Acuíferos en Restricción y Prohibición	8%	0%
C7 Infraestructura	4%	10%

Fuente: Elaboración Propia.

El resultado final de la aplicación de esta metodología de jerarquización, se muestra en el Cuadro 3.2-2.

Cuadro 3.2-2 Cuencas Seleccionadas

Macrozona	Cuenca DGA	Prioridad
Norte	Río Limarí	1,26
	Río Copiapó	1,35
	Río Loa	1,71
Centro	Río Maipo	1,28
	Río Aconcagua	1,61
Sur	Río Imperial	1,25
	Río Bío-Bío	1,35
Austral	Río Aysén	1,70

Nota: Un valor más bajo del índice indica un mayor nivel de prioridad.

Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE OFERTA HÍDRICA Y DERECHOS DE AGUAS

A continuación, se muestra la evolución temporal que ha experimentado la relación entre la oferta hídrica y los usos del agua, estos últimos, representados por los derechos de agua constituidos.

4.1 OTORGAMIENTO DE DERECHOS

El Cuadro 4.1-1 muestra un resumen de los derechos permanentes y consuntivos superficiales y derechos consuntivos de agua subterránea, constituidos hasta el año 2015 en las 8 cuencas de estudio.

Cuadro 4.1-1 Derechos Consuntivos Otorgados (l/s)

Macrozona	Cuenca DGA	Permanentes Superficiales	Definitivos Subterráneos
Norte	Río Loa	5.588	3.864
	Río Copiapó	1.353	21.096
	Río Limarí	29.289	6.042
Centro	Río Aconcagua	146.755	35.510
	Río Maipo	206.108	119.587
Sur	Río Bío-Bío	168.573	10.536
	Río Imperial	295.209	10.719
Austral	Río Aysén	12.606	352

Fuente: Elaboración Propia en base a derechos registrados en CPA hasta el año 2015.

4.2 OFERTA HÍDRICA POR CUENCA

El Cuadro 4.2-1 muestra los valores de la oferta hídrica o caudal medio para cada una de las cuencas en base a antecedentes públicos. En tanto, el Cuadro 4.2-2 muestra los valores para la oferta hídrica subterránea, la cual corresponde a la recarga media total de la cuenca, obtenida de igual manera en base a antecedentes públicos.

Cuadro 4.2-1 Oferta Hídrica Superficial (l/s)

Macrozona	Cuenca DGA	Oferta Superficial	Periodo	Fuente
Norte	Río Loa	3.180 (*)	1974 – 2012	KP 2014 Ficha 31
	Río Copiapó	3.501 (*)	1971 – 2012	Mineurita 2015
	Río Limarí	24.278 (*)	1990 – 2003	Cazalac 2006 Ficha 13
Centro	Río Aconcagua	25.432 (**)	1950 – 1999	AC 2001 Ficha 4
	Río Maipo	116.500 (**)	1950 – 2006	Arrau 2008 Ficha 23
Sur	Río Bío-Bío	1.874.000 (*)	-	DARH 2001 Ficha 3
	Río Imperial	591.180 (*)	1950 – 1996	CONIC 1998 Ficha 1
Austral	Río Aysén	545.170 (*)	1995 – 2015	Estación Fluviométrica Río Aysén en Puerto Aysén

Notas

(*): Corresponden a valores medios.

(**): Cuenclas de ríos Aconcagua y Maipo corresponden a caudal con una probabilidad de excedencia del 85%.

Fuente: Elaboración Propia en base a estudios públicos DGA.

Cuadro 4.2-2 Oferta Hídrica Subterránea (l/s)

Macrozona	Cuenca DGA	Oferta Subterránea	Periodo	Fuente
Norte	Río Loa	2.330	1974 – 2012	KP 2014 Ficha 31
	Río Copiapó	4.500	1993 – 2012	Hidromas 2013 Ficha 29
	Río Limarí	2.569	1960 - 2007	DGA 2008 Ficha 24
Centro	Río Aconcagua	18.620	1991 – 2001	DGA 2015 Ficha 33
	Río Maipo	57.663	1950 – 1998	DGA 2006
Sur	Río Bío-Bío	46.463	-	DGA 2016
	Río Imperial	30.782	1950 – 1996	CONIC 1998 Ficha 1
Austral	Río Aysén	-	-	-

Fuente: Elaboración Propia en base a estudios públicos DGA.

4.3 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA RELACIÓN ENTRE OFERTA HÍDRICA Y DERECHOS

Se analizó la evolución temporal, dentro del periodo 1960 – 2015, de la oferta hídrica superficial y subterránea, de los derechos de agua constituidos (demanda hídrica) y de la diferencia entre estos. Este análisis no corresponde a la determinación de la disponibilidad efectiva de agua para constituir derechos, como lo contempla la DGA en su definición de disponibilidad hídrica. Lo más relevante de los resultados es que, por ejemplo, para las cuencas de los ríos Maipo, Aconcagua, Limarí y Loa habría otorgamiento de derechos por sobre la oferta. La situación de los acuíferos muestra que hay un caudal de demanda mayor a la oferta para las macrozonas Norte y Centro, no así para las cuencas de los ríos Bío-Bío e Imperial. La cuenca del río Aysén no dispone de información suficiente para su análisis.

CAPÍTULO 5 INFORMACIÓN BASE Y METODOLOGÍA

El presente capítulo aborda uno de los temas más sensibles del estudio. Proporciona los alcances metodológicos sobre los cuáles se construyó la base de datos estadística, en particular los procesos de relleno y homogeneidad. Adicionalmente proporciona las metodologías para los diferentes tipos de análisis utilizados en la caracterización de cada una de las variables hidrometeorológicas.

5.1 CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE BASE DE DATOS

La metodología de relleno y análisis de consistencia se encuentra bastante desarrollada en la experiencia científica nacional e internacional. Se trabajó principalmente con correlaciones medias mensuales, anuales y el uso de curvas doble acumuladas (CDA) para el análisis de consistencia de cada estación. El objetivo de esta metodología es proveer de series estadísticas confiables para los procedimientos estadísticos del análisis espacial y temporal.

5.2 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS

A continuación, se presenta una breve descripción de las metodologías utilizadas para el análisis, cuyos resultados son presentados más adelante.

Análisis Espacial y Modelos Topoclimáticos

El análisis espacial tiene por objetivo comprender el comportamiento que tiene una variable debido a diversos factores geográficos y las observaciones que existen de la variable en sí.

Chile presenta muchos tipos de climas desde áridos-desérticos en el Norte, hasta templados mediterráneos para las zonas Centro-Sur y lluviosos para la zona Austral. Todos estos climas tienen una distribución característica de la precipitación y de la temperatura.

La mayoría de los patrones espaciales obedecen a isoyetas e isotermas que fueron construidas con información hasta el año 1987, cuyos patrones espaciales dependieron de un criterio experto, el cual en muchas ocasiones no disponía de una información suficiente para caracterizar de una manera adecuada la traza de estas variables en el espacio, y en particular, los valores que podía alcanzar para zonas cordilleranas en donde la información es particularmente escasa y poco densa.

Para el presente estudio, el análisis espacial se ha hecho a través de modelos topoclimáticos de temperatura y precipitación. Su objetivo principal es representar la información hidrometeorológica de una manera espacialmente distribuida.

Análisis Temporal

La variabilidad temporal apunta a resolver cuestionamientos básicos cómo: ¿Existen tendencias estadísticamente significativas en las variables analizadas? ¿Hay cambios significativos en el tiempo de los valores medios de las variables y en sus varianzas? ¿Cuáles son los ciclos irregulares que poseen las series y que por ende caracterizan a las cuencas analizadas?. Para resolver estos cuestionamientos se ha utilizado gran parte de la teoría matemática relativa al análisis de series de tiempo.

Producto de la elevada cantidad de información (número de series de tiempo factibles de ser analizadas), y de las tres agregaciones temporales que son abordadas en este estudio (anual, invierno y verano) se ha escogido, para el análisis y determinación de los ciclos irregulares, analizar tres estaciones para cada cuenca. Cada estación escogida representa la zona costera (influencia oceánica), depresión intermedia y zona cordillerana (influencia orográfica). De esta manera se asegura cubrir el espacio representado por cada variable.

Análisis de Estacionareidad de Series Fluviométricas

En el análisis de series de tiempo, la hipótesis de estacionareidad suele ser una de los supuestos más comunes. La estacionareidad fuerte se define como la característica de una serie de tiempo en que todos sus momentos son independientes de la variable temporal (i.e., no cambian en el tiempo). De esta manera, se analizaron las series para las estaciones de interés

Metodología de Análisis de la Evapotranspiración

Para la determinación de la evapotranspiración se consideró el estudio CNR (2015)², en el que se presenta la información de evapotranspiración más actualizada y con un mayor nivel de detalle espacial.

Metodología de Caracterización Nival

El objetivo de este análisis fue la generación de un set de datos histórico de Equivalente en Agua de la nieve (EA, o SWE en inglés), distribuidos espacialmente y temporalmente en distintas cuencas de Chile. Dicho set de datos es estimado en base a una integración entre modelos de simulación del comportamiento del manto nival e imágenes satelitales.

² Comisión Nacional de Riego (2015). Evapotranspiración de Referencia para Determinación de Demandas de Riego en Chile. Documento preparado por AGRIMED. Universidad de Chile.

Método de la Curva Número para Caracterización de Recarga

El método de la curva número permite estimar la recarga potencial sobre un acuífero a partir de variables hidrológicas como la precipitación y el valor de curva número asociado a la cuenca en análisis. De esta manera, la infiltración o recarga subterránea se determina, de acuerdo a este método, como la suma de la recarga desde tres aportes: escorrentía superficial, almacenamiento inicial y retención de almacenamiento.

Metodología de Construcción del Indicador Regional

La metodología consiste en promediar las anomalías de una variable hidrometeorológica medida por estaciones o registros comprendidos dentro de un dominio de interés. Este cálculo da como resultado un indicador regional representativo que permite visualizar cambios y/o tendencias de una manera más clara, sobre todo cuando existe una variabilidad significativa entre las estaciones o registros utilizados para formar el indicador.

CAPÍTULO 6 CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS

El presente capítulo muestra los resultados obtenidos de la aplicación de las diferentes metodologías, explicadas en el capítulo anterior, a las variables hidrometeorológicas de interés.

6.1 PRECIPITACIÓN

En los acápite siguientes, se presentan los resultados obtenidos a partir de la realización de los análisis espacial y temporal a la variable precipitación.

6.1.1 Análisis Espacial y Modelos Topoclimáticos

De los modelos topoclimáticos de precipitación se aprecia que la mayor parte de la variabilidad en precipitaciones está controlada por la topografía de cada una de las cuencas. El patrón predominante muestra un incremento de las precipitaciones con altura debido al efecto orográfico. La excepción a esta regla la constituye la cuenca del río Aysén, donde se observa una transición de un régimen húmedo oceánico en la costa hasta un clima de estepa en las zonas altas. La cuenca del río Loa por el otro lado muestra un contraste importante entre el clima del desierto de Atacama y el clima de cordillera, el cual presenta precipitaciones características del “invierno altiplánico” durante los meses de diciembre a febrero. La cuenca del río Copiapó presenta además de un marcado régimen orográfico, una variación importante de las precipitaciones de Norte a Sur. Esta variación latitudinal se produce debido a la transición desde un clima desértico hacia un clima Mediterráneo.

6.1.2 Análisis Temporal Precipitaciones

A continuación, se presentan los resultados del análisis temporal de precipitaciones.

6.1.2.1 Análisis Espectral de las Precipitaciones

Para la cuenca del río Loa se detectaron periodos significativos para la precipitación entre 2 y 9 años para la agregación anual, concentrándose el mayor periodo en la estación Linzor, la más cordillerana, y el menor periodo en la estación El Loa Calama AD, de influencia costera. Para la agregación de invierno, los valores de los ciclos de precipitación se concentran entre los 2, 5 y 7 años de recurrencia, presentándose los mayores ciclos en la

estación Calama, representativa de la depresión intermedia. En el caso de la agregación de verano, la zona cordillerana presenta ciclos de precipitación de 2 y 5 años (estación Linzor) y de 6 años para la costa (estación El Loa Calama AD). Sin embargo, la estación Calama, es la que presenta los ciclos más elevados de 3, 7 y 8 años.

En el caso de la cuenca del río Copiapó tienden a reproducirse los mismos ciclos que los vistos en la cuenca del río Loa, pero ligeramente menores. Dicho de otra manera, los ciclos entre 2 y 4 años aparecen en mayor cantidad que los ciclos de mayor periodo (10 años).

En el caso de la cuenca del río Limarí, los ciclos asociados a la agregación anual en precipitación exhiben rangos entre 3 a 7 años. Respecto de la agregación de invierno, la precipitación de la estación La Paloma Embalse sigue siendo la que presenta los mayores ciclos, entre 3 a 7 años, mientras que las otras estaciones presenta ciclos entre 2 a 4 años. En el caso de la agregación de verano, son las estaciones más altas las que presentan un mayor espectro de periodos (2 a 4 años para Las Ramadas; 2, 13 años para Punitaqui).

En la cuenca del río Aconcagua, para la agregación anual de la precipitación, se observan ciclos entre 3 y 5 años. Para la agregación de verano, la precipitación en zona de cordillera exhibe 2 ciclos estables de 3 y 4 años. Al contrario, la estación más costera, Lo Rojas, exhibe ciclos de 2 y 7 años.

Para la cuenca del río Maipo, en la agregación anual de la precipitación, se han detectado ciclos entre 2, 4, 5 y 7 años. En la agregación temporal de invierno, la precipitación presenta los mismos ciclos que en la agregación anual, definiéndose también un ciclo de 3 años. En la agregación de verano, para la precipitación, los mayores periodos se observan para las estaciones Quinta Normal (2 y 7 años), seguidos de San Antonio (4 años) y San José de Maipo (2-3 años).

Para la cuenca del río Bío-Bío, la agregación anual de precipitación, tanto la estación Laguna Malleco (cordillerana) como la estación Río Bío-Bío en Desembocadura presentan ciclos menores de 2 y 5 años, a diferencia de la estación Las Achiras (depresión intermedia) que exhibe ciclos de 3, 6 y 9 años, los que dan cuenta de una influencia climática externa. La agregación de invierno, sin embargo, presenta un comportamiento “opuesto” al detectado para la agregación anual. En este caso la estación Las Achiras es quien exhibe un ciclo de 3 años, mientras que las estaciones Laguna Malleco y Río Bío-Bío en Desembocadura presentan un ciclo bianual y otro de 6 años. En el caso de la agregación de verano para la precipitación, los ciclos detectados para las estaciones Las Achiras y Bío-Bío en desembocadura son del orden de 3 años. Por otra parte, la estación Laguna Malleco, representante de la zona alta, posee ciclos de 5 y 9 años, lo que ratifica la posible existencia de una influencia decadal.

Para la cuenca del río Imperial, la agregación anual de precipitación informa de ciclos de 3, 4 y 5 años para la estación Vilcún (cordillerana), mientras que en la estación Puerto Saavedra (costera) se observan ciclos de 2 y 5 años. La estación Maquehue Temuco (depresión intermedia) informa de los periodos más elevados de 8 y 10 años, lo que sugiere la influencia de un forzante decadal. La agregación de invierno indica que, tanto para la precipitación en zona cordillerana como en la depresión intermedia, los ciclos detectados corresponden a 2,5 años. La zona costera agrega un ciclo de 4 años. En el caso de la agregación de verano, la precipitación en la zona alta exhibe un ciclo de 5 años, mientras que la zona media agrega a ese uno de 3 y 8 años. La zona baja presenta ciclos de 2 y 3 años.

La agregación anual de precipitación reconoce ciclos de 4, 6 y 7 años para la estación Balmaceda (zona alta), mientras que para la estación Tte. Vidal (zona media) se observan ciclos de 3, 5 y 9 años, se advierte la presencia de un ciclo decadal para la zona sur y austral. Por otro lado, la estación Puerto Aysén (zona baja o costera) presenta ciclos menores, de 3 y 4 años. La agregación de invierno informa de ciclos de 2, 3 y 4 años para la zona alta, de 4 años para la zona media y de 3, 7 y 9 años para la zona baja (Puerto Aysén). La agregación temporal de verano informa de variados ciclos detectados para la precipitación. En el caso de la zona alta, se confirman ciclos de 2, 3 y 6 años, mientras que la zona media tiene ciclos de 3, 5 y 7 años y la zona baja en Puerto Aysén informa ciclos de 2, 3, 4 y 6 años.

6.1.2.2 Análisis de Cambios en Series de Tiempo de las Precipitaciones

Si bien los resultados del test de tendencias de Mann-Kendall sugieren que no ha habido una alteración marcada de las precipitaciones a nivel país entre 1960 y 2014 (exceptuando casos como la cuenca del río Aysén y la zona alta del río Loa), es importante destacar que, aunque la mayoría de las estaciones no presentaron tendencias significativas, la gran mayoría de las estaciones que presentaron resultados significativos presentaron tendencias negativas.

Además del test de Mann-Kendall se realizaron tests de cambios en las medias de los periodos 1960-1986 y 1987-2014. Dentro de la macrozona Norte la cuenca del Loa es la única que presentó cambios significativos en las precipitaciones indicando que en general las precipitaciones del periodo 1987-2014 son menores a las registradas durante el periodo 1960-1986, particularmente durante la época de verano. Para la macrozona Centro no se observa ningún cambio en el régimen de precipitaciones de los dos periodos analizados. Para la macrozona Sur se confirman los resultados del test de Mann-Kendall, con unas pocas estaciones mostrando descensos leves en las precipitaciones, pero la mayoría mostrando un régimen inalterado de precipitaciones. Para la macrozona Austral se

observan descensos leves en la media de precipitaciones del periodo 1987-2014 respecto al periodo 1960-1986, sin embargo, los cambios detectados son en general menores al 20%.

Los resultados del test de cambio de varianza para la macrozona Norte muestran diferencias importantes entre las tres cuencas. La cuenca del río Loa muestra una señal que no es consistente entre las estaciones ni entre los periodos anuales, verano e invierno. Este resultado se atribuye a la aridez de la zona, donde uno o dos años húmedos son suficientes para alterar las propiedades estadísticas de la serie de tiempo analizada. La alta variabilidad entre estaciones puede estar relacionada además al régimen de precipitaciones convectivo que existe en la precordillera y en la cordillera de la cuenca, lo que resulta en que estaciones cercanas puedan presentar valores de precipitación total o estacional distintos a pesar de encontrarse cerca.

Para la cuenca del río Copiapó se observa un aumento significativo de la variabilidad de precipitaciones en general para todas las estaciones excepto para una durante la estación de invierno. Este resultado se puede atribuir a la presencia de varios años húmedos durante el periodo 1987-2014, lo cual resultó en un aumento de la varianza de la serie de tiempo durante aquel periodo.

Para la macrozona Centro se observan en general aumentos de la varianza, los cuales tienden a ser no-significativos excepto durante el periodo de verano.

Para la macrozona Sur se observa un resultado que no es consistente entre las cuencas del río Bío-Bío y la cuenca del río Imperial. La cuenca del río Bío-Bío presenta en general leves reducciones de la varianza, mientras que la cuenca del río Imperial presenta incrementos significativos.

En el caso de la macrozona austral, representada por la cuenca del río Aysén, se observa una reducción de la varianza anual en cinco estaciones. Es probable que esta reducción en la varianza anual sea atribuible a la reducción (no-significativa) observada durante el periodo de verano.

6.1.2.3 Análisis de Sequías

Se analizaron los periodos de sequías considerando aquel periodo que de manera continua presenta por 3 años o más, un registro bajo el promedio anual. La intensidad corresponde a la máxima diferencia presentada en periodo de sequía respecto a la media anual y la magnitud se define como la sumatoria del déficit alcanzado en los años de sequía.

Dentro de la cuenca del río Loa, sólo la estación Linzor, la cual presenta la mayor cantidad de precipitaciones, detecta el periodo comprendido entre los años 2012 y 2014 como periodo seco, lo cual podría ser influencia de la mega sequía del periodo 2010-2014. Adicionalmente, en el sector costero, representado por la estación el Loa Calama AD, se observa una duración mayor de las sequías respecto al resto de la cuenca, alcanzando valores extremos de 6 y 7 años.

Para la cuenca del río Copiapó se presenta un periodo de sequía con una duración extrema de 14 años, lo cual es una extensión que no se presenta en ninguna otra estación de la macrozona norte.

Con los resultados en la cuenca del río Limarí se comienza a presentar el efecto de la mega sequía en el periodo 2010 – 2014. Las mayores intensidades se observan previo al año 1988, sin embargo, el número de eventos se ven aumentados.

En la macrozona centro, se observa un efecto similar a lo visto en la macrozona Norte, es decir los periodos de sequías de mayor intensidad se presentan en años previos a 1988, aumentando el número de eventos luego de este año. Sin embargo, el efecto de la mega sequía se extiende a lo largo de la macrozona, observándose como evento extremo de magnitud y duración para las estaciones de Riecillos en la cuenca del río Aconcagua y Quinta Normal Santiago para la cuenca del río Maipo.

En la macrozona sur, el efecto de la mega sequía entre los años 2010 y 2014 es registrada en todas las estaciones, alcanzando un valor extremo de duración, magnitud e intensidad en las estaciones Río Bío-Bío en Desembocadura de la cuenca del río Bío-Bío y Puerto Saavedra, ubicada en la cuenca del río Imperial.

La macrozona austral, presenta un periodo extremo en la duración de los eventos de sequía entre los años 1980 a 1989, registrándose con leves intermitencias en todas las estaciones de la cuenca. Sin embargo, el periodo crítico se registra en la estación Puerto Aysén durante el periodo 1995 - 2009, la de mayor precipitación media anual en la cuenca, evento que no es registrado de igual forma en el resto de la cuenca.

6.1.2.4 Variabilidad en Régimen de Precipitaciones

La estadística de precipitación se analizó en dos periodos de 29 años para cada estación, periodo mínimo sobre el cual se estima que los resultados poseen validez estadística. El rango de cada uno de ellos dependió de la longitud de información en cada cuenca.

La macrozona norte, exceptuando la cuenca del Loa, presenta un aumento de sus valores máximos, promedios y mínimos en el segundo periodo de análisis. Dicho aumento es más concreto en la cuenca del río Limarí.

La macrozona centro tiene un comportamiento disímil. La cuenca del Aconcagua disminuye sus valores medios y mínimos en 15 mm, mientras que sus valores máximos se mantienen estables. Por otro lado, la cuenca del Maipo tiene un comportamiento más errático. Disminuye sus valores medios y aumentan sus valores mínimos para las estaciones de costa y valle, mientras que para la estación de cordillera se observa un aumento del valor mínimo y máximo, al igual que del promedio. En este caso, el cambio del valor máximo en la estación de cordillera puede ser considerado como el más significativo de las 3 estaciones analizadas.

La macrozona sur, tiene un comportamiento diferente para cada estación y cuenca. La cuenca del Bío-Bío informa que la estación costera presenta un aumento de sus valores mínimos, medios y máximos entre ambos periodos. Sin embargo, la estación del valle (Las Achiras) presenta un aumento de sus valores mínimos, pero una disminución de su valor medio y su máximo. La estación de cordillera (Laguna Malleco) tiene el mismo comportamiento.

La cuenca del Imperial, es bastante más errática que su símil del Bío-Bío. La estación costera aumenta sus mínimos y promedios, pero decae en su valor máximo, siendo este último el cambio más significativo en monto (80 mm). La estación del valle (Manquehue Temuco AD) presenta una disminución de su valor mínimo (90 mm, el más significativo) y un aumento de sus valores medios y máximos en el segundo periodo de análisis (20 mm). Sin embargo, para la estación de cordillera, se tienen disminuciones en sus valores mínimos y máximos (60 y 90 mm respectivamente), pero un mayor valor medio, lo que sugiere la presencia de un clima más estable. Aun así, el aumento de su valor medio (20 mm) es menor a los cambios de sus valores extremos.

Por último, la cuenca de Aysén (macrozona austral) también exhibe un comportamiento distinto a lo largo del espacio. Puerto Aysén (costa), presenta fuertes reducciones en sus valores máximos (más de 1.000 mm), medios y mínimos (300 y 400 mm). Sin embargo, en el caso del valle, la reducción sólo se mantiene para los valores medios y máximos, siendo éste último el más relevante con una reducción del orden de 415 mm. Su valor mínimo aumenta en 65 mm. La estación de Cordillera exhibe el mismo comportamiento que la estación de costa, siendo la reducción de su valor máximo el más relevante y estimado en 137 mm.

6.2 TEMPERATURA

En los siguientes acápite se presentan los principales resultados obtenidos para los análisis realizados a la variable temperatura.

6.2.1 Análisis Espacial y Modelos Topoclimáticos

Los resultados de la aplicación de modelos topoclimáticos de temperatura muestran un resultado esperado: la temperatura media anual, de invierno y de verano está dominada en general por la elevación, presentándose temperaturas medias menores en la cordillera y en cordones montañosos. No se observan gradientes latitudinales de temperaturas significativos, pero este resultado debe confirmarse con la implementación de modelos topoclimáticos basados en un mayor número de estaciones. Asimismo, no se presentan gradientes longitudinales significativos que reflejen la influencia marítima en las temperaturas. Nuevamente este resultado debe confirmarse con más detalle ya que la variabilidad introducida por la temperatura, sumada al bajo número de estaciones disponibles puede ocultar la señal de variabilidad longitudinal de temperaturas.

6.2.1 Análisis Temporal de la Temperatura

A continuación, se presentan los resultados del análisis temporal de temperatura.

6.2.1.1 Análisis Espectral de la Temperatura

Para la cuenca del río Loa, existen dos ciclos característicos para la estación El Loa Calama AD, uno de 2 años y otro entre 7 y 8 años. Estos ciclos también se aprecian en la agregación temporal de invierno y podrían estar relacionados a influencias de indicadores regionales como “El Niño”. Para la agregación de invierno, la estación Parshall N2 presenta un ciclo de 4 años, posiblemente ligado a efectos de indicadores regionales. En el caso de la agregación de verano, la temperatura exhibe ciclos de 3 años para la costa y un adicional de 6 para la depresión intermedia.

En el caso de la cuenca del río Copiapó tienden a reproducirse los mismos ciclos que los vistos en la cuenca del río Loa, pero ligeramente menores. Dicho de otra manera, los ciclos entre 2 y 4 años aparecen en mayor cantidad que los ciclos de mayor periodo (10 años).

En el caso de la cuenca del río Limarí, el rango observado es entre 3 a 5 años, concentrándose los mayores ciclos en la misma estación anterior. Respecto de la agregación de invierno, la estación Las Ramadas, cordillerana, es la que exhibe el rango más amplio de ciclos, entre los 3 y 6 años, a diferencia de las otras 2 que no presentan ciclos mayores a 4 años. En el caso de la agregación de verano, si bien la estación Las Ramadas sigue presentando más variedad de ciclos, estos siguen acotados entre 2 a 5 años, fenómeno que se repite para las otras 2 estaciones analizadas.

En la cuenca del río Aconcagua, para la agregación anual de temperatura, Vilcuya (cordillera) presenta el mismo ciclo bianual de Riecillos. Las otras estaciones, Quillota (depresión intermedia) y Lliu-Lliu Embalse (ligeramente más en la costa), presentan ciclos bastante más variables y distintos entre sí. La estación Quillota presenta ciclos de 3 y 7 años (descartando el de 22 años), mientras que la estación Lliu-Lliu Embalse de 3, 4, 5 y 9 años, lo que comunica que puede estar siendo influenciada por forzantes climáticas bastante diferentes al resto de las estaciones. De estos 4 ciclos, los ciclos de 4, 5 y 9 años se observan también para la agregación temporal de invierno en el caso de la temperatura de la estación Lliu-Lliu, mientras que la estación Quillota agrega los ciclos de 3 y 7 años (descartándose también el ciclo de 22,5 años). Para la agregación de verano, las estaciones Vilcuya y Lliu-Lliu Embalse presentan ciclos de 5 y 4 años respectivamente, sin embargo, la estación Quillota, agrega un ciclo del orden de los 9 años.

Para la cuenca del río Maipo, la agregación anual temperatura, presenta ciclos del mismo orden de magnitud. La estación Embalse El Yeso (cordillera) presenta ciclos entre 2 y 7 años, mientras que Pudahuel (depresión intermedia) exhibe un ciclo bianual y otro de 4 años. La estación Melipilla (costa) presenta ciclos que no superan los 3 años. En la agregación temporal de invierno la temperatura presenta un comportamiento similar, por cuanto, tanto la estación cordillerana como la costera presentan un ciclo marcado de 5 y 3 años respectivamente, pero Pudahuel agrega un ciclo del orden de 7 años. En la agregación de verano, todas las estaciones presentan ciclos comunes entre 2 y 4 años, pero sólo Pudahuel exhibe un ciclo de 7 años.

Para la agregación anual de temperatura, las estaciones Quilaco (depresión intermedia) y Lonquimay (cordillerana) presentan un ciclo de 3 años, mientras que la estación Angol “La Mona” (más costera que la estación Quilaco, pero sin una influencia oceánica marcada) presenta un ciclo de 7 años. La agregación de invierno, el comportamiento es bastante regular para las 3 estaciones, las cuales presentan un ciclo de 2 años y sólo la estación Lonquimay agrega otro de 4 años. En el caso de la agregación de verano, la mayor variabilidad de ciclos está concentrada en la estación Lonquimay con 2 ciclos muy marcados de 2 y 6 años, mientras que la estación Angol exhibe uno de 5 años.

Para la cuenca del río Imperial, la agregación anual de temperatura en la parte alta está representada por la estación Malalcahuello, la cual informa ciclos de 3 y 7 años, mientras que la zona costera presenta un ciclo de 5 años. Por otro lado, la estación Maquehue, exhibe un ciclo bianual y otro de 4 años. La agregación de invierno, la zona alta y baja de la cuenca exhibe ciclos de 4 años. La zona media sólo informa de un ciclo bianual que también presenta la zona baja. En el caso de la agregación de verano, la zona alta presenta sólo 1

ciclo de 4 años, mientras que para la zona media y baja se observan ciclos de 2 y 3 años. Sin embargo, la zona media presenta además un periodo de 7 años.

Para la cuenca del río Aysén, la agregación anual de temperatura en la zona alta, se detectaron ciclos de 4 años. Tanto las estaciones Tte. Vidal como Puerto Aysén presentan ciclos de 5 y 4 años respectivamente, sin embargo, también es posible atribuir un ciclo adicional de 6 años para la primera y de 20 años para la zona baja. La agregación de invierno, la temperatura es donde se tienen mayores diferencias respecto de los métodos. Mientras se observan ciclos de 10 años para la zona baja, para la zona media y alta se observan ciclos de 4 y 2 años respectivamente, aunque también es posible identificar un ciclo de 10 y otro de 14 años. La agregación temporal de verano en la zona baja exhibe la misma variabilidad detectada con la precipitación, mientras que la zona media y alta exhiben ciclos de 2 y 3 años, además de ciclos de 6 y 14 años, los cuáles requieren de mayor análisis con índices o forzantes externas.

6.2.1.2 Análisis de Cambios en Series de Tiempo de la Temperatura

Los resultados son en general consistentes para todo el territorio analizado. Para la macrozona Norte las tendencias observadas de temperatura son al alza para la cuenca del río Loa y la cuenca del río Limarí. Para la cuenca del río Copiapó los resultados no son consistentes con lo observado en el Loa y el Limarí, presentando una tendencia negativa de temperaturas durante el verano para una estación (y otra positiva), y con indicios de aumentos leves para temperaturas medias anuales y de invierno. Para la macrozona Centro los resultados dan cuenta de un aumento significativo de las temperaturas anuales y de verano. La señal es consistente para todas las estaciones de la cuenca del Maipo y para todas, excepto una, en la cuenca del río Aconcagua. Este resultado se repite para la macrozona Sur, con aumentos significativos en las temperaturas anuales y de verano para la región. Las temperaturas de verano muestran una tendencia al incremento positiva para todas las estaciones analizadas. Para la macrozona Austral las tendencias al alza tienden a ser menos importantes, pero se mantiene aún la señal de calentamiento durante el verano en particular para la zona alta de la cuenca del río Aysén.

Junto con el test de Mann-Kendall, se evaluaron las diferencias de temperatura entre los periodos 1987-2014 y 1960-1986 mediante el test de diferencia de medias. Para la macrozona Norte, las estaciones dentro de las cuencas de los ríos Loa y Limarí muestran aumentos de 0,5 a más de 1°C, mientras que las estaciones dentro del río Copiapó muestran cambios leves que no son consistentes con los observados dentro de las otras cuencas.

Para la macrozona Centro se observan alzas de temperaturas medias anuales, de invierno y de verano del orden de 0,5°C hasta más de 1°C. Esto se replica en la macrozona Sur. Esta

última macrozona presenta las alzas más altas de temperaturas medias de verano, con alzas en promedio del orden de $0,75^{\circ}\text{C}$ para todas las estaciones analizadas. Para la macrozona Austral no se observan cambios significativos en las temperaturas.

Los resultados del test de cambios en la varianza para la macrozona Norte muestran cambios significativos tanto positivos y negativos para la cuenca del río Loa y río Copiapó. Para la cuenca del Limarí los cambios tienden a ser negativos, con una reducción de la varianza en general.

Para la macrozona Centro no se observan cambios significativos, excepto para el periodo de verano donde se observan tres estaciones con reducciones significativas en la varianza. Para la macrozona Sur se observan reducciones significativas en la variabilidad de temperatura media anual dentro de la cuenca del río Bío-Bío (leves). Finalmente, para la macrozona Austral, se observan aumentos significativos de la varianza de las temperaturas medias anuales y de invierno.

6.2.1.1 Variabilidad en Régimen de Temperatura

En la macrozona norte se tienen diferentes comportamientos para cada cuenca. La cuenca del río Loa presenta en su estación de costa, un aumento sostenido de sus valores mínimos y medios, pero no en cuanto a su máximo histórico en cada subperíodo. El aumento es del orden de 1°C . La estación cordillerana Parshall N2, a diferencia de la zona de costa, presenta una estabilidad en su valor mínimo, pero una disminución de sus valores medios y máximos, exactamente el comportamiento opuesto al observado en costa.

La cuenca del Copiapó presenta un comportamiento similar a su símil del Loa, pero con cambios mucho más leves. Sólo la estación costera posee un aumento significativo en su valor mínimo del orden de 1°C . Para la estación Lautaro Embalse (representativa del valle), el comportamiento es diferente. Se ve una reducción de los valores mínimos (1°C) y una disminución muy leve en sus valores medios y máximos ($0,3^{\circ}\text{C}$).

En el caso de la cuenca del Limarí, los cambios se aprecian más estables y orientados al alza general de las temperaturas. Los mayores aumentos se observan en la estación Cogotí embalse (valle), particularmente en sus valores mínimos y medios ($3,8$ y 1°C). Para las otras dos estaciones los aumentos también se concentran en su valor mínimo (1°C) y la única reducción se da en el máximo de la estación Las Ramadas de $0,5^{\circ}\text{C}$.

Para la macrozona centro, se tiene un comportamiento similar. La cuenca del Aconcagua exhibe aumentos de temperatura que se concentran entre la estación Lliu-Lliu Embalse y Vilcuya, siendo esta última la que concentra las mayores alzas en sus valores mínimos

(1,5°C) y máximos (0,7°C). La estación del valle central no presenta variaciones significativas.

La cuenca del Maipo presenta sus mayores cambios en la estación de Pudahuel y El Yeso Embalse. Estos aumentos varían entre 0,4 y 0,6 °C y son consistentes tanto en sus valores mínimos, medios y máximos.

Pasando a la macrozona sur, la cuenca del río Bío-Bío presenta un alza generalizada de los valores mínimos, medios y máximos de temperatura para las tres estaciones seleccionadas. Las mayores alzas se concentran en las estaciones Lonquimay y Quilaco (entre 0,4 y 1,4°C), mientras que la estación Angol concentra la mayor alza en su valor mínimo (1,4°C).

Para la cuenca del río Imperial, se observa un comportamiento similar al observado en la cuenca del Bío-Bío. Existe un aumento que es transversal en todas las estaciones analizadas, siendo la estación costera (Pto. Saavedra) y cordillerana (Malalcahuello), las que presentan sus mayores alzas en sus valores máximos.

Finalmente, la macrozona austral tiene un comportamiento más errático. La estación Balmaceda prácticamente no presenta cambios en ninguno de sus valores. A nivel del valle, la estación Teniente Vidal presenta una disminución considerable de su valor mínimo en 3°C, que no es representado por las otras estaciones. La estación costera se mantiene prácticamente constante.

6.3 CAUDALES

El análisis de la variabilidad espacial y temporal de las series fluviométricas está limitado a 2 variables importantes: su carácter estacionario y el grado de intervención de su régimen. En general, es factible encontrar comportamientos estacionarios, pero quedan muy pocas estadísticas que hayan sido llevadas a un régimen natural a través de un modelo de simulación operacional.

La cuenca del río Loa presentó periodos significativos correspondientes a 3, 6 y 9 años. Teniendo en cuenta la limitación de este resultado, producto del método relleno, resulta interesante igualmente el periodo encontrado de 9,2 y 3,2 años, los cuales también son detectados para la estación Linzor. El periodo de 6 años para la agregación de verano se presenta en la estación Loa en Calama.

Para la cuenca del río Copiapó, los ciclos detectados comprenden los 3,5, 4,1 y 4,8 años. Los ciclos de 3,5 y 4,1 fueron detectados también para la precipitación de la zona, tanto para las estaciones Jorquera en la Guardia y Lautaro Embalse. El ciclo de 4,8 años es exclusivo de la serie de caudales.

Para la cuenca del río Limarí, los ciclos detectados comprenden valores entre los 3 y 7 años, ciclos que también se correlacionan con los detectados en la precipitación. Los ciclos de invierno y verano (3 y 4 años) fueron observados en la estación Las Ramadas, al igual que el ciclo de 2,8 años. Respecto del ciclo de 7 años en invierno, este es observado para la estación Paloma Embalse.

En la cuenca del río Aconcagua los ciclos son más diversos, comprenden valores entre 2, 3, 5 y 7 años. Particularmente, resulta interesante que tanto los ciclos de verano y a nivel anual presenten valores similares, y que la agregación de invierno revele adicionalmente un ciclo de 5 y 7 años. Estos ciclos fueron detectados también en la estación Riecillos, particularmente los de 2, 3 y 5 años. El ciclo de 7 años a nivel de invierno es particular de la serie de caudales, dado que la precipitación informa de ciclos de más de 10 años para la misma agregación temporal.

Para la cuenca del río Maipo, se detectaron ciclos de 2, 4, 6, 7 y 12 años. En comparación con el Aconcagua los ciclos son mayores en magnitud. La agregación temporal de invierno concentra los ciclos más altos, seguido por la de verano. Ciclos de 2, 3 y 4 años fueron detectados para la estación San José de Maipo (Retén), por lo que los mayores ciclos no son sólo atribuibles al comportamiento de la precipitación ni de la temperatura, lo que se condice con ciclos de forzantes externas.

En la cuenca del río Bío-Bío, los ciclos se ven reducidos en magnitud, observándose ciclos de 2, 3 y 4,5 años. Este comportamiento de ciclos bajos se observa en una combinación de los ciclos de precipitación y temperatura, pero los ciclos detectados para estas variables resultaron ser más extremos (6 y 10 años), lo que significa que la señal de caudal es mucho más modulada que la de precipitación y temperatura.

Para la cuenca del río Imperial los ciclos detectados son mayores en magnitud que los ciclos detectados en Bío-Bío, presentándose ciclos de 6, 9 y 10 años en adición a los bajos de 2, 3 y 4 años. Si bien los ciclos más bajos son detectados por la precipitación en todas las agregaciones, los ciclos más altos son particularmente observados en la estación de Maquehue Temuco AD.

En la cuenca del río Aysén los ciclos detectados, pese a la limitación de una longitud de registro de 35 años, son consistentes en todas las agregaciones temporales y equivalen a un valor de 5 años. Este ciclo está detectado solo a nivel anual por la estación Balmaceda AD a nivel anual e invierno.

6.3.1 Variabilidad en Régimen de Caudales

Los cambios estimados para la cuenca del río Loa en su comportamiento anual está perfectamente explicado por las agregaciones temporales de invierno y verano. Se observan leves aumentos de caudal para cada probabilidad de excedencia, concentrados principalmente en el periodo de invierno. En este caso, la escorrentía está condicionada con los fenómenos de invierno altiplánico y a la influencia subterránea.

Para la cuenca del río Copiapó, el cambio observado es bastante más pronunciado que en la cuenca del Loa, pero a diferencia de ésta última, la longitud de registro es de 35 años (11 menos que en el caso de Loa). Esto significa que, pese a que existe una ventana de “traslape” grande, la incorporación de los últimos eventos, tanto en la agregación temporal de invierno como verano, afirman un aumento de los eventos extremos, pues el cambio está concentrado principalmente en P10. Las otras probabilidades presentan cambios leves, salvo por P50 en verano e invierno que exhibe un aumento del orden de los 300 l/s. Este aumento está explicado por la incorporación de estos eventos extremos en P2.

En el caso de la cuenca del río Limarí se observa un comportamiento bastante similar a la cuenca del río Copiapó. Presenta un aumento consistente de P10 para las tres agregaciones temporales. Adicionalmente se observa un aumento del caudal anual y de invierno para P85, lo que comunica una mayor disponibilidad. La cuenca del río Limarí contó con 55 años de registro, por lo que los cambios son significativos y los traslapes son mínimos. En este sentido es posible concluir que existe un aumento significativo de los eventos extremos durante los últimos 30 años, concentrados en el periodo de verano. Sólo P50 presenta un aumento significativo para la agregación de invierno, la que se “diluye” en la agregación anual.

Se observa una disminución consistente para P10, P50 y P85 en la cuenca del Aconcagua. Ésta se aprecia para las tres agregaciones temporales definidas, siendo el caudal de verano el más perjudicado, debido probablemente al menor aporte nival en los últimos años. Para P85 los cambios son significativos a nivel de escorrentía anual y de verano.

Para la cuenca del río Maipo, se observa otro comportamiento. A nivel anual y de verano no hay cambios significativos en los montos asociados a P10, P50 y P85. Es más, P50 suele ser un poco mayor, diferencia que se acentúa en la agregación temporal de invierno, donde P85 es también ligeramente mayor.

Para la cuenca del río Bío-Bío, se puede apreciar a nivel anual, una disminución tanto para P10 y P85, pese a visualizarse un aumento en P50, comportamiento similar a lo que se observa en la estación de precipitación Laguna Malleco. En este sentido, el caudal en invierno domina el comportamiento anual dado que representa un mayor volumen de aporte.

En el caso de la cuenca del río Imperial, los cambios son más consistentes en las tres agregaciones temporales e indican una disminución del caudal. Ésta es mucho más acentuada en verano, mientras que en la escorrentía de invierno sigue siendo una disminución mesurada y más concentrada en el cambio asociado a P10. Este comportamiento se observa en Vilcún, salvo para P85, en donde se observaban aumentos. Sin embargo, las otras dos estaciones analizadas si presentan una disminución que es consistente para todas las probabilidades de excedencia analizadas y en todas las agregaciones temporales, lo que ratifica el comportamiento de caudal observado.

Para la macrozona austral, existe una diferencia leve para P50 y P85, un leve aumento, pero que no es atribuible a un cambio global. Este comportamiento es una mezcla de lo que se observa en las estaciones Balmaceda y Teniente Vidal Coyhaique.

6.3.2 Estacionareidad de Series Fluviométricas

No existe una señal clara y significativa de tendencia generalizada en las cuencas. Para la macrozona norte sólo existen 2 estaciones con una tendencia estadísticamente significativa a la baja, Manflas en Vertedero (Anual e Invierno) en Copiapó y Combarbalá en Ramaditas (Anual y Verano) en la cuenca del Limarí.

Para la macrozona centro, la estación Juncal en Juncal, de régimen nival en la cuenca del Aconcagua, es la que presenta tendencia a la baja tanto a nivel anual como en invierno. Por otro lado, en la cuenca del río Maipo, Mapocho en los Almendros, de régimen mixto nivopluvial, también presenta una tendencia significativa a la baja concentrada en la agregación temporal anual e invierno.

Un comportamiento similar se observa en las estaciones de la macrozona sur. La cuenca de Bío-Bío en Rucalhue es la que presenta una tendencia significativa hacia la baja en la agregación de invierno, la que también comparte Cautín en Rari-Ruca en la cuenca del Imperial, exactamente en la misma agregación.

En la macrozona austral, solo la estación Coyhaique en Tejas Verdes presenta una señal inequívoca en las tres agregaciones temporales calculadas.

6.4 EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

A partir de la información GIS y valores medios en cada cuenca obtenidos desde el estudio de Agrimed (2015), se seleccionó la información de ETo mensual asociada espacialmente a cada cuenca analizada.

Se observa que el mes con mayor evapotranspiración de referencia es enero en todas las cuencas. Por otro lado, el menor valor medio de esta variable se encuentra entre los meses de junio y julio. Se presenta, a modo de ejemplo, con los valores correspondientes a la cuenca del río Copiapó.

La evapotranspiración de referencia en las cuencas seleccionadas varía desde sobre los 2.000 mm/año en el interior del desierto de Atacama en la cuenca del Loa, hasta los 700 mm/año en la parte baja de la cuenca de Aysén. Del mismo modo, en todas las cuencas se observa la variabilidad longitudinal de la evapotranspiración de referencia, la cual aumenta desde la cordillera hacia los valles centrales (a excepción de la cuenca de Aysén), y luego disminuye hacia la costa por el aumento de la nubosidad y humedad relativa por la cercanía con el mar.

6.5 NIEVE

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos asociados a la variable nieve.

6.5.1 Series de tiempo y climatología de Equivalente en Agua

Para las cuencas analizadas, el régimen de precipitaciones es generalmente consistente, con las mayores precipitaciones concentradas dentro del periodo junio - agosto. Luego de la acumulación, la cuenca experimenta derretimiento debido al aumento de temperaturas y de radiación incidente en el manto nival. El peak de acumulación para todas las cuencas se observa durante el mes de septiembre, mientras que las mínimas acumulaciones se observan generalmente durante el mes de marzo o abril (fin de la temporada de derretimiento). Se observa además un gradiente positivo de acumulación hacia las cuencas del Sur, con la cuenca del río Itata presentando las mayores acumulaciones y la cuenca del río Copiapó presentando las menores acumulaciones.

La cuenca del río Copiapó muestra acumulaciones de nieve sólo en la parte alta y generalmente concentradas en su zona sur. Este resultado es esperable dado que las precipitaciones decaen de Sur a Norte (a medida que el clima pasa a ser árido a desértico). La cobertura nival alcanza su extensión máxima durante el mes de agosto, y su extensión mínima durante el mes de abril. Las máximas acumulaciones se presentan en la zona cordillerana Sur.

La cuenca del río Limarí presenta un régimen nival de máximas acumulaciones durante el mes de septiembre, y mínimas acumulaciones durante el mes de abril. La cobertura nival es uniforme durante los meses de julio a septiembre, con las máximas acumulaciones presentes en la zona sur de ésta.

La cuenca del río Aconcagua presenta acumulaciones importantes de nieve entre los meses de junio a noviembre. La cobertura nival es significativa incluso en los meses de noviembre, diciembre y enero. Las máximas acumulaciones se presentan durante el mes de septiembre,

aunque es posible que acumulaciones importantes puedan existir durante el mes de octubre debido a la alta elevación de la cuenca. Las máximas acumulaciones están presentes en la cuenca del río Juncal. Las acumulaciones mínimas se dan entre los meses de marzo y abril.

La cuenca del río Maipo presenta acumulaciones importantes de nieve entre los meses de junio a diciembre, siendo el máximo observado en los meses de septiembre y octubre. Las máximas acumulaciones se dan generalmente en el extremo norte de la cuenca (límite con la cuenca del río Aconcagua) y en el extremo sur de esta (límite con la cuenca del río Rapel). Las acumulaciones mínimas se dan generalmente entre los meses de marzo y abril.

La cuenca del río Itata presenta un régimen nival diferente al resto de las cuencas analizadas. Las mayores acumulaciones se dan entre los meses de agosto a octubre, con el máximo probablemente ubicado en septiembre, y las mínimas acumulaciones se dan entre los meses de marzo a mayo. Las mayores acumulaciones se dan en la zona alta centro de la cuenca, en el sector de Nevados de Chillán, correspondiente a la zona de mayor elevación de la cuenca.

6.5.2 Análisis de Sequías y de Tendencias

Las cuencas de la macrozona norte presentan dos visualizaciones distintas de los efectos de la sequía. Por un lado, la cuenca del río Copiapó muestra un marcado descenso de la acumulación de nieve en la zona norte de la cuenca. La zona sur muestra una leve acumulación de nieve en concordancia con las mayores elevaciones y precipitaciones presentes sobre ella.

La cuenca del río Limarí por otra parte muestra una reducción significativa de la acumulación, pasando de una acumulación significativa en toda su parte alta durante 1997-98 a una acumulación focalizada en las más altas cumbres. Es importante mencionar la gran diferencia de magnitudes de nieve acumuladas en ambas cuencas: el año 2012-13 del río Limarí presenta acumulaciones similares a las observadas en el río Copiapó para el año 1997-98.

Las cuencas de la zona centro presentan una diferencia importante entre las acumulaciones, sin embargo, la diferencia no es tan significativa como la observada en las cuencas de la macrozona Norte. Este resultado es una manifestación de la mayor intensidad de la sequía en la zona Norte del país. La cuenca del río Aconcagua presenta reducciones en su acumulación, al igual que la cuenca del río Maipo, sin embargo, las diferencias son de una magnitud menor que las observadas para la zona Norte. Para la cuenca del río Itata, se observan diferencias significativas en términos de la extensión y profundidad del manto.

6.6 RECARGA Y NIVELES DE POZOS

A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos para las variables recarga y niveles de pozos.

6.6.1 Generación de Estadística de Recarga Anual en Cuencas

Se estimó la proporción de la escorrentía y de las retenciones en el suelo, a escala anual para el periodo 1960-2014, que recargan y que contribuyen al almacenamiento subterráneo. El cálculo de la recarga anual en las cuencas se realizó de manera tal que el promedio anual de los valores calculados fuese similar a los valores recopilados en los estudios revisados. Para esto, se ajustó los valores de los coeficientes empíricos que definen el cálculo de la recarga anual en las cuencas, los cuales dependen del coeficiente de escorrentía presentado por Benítez et al. (1980). Así, se obtuvo un valor de recarga media anual semejante a la oferta hídrica subterránea revisada, junto con una estadística anual de recarga en cada cuenca, obteniéndose una variabilidad temporal de esta variable.

6.6.2 Análisis de Frecuencia para Recargas Anuales

Se observó que las macrozonas sur y austral presentan una tendencia negativa en la comparativa de los parámetros estadísticos analizados y asociados a la recarga subterránea, observándose comportamiento similar en la cuenca del río Aconcagua. La cuenca del río Aysén es la que presenta la mayor disminución de su valor medio, en torno al 10%, mientras que las restantes se acercan a un 5%. Por otro lado, la macrozona norte, junto a la cuenca del río Maipo, muestra un aumento de la desviación estándar debido al aumento de los valores máximos y decaimiento de los mínimos. A su vez, el menor caudal de recarga, debido a las menores precipitaciones de este sector, conlleva a variaciones de hasta un 32% en el valor medio, pero que no corresponden a un valor importante en términos de caudal. La cuenca del río Loa, en tendencia contraria al resto de las cuencas de la macrozona norte, presenta una disminución en el valor medio de la recarga en un porcentaje importante, pero que corresponde a un bajo caudal.

Las cuencas de los ríos Bío-Bío e Imperial presentan un comportamiento disímil a pesar de ser geográficamente cercanas. Por lo tanto, se decidió realizar un análisis más fino de su estadística, comprendiendo las tres subdivisiones definidas como Costera, Depresión Intermedia y Cordillera. Este nuevo análisis mostró tendencias similares en las zonas de depresión intermedia y cordillerana de ambas cuencas, identificándose de esta forma que el cambio de comportamiento detectado en el análisis general de la cuenca corresponde al sector costero.

6.7 INDICADOR REGIONAL

Se generaron en total 6 indicadores por cuenca (uno para cada una de las variables de interés).

Un resumen de los resultados de la tendencia tanto en la precipitación como en la temperatura para los indicadores regionales calculados puede observarse en la Figura 6.7-1.

En general para la precipitación no se observan cambios significativos en la serie histórica. La única región que presenta cambios significativos es la cuenca de Aysén, con una reducción de precipitaciones del orden del 10% entre los periodos 1960-1986 y 1987-2014. De acuerdo a la serie histórica observada la precipitación en Aysén fue particularmente alta durante la década de 1960, por lo que es posible que la tendencia detectada no sea relevante en términos climatológicos, sino que simplemente un resultado particular de la estadística observada. La cuenca de Copiapó muestra cambios importantes en la media, con el periodo 1988-2014 presentando una media más alta que el periodo 1960-1986, sin embargo, dicho cambio no es estadísticamente significativo debido a la alta varianza observada en la serie. Cabe destacar que el cambio de variabilidad más importante lo presenta la cuenca del río Copiapó, el único estadísticamente significativo atribuido a la presencia del evento extremo del año 1997/98.

Macrozona	Cuenca	Precipitación			Temperatura		
		Anual	Invierno	Verano	Anual	Invierno	Verano
Norte	Loa	■	■	■	■	■	■
Norte	Copiapó	■	■	■	■	■	■
Norte	Limarí	■	■	■	■	■	■
Centro	Aconcagua	■	■	■	■	■	■
Centro	Maipo	■	■	■	■	■	■
Sur	Bío-Bío	■	■	■	■	■	■
Sur	Imperial	■	■	■	■	■	■
Austral	Aysén	■	■	■	■	■	■

Tendencia	Simbología
Aumenta	■
Neutra	■
Disminuye	■

Figura 6.7-1 Resumen de resultados para la tendencia de la precipitación y temperatura.

Para las temperaturas el panorama es diametralmente opuesto al observado en precipitaciones. Se observan tendencias al alza significativas en las cuencas del Limarí al Imperial a nivel anual, con cambios de promedio importantes (entre 0,1°C y 0,5°C) para los periodos de 1960-1986 vs 1987-2014. Este calentamiento se observa también en las tendencias de Mann-Kendall detectadas, donde casi todas las cuencas presentan tendencias estadísticamente significativas al alza, exceptuando Loa y Copiapó. Estos resultados son consistentes con los resultados de Falvey y Garreaud (2009), donde se evidenciaron alzas de temperaturas medias para las estaciones ubicadas en los valles y pre-cordillera. Las tendencias al alza en temperaturas de verano e invierno son consistentes con la señal al alza en las temperaturas anuales, presentando el periodo de verano un alza mayor en general al periodo de invierno (0,3-0,4°C vs 0,5-0,8°C). La mayor alza

registrada se presenta para la cuenca del Bío-Bío, con una diferencia de temperatura anual de 0,52°C entre los dos periodos analizados y una diferencia de 0,87°C para temperaturas de verano. La misma cuenca es la que además presenta las reducciones más drásticas en términos de variabilidad.

CAPÍTULO 7 RELACIÓN CON LAS FORZANTES CLIMÁTICAS EXTERNAS

Con el fin de detectar posibles influencias climáticas de alcance global y en distintas escalas temporales, se efectuó un análisis de las principales forzantes climáticas externas que se pueden observar, las que corresponden a las siguientes:

- ENSO: referencia a El Niño “Southern Oscillation”, o el sistema compuesto por la atmósfera y el océano, durante un evento cálido de El Niño. El ciclo de ENSO incluye las fases de La Niña y el Niño, así como fases neutras.
- PDO: siglas de Pacific Decadal Oscillation, se trata de un patrón de variación climática, similar a ENSO, aunque en una escala temporal de décadas y no estacional.
- AAO: El índice de oscilación antártica (AAO) es el patrón dominante de las variaciones no estacionales de circulación troposférica al sur de los 20° de Latitud Sur.

A continuación, se presenta un resumen de los principales resultados obtenidos.

La precipitación se correlaciona positivamente con el índice ENSO entre las cuencas de Copiapó e Imperial, tanto para el indicador climático anual como para los de invierno y verano, lo cual da cuenta del amplio rango de influencia de ENSO sobre la precipitación anual. Por otra parte, tanto la cuenca del río Loa como la cuenca del río Aysén no presentan correlaciones con ninguno de los indicadores climáticos evaluados (ENSO, PDO y AAO). Respecto a Copiapó, habría una mayor correlación con el indicador PDO, inclusive en verano, donde no existe correlación significativa con el indicador de verano ENSO.

Es posible destacar las zonas de Aconcagua, Maipo y Bío-Bío, que además de las correlaciones de la precipitación con ENSO, también presentan correlaciones positivas con los indicadores anual y de verano de PDO. También es significativa la correlación negativa con el indicador de verano AAO.

Finalmente, la precipitación de verano muestra baja respuesta a los indicadores climáticos, salvo en Maipo (correlación positiva con ENSO anual y de verano) e Imperial (correlación negativa con

los tres indicadores de ENSO). En particular, resulta interesante la correlación negativa de ENSO con este indicador en Imperial, lo cual daría cuenta de fenómenos climáticos particulares en esta zona, que a su vez podrían explicar en parte los cambios en la media observados en la época de verano de Imperial.

En el caso de la temperatura, habrían correlaciones positivas significativas para todos los indicadores ENSO (anual, invierno y verano) con las cuencas de los ríos Loa, Copiapó y Limarí. Se aprecia que las correlaciones son más importantes en las cuencas de los ríos Loa y Copiapó, debilitándose hacia el sur. En efecto, las cuencas de los ríos Aconcagua y Maipo muestran correlaciones positivas significativas con los indicadores ENSO anual y de verano, siendo levemente mayores las correlaciones con ENSO de verano. Hacia el sur, la cuenca del río Imperial también muestra una correlación positiva significativa con el indicador ENSO de invierno.

Si se analiza la precipitación de invierno se puede observar una mayor influencia geográfica del indicador ENSO anual, de verano e invierno, con correlaciones positivas significativas hasta la cuenca del río Bío-Bío, incluyendo a la cuenca del río Imperial en el caso de ENSO de invierno. No ocurre lo mismo con la temperatura de verano, cuyas correlaciones con ENSO son significativas únicamente hasta la cuenca del río Limarí.

Los indicadores PDO anual, invierno y verano muestran correlaciones positivas significativas con la temperatura en la cuenca del río Copiapó, siendo mayor para el PDO de verano. Loa también muestra una correlación positiva significativa con el PDO de invierno. Estas correlaciones se mantienen en el caso del invierno y se extienden hasta la cuenca del río Limarí en el caso del verano.

Por su parte, el indicador AAO (anual, invierno y verano) es el único que se correlaciona positivamente con las temperaturas anual y de invierno en la cuenca del río Aysén, lo cual es consistente con lo esperado. En otras zonas se observan correlaciones significativas con el indicador AAO, siendo dichas correlaciones más extensas geográficamente en el caso del invierno, abarcando las cuencas de los ríos Imperial, Bío-Bío y Copiapó.

CAPÍTULO 8 ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE CRECIDAS

8.1 ANÁLISIS DE CRECIDAS

El análisis hidrológico de crecidas se realizó mediante de los métodos de precipitación escorrentía DGA-AC, Verni King Modificado y Fórmula Racional, sobre una selección de estaciones fluviométricas pertenecientes a las cuencas en estudio. La determinación de utilizar cada una de ellas obedeció al resultado de un análisis preliminar a la estadística fluviométrica y niveles freáticos tanto de estaciones como pozos pertenecientes a la DGA. Ambas fuentes de información fueron comparadas de manera gráfica en busca de una posible relación entre los caudales de crecidas y la variación de los niveles en el acuífero. Finalmente, solo fueron seleccionadas aquellas estaciones fluviométricas donde este fenómeno se observó de manera clara, las cuales resultaron pertenecer a las cuencas de los ríos Copiapó, Limarí, Aconcagua y Maipo.

8.2 RESULTADOS

Determinados los parámetros que permiten la aplicación de los métodos de análisis de crecidas, se obtuvieron los caudales máximos instantáneos para diferentes periodos de retorno. A fin de comparar los resultados obtenidos de la aplicación de los métodos, se realizó un análisis de frecuencia al caudal máximo anual observado en cada una de las estaciones seleccionadas.

Al realizar la comparación de los caudales resultantes frente a los observados se puede estimar una de las debilidades del método. El análisis del caudal de crecida se realiza asignando un valor de precipitación máxima, estimado en el centro de gravedad, sobre la superficie total de la cuenca aportante del punto de control. Sin embargo, no en todos los casos este punto puede ser representativo de la precipitación de la cuenca, causando generalmente una sobreestimación de los resultados. Esta situación se presenta al observar las estaciones Río Copiapó en Angostura y Río Manflas en Vertedero, donde la primera abarca prácticamente la totalidad de la cuenca del río Copiapó, mientras que la segunda representa un afluente al río Copiapó. La diferencia en la superficie de sus cuencas aportantes influye en la estimación de sus caudales máximos instantáneos, donde se observa una sobrestimación, de acuerdo a los valores observados, para la estación Río Copiapó en Angostura y un buen ajuste para Río Manflas en Vertedero.

CAPÍTULO 9 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

9.1 IDENTIFICACIÓN DE CUENCAS

A continuación, se describen los principales resultados, conclusiones y recomendaciones obtenidas con este estudio, de acuerdo con los objetivos definidos.

Junto con la revisión y análisis de la información disponible se definieron 7 criterios de selección orientados a priorizar las cuencas y definir en cuáles de ellas se efectuarán los análisis de detalle que son el objetivo de este estudio. Los criterios evaluados fueron: Criterio de selección DGA, Completitud y Registro de la Información Hidrometeorológica, Estrés Hídrico Superficial, Completitud y Registro de la Información Subterránea, Estrés Hídrico Subterráneo, Acuíferos en Restricción o Prohibición e Infraestructura.

Mediante la aplicación de la metodología "multicriterio, se generó un listado de cuencas por macrozona ordenados por su nivel de prioridad. La finalidad de esta priorización fue seleccionar dos cuencas por macrozona. Finalmente, las cuencas seleccionadas luego de la evaluación fueron las de los ríos Loa, Copiapó y Limarí para la macrozona norte, Río Aconcagua y Río Maipo para la macrozona centro, Río Bío-Bío e Imperial para la macrozona sur y Río Aysén para la macrozona austral.

9.2 RESULTADOS Y CONCLUSIONES POR CUENCA

En el cuadro 9.2-1 se presenta una síntesis con los resultados obtenidos para las variables analizadas para cada una de las cuencas, y, considerando las diferentes agregaciones temporales para dichas series. Se debe tener en cuenta que las variables analizadas son variadas y del mismo modo, los análisis efectuados para cada una de las series es también diverso. Es por este motivo que se decidió ocupar la agregación temporal "anual" como representativa de este análisis. La riqueza y variabilidad de los resultados invita al lector a profundizar en la lectura del informe final.

El cuadro agrupa las cuencas analizadas para cada macrozona. Las tres primeras columnas informan la cantidad de estaciones de precipitación (P), temperatura (T) y caudal (Q) que pudieron ser utilizadas en el análisis, es decir, fueron consistentes y homogéneas. También se

informa para cada cuenca analizada los códigos de las estaciones que fueron seleccionadas para efectos de representación espacial (Costa, Depresión Intermedia u valle central y Cordillera). Del mismo modo se informa la longitud del registro completado según la metodología empleada. Esto significa que cada período o ventana de análisis (P1 u P2) es diferente para cada sistema, pero se ha construido de tal manera que se agrupe un mínimo de 30 años por ventana de análisis de tal modo que los análisis estadísticos sean robustos. El último año de análisis corresponde al año hidrológico 2014/15. Esto implica que cualquier serie con menos de 60 años presenta un “traslape” entre períodos, pero que no alteran los resultados encontrados.

Luego de que se informan los años de registros se presentan los resultados y/o cambios detectados en las variables. Es así que para la temperatura, por ejemplo, se presenta el valor promedio anual que presentó en P1, P2 y la diferencia porcentual respecto de P1. Seguido se informan cuáles fueron los períodos dominantes significativos asociados a los ciclos irregulares, los cuales comprenden valores entre los 2 y 11 años.

En el caso de la recarga se informa de la variación anual entre los períodos P1 y P2.

Para la variable caudal se determinaron los indicadores Q50% y Q85% (asociados a la respectiva probabilidad de excedencia), pues son representativos de cambios medios (Q50%) y de asignación de recursos (Q85%). Se presentan los respectivos valores para cada ventana y de la variación porcentual de los mismos.

Finalmente, en el caso de la precipitación, se presentan los valores calculados en cada ventana (P1 y P2) con su respectivo porcentaje de variación respecto de P1, los ciclos significativos detectados y el análisis de sequía efectuado, en donde se informa de la duración en años del máximo período presentado en la estación de análisis, la intensidad (valor peak) y magnitud (suma del déficit de precipitación a lo largo del período más desfavorable).

Estas variables permiten entonces resumir la variabilidad temporal de los sistemas, la cual debe de sumarse a los mapas de variación espacial construidos en el estudio, a través de modelos topoclimáticos y sumados al análisis de tendencia ya informado.

Por ejemplo, para la cuenca del río Imperial se procesaron un total de 22 estaciones de precipitación, 4 de temperatura y 1 de caudal. Los años de registro para P y Q fueron de 55 años, mientras que la temperatura tuvo una longitud de registro de 45 años. El cambio más fuerte de temperatura se da en la estación costera, donde se advierte un 4% de aumento, y sus ciclos más relevantes son de 2, 3, 5, 8 y 11 años, pudiendo éste último estar relacionado a cambios en la PDO. La variación de la recarga anual es mínima (-1%). La disminución de caudal medio es baja (-3%), pero se concentra en los caudales bajos, disminuyendo casi un 10% para el Q85%. Los períodos significativos encontrados fueron de 4 y 6 años, también detectados en la precipitación,

la que también presenta variaciones negativas del 7% en la estación indicadora de costera y 10% en depresión intermedia. Cabe destacar que la precipitación también presenta periodos dominantes muy altos, sobre 8 años, al igual que en el caso de la temperatura. Estos periodos, especialmente el de 14 años, debe ser tomado con cuidado dado que está al borde de la detección admisible dada la longitud de registro utilizada. Si bien la duración más grande en términos de sequía lo tuvo la estación costera con 6 años, la magnitud de la sequía y su intensidad son máximas para la estación cordillerana (2419 mm en magnitud y 675 mm en intensidad, el doble del obtenido en las otras estaciones), lo que informa del diferente impacto de este fenómeno a nivel espacial.

A modo de resumen, el cuadro 9.2-1 corresponde a una manera simple para que el lector pueda detectar los cambios encontrados para las variables de interés. En general, y complementando con los resultados obtenidos en los análisis de tendencia, la discretización espacial sugerida en la metodología ha demostrado ser fundamental. La precipitación si bien presenta tendencias mayoritariamente neutras, al ser analizada en sus dimensiones de costa, valle y cordillera, permite detectar donde se concentran los cambios en la variable y cual resulta más sensible, por ejemplo, para la cuenca del Limarí, la variación es de un -6% promedio, mientras que en cordillera se produce un aumento del 39%. Los periodos dominantes de la variable, resultaron ser aquellos también informados por la comunidad científica para ENSO, lo que ratifica la alta correspondencia entre la forzante meteorológica externa y el clima local. Cada cuenca entonces exhibe un cambio particular.

Similar es lo que ocurre con la temperatura, que a diferencia de la precipitación, presenta tendencias significativas alza en la mayoría de las cuencas. Esta alza alcanzó un máximo del 6% en la zona del Valle en la cuenca del Limarí, pero es notablemente consistente (especialmente hablando, de costa a cordillera) en las cuencas del Maipo, Bío-Bío e Imperial, las que además informan ciclos dominantes muy parecidos, concentrados entre los ciclos bianuales y de 5 a 9 años).

En este caso el caudal integra estas variabilidades. Si bien las estaciones escogidas fueron representativas de la oferta hídrica en la parte alta de las cuencas, debido a su carácter de menor intervención, las variaciones son interesante desde dos puntos de vista: en términos de su magnitud y variabilidad espacial. El caudal medio presenta aumentos para las cuencas de Loa y Copiapó (7 y 12%), mientras que para Limarí y Aconcagua (macrozona centro) se advierten disminuciones (-4 y -6%). Maipo y Bío-Bío vuelven a presentar aumentos (7.4% y 4.5%). Sin embargo, Q85% informa que las cuencas del norte si presentan un aumento importante (4, 55 y 44%), pero las cuencas del centro y sur todas exhiben disminuciones (-15, -2, -7.6, -9.4%), por lo que el impacto para la asignación de recursos y de los efectos de sequía son igualmente o más relevantes que los de disponibilidad asociados al caudal medio.

En términos de duración de sequía, la zona centro y sur exhibe mayores duraciones que la zona norte, siendo muy particular el caso de Aysén, que presenta duraciones de 15 años, sólo comparable a lo visto en Copiapó.

9.3 COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES GENERALES

El trabajo realizado ha cumplido con los objetivos del estudio, los cuáles buscaban identificar y cuantificar los cambios en los patrones meteorológicos en 4 macrozonas priorizadas del país.

En general, el estudio muestra una metodología de análisis consistente y robusta, que permite caracterizar primero, la disponibilidad y calidad de la información hidrometeorológica, pero que requiere o depende directamente de que las series de tiempo presenten una longitud de registro adecuada, con un análisis robusto sobre la validez de los datos monitoreados.

Si bien este estudio presenta tendencias estadísticamente significativas para la precipitación y temperatura, la más importante es ésta última, lo que impacta en las cuencas de regímenes hidrológicos nivales o nivo-pluviales, favoreciendo los derretimientos, y entregará con el tiempo una inadecuada idea de disponibilidad futura. Adaptarse a esta situación requiere esencialmente una evaluación de los rendimientos (la razón entre el caudal 85% y la totalidad de los derechos permanentes sobre un cauce) actuales de los derechos de agua otorgados y la incorporación de este concepto en el quehacer del DARH al momento de asignar un recurso. Esto es imperativo para los nuevos derechos que se soliciten.

Igualmente, en las normativas de cálculo de los caudales de dilución tanto en zonas con información como en zonas sin información, debería considerarse la existencia de tendencias y proponer nuevos estudios metodológicos para la determinación de dichos caudales, especialmente en aquellas zonas donde los caudales medios mensuales tienden a disminuir en los períodos de caudales mínimos

Respecto de la identificación de tendencias o variaciones relacionadas al cambio climático, cabe destacar que los resultados de este proyecto muestran que en los últimos 50 años muchas de las variables hidrometeorológicas han experimentado cambios, lo que implica un cuestionamiento al supuesto de invariabilidad hidrológica que tan a menudo se aplica en la gestión del agua. Las proyecciones de cambio climático para Chile indican que muchos de estos cambios se mantendrán o incluso se intensificarán, por lo que es necesario hacer recomendaciones respecto a la gestión hídrica en particular a los supuestos empleados por la DGA al momento de constituir derechos de aprovechamiento tanto superficiales como subterráneos.

En primer lugar, es importante recalcar la importancia de considerar los efectos del cambio climático en la gestión de largo plazo del recurso hídrico. El supuesto de invariabilidad hidrológica no aplica para el largo plazo debido a la presencia del cambio climático, y por ende gestionar recursos asumiendo invariabilidad llevará inevitablemente a ineficiencias en el aprovechamiento del recurso hídrico. En caso de que el cambio climático impacte negativamente la oferta hídrica, los derechos constituidos se verán afectados negativamente, reduciéndose el valor real de los

derechos permanentes y generando complicaciones a la gestión del recurso de parte de usuarios que asumen el escenario de probabilidad de excedencia del 85% como un valor válido para los escurrimientos superficiales permanentes. En caso de que el cambio climático resulte en un aumento de los recursos disponibles, se podrían tener escenarios de sub-aprovechamiento del agua.

Vale la pena recalcar además que los impactos del cambio climático tienen una componente estacional importante, y que, si bien es posible que las precipitaciones no experimenten cambios, eso no garantiza que la distribución temporal de recursos hídricos durante el año se mantenga.

Como manera de abordar estas distintas observaciones, el equipo consultor recomienda lo siguiente:

1) En el corto plazo, realizar una evaluación del impacto del cambio climático de manera sistemática en todo el territorio nacional, en particular sus efectos en las variables hidrometeorológicas de interés. En este sentido, el presente estudio ha permitido dar un primer paso, realizando una evaluación detallada del cambio en los patrones hidrometeorológicos en algunas de las cuencas más importantes del país, lo que favorece la toma de decisiones relacionadas a la gestión del recurso hídrico. Es decir, sean tomado en consideración los efectos que hasta el momento ha tenido el cambio climático en las diferentes variables hidrometeorológicas medidas de manera frecuente. No obstante, la incorporación continua de información permite ir mejorando el análisis ya realizado e ir incluyendo nuevas cuencas en el análisis.

2) Incorporar en la infraestructura digital de la DGA modelos de cambio climático que puedan ser actualizados de acuerdo a las iteraciones realizadas por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), en conjunto con modelos de escalamiento que puedan proyectar dichos cambios en las variables hidrometeorológicas de interés. Notar que este punto es distinto al punto 1), en la que se recomienda evaluar el impacto del cambio climático en el corto plazo. La recomendación aquí presentada permitirá que la DGA analice de forma dinámica los impactos del cambio climático de acuerdo a las proyecciones realizadas por el mundo científico.

3) Incorporar en la infraestructura digital de la DGA modelos hidrológicos o sistemas de simulación de base física que sean capaces de generar estadísticas sintéticas forzadas por los modelos de cambio climático. Estas estadísticas sintéticas luego podrían ser utilizadas para generar las curvas de variación estacional o para generar las métricas que la DGA utiliza para constituir derechos de aprovechamiento.

En línea con la recomendación 3, el equipo consultor estima conveniente recomendar que la DGA plantee la posibilidad de modernizar su infraestructura digital de manera de que pueda

incorporar no solo proyecciones de cambio climático sino que además fuentes de información o metodologías alternativas, como imágenes satelitales y asimilación de datos. Para esto se recomienda a la DGA implementar sistemas modulares de simulación. Estos sistemas consisten en módulos de procesamiento de datos independientes y que puedan ser modificados o reemplazados fácilmente sin afectar el sistema en su totalidad.

Para el caso de los sistemas acuíferos, que presentan una gran inercia y amortiguamiento de las variaciones en las condiciones hidrometeorológicas superficiales (que afectan la recarga), los análisis debieran realizarse con modelos de tal forma de incorporar las variaciones de largo plazo de la recarga. Esto podría hacerse variando porcentualmente la magnitud de la recarga (según la oferta superficial), o utilizando series estocásticas que incorporen esa misma variación en sus parámetros, para representar el cambio climático. Asimismo, es necesario que la DGA mejore o amplíe la red de medición de niveles a la zona Sur del país (desde la IX región).

Como resultados del presente trabajo se detectaron varias brechas, en particular:

- El análisis de las series de tiempo depende fuertemente de la calidad y extensión de la información. Se encontró, en este sentido, que las series de caudales poseen discontinuidades más severas que las series meteorológicas.
- Dentro del análisis espacial efectuado, se verifica que los modelos topoclimáticos si son una buena herramienta para la distribución de la precipitación y la temperatura. Sin embargo, los climas extremos de nuestro país hacen difícil encontrar ecuaciones de alta significancia.
- En el proceso de revisión de antecedentes, llama la atención que la mayoría de las minutas de asignación de recursos u disponibilidad hídrica para cuencas en evidente estrés hídrico tengan más de 10 años. En este sentido las minutas de disponibilidad debiesen ser una tarea que contemple ajustes cada al menos 5 años.

Una coordinación entre las diversas instituciones que participan de la gestión del recurso hídrico y que poseen equipos técnicos fuertes como lo son la CNR y la DOH, es necesaria, en particular para el levantamiento de una base de información común, en donde se tenga conocimiento de las últimas herramientas generadas en los estudios, como modelos hidrogeológicos, y que la DGA puede utilizar para mejorar su labor de asignación de derechos. Llama la atención lo complejo (e infructuoso) que ha sido levantar datos tan simples como los caudales 85% para las cuencas analizadas. Este dato es manejado incluso a nivel regional y central, pero ni los informes técnicos ni los estudios tienen una política de entregar ese valor como una métrica objetivo. En este sentido es necesario

que la DGA tenga una batería de métricas básicas a solicitar para cualquier estudio de modelación que termina siendo una herramienta para la asignación de derechos.

- También relacionado en el proceso de revisión de antecedentes, llama la atención el sobreotrogamiento que existe principalmente en los acuíferos. Las tasas de explotación sustentables no se condicen con el nivel de estrés de los acuíferos y los derechos constituídos llegan a sobrepasar la recarga natural de los mismos 4, 5, 7 y hasta 13 veces, como se puede analizar en el criterio de estrés hídrico subterráneo. En este sentido la DGA también requiere de algún mecanismo de control preventivo y no reactivo, principalmente porque el reactivo puede ser inconstitucional, en el sentido que no se pueden revocar derechos de aprovechamiento constituídos.
- Es importante, principalmente para todas las iniciativas de balance hídrico, disponer de información de caudales en régimen natural que abarquen las zonas de desembocadura. En este sentido, se están llevando iniciativas de actualización de los modelos Maipo-Mapocho, Aconcagua, Huasco, Copiapó y Choapa que la DGA debiese incluir en la revisión de antecedentes para esta clase de estudios.
- Si bien siempre se hace hincapié que se requiere información en altura, este estudio proporciona además una ayuda en el sentido que se ha incluido un análisis de imágenes satelitales de cobertura nival, las que proporcionan el patrón espacial de la acumulación nival, incluso considerando condiciones hidrológicas húmedas y secas. Estas imágenes deben de superponerse con mapas de accesibilidad, lo que permitirán la instalación de estaciones que sean capaces de medir en ambas condiciones hidrológicas.
- Respecto del análisis de tendencia, el objetivo que ha tenido este estudio es detectar la presencia o no de éstas y su significancia estadística. En este sentido, existe una brecha para mejorar el análisis a través del cálculo de una tasa de aumento o descenso según corresponda. Sin embargo, la obtención de este valor debe ir acompañado de una serie de supuestos metodológicos, los que deben incluir la inspección de toda la serie de tiempo, la elección de un período crítico, de tal manera que la tasa calculada obedezca un criterio conservador y permita una planificación a largo plazo más robusta. En este caso se ha optado por la variación porcentual de montos en el caso de precipitación y caudales y de aumento o disminución en grados Celsius para la temperatura.

Finalmente, cabe destacar que la metodología en general, es completamente aplicable a cualquier otra cuenca que desee analizarse. Esto permitiría consolidar resultados de cambios en patrones hidrometeorológicos en otras cuencas que tienen una alta prioridad para la DGA. Como toda metodología, su grado de aplicación y bondad de ajuste depende de la calidad de la información base suministrada y procesada. No obstante, los resultados presentados se basan

en un acabado análisis de la información que se tuvo para las cuencas de estudio, por lo que su uso en la toma de decisiones permitiría mejorar el nivel de certeza de los análisis enfocados a la correcta gestión de los recursos hídricos.