



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

INFORME FINAL

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	3
1.3 OBJETIVOS.....	6
CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES	7
2.1 INTRODUCCIÓN	7
2.2 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES	7
2.3 ANÁLISIS DE ANTECEDENTES.....	10
2.3.1 Análisis de Estudios.....	10
2.3.2 Base de Datos del Centro de Investigación del Clima y Resiliencia CR2.....	10
CAPÍTULO 3 IDENTIFICACIÓN DE CUENCAS PRIORIZADAS POR MACROZONA.....	16
3.1 INTRODUCCIÓN	16
3.2 DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE PRIORIZACIÓN	16
3.3 EVALUACIÓN DE INDICADORES	18
3.3.1 C1: Criterio DGA.....	18
3.3.2 C2: Completitud y Registro de la Información Hidrometeorológica	20
3.3.3 C3: Estrés Hídrico Superficial	23
3.3.4 C4: Completitud y Registro de la Información Subterránea.....	26
3.3.5 C5: Estrés Hídrico Subterráneo.....	28
3.3.6 C6: Acuíferos en Restricción o Prohibición	32
3.3.7 C7: Infraestructura	33
3.4 SELECCIÓN DE CUENCAS PRIORIZADAS.....	35
3.5 CONCLUSIONES.....	40
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE OFERTA HÍDRICA Y DERECHOS DE AGUAS ..	41
4.1 INTRODUCCIÓN	41
4.2 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL OTORGAMIENTO DE DERECHOS.....	41
4.3 OFERTA HÍDRICA POR CUENCA.....	44
4.4 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA RELACIÓN ENTRE OFERTA HÍDRICA Y DERECHOS.....	45
4.5 CONCLUSIONES.....	49

CAPÍTULO 5	INFORMACIÓN BASE Y METODOLOGÍA.....	50
5.1	INTRODUCCIÓN.....	50
5.2	CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE BASE DE DATOS.....	50
5.2.1	Generalidades.....	50
5.2.2	Metodología de Relleno y Análisis de Consistencia.....	51
5.2.3	Resultados del Procedimiento de Relleno.....	52
5.2.3.1	Resultados Relleno Estadística Pluviométrica.....	65
5.2.3.2	Resultados Relleno Estadística de Temperatura.....	66
5.2.4	Escalas de Agregación Temporal.....	67
5.3	METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS.....	68
5.3.1	Análisis Espacial y Modelos Topoclimáticos.....	68
5.3.1.1	Definición y Alcances.....	69
5.3.1.2	Metodología de aplicación.....	70
5.3.2	Análisis Temporal.....	72
5.3.2.1	Análisis Espectral.....	73
5.3.2.2	Métodos de análisis estadísticos y metodología de aplicación.....	78
5.3.2.3	Análisis de Cambios en Series de Tiempo.....	83
5.3.3	Análisis de Estacionareidad de Series Fluviométricas.....	84
5.3.4	Metodología de Análisis de la Evapotranspiración.....	86
5.3.5	Metodología de Caracterizacion Nival.....	89
5.3.6	Método de la Curva Número para Caracterización de Recarga.....	95
5.3.7	Metodología de Construcción del Indicador Regional.....	102
5.4	CONCLUSIONES.....	103
CAPÍTULO 6	CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS.....	104
6.1	INTRODUCCIÓN.....	104
6.2	PRECIPITACIÓN.....	104
6.2.1	Análisis Espacial y Modelos Topoclimáticos.....	104
6.2.2	Análisis Temporal Precipitaciones.....	117
6.2.2.1	Análisis Espectral de las Precipitaciones.....	117
6.2.2.2	Análisis de Cambios en Series de Tiempo de las Precipitaciones.....	125
6.2.2.3	Variabilidad en Régimen de Precipitaciones.....	141
6.2.2.4	Variabilidad en Régimen de Precipitaciones.....	162
6.3	TEMPERATURA.....	168
6.3.1	Análisis Espacial y Modelos Topoclimáticos.....	168
6.3.2	Análisis Temporal de la Temperatura.....	181
6.3.2.1	Análisis Espectral de la Temperatura.....	181
6.3.2.2	Análisis de Cambios en Series de Tiempo de la Temperatura.....	184
6.3.2.3	Variabilidad en Régimen de Temperatura.....	199
6.4	CAUDALES.....	206
6.4.1	Variabilidad en Régimen de Caudales.....	208

6.4.2	Estacionareidad de Series Fluviométricas	216
6.5	EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	220
6.6	NIEVE	229
6.6.1	Series de tiempo y climatología de Equivalente en Agua.....	229
6.6.1	Análisis de Sequías y Análisis de Tendencias	239
6.7	RECARGA Y NIVELES DE POZOS	242
6.7.1	Generación de Estadística de Recarga Anual en Cuencas	242
6.7.2	Análisis de Frecuencia para Recargas Anuales	245
6.7.3	Caracterización de Recarga Mediante Niveles de Pozos	257
6.8	INDICADOR REGIONAL	258
6.9	CONCLUSIONES.....	267
CAPÍTULO 7	RELACIÓN CON LAS FORZANTES CLIMÁTICAS EXTERNAS	268
7.1	INTRODUCCIÓN	268
7.2	FORZANTES CLIMÁTICAS EXTERNAS.....	268
7.3	CONCLUSIONES.....	272
CAPÍTULO 8	ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE CRECIDAS	275
8.1	INTRODUCCIÓN	275
8.2	ANÁLISIS DE CRECIDAS	275
8.3	MÉTODOS DE ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE CRECIDAS.....	277
8.3.1	Método DGA-AC.....	277
8.3.2	Método Verni King Modificado.....	278
8.3.3	Método Formula Racional	279
8.4	DELIMITACIÓN DE CUENCAS APORTANTES.....	279
8.5	ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES	280
8.6	RESULTADOS	283
8.7	CONCLUSIONES.....	287
CAPÍTULO 9	TALLER DE DIFUSIÓN	288
CAPÍTULO 10	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	291
10.1	CONCLUSIONES GENERALES	291
10.2	RESULTADOS Y CONCLUSIONES POR CUENCA	297
10.2.1	Cuenca del Río Loa	297
10.2.2	Cuenca del Río Copiapó	302
10.2.3	Cuenca del Río Limarí.....	306
10.2.4	Cuenca del Río Aconcagua	310
10.2.5	Cuenca del Río Maipo	314
10.2.6	Cuenca del Río Bío-Bío	318
10.2.7	Cuenca del Río Imperial	321

10.2.8	Cuenca del Río Aysén	325
10.3	COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES GENERALES	331
CAPÍTULO 11	BIBLIOGRAFÍA	338

ANEXO A1	REVISIÓN DE ANTECEDENTES
ANEXO A2	BASE DE DATOS
ANEXO B	FIGURAS
ANEXO C	RESUMEN METODOLOGÍA RELLENO
ANEXO D	ESTADÍSTICAS PP Y T POR CUENCA
ANEXO E	MODELOS TOPOCLIMÁTICOS
ANEXO F	GRÁFICOS DE ANÁLISIS
ANEXO G	DIFERENCIA DE MEDIAS Y VARIANZA
ANEXO H	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA
ANEXO I	ESTACIONAREIDAD
ANEXO J	NIEVE
ANEXO K	ESTADÍSTICA DE RECARGA ANUAL
ANEXO L	RESPUESTA NIVELES A CRECIDAS
ANEXO M	ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE CRECIDAS
ANEXO N	TALLER DE DIFUSIÓN

Estos Anexos se encuentran disponibles en formato digital en el DVD adjunto al presente documento.

CUADROS

Cuadro 1.1-1	Estaciones DGA a lo Largo del País.....	2
Cuadro 1.2-1	Cuencas Prioritarias por Macrozona	5
Cuadro 2.2-1	Listado de Estudios Revisados.....	7
Cuadro 2.3-1	Resumen Información Recopilada de Estudios DGA.....	11
Cuadro 3.3-1	Priorización Criterio C1.....	19
Cuadro 3.3-2	Umbrales de Estaciones Válidas para C2	21
Cuadro 3.3-3	Priorización Criterio C2.....	22
Cuadro 3.3-4	Declaraciones de Agotamiento	23
Cuadro 3.3-5	Priorización Criterio C3.....	25
Cuadro 3.3-6	Pozos de Observación DGA por Región	26
Cuadro 3.3-7	Priorización Criterio C4.....	27
Cuadro 3.3-8	Derechos de Aprovechamiento Subterráneos Otorgados (l/s).....	29
Cuadro 3.3-9	Priorización Criterio C5 para Primera Aproximación	30
Cuadro 3.3-10	Priorización Criterio C5 para Segunda Aproximación	31
Cuadro 3.3-11	Priorización Criterio C6.....	33
Cuadro 3.3-12	Priorización Criterio C7.....	34
Cuadro 3.4-1	Ponderación por Criterio.....	35
Cuadro 3.4-2	Resumen Jerarquía Macrozonas Norte y Centro	36
Cuadro 3.4-3	Resumen Jerarquía Macrozonas Sur y Austral.....	37
Cuadro 3.4-4	Evaluación Jerarquía por Peso Macrozonas Norte y Centro.....	38
Cuadro 3.4-5	Evaluación Jerarquía por Peso Macrozonas Sur y Austral	39
Cuadro 3.5-1	Cuencas Seleccionadas.....	40
Cuadro 4.2-1	Derechos Consuntivos Otorgados (l/s).....	44
Cuadro 4.3-1	Oferta Hídrica Superficial (l/s).....	45
Cuadro 4.3-2	Oferta Hídrica Subterránea (l/s).....	45
Cuadro 5.2-1	Estaciones Disponibles por Cuenca.....	53
Cuadro 5.2-2	Resumen de Información y Observaciones Respecto a cada Cuenca.....	63
Cuadro 5.2-3	Resumen Estadística Pluviométrica Rellenada.	65
Cuadro 5.2-4	Resumen Estadística de Temperatura Rellenada.	66
Cuadro 5.2-5	Agregaciones Temporales para las Cuencas Seleccionadas.	67

Cuadro 6.2-1	Resumen de la aplicación de los modelos topoclimáticos en cada una de las cuencas de estudio para la variable precipitación.....	105
Cuadro 6.2-2	Periodos detectado a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Loa.....	118
Cuadro 6.2-3	Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Copiapó.	118
Cuadro 6.2-4	Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Limarí.....	119
Cuadro 6.2-5	Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Aconcagua.....	119
Cuadro 6.2-6	Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Maipo.	120
Cuadro 6.2-7	Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Bío-Bío.	120
Cuadro 6.2-8	Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Imperial.	121
Cuadro 6.2-9	Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Aysén.....	121
Cuadro 6.2-10	Periodos de Sequía Macrozona Norte	142
Cuadro 6.2-11	Periodos de Sequía Macrozona Centro.....	144
Cuadro 6.2-12	Periodos de Sequía Macrozona Sur	145
Cuadro 6.2-13	Periodos de Sequía Macrozona Austral	146
Cuadro 6.2-14	Resumen de la variación porcentual de la precipitación asociada al 10% (P10) de probabilidad de excedencia en todas las estaciones seleccionadas por macrozona.....	156
Cuadro 6.2-15	Resumen de la variación porcentual de la precipitación asociada al 50% (P50) de probabilidad de excedencia en todas las estaciones seleccionadas por macrozona.....	157
Cuadro 6.2-16	Resumen de la variación porcentual de la precipitación asociada al 85% (P85) de probabilidad de excedencia en todas las estaciones seleccionadas por macrozona.....	158
Cuadro 6.3-1	Resumen de la aplicación de los modelos topoclimáticos en cada una de las cuencas de estudio para la variable temperatura	168
Cuadro 6.3-2:	Resumen de Resultados de variación de temperatura para las estaciones analizadas.....	205
Cuadro 6.4-1	Series de tiempo fluviométricas analizadas en el estudio.....	206
Cuadro 6.4-2	Frecuencias y periodos dominantes de las series fluviométricas analizadas.....	207
Cuadro 6.4-3	Resumen de periodos considerados en el análisis de variabilidad de caudales.....	209

Cuadro 6.4-4	Resumen de Resultados de Análisis de Estacionalidad.....	218
Cuadro 6.4-5	Resultados del análisis de tendencia sobre las series de caudal escogidas.	219
Cuadro 6.5-1	Estadísticos ETo Cuenca Río Loa (mm).....	221
Cuadro 6.5-2	Estadísticos ETo Cuenca Río Copiapó (mm)	222
Cuadro 6.5-3	Estadísticos ETo Cuenca Río Limarí (mm)	223
Cuadro 6.5-4	Estadísticos ETo Cuenca Río Aconcagua (mm).....	224
Cuadro 6.5-5	Estadísticos ETo Cuenca Río Maipo (mm).....	225
Cuadro 6.5-6	Estadísticos ETo Cuenca Río Bío-Bío (mm).....	226
Cuadro 6.5-7	Estadísticos ETo Cuenca Río Imperial (mm).....	227
Cuadro 6.5-8	Estadísticos ETo Cuenca Río Aysén (mm).....	228
Cuadro 6.6-1	Resultados de test de tendencia de Mann-Kendall para las cuencas analizadas.	242
Cuadro 6.7-1	Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Loa (l/s)	246
Cuadro 6.7-2	Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Loa (m ³ /s)	246
Cuadro 6.7-3	Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Copiapó (l/s)	247
Cuadro 6.7-4	Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Copiapó (m ³ /s).....	247
Cuadro 6.7-5	Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Limarí (l/s).....	248
Cuadro 6.7-6	Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Limarí (m ³ /s).....	248
Cuadro 6.7-7	Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Aconcagua (l/s)	249
Cuadro 6.7-8	Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Aconcagua (m ³ /s)	249
Cuadro 6.7-9	Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Maipo (l/s)	250
Cuadro 6.7-10	Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Maipo (m ³ /s)	250
Cuadro 6.7-11	Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Bío-Bío (l/s)	251
Cuadro 6.7-12	Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Bío-Bío (m ³ /s)	251
Cuadro 6.7-13	Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Imperial (l/s)	252
Cuadro 6.7-14	Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Imperial (m ³ /s)	252
Cuadro 6.7-15	Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Aysén (l/s)	253
Cuadro 6.7-16	Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Aysén (m ³ /s)	253
Cuadro 6.8-1	Resultados regionales precipitación total anual.....	262
Cuadro 6.8-2	Resultados regionales precipitación total invierno.....	263
Cuadro 6.8-3	Resultados regionales precipitación total verano.....	263
Cuadro 6.8-4	Resultados regionales temperatura media anual.....	264
Cuadro 6.8-5	Resultados regionales temperatura media invierno.....	264
Cuadro 6.8-6	Resultados regionales temperatura media verano.....	265
Cuadro 7.2-1	Coefficientes de correlación (R) y p-valores (p) entre las precipitaciones representativas de las cuencas en estudio y distintos índices climáticos.	270
Cuadro 7.3-1	Coefficientes de correlación (R) y p-valores (p) entre las temperaturas representativas de las cuencas en estudio y distintos índices climáticos.	273
Cuadro 8.2-1	Pozos Análisis Hidrológico de Crecidas	276

Cuadro 8.2-2 Estaciones Análisis Hidrológico de Crecidas	277
Cuadro 8.3-1 Parámetro Zonas Homogéneas Método DGA-AC.....	278
Cuadro 8.4-1 Parámetros Cuencas Análisis Hidrológico de Crecidas	280
Cuadro 8.5-1 Estación Pluviométrica Asociada.....	281
Cuadro 8.5-2 Factor Transposición Análisis de Crecidas.....	281
Cuadro 8.5-3 Análisis de Frecuencia Precipitación Máxima 24 Horas (mm)	282
Cuadro 8.6-1 Caudal Máximo Instantáneo (m ³ /s), Método DGA-AC	283
Cuadro 8.6-2 Caudal Máximo Instantáneo (m ³ /s), Método Verni King Modificado	284
Cuadro 8.6-3 Caudal Máximo Instantáneo (m ³ /s), Método Fórmula Racional	285
Cuadro 8.6-4 Caudal Máximo Instantáneo Observado (m ³ /s).....	286
Cuadro 10.1-1 Cuencas Seleccionadas.....	292
Cuadro 10.2-1 Cuadro Resumen Resultados Análisis de Variación Agregación Anual.....	330

FIGURAS

Figura 1.2-1	Zona de Estudio	4
Figura 2.3-1	Comparación entre CR2 y DGA para la variable precipitación mensual.	13
Figura 2.3-2	Comparación entre CR2 y DGA para la variable temperatura mensual.	14
Figura 2.3-3	Comparación entre CR2 y DGA para la variable caudal medio mensual (m ³ /s).	15
Figura 3.2-1	Proceso de decisión considerado para este estudio.	17
Figura 4.2-1	Evolución Derechos Permanentes y Consuntivos Superficiales	42
Figura 4.2-2	Evolución Derechos Definitivos y Consuntivos Subterráneos	43
Figura 4.4-1	Evolución Temporal de Derechos de Aprovechamiento y Oferta Hídrica Superficial.....	47
Figura 4.4-2	Evolución Temporal de Derechos de Aprovechamiento y Oferta Hídrica Subterránea.....	48
Figura 5.2-1	Series de tiempo de las estaciones de precipitación dentro de la cuenca del Río Limarí.	54
Figura 5.2-2	Resultados de relleno de valores anuales de precipitación para la cuenca del Río Limarí.	56
Figura 5.2-3	Ejemplo de chequeo de estaciones utilizadas para formar patrón.	57
Figura 5.2-4	CDA de todas las estaciones de precipitación de la cuenca del Río Limarí.	58
Figura 5.2-5	Ejemplo de corrección de CDA para la estación Pirque.	59
Figura 5.2-6	Relleno de valores de precipitación mensual en periodo 1960 a 2014 para la cuenca del Río Limarí.	60
Figura 5.2-7	Serie datos históricos mensuales rellenos finales en cuenca del río Limarí.	62
Figura 5.3-1	Ejemplo de generación de modelo topoclimático para la cuenca del Río Maipo utilizando la base de datos CR2.	70
Figura 5.3-2	Aplicación del método del análisis singular espectral (SSA).	79
Figura 5.3-3	Espectro MTM asociado a la estación Calama.	81
Figura 5.3-4	Espectro MEM asociado a la estación Calama.	82
Figura 5.3-5	Esquema metodológico del procedimiento de análisis temporal.	82
Figura 5.3-6	Ejemplo del sistema de asimilación de datos para un pixel ubicado en la Sierra Nevada, California (Margulis et al., 2015).	94

Figura 5.3-7	Esquema del algoritmo de modelación y asimilación de nieve, utilizado en este trabajo.	94
Figura 5.3-8	Esquema Conceptual Metodología Curva Numero	97
Figura 5.3-9	Distribución de Sectores de Recarga en Cuencas Loa, Copiapó, Limarí y Aconcagua	100
Figura 5.3-10	Distribución de Sectores de Recarga en Cuencas Maipo, Bío-Bío, Imperial y Aysén	101
Figura 6.2-1	Ajuste de los modelos topoclimáticos para precipitación	107
Figura 6.2-2	Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Loa	108
Figura 6.2-3	Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Copiapó	109
Figura 6.2-4	Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Limarí.....	110
Figura 6.2-5	Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Aconcagua	111
Figura 6.2-6	Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Maipo	112
Figura 6.2-7	Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Bío-Bío	113
Figura 6.2-8	Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Imperial	114
Figura 6.2-9	Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Aysén	115
Figura 6.2-10	Resultado de test de Mann-Kendall para precipitación, macrozona Norte.	126
Figura 6.2-11	Resultado de test de Mann-Kendall para precipitación, macrozona Centro.....	127
Figura 6.2-12	Resultado de test de Mann-Kendall para precipitación, macrozona Sur.	128
Figura 6.2-13	Resultado de test de Mann-Kendall para precipitación, macrozona Austral.	129
Figura 6.2-14	Resultado de test de cambios en la media de precipitación, macrozona Norte	132
Figura 6.2-15	Resultado de test de cambios en la media de precipitación, macrozona Centro.....	133
Figura 6.2-16	Resultado de test de cambios en la media de precipitación, macrozona Sur.....	134
Figura 6.2-17	Resultado de test de cambios en la media de precipitación, macrozona Austral.	135

Figura 6.2-18	Resultado de test de cambios en la varianza de precipitación, macrozona Norte.	137
Figura 6.2-19	Resultado de test de cambios en la varianza de precipitación, macrozona Centro.....	138
Figura 6.2-20	Resultado de test de cambios en la varianza de precipitación, macrozona Sur.....	139
Figura 6.2-21	Resultado de test de cambios en la varianza de precipitación, macrozona Austral.	140
Figura 6.2-22	Definición Intensidad, Magnitud, y Duración.	142
Figura 6.2-23	Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Loa.	148
Figura 6.2-24	Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Copiapó.....	149
Figura 6.2-25	Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Limarí.	150
Figura 6.2-26	Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Aconcagua	151
Figura 6.2-27	Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Maipo.....	152
Figura 6.2-28	Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Bío-Bío.	153
Figura 6.2-29	Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Imperial.....	154
Figura 6.2-30	Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Aysén.	155
Figura 6.2-31	Curvas de variación estacional de precipitación media mensual (PMM) para las estaciones seleccionadas en la Macrozona Norte.....	159
Figura 6.2-32	Curvas de variación estacional de precipitación media mensual (PMM) para las estaciones seleccionadas en la Macrozona Centro.	160
Figura 6.2-33	Curvas de variación estacional de precipitación media mensual (PMM) para las estaciones seleccionadas en la Macrozona sur.	161
Figura 6.2-34	Curvas de variación estacional de precipitación media mensual (PMM) para las estaciones seleccionadas en la Macrozona Austral.	162
Figura 6.2-35	Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Loa.	163
Figura 6.2-36	Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Copiapó.....	163
Figura 6.2-37	Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Limarí.	164
Figura 6.2-38	Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Aconcagua.	164
Figura 6.2-39	Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Maipo.....	165
Figura 6.2-40	Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Bío-Bío.....	165
Figura 6.2-41	Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Imperial.....	166

Figura 6.2-42	Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Aysén.	166
Figura 6.3-1	Ajuste de los modelos topoclimáticos para temperatura.....	172
Figura 6.3-2	Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Loa.	173
Figura 6.3-3	Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Copiapó	174
Figura 6.3-4	Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Limarí.....	175
Figura 6.3-5	Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Aconcagua	176
Figura 6.3-6	Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Maipo	177
Figura 6.3-7	Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Bío-Bío	178
Figura 6.3-8	Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Imperial	179
Figura 6.3-9	Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Aysén	180
Figura 6.3-10	Resultado de test de Mann-Kendall para temperatura, macrozona Norte.....	185
Figura 6.3-11	Resultado de test de Mann-Kendall para temperatura, macrozona Centro.....	186
Figura 6.3-12	Resultado de test de Mann-Kendall para temperatura, macrozona Sur.....	187
Figura 6.3-13	Resultado de test de Mann-Kendall para temperatura, macrozona Austral.	188
Figura 6.3-14	Resultado de test de cambios en la media de temperatura, macrozona Norte.	190
Figura 6.3-15	Resultado de test de cambios en la media de temperatura, macrozona Centro.....	191
Figura 6.3-16	Resultado de test de cambios en la media de temperatura, macrozona Sur.....	192
Figura 6.3-17	Resultado de test de cambios en la media de temperatura, macrozona Austral.	193
Figura 6.3-18	Resultado de test de cambios en la varianza de temperatura, macrozona Norte.	195
Figura 6.3-19	Resultado de test de cambios en la varianza de temperatura, macrozona Centro.....	196
Figura 6.3-20	Resultado de test de cambios en la varianza de temperatura, macrozona Sur.....	197
Figura 6.3-21	Resultado de test de cambios en la varianza de temperatura, macrozona Austral.	198

Figura 6.3-22	Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Loa.	199
Figura 6.3-23	Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Copiapó.	200
Figura 6.3-24	Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Limarí.	201
Figura 6.3-25	Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Aconcagua.	201
Figura 6.3-26	Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Maipo.	202
Figura 6.3-27	Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Bío-Bío.	203
Figura 6.3-28	Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Imperial.	203
Figura 6.3-29	Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Aysén.	204
Figura 6.4-1	Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Loa.	209
Figura 6.4-2	Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Copiapó.	210
Figura 6.4-3	Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Limarí.	211
Figura 6.4-4	Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Aconcagua.	211
Figura 6.4-5	Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Maipo.	212
Figura 6.4-6	Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Bío-Bío.	213
Figura 6.4-7	Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Imperial.	213
Figura 6.4-8	Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Aysén.	214
Figura 6.4-9	Curvas de variación estacional de caudal (QMM) para todas las cuencas analizadas.	215
Figura 6.4-10	Ejemplo de resultados de test ACF y PACF para la estación Pulido en Vertedero (cuenca río Copiapó).	217
Figura 6.5-1	Variación Mensual ETo Cuenca Loa	221
Figura 6.5-2	Estadísticos ETo Cuenca Loa Escala Anual	221
Figura 6.5-3	Variación Mensual ETo Cuenca Copiapó.	222
Figura 6.5-4	Estadísticos ETo Cuenca Copiapó Escala Anual.	222
Figura 6.5-5	Variación Mensual ETo Cuenca Limarí	223
Figura 6.5-6	Estadísticos ETo Cuenca Limarí Escala Anual	223
Figura 6.5-7	Variación Mensual ETo Cuenca Aconcagua	224
Figura 6.5-8	Estadísticos ETo Cuenca Aconcagua Escala Anual	224
Figura 6.5-9	Variación Mensual ETo Cuenca Maipo.	225
Figura 6.5-10	Estadísticos ETo Cuenca Maipo Escala Anual.	225
Figura 6.5-11	Variación Mensual ETo Cuenca Bío-Bío	226
Figura 6.5-12	Estadísticos ETo Cuenca Bío-Bío Escala Anual	226

Figura 6.5-13	Variación Mensual ETo Cuenca Imperial.....	227
Figura 6.5-14	Estadísticos ETo Cuenca Imperial Escala Anual.....	227
Figura 6.5-15	Variación Mensual ETo Cuenca Aysén	228
Figura 6.5-16	Estadísticos ETo Cuenca Aysén Escala Anual	228
Figura 6.6-1	Serie de tiempo del Equivalente en Agua (EA) diario medio sobre las distintas cuencas analizadas en este estudio.....	230
Figura 6.6-2	Climatología de EA para cada una de las cuencas analizadas.....	232
Figura 6.6-3	Equivalente en Agua de Nieve mensual (m) para la cuenca del Río Copiapó.	234
Figura 6.6-4	Equivalente en Agua de Nieve mensual (m) para la cuenca del Río Limarí.....	235
Figura 6.6-5	Equivalente en Agua de Nieve mensual (m) para la cuenca el Río Aconcagua	236
Figura 6.6-6	Equivalente en Agua de Nieve mensual (m) para la cuenca del Río Maipo	237
Figura 6.6-7	Equivalente en Agua de Nieve mensual (m) para la cuenca del río Itata.	238
Figura 6.6-8	Comparación del Equivalente en Agua de Nieve (m) al 1º de septiembre de un año húmedo (1997-98) con un año seco (2012-13), cuencas macrozona Norte.....	239
Figura 6.6-9	Comparación del Equivalente en Agua de Nieve (m) al 1º de septiembre de un año húmedo (1997-98) con un año seco (2012-13), cuencas macrozona Centro.....	240
Figura 6.6-10	Comparación del Equivalente en Agua de Nieve (m) al 1º de septiembre de un año húmedo (1997-98) con un año seco (2012-13), cuencas macrozona Sur.....	241
Figura 6.7-1	Precipitación Anual y Recarga Anual Cuenca Río Aconcagua	244
Figura 6.7-2	Variación del Cociente Recarga / Precipitación Cuenca Río Aconcagua.....	244
Figura 6.7-3	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Loa.....	246
Figura 6.7-4	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Copiapó	247
Figura 6.7-5	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Limarí	248
Figura 6.7-6	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Aconcagua.....	249
Figura 6.7-7	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Maipo	250
Figura 6.7-8	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Bío-Bío.....	251
Figura 6.7-9	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Imperial	252
Figura 6.7-10	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Aysén.....	253
Figura 6.7-11	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Bío-Bío, Zona Cordillerana	254
Figura 6.7-12	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Imperial, Zona Cordillerana	255
Figura 6.7-13	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Bío-Bío, Depresión Intermedia.....	255
Figura 6.7-14	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Imperial, Depresión Intermedia.....	256
Figura 6.7-15	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Bío-Bío, Zona Costera.....	256

Figura 6.7-16	Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Imperial, Zona Costera.....	257
Figura 6.8-1	Serie de tiempo de los indicadores precipitación total anual	258
Figura 6.8-2	Serie de tiempo de los indicadores precipitación total invierno	259
Figura 6.8-3	Serie de tiempo de los indicadores precipitación total verano	259
Figura 6.8-4	Serie de tiempo de los indicadores temperatura media anual	260
Figura 6.8-5	Serie de tiempo de los indicadores temperatura media invierno	260
Figura 6.8-6	Serie de tiempo de los indicadores temperatura media verano	261
Figura 6.8—7:	Resumen de resultados para la tendencia de la precipitación y temperatura para los indicadores regionales calculados para las tres agregaciones temporales definidas.	265
Figura 8.2-1	Variación de Niveles de Pozos Frente a Crecidas.....	276
Figura 8.6-1	Análisis de Crecidas Río Guatulame en el Tomé	287

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

La Dirección General de Aguas (DGA) posee en la actualidad un total de 507 estaciones fluviométricas y 683 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de todo el país (contabilizando sólo estaciones vigentes). El Cuadro 1.1-1 muestra la distribución de estas estaciones por región. Además de lo anterior, la DGA posee registros de nivel freático en pozos de observación desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de Los Lagos.

Cuadro 1.1-1 Estaciones DGA a lo Largo del País

Región	Estaciones Fluviométricas	Estaciones Meteorológicas
XV	19	26
I	13	26
II	32	40
III	27	29
IV	48	66
V	22	62
RM	22	46
VI	19	29
VII	59	62
VIII	74	73
IX	41	54
XIV	17	22
X	35	38
XI	37	40
XII	42	70
Total	507	683

Fuente: Elaboración Propia en base a información recogida por la red de monitoreo de la DGA. Cuadro no considera en su contabilidad un total de 168 estaciones meteorológicas y 362 estaciones fluviométricas informadas como suspendidas por DGA.

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.

Cabe mencionar que en el desarrollo del estudio se utilizó la notación nacional para separador de miles y decimales, es decir, “.” y “,” respectivamente. Sin embargo, algunos resultados obtenidos, principalmente figuras, han sido generados mediante notación norteamericana (“,” y “.” para separador de miles y decimales respectivamente), por lo que en aquellos casos se mantendrá la notación del software que lo generó.

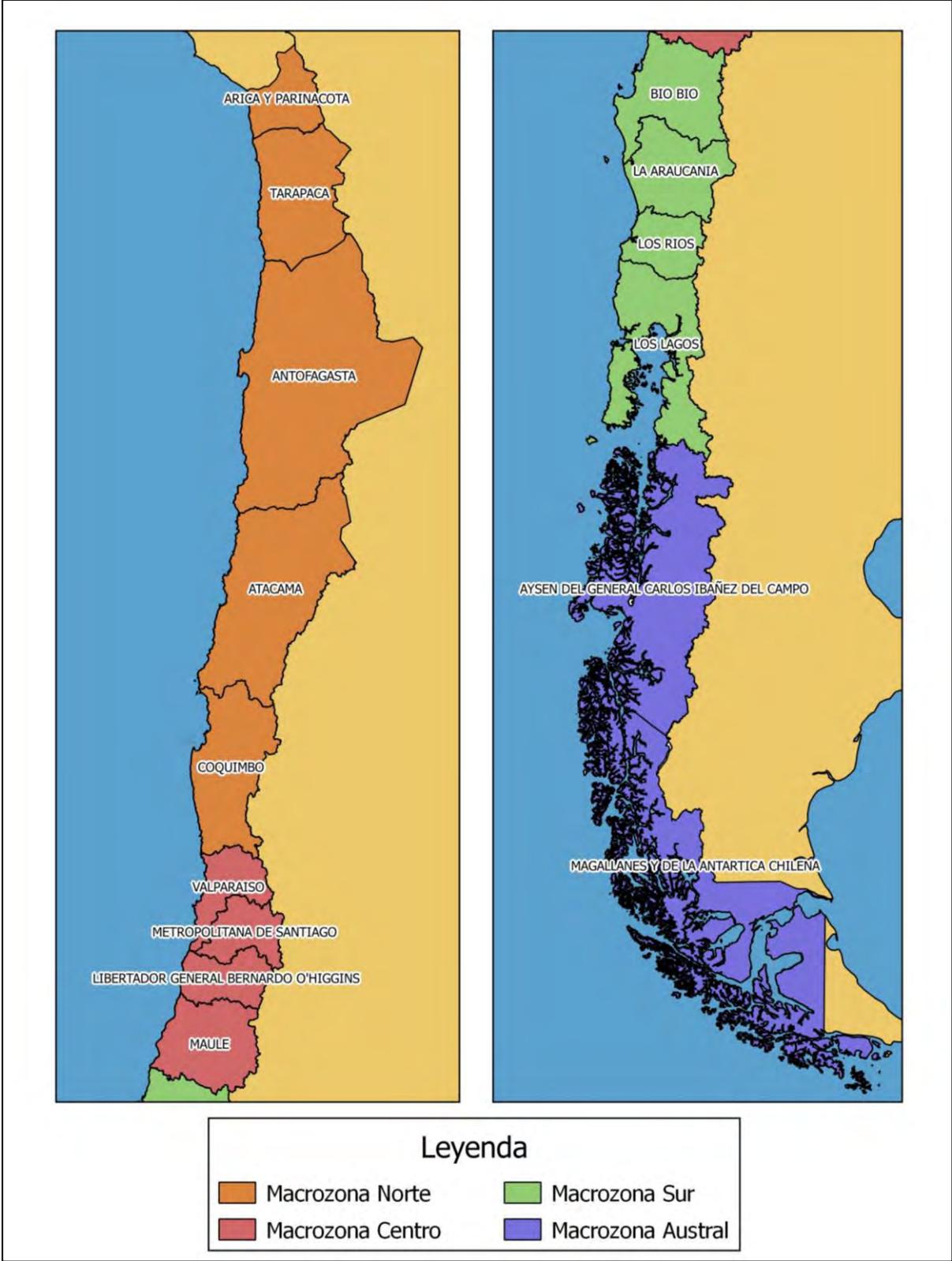
1.2 UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

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).

- **Macrozona Norte:** se extiende administrativamente desde la región de Arica y Parinacota (XV) en el extremo norte del país hasta la región de Coquimbo (IV) en su límite sur. Cuenta con una superficie de 301.619,37 Km² del país (40% del país) y la comprenden junto a otras, las cuencas del río Lluta, San José, Pampa del Tamarugal, Loa, Copiapó, Huasco, Elqui Limarí y Choapa.
- **Macrozona Centro:** administrativamente corresponde a las regiones de Valparaíso (V), Metropolitana (RM), del Libertador General Bernardo O'Higgins (VI) y Maule (VII), encontrándose constituida por las cuencas de los ríos Aconcagua (límite norte), Maipo, Rapel, Mataquito y Maule (límite sur), entre otras. Esta se ubica entre los paralelos 32° y 36° sur y cuenta con una superficie de 78.034,63 Km² (10,4% del país).
- **Macrozona Sur:** se extiende desde la región del Bío-Bío (VIII) en su límite norte, hasta la región de Los Ríos (XIV) en su límite sur y la comprenden junto a otras, las cuencas del río Itata, Bío-Bío, Imperial, Toltén, Valdivia y Bueno. En términos generales corresponde a una banda entre los paralelos 36° y 46° sur, que cubre una superficie de 135.814,79 Km² (18% del país).
- **Macrozona Austral:** corresponde administrativamente a las regiones de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo (XI) y Magallanes y de la Antártica Chilena (XII), extendiéndose desde la cuenca del río Palena y costeras entre la región de Los Lagos (X), pasando por las cuencas de los ríos Aysén, Baker, Pascua, Islas y Costeras, hasta el Cabo de Hornos en su límite más austral. La zona se extiende en términos generales del paralelo 46° sur hasta el Cabo de Hornos en el paralelo 56° sur, cubriendo una superficie de 237.671,25 Km² (31,6% del país).

La Figura 1.2-1 muestra las regiones que se encuentran comprendidas en cada una de las macrozonas definidas por la DGA.

El Cuadro 1.2-1 muestra las principales cuencas ubicadas en cada una de las macrozonas, de acuerdo a la delimitación de cuencas DGA.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 1.2-1 Zona de Estudio

Cuadro 1.2-1 Cuencas Prioritarias por Macrozona

Macrozona	Cuenca
Norte	Río Lauca
	Río Lluta
	Río San José
	Pampa del Tamarugal
	Río Loa
	Salar de Atacama
	Río Copiapó
	Río Huasco
	Río Elqui
	Río Limarí
	Río Choapa
Centro	Río Petorca
	Río Ligua
	Río Aconcagua
	Río Maipo
	Río Rapel
	Río Mataquito
	Río Maule
Sur	Río Itata
	Río Bío-Bío
	Río Imperial
	Río Toltén
	Río Valdivia
	Río Bueno
	Río Puelo
	Río Yelcho
	Islas Chiloé y Circundantes
Austral	Río Palena y Costeras Límite X Región
	Río Aysén
	Río Baker
	Río Pascua
	Islas entre límite Región y Canal Ancho y Estrecho de la Concepción
	Costeras entre Seno Andrew y Río Hollemberg e islas al oriente
	Costeras entre Laguna Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes

Fuente: Elaboración Propia

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 pueda 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.

CAPÍTULO 2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

2.1 INTRODUCCIÓN

En el marco de la realización de este estudio, es necesaria una revisión exhaustiva de los antecedentes disponibles. Para esto se procedió a hacer una preselección de los estudios relevantes, los cuáles son presentados en esta sección.

2.2 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES

Se revisaron estudios y publicaciones de la DGA, estos corresponden a estudios solicitados por la DGA y otros desarrollados por la misma. El Cuadro 2.2-1 presenta el listado de los documentos revisados.

Cuadro 2.2-1 Listado de Estudios Revisados

ID	Documento	Año	Ejecutor	Mandante
1	Modelo de Simulación Hidrológico Operacional Cuenca del Río Imperial, IX Región (SIT N° 47)	1998	CONIC-BF Ingenieros Civiles Consultores Ltda.	DGA
2	Determinación de la disponibilidad de recursos hídricos para constituir nuevos derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en las cuencas de Tiltil, Chacabuco-Polpaico, Lampa, Colina Inferior, Colina Sur, Chicureo y Santiago Norte, Provincia de Chacabuco, región Metropolitana. Minuta técnica N°113.	1999	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
3	Variabilidad Hidrológica del Río Bío-Bío Octava Región, Chile (SDT N° 125)	2001	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
4	Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Aconcagua (SIT N° 73)	2001	Ayala, Cabrera y Asociados Ltda. Ingenieros Consultores	DGA
5	Evaluación de los Recursos Subterráneos de la Cuenca del Río Aconcagua. S.D.T. N° 141.	2002	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
6	Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Maipo. S.D.T. N° 145.	2003	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
7	Determinación de los Derechos de Aprovechamiento de Agua Subterránea Factibles de Constituir en los	2003	Departamento de Administración de Recursos	DGA

ID	Documento	Año	Ejecutor	Mandante
	Sectores de Calama y Llalqui, Cuenca del Río Loa, II Región (SDT N° 153)		Hídricos	
8	Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de la Cuenca del Río Elqui IV Región (SDT N° 161)	2003	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
9	Evaluación de los Recursos Superficiales de la Cuenca del Río Aconcagua. S.D.T. N° 165.	2004	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
10	Determinación de la disponibilidad de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas en la cuenca del río Maipo hasta la confluencia con el estero Puangue. S.D.T. N° 171.	2004	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
11	Evaluación de los Recursos Subterráneos de la Cuenca del Río Aconcagua. Actualización al 15 de septiembre de 2004. S.D.T. N° 182.	2004	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
12	Evaluación de los Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Loa (SDT N° 192)	2005	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
13	Aplicación de Metodologías para Determinar la Eficiencia de Uso del Agua Estudio de Caso en la Región de Coquimbo	2006	CAZALAC	Gobierno Regional Región de Coquimbo
14	Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable del Acuífero del Valle del Elqui (SDT N° 228)	2006	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
15	Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Valle del Estero Puangue: Diagnóstico Situación Actual. S.I.T. N° 118.	2006	Departamento de Estudios y Planificación	DGA
16	Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Valle del Estero Puangue, Sectores Puangue Alto, Medio y Bajo, La Higuera, Cholqui, Popeta y Melipilla. S.I.T. N° 237.	2006	Departamento de Estudios y Planificación	DGA
17	Modelación Superficial para la Cuenca de los Ríos Maipo Mapocho. Estimación de la Recarga para Escenario Actual 2005. S.D.T. N° 235	2006	Departamento de Estudios y Planificación	DGA
18	Evaluación de la explotación máxima sustentable del acuífero Puangue-Melipilla. S.D.T. N°250.	2007	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
19	Evaluación de la explotación máxima sustentable del acuífero Santiago Sur. S.I.T. N° 119.	2007	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
20	Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de la Cuenca del Choapa (SDT N° 248)	2007	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
21	Informe Preliminar Determinación del Potencial Hidroeléctrico XI Región y Provincia de Palena X Región (SIT N° 120)	2007	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA

ID	Documento	Año	Ejecutor	Mandante
22	Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable del Acuífero de Huasco (SIT N° 131)	2007	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
23	Plan Director para la Gestión de los Recursos Hídricos Cuenca del Río Maipo. Fase II Actualización del Modelo de Operación del Sistema y Formulación del Plan (SIT N° 133)	2008	Luis Arrau del Canto Consultores en Ingeniería Hidráulica y de Riego	DGA
24	Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de la Cuenca del Río Limarí (SDT N° 268)	2008	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
25	Reevaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Río Huasco Aguas Abajo del Embalse Santa Juana (SDT N° 271)	2009	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
26	Reevaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Salar de Llamara (SDT N° 281)	2009	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
27	Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Salar de Atacama (SDT N° 324)	2012	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
28	Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero de la Parte Baja del Río Lluta (SDT N° 330)	2012	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
29	Actualización de la Modelación Integrada y Subterránea del Acuífero de la Cuenca del Río Copiapó (SIT N° 332)	2013	HIDROMAS CEF Limitada	DGA
30	Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos de los Sectores Hidrogeológicos de Aprovechamiento Común Ojos de San Pedro y Pampa Peineta (SDT N° 351)	2014	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
31	Análisis Integrado Río Loa Región de Antofagasta (SIT N° 339)	2014	Knight Piésold S.A.	DGA
32	Estimación preliminar de las recargas de agua subterránea y determinación de los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común en las cuencas de las regiones del Maule, Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. S.D.T. N° 359.	2014	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA
33	Determinación de la disponibilidad de aguas subterráneas en el valle del río Aconcagua. S.D.T. N° 372.	2015	Departamento de Administración de Recursos Hídricos	DGA

Fuente: Elaboración Propia.

Adicionalmente a la revisión de estudios, se recopilaron los antecedentes asociados a fluviometría, meteorología y niveles de pozos de observación desde la base de datos de la DGA.

2.3 ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

A continuación, se detalla brevemente el análisis realizado a la información recopilada de estudios y datos de la DGA.

2.3.1 Análisis de Estudios

Los estudios listados en el punto anterior se revisaron con el fin de obtener la información necesaria para el cálculo de los índices que permiten la ordenación de las cuencas de cada macrozona.

En su mayoría estos estudios presentan balances hídricos a nivel de cuenca, acompañados por modelos superficiales y subterráneos según el caso.

El objetivo original de la revisión fue rescatar los valores de la recarga, derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneas, y el caudal de 85% de probabilidad de excedencia (Q_{85}) asociados a las cuencas respectivas de cada informe. Sin embargo, no todos estos estudios realizan un análisis de frecuencia sobre la fluvimetría de las cuencas en régimen natural, por lo que el Q_{85} no siempre se encuentra disponible. El Anexo A1 presenta un mayor detalle de la revisión de antecedentes realizada por medio de fichas asociadas a cada uno de los estudios.

Entre otros de los parámetros importantes revisados se encuentran la determinación y recomendación de zonas de agotamiento y restricción.

Para contrastar la información de la recarga obtenida a partir de los estudios realizados a solicitud de la DGA, se utilizaron estudios técnicos desarrollados por el DARH y el DEP.

En el Cuadro 2.3-1 se presenta un resumen de la información recopilada. Esta corresponde a la recarga para las cuencas consideradas a partir de los estudios solicitados por la DGA y los informes técnicos de la DGA; además de los derechos de aprovechamiento de aguas superficiales y subterráneos.

2.3.2 Base de Datos del Centro de Investigación del Clima y Resiliencia CR2

Producto de la gran cantidad de información que se debió procesar, en términos de series de tiempo de estaciones fluviométricas y meteorológicas, fue necesario contar con una base de datos ordenada donde toda esta información se encuentre disponible y sea de fácil acceso.

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 y la Dirección General de Aguas (DGA). Estos datos corresponden a series

de tiempo puntuales o espacialmente distribuidas y registradas a través de instrumentos in situ o remotos principalmente de la DMC y la DGA. La base de datos que se descargó desde el sitio web del CR2 se puede consultar en el Anexo A2 e 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.

Cuadro 2.3-1 Resumen Información Recopilada de Estudios DGA

Macrozona	Cuenca	Recarga según Estudio (l/s)	Recarga Informe Técnico DGA (l/s)	DAA Subt. (l/s)	DAA Sup. (l/s)	Año Publicación Estudio Solicitado por DGA
Norte	Río Salado	-	110	-	-	2009
	Río Copiapó	4.500	-	19.600	-	2013
	Pampa del Tamarugal	1.113	-	4.142	-	2011
	Río Elqui	2.317	2.056	8.350	-	2006
	Río Choapa	551	949	1.821	-	2006
	Río Loa	1.450	-	3.794	17.305	2014
	Río Los Choros	656	-	1.596	-	2004
	Río San José	365	-	888	-	1998
	Río Limarí	2.349	2.569	3.040	-	2006
	Río Lluta		460	583	-	2012
	Río Huasco	1.760	-	1.868	10.386	2013
	Salar de Atacama	5.600	5.600	3.138	4.434	2010
	Río Lauca	425	-	80	600	2011
Centro	Río Petorca	522	-	-	-	2014
	Río Ligua	682	-	-	-	2014
	Río Aconcagua	18.620	-	-	-	2015
	Río Maipo	58.210	-	-	-	2007
	Río Rapel	26.140	-	-	-	2005
	Río Mataquito	30.957	-	-	-	2012
	Río Maule	58.000	-	-	-	2011

Nota: DAA = Derechos de Aprovechamiento de Aguas otorgados a la fecha del estudio.

Fuente: Elaboración Propia.

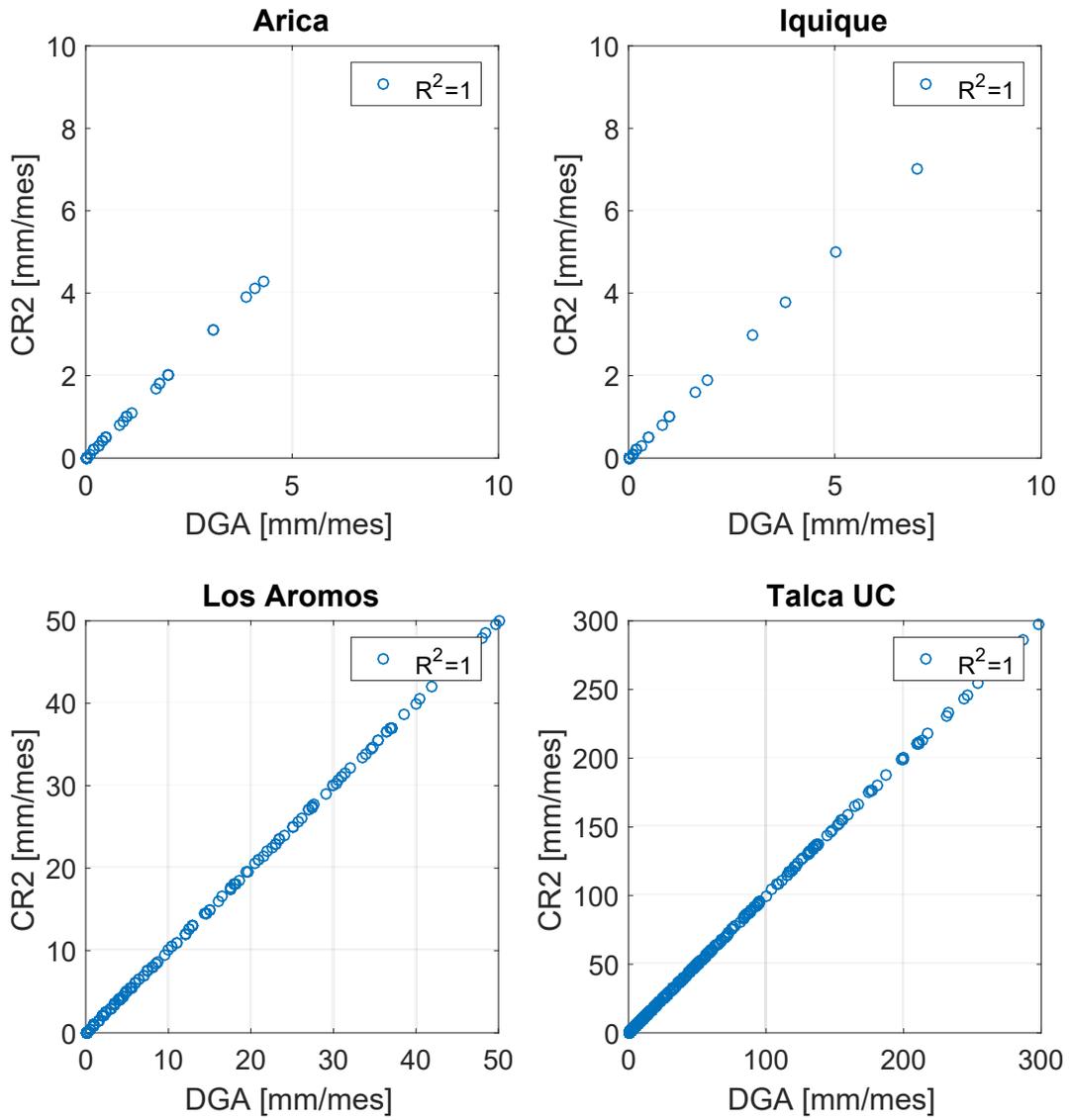
Para poder utilizar esta información fue necesario efectuar una verificación entre una muestra de las series de tiempo tanto de la base de datos DGA como la recopilada por el CR2, para verificar que la información disponible sea la misma.

La Figura 2.3-1 presenta la comparación para cuatro series de precipitación registrada en ambas bases de datos. Se puede apreciar que la correlación de precipitación entre ambas fuentes es perfecta. La Figura 2.3-2 presenta la comparación para 4 estaciones de temperaturas medias mensuales registradas en ambas bases de datos. La comparación es casi perfecta, aunque se aprecian algunas diferencias producto probablemente de la agregación de los datos diarios a mensual, lo que no afecta el desarrollo del estudio ni el alcance de sus objetivos.

Finalmente, la Figura 2.3-3 presenta la comparación para 8 series fluviométricas (caudales medios mensuales).

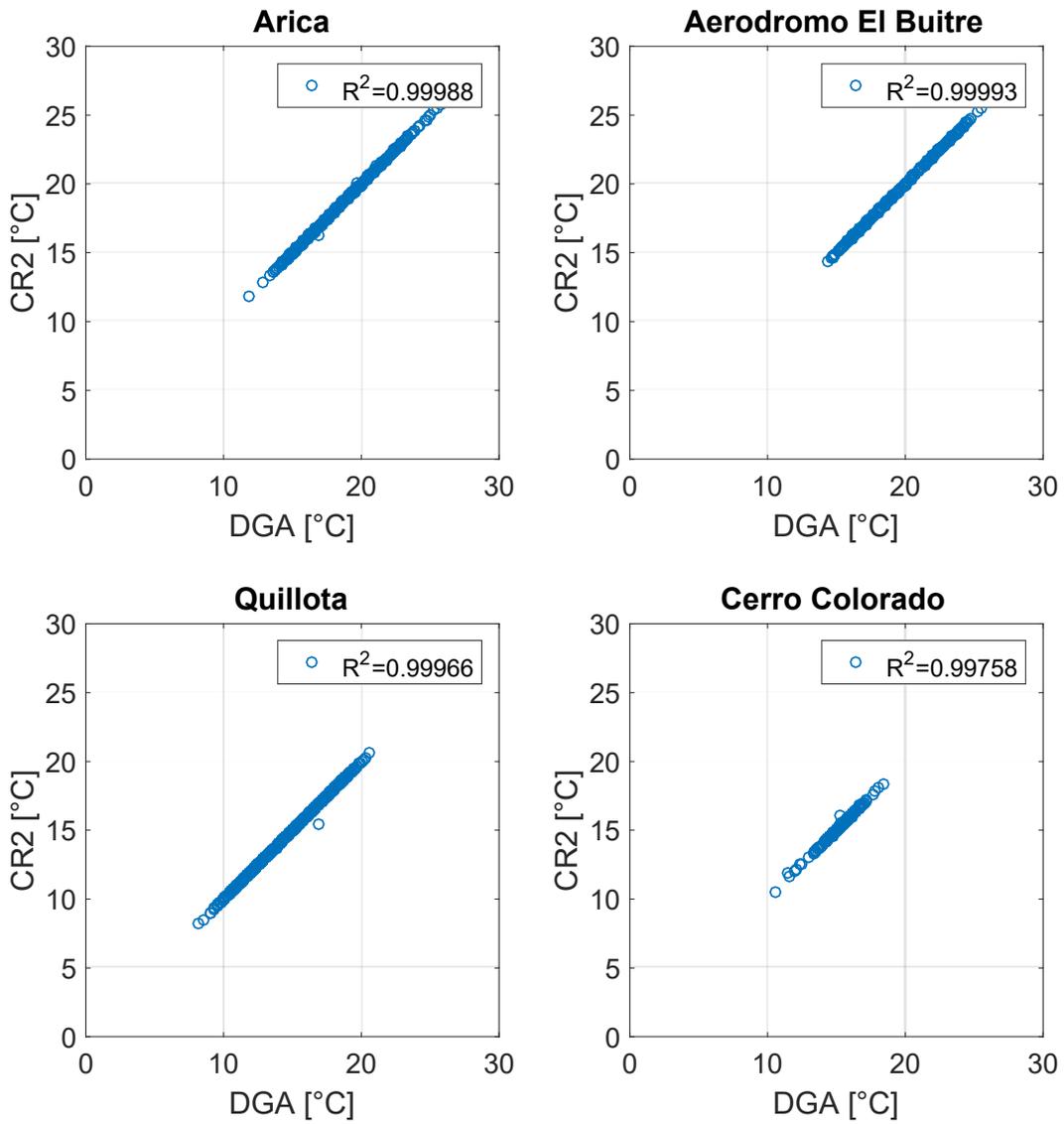
En general, para las 3 variables principales de análisis, se ha verificado una correlación prácticamente completa en un set aleatorio de estaciones en donde ambas bases de información se corresponden.

En consecuencia, se utilizó la base de datos registrada en el CR2 dada su disponibilidad de información, al formato en que se encuentra y a la excelente correspondencia encontrada con la información registrada en DGA.



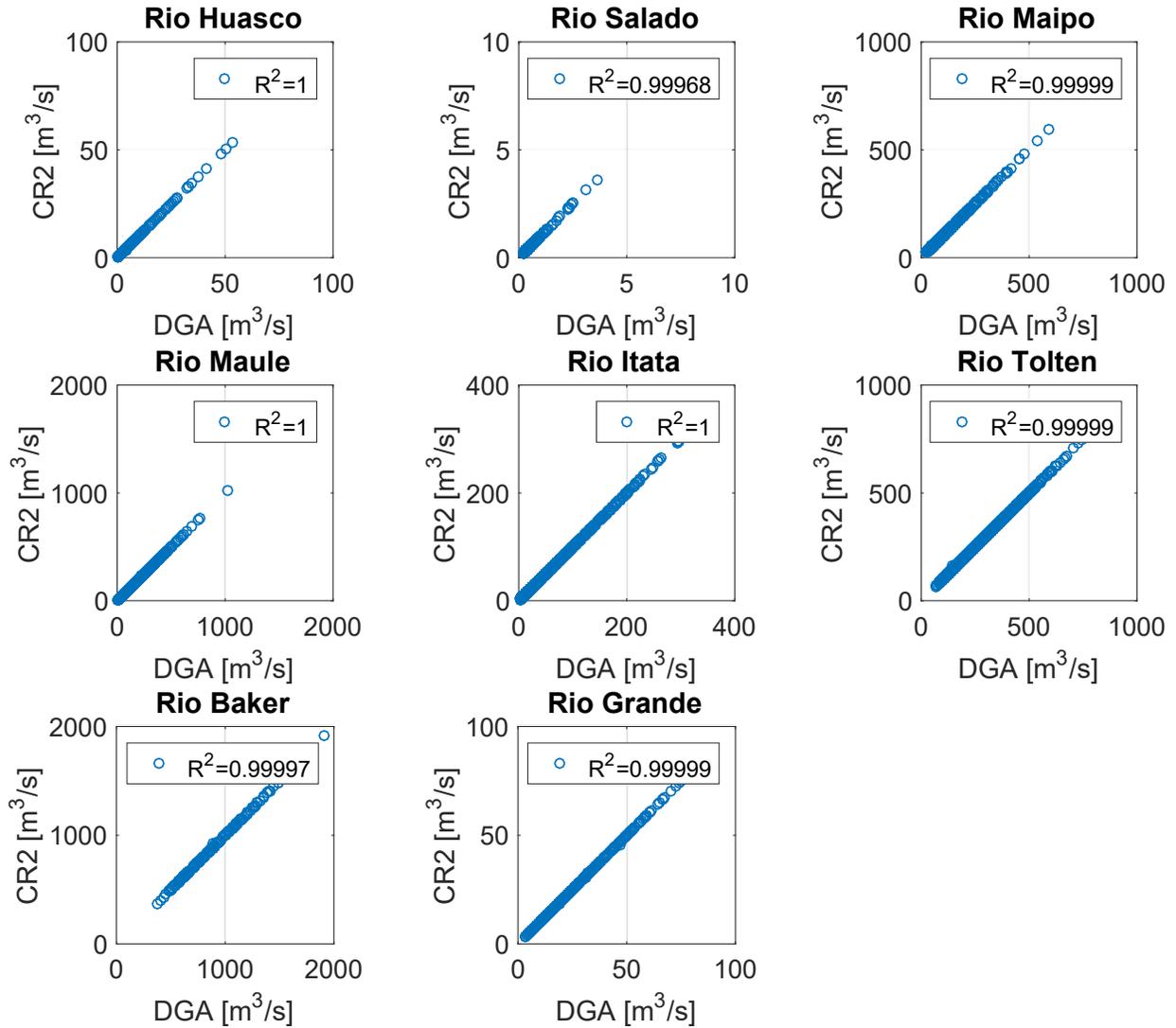
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 2.3-1 Comparación entre CR2 y DGA para la variable precipitación mensual.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 2.3-2 Comparación entre CR2 y DGA para la variable temperatura mensual.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 2.3-3 Comparación entre CR2 y DGA para la variable caudal medio mensual (m³/s).

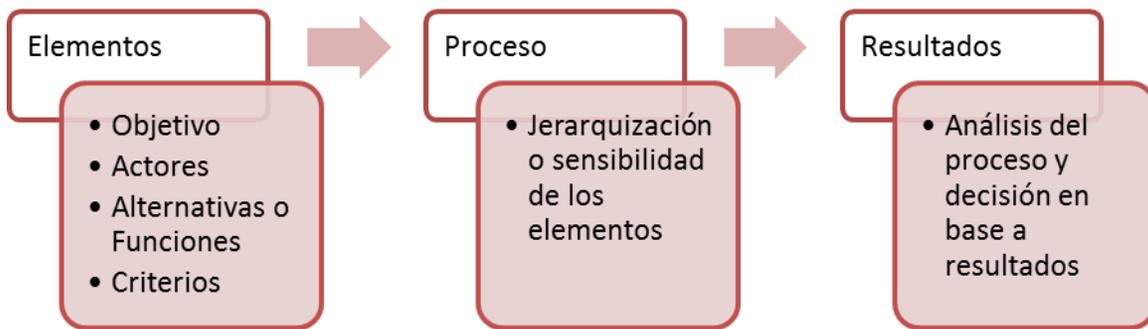
CAPÍTULO 3 IDENTIFICACIÓN DE CUENCAS PRIORIZADAS POR MACROZONA

3.1 INTRODUCCIÓN

El presente capítulo explica la definición de criterios e indicadores de evaluación que se definieron para elegir las cuencas que cumplen con los requisitos básicos para ser analizadas. Cada criterio posee un indicador seguido de una evaluación de un panel de expertos. Es importante destacar que esta clase de metodología es absolutamente aplicable a cualquier sistema de manera de efectuar un ranking en las cuencas que son prioridad. Si bien este estudio considera un máximo de 2 cuencas por macrozona, el ranking y los indicadores se han determinado para todo el set de cuencas a analizar, lo que deja a la DGA una lista priorizada en la cual enfocarse para cerrar las brechas de información de los mismos sistemas.

3.2 DEFINICIÓN DE CRITERIOS DE PRIORIZACIÓN

De acuerdo a Pacheco & Contreras (2008), un proceso de decisión implica la comparación entre las alternativas, sobre las que se puede optar, dada cierta disyuntiva identificada. En primera instancia, de acuerdo a estos autores, es necesario separar el problema de decisión en los elementos que lo componen, para la posterior comparación entre ellos. De esta manera la toma de decisión implica comparar elementos, para lo cual es necesario realizar mediciones que permitan aplicar los criterios de comparación para establecer preferencias entre ellos, es decir, una jerarquía. La Figura 3.2-1 presenta el esquema básico del problema de decisión que se plantea en el presente estudio, donde se reconocen tres etapas principales.



Fuente: Adaptado de Pacheco & Contreras, 2008.

Figura 3.2-1 Proceso de decisión considerado para este estudio.

A partir de lo indicado por Pacheco & Contreras (2008) y lo expuesto en la Figura 3.2-1, en el caso particular de este estudio, el proceso de decisión (objetivo) consiste en identificar cuáles son las cuencas o sistemas que se deben priorizar para el estudio de sus regímenes hidrológicos y que sean representativas para la caracterización de la variabilidad temporal y espacial de su macrozona. De esta forma, los “criterios” del problema de decisión son definidos aquí como los elementos técnicos y estratégicos esenciales a juicio del consultor que deben ser evaluados con el propósito de materializar una selección.

Por lo tanto, la “jerarquía” de los “criterios” se produce al momento de identificar aquellos con mayor o menor sensibilidad para la correcta aplicación de la metodología propuesta por el consultor, como también las razones estratégicas que existan para privilegiar un sistema de otro. Parte de este último criterio en este caso ha sido proporcionado y priorizado por la DGA, por lo que se traduce como una entrada en la evaluación de este trabajo y no se ahonda en los criterios que permitieron a la DGA la elección de estos sistemas informados.

Esta “jerarquía” entre los criterios permite, por lo tanto, ordenar la información recopilada de diversas fuentes y conducir el análisis de una mejor manera, permitiendo así presentar una evaluación estructurada de los sistemas y proponer un ranking de priorización sobre el estudio de los mismos. Esta valoración se traduce en un “peso” relativo que tiene cada criterio, el cual depende de las características de cada macrozona y también en una evaluación de su idoneidad dada las características del régimen hídrico de la macrozona evaluada. Por ejemplo, en la macrozona norte los criterios asociados al agua subterránea tendrán un mayor peso respecto a otros criterios, dado la elevada dependencia de esta zona al recurso subterráneo y las características de su régimen hídrico; a diferencia de la macrozona austral, donde no tiene sentido valorar este criterio (no existe un desarrollo de acuíferos), por cuanto es más relevante la presencia de estaciones y la extensión de sus registros (los que tendrán un mayor peso en la evaluación).

Además de los criterios, como elementos básicos que deben ser jerarquizados, se requiere definir los indicadores que se emplearán en la evaluación y la forma en que se puntuarán dichos indicadores. Para obtener dichos indicadores, el consultor ha presentado previamente en reunión con la inspección fiscal, tanto los criterios que se evaluarán como los indicadores que se utilizarán para su valoración. Estos criterios e indicadores se describen a continuación en el acápite 3.3.

3.3 EVALUACIÓN DE INDICADORES

Cada uno de los indicadores por cuenca se categorizó en 3 niveles de priorización (jerarquía), los cuales se mencionan a continuación:

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

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

3.3.1 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.

En este sentido, la DGA ha proporcionado un listado de cuencas junto con su nivel de priorización para cada una de las macrozonas, lo cual se muestra en el Cuadro 3.3-1, mientras que la Figura B-01 del Anexo B muestra las cuencas prioritarias DGA, diferenciando con colores el nivel de jerarquía asignada.

Tomando en consideración que la jerarquía realizada por la DGA responde a necesidades actuales de la gestión hídrica, se ha decidido utilizar este listado de cuencas para el análisis de los siguientes indicadores.

Cuadro 3.3-1 Priorización Criterio C1

Macrozona	Cuenca DGA	Prioridad
Norte	Río Lauca	3
	Río Lluta	2
	Río San José	2
	Pampa del Tamarugal	1
	Río Loa	2
	Salar de Atacama	2
	Río Copiapó	1
	Río Huasco	3
	Río Elqui	3
	Río Limarí	1
Río Choapa	2	
Centro	Río Petorca	2
	Río Ligua	2
	Río Aconcagua	1
	Río Maipo	1
	Río Rapel	2
	Río Mataquito	3
	Río Maule	1
Sur	Río Itata	3
	Río Bío-Bío	1
	Río Imperial	1
	Río Toltén	2
	Río Valdivia	1
	Río Bueno	2
	Río Puelo	3
	Río Yelcho	2
	Islas Chiloé y Circundantes	3
Austral	Río Palena y Costeras Límite X Región	2
	Río Aysén	1
	Río Baker	1
	Río Pascua	1
	Islas entre límite Región y Canal Ancho y Estrecho de la Concepción	3
	Cost. entre Seno Andrew y Río Hollelberg e islas al oriente	3
	Cost. entre Laguna Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes	3

Fuente: Elaboración Propia en base a priorización realizada por DGA.

3.3.2 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. Para estos fines, se ha elaborado un procedimiento que permite caracterizar para cada estación hidrometeorológica su grado de completitud y calidad en 3 pasos, los cuáles se describen a continuación.

- Se define un “mes válido” como aquel mes que presenta 20 o más días de información para su cálculo. Por tanto, el primer paso es obtener la estadística de meses válidos para cada una de las estaciones de precipitación, temperatura y caudal. Esto define de manera implícita un primer criterio de clasificación. A juicio de este consultor, un dato puede ser considerado como “confiable”, cuando incluye en su cálculo al menos 20 observaciones (en rigor, 20 días con información).
- Se define un “año válido” como aquel año que presente 10 o más meses válidos. Nuevamente, y de manera implícita, el consultor propone que un año puede ser considerado “útil” para los propósitos del análisis cuando no presenta más de 2 meses de vacíos.

Se calcula, para cada estación hidrometeorológica, el número de años válido que ésta presenta. Sin embargo, la mera aplicación de este procedimiento no es suficiente para valorar este criterio. El cálculo del número de años válidos genera la interrogante obvia de ¿Cuál es el mínimo valor de años válidos que se debe considerar para que una estación pueda ser procesada en el análisis?

Para responder esa inquietud es necesario recordar que los análisis estadísticos destinados a la caracterización de las series de tiempo requieren en general un mínimo de 29 años, para asegurar confiabilidad estadística de los resultados. Sin embargo, este criterio puede ser muy restrictivo, dada la alta heterogeneidad de la longitud de los registros hidrometeorológicos de nuestro país.

La publicación de Rubio-Álvarez y McPhee (2010), que analizó series de caudales entre la VII a XI regiones, mostró las mismas dificultades para caracterizar los patrones espaciales de caudales, especialmente para la zona más Austral. En ese caso, existía una gran diferencia entre la calidad de la información desde la VII a IX regiones, donde había registros más extendidos y completos, y la zona Austral, donde pese a que no existían muchos vacíos, la longitud de los registros muchas veces no superaban los 20 años. En este caso, Rubio y McPhee (2010) aplicaron tanto las técnicas de selección espacial (análisis de clústers) y temporal (análisis espectral) sobre series con una longitud de registro fija de 25 años y luego replicaron el análisis para el periodo completo de 51 años disponibles (VII-IX Regiones).

Al efectuar el análisis encontraron los mismos patrones espaciales con diferencias muy sutiles en cuanto a que 1 o 2 estaciones podían o no dejar un patrón en particular de un total de 30 analizadas en esa zona. Adicionalmente, las frecuencias dominantes más importantes se caracterizaban en ambos periodos (25 y 50 años), pero evidentemente la significancia estadística era menor en aquellas series que exhiben menor longitud de registro.

Teniendo en cuenta esta información, se ha definido que el mínimo de años válido que permita considerar una estación como “apta” de ser utilizada en este estudio sea de 25 años. Lo anterior es concordante con lo dispuesto en el Decreto N° 14 del 2012 y su modificación mediante el Decreto N° 71 del 2014, ambos del Ministerio del Medio Ambiente, que aprueba el reglamento para la determinación del caudal ecológico mínimo y que considera la utilización de una estadística hidrológica de al menos 25 años. Lo que queda entonces es analizar la distribución espacial de las estaciones hidrometeorológicas y priorizar las cuencas a analizar.

Las Figuras B-02, B-03 y B-04 del Anexo B presentan la distribución espacial de las estaciones de caudal, precipitación y temperatura respectivamente. Lo primero que resalta del análisis de la Figura B-03 y B-04 es que la distribución espacial de las estaciones “válidas” no es una variable de decisión restrictiva, por cuanto en general, en todas las cuencas “candidatas” propuestas por la DGA existe información de precipitación y temperatura que permiten llevar a cabo un análisis correcto y garantizar la significancia estadística de las técnicas de análisis propuestas por el consultor. Por tanto, la variable de control es el caudal.

El análisis de la Figura B-02 muestra que la distribución de estaciones fluviométricas “válidas” (es decir, que poseen más de 25 años válidos en su registro), es heterogénea, no sólo entre las macrozonas, sino que también dentro de una misma cuenca. Para adoptar entonces un indicador para la valorización de este criterio, se procedió a contabilizar el número de estaciones válidas para cada cuenca objetivo. Con este resultado se definió un “ranking” independiente para cada macrozona el cual busca potenciar aquellos sistemas (cuencas) que contienen el mayor número de estaciones válidas para ser analizadas. El Cuadro 3.3-2 detalla los umbrales adoptados para el indicador en cada macrozona, mientras el Cuadro 3.3-3 presenta la priorización del criterio en cuestión.

Cuadro 3.3-2 Umbrales de Estaciones Válidas para C2

Ranking	MZN	MZC	MZS	MZA
1	>=9	>= 7	>= 7	>= 5
2	5-8	4-6	4-6	2-4
3	< 5	< 4	< 3	<= 1

Nota: MZN = Macrozona Norte, MZC = Macrozona Centro, MZS = Macrozona Sur, MZA = Macrozona Austral.

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 3.3-3 Priorización Criterio C2

Macrozona	Cuenca DGA	Prioridad
Norte	Río Lauca	3
	Río Lluta	3
	Río San José	3
	Pampa del Tamarugal	3
	Río Loa	1
	Salar de Atacama	3
	Río Copiapó	2
	Río Huasco	2
	Río Elqui	2
	Río Limarí	1
Río Choapa	2	
Centro	Río Petorca	3
	Río Ligua	3
	Río Aconcagua	2
	Río Maipo	1
	Río Rapel	2
	Río Mataquito	2
	Río Maule	1
Sur	Río Itata	1
	Río Bío-Bío	2
	Río Imperial	1
	Río Toltén	1
	Río Valdivia	3
	Río Bueno	3
	Río Puelo	3
	Río Yelcho	3
	Islas Chiloé y Circundantes	3
Austral	Río Palena y Costeras Límite X Región	3
	Río Aysén	2
	Río Baker	3
	Río Pascua	3
	Islas entre límite Región y Canal Ancho y Estrecho de la Concepción	3
	Cost. entre Seno Andrew y Río Hollemborg e islas al oriente	1
	Cost. entre Laguna Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes	3

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.3 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 la fecha de realización del estudio, la DGA ha declarado como agotadas 11 cuencas o subcuencas en el país, las cuales se señalan en el Cuadro 3.3-4.

Cuadro 3.3-4 Declaraciones de Agotamiento

Declaración Agotamiento	Región	Cuenca Prioritaria	Resolución	Fecha
Río Grande y Río Limarí y sus Afluentes	IV	Río Limarí	DGA 72	19-01-2005
Río Choapa y sus Afluentes	IV	Río Choapa	DGA 1432	08-10-2004
Río Loa y sus Afluentes	II	Río Loa	DGA 197	24-01-2000
Estero Chimbarongo y sus Afluentes	VI	Río Rapel	DGA 894	05-11-1999
Primera Sección Río Mapocho y sus Afluentes	XIII	Río Maipo	DGA 383	27-09-1983
Río Diguillín y sus Afluentes	VIII	Río Itata	DGA 158	21-04-1994
Río Laja desde sus Nacientes y Btma. Canal Siberia	VIII	Río Bío-Bío	DGA 1858	25-08-1952
Primera Sección Río Tinguiririca y sus Afluentes	VI	Río Rapel	DGA 80	16-03-1983
Primera Sección Río Aconcagua	V	Río Aconcagua	DGA 209	22-05-1985
Río Putaendo y sus Afluentes	V	Río Aconcagua	DGA 1278	13-09-2004
Río Elqui y sus Afluentes	IV	Río Elqui	DGA 1515	25-05-2009

Fuente: Elaboración Propia en base a información DGA.

La información mostrada en el Cuadro 3.3-4 permite identificar 9 cuencas prioritarias cuyo recurso superficial se encuentra agotado ya sea parcial o totalmente: ríos Loa, Elqui, Limarí y Choapa en la macrozona norte; ríos Aconcagua, Maipo y Rapel en la macrozona centro; ríos Itata y Bío-Bío en la macrozona sur.

Se ha utilizado este indicador como base para la definición de niveles de priorización en este criterio, el cual se complementa con el análisis de las solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales pendientes en cada una de las cuencas (ver Figura B-05 del Anexo B). De este modo, aquellas cuencas que posean una declaración de agotamiento y además una gran cantidad de solicitudes pendientes serán evaluadas con un nivel 1, mientras que en el otro extremo (nivel 3) se encontrarán aquellas cuencas sin declaración de agotamiento y con una baja o nula cantidad de solicitudes pendientes en comparación con el resto de la macrozona. 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.

El Cuadro 3.3-5 muestra para cada cuenca en análisis la cantidad de solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas superficiales pendientes y el nivel de priorización asignado, destacándose con color aquellas cuencas que además poseen declaración de agotamiento parcial o total.

Se observa que 2 de las 9 cuencas con declaración de agotamiento posee nivel 2 (río Loa y río Elqui). Esto se debe a que, a pesar de encontrarse agotadas, la cantidad de solicitudes pendientes es muy baja en comparación a las otras cuencas de la macrozona norte.

En el caso de la macrozona austral, ninguna cuenca posee una prioridad de nivel 1, ya que no existen declaraciones de agotamiento.

Cuadro 3.3-5 Priorización Criterio C3

Macrozona	Cuenca DGA	Pendientes	Prioridad
Norte	Río Lauca	95	3
	Río Lluta	225	2
	Río San José	193	2
	Pampa del Tamarugal	327	2
	Río Loa	95	2
	Salar de Atacama	51	3
	Río Copiapó	110	2
	Río Huasco	54	3
	Río Elqui	59	2
	Río Limarí	495	1
	Río Choapa	739	1
Centro	Río Petorca	128	3
	Río Ligua	45	3
	Río Aconcagua	713	1
	Río Maipo	580	1
	Río Rapel	1.068	1
	Río Mataquito	1.066	2
	Río Maule	2.116	2
Sur	Río Itata	1.507	1
	Río Bío-Bío	3.355	1
	Río Imperial	2.110	2
	Río Toltén	2.377	2
	Río Valdivia	1.236	2
	Río Bueno	877	3
	Río Puelo	109	3
	Río Yelcho	87	3
	Islas Chiloé y Circundantes	206	3
Austral	Río Palena y Costeras Límite X Región	357	2
	Río Aysén	800	2
	Río Baker	315	2
	Río Pascua	50	3
	Islas entre límite Región y Canal Ancho y Estrecho de la Concepción	0	3
	Cost. entre Seno Andrew y Río Hollemberg e islas al oriente	9	3
	Cost. entre Laguna Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes	35	3

Fuente: Elaboración Propia.

3.3.4 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.

De acuerdo a los registros obtenidos de las bases de datos de la DGA, existen 1.046 pozos de observación en la red DGA que cuentan con algún registro de nivel (Cuadro 3.3-6), localizándose desde el límite norte del país hasta la VII región.

Cuadro 3.3-6 Pozos de Observación DGA por Región

Región	Pozos
I y XV	155
II	56
III	132
IV	203
V	156
VI	185
VII	31
XIII	128
Total General	1.046

Fuente: Elaboración Propia en base a información DGA.

Es importante mencionar que, si bien existen pozos DGA ubicados más hacia el sur del país, estos no poseen registros, por lo que no fueron considerados en el análisis.

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.

De acuerdo a lo anterior, aproximadamente el 79% de los pozos cumple con el requisito de longitud, mientras que el porcentaje se reduce a aproximadamente 48% cuando se considera además el requisito de densidad de registro, correspondiente a 500 pozos (ver Figura B-06 del Anexo B).

Finalmente, se realizó una contabilización de la cantidad de pozos válidos por cuenca, mediante lo cual se asignó el nivel de priorización para cada cuenca 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.

El Cuadro 3.3-7 muestra los resultados del criterio C4.

Cuadro 3.3-7 Priorización Criterio C4

Macrozona	Cuenca DGA	Pozos	Prioridad
Norte	Río Lauca	0	3
	Río Lluta	4	2
	Río San José	14	2
	Pampa del Tamarugal	57	1
	Río Loa	9	2
	Salar de Atacama	0	3
	Río Copiapó	56	1
	Río Huasco	15	2
	Río Elqui	44	1
	Río Limarí	43	1
	Río Choapa	8	2
Centro	Río Petorca	15	2
	Río Ligua	8	2
	Río Aconcagua	57	1
	Río Maipo	99	1
	Río Rapel	71	1
	Río Mataquito	0	3
	Río Maule	0	3

Fuente: Elaboración Propia en base a información DGA.

Es importante notar que este indicador no fue evaluado en las macrozonas sur y austral debido a que no cuentan con información de niveles en pozos de monitoreo DGA.

Se observa que en la macrozona norte poseen un nivel 1 las cuencas Pampa del Tamarugal, río Copiapó, río Elqui y río Limarí, mientras que en la macrozona centro destacan las cuencas del río Aconcagua, río Maipo y río Rapel.

3.3.5 C5: Estrés Hídrico Subterráneo

Este criterio tiene por objetivo evaluar el grado de estrés de los acuíferos de entre las posibles cuencas a seleccionar. 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 utilizaron dos aproximaciones en base a la información disponible. La primera de ellas corresponde a la estimación del indicador como el cociente entre los derechos permanentes constituidos y la recarga estimada en base a estudios disponibles. La segunda corresponde a la estimación del indicador como el cociente entre el volumen comprometido en los sectores hidrogeológicos de aprovechamiento común (SHAC) y el volumen sustentable de los mismos. Como puede apreciarse, ambos indicadores apuntan al mismo fin.

Para la aplicación de la primera aproximación, se obtuvieron los derechos de aprovechamiento de dos fuentes DGA distintas. La primera corresponde a la revisión y actualización que actualmente se encuentra realizando el DARH-DGA de los derechos de aguas otorgados, para corregir o completar los registros. Esta revisión se encuentra realizada para todos aquellos derechos que poseen coordenadas reconocibles e identificadas, correspondiendo a un total de 42.085 registros asociados a derechos subterráneos.

Debido a que la actualización de derechos no considera aquellos que no poseen coordenadas, se procedió a utilizar como segunda fuente de información el listado de derechos de agua disponible en la página web de la DGA. De este listado se adicionaron todos los derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas que contaban con el campo "Cuenca" y que podían ser asociados a alguna de las cuencas en análisis.

El proceso anterior fue realizado considerando los derechos de tipo permanente y consuntivo, obteniéndose el listado resumen que se muestra en el Cuadro 3.3-8 para las macrozonas norte y centro.

Luego de lo anterior, se utilizaron los valores de recarga por cuenca obtenidos de los estudios mencionados en la revisión de antecedentes y presentados en el Cuadro 2.3-1.

Cuadro 3.3-8 Derechos de Aprovechamiento Subterráneos Otorgados (l/s)

Macrozona	Cuenca DGA	DAA Subt c/ coord	DAA Subt s/ coord	DAA Subt Total
Norte	Río Lauca	76,0	0,0	76,0
	Río Lluta	543,1	32,3	575,4
	Río San José	921,8	1.506,7	2.428,5
	Pampa del Tamarugal	4.155,9	166,3	4.322,2
	Río Loa	3.541,7	321,9	3.863,6
	Salar de Atacama	3.254,0	265,0	3.519,0
	Río Copiapó	8.206,3	12.889,3	21.095,6
	Río Huasco	512,9	621,2	1.134,2
	Río Elqui	6.320,5	1.096,6	7.417,1
	Río Limarí	5.022,4	936,0	5.958,4
	Río Choapa	2.094,0	220,3	2.314,3
Centro	Río Petorca	3.461,6	1.400,8	4.862,3
	Río Ligua	5.528,2	3.444,9	8.973,1
	Río Aconcagua	28.439,4	7.070,8	35.510,2
	Río Maipo	69.766,6	48.471,5	11.8238,1
	Río Rapel	47.491,8	6.029,2	53.521,0
	Río Mataquito	11.832,5	5.702,6	17.535,1
	Río Maule	69.389,0	6.546,8	75.935,8

Nota: DAA = Derechos de Aprovechamiento de Aguas.

Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por la DGA.

Para la aplicación de la segunda aproximación, se utilizó el documento de "Situación de Acuíferos" que dispone la DGA, en el cual se detalla para cada acuífero los volúmenes sustentables, provisionales, total comprometido y total solicitado. En base a él, se obtuvo el volumen total comprometido y sustentable para cada cuenca de estudio, obteniéndose su cociente como otro indicador.

La definición del nivel de priorización se obtuvo analizando ambos indicadores, en 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.

El Cuadro 3.3-9 muestra los resultados de priorización según el indicador obtenido mediante la primera aproximación.

Cuadro 3.3-9 Priorización Criterio C5 para Primera Aproximación

Macrozona	Cuenca DGA	Recarga (l/s)	Derechos (l/s)	DAA/Recarga	Prioridad
Norte	Río Lauca (*)	425	80	0,19	3
	Río Lluta	460	575	1,25	2
	Río San José	365	2.428	6,65	1
	Pampa del Tamarugal	1.113	4.322	3,88	1
	Río Loa	1.450	3.864	2,66	2
	Salar de Atacama	5.600	3.519	0,63	3
	Río Copiapó	4.500	21.096	4,69	1
	Río Huasco (**)	1.760	1.673	0,95	3
	Río Elqui	2.317	7.417	3,20	1
	Río Limarí	2.349	5.958	2,54	2
	Río Choapa	949	2.314	2,44	2
Centro	Río Petorca	522	4.862	9,3	1
	Río Ligua	682	8.973	13,2	1
	Río Aconcagua	18.620	35.510	1,9	2
	Río Maipo	58.210	119.577	2,1	2
	Río Rapel	26.140	56.032	2,1	2
	Río Mataquito	30.957	17.545	0,6	3
	Río Maule	58.000	75.936	0,8	3

(*) Derechos obtenidos de estudio

(**) Derechos obtenidos de estudio DGA (2013)

Fuente: Elaboración Propia en base a antecedentes citados en capítulo 2 del presente informe.

Se observa que la macrozona norte posee nivel 1 en las cuencas de río San José, Pampa del Tamarugal, río Copiapó, río Elqui y río Choapa, mientras que en la macrozona centro destacan las cuencas de río Petorca y río Ligua.

A continuación, el Cuadro 3.3-10 muestra la priorización obtenida, pero utilizando la segunda aproximación para el indicador.

Cuadro 3.3-10 Priorización Criterio C5 para Segunda Aproximación

Macrozona	Cuenca DGA	Vol. Sust. (m ³ /año)	Vol Compr. (m ³ /año)	Vol. Compr./ Vol. Sust.	Prioridad
Norte	Río Lauca (*)	-	-	-	-
	Río Lluta	14.506,560	18.819,328	1,30	2
	Río San José	22.075,200	141.581,864	6,41	1
	Pampa del Tamarugal	35.437,600	156.401,901	4,41	1
	Río Loa (**)	-	-	-	-
	Salar de Atacama (***)	86.093,280	113.452,731	1,32	2
	Río Copiapó	118.141,803	586.434,941	4,96	1
	Río Huasco	23.084,352	45.257,114	1,96	2
	Río Elqui (**)	-	-	-	-
	Río Limarí	69.413,890	170.392,465	2,45	2
	Río Choapa	29.927,664	86.956,077	2,91	2
Centro	Río Petorca	11.510,640	151.348,811	13,15	1
	Río Ligua	21.192,192	245.416,319	11,58	1
	Río Aconcagua (**)	-	-	-	-
	Río Maipo	1.370.236,065	3.480.089,093	2,54	2
	Río Rapel	572.523,466	1.404.527,717	2,45	2
	Río Mataquito	510.883,000	492.960,292	0,96	3
	Río Maule	2.088.888,270	885.594,688	0,42	3

(*) Información no disponible.

(**) Información incompleta, no permite realizar la estimación.

(***) Se considera contradictorio valor del volumen sustentable en relación a los informes técnicos DGA.

Fuente: Elaboración Propia en base a antecedentes citados en capítulo 2 del presente informe.

Los resultados presentados en el Cuadro 3.3-10 son en general similares a los presentados en el Cuadro 3.3-9, a excepción de las cuencas Salar de Atacama, río Huasco y río Choapa.

En el caso de la cuenca del Salar de Atacama, el Cuadro 3.3-10 muestra un indicador de 1,32, indicando una leve sobreexplotación de la cuenca. Sin embargo, el valor del volumen sustentable indicado es de 2.730 l/s, lo que corresponde a aproximadamente la mitad de la recarga conocida por este consultor y que es además informada en el estudio "Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Salar de Atacama" (SDT N° 324, 2012), por lo que se considera más adecuado el valor presentado en el Cuadro 3.3-9. Es posible que este valor no represente el volumen sustentable de todo el acuífero, sino que sólo de una parte de él, sin embargo, no es posible corroborar esta hipótesis debido a que la fuente oficial que proporciona este valor no ofrece un detalle suficiente para su análisis.

Situación similar se observa en la cuenca del río Huasco, en que el Cuadro 3.3-10 presenta un volumen sustentable de 732 l/s, muy inferior al informado en el estudio "Evaluación de la Explotación Máxima Sustentable del Acuífero de Huasco" (SIT N° 131, 2007), por lo que se considera más adecuado el valor presentado en el Cuadro 3.3-9.

Considerando lo dicho anteriormente, la jerarquía definitiva para el criterio C5 queda definida por los niveles de priorización presentados en el Cuadro 3.3-9.

3.3.6 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.

La Figura B-07 del Anexo B muestra los sectores acuíferos que se encuentran con restricción y con prohibición. Estos sectores corresponden a un total de 159, sin embargo, sólo 91 de ellas se ubican en cuencas consideradas prioritarias (de acuerdo a lo informado por la DGA al mes de Octubre de 2015).

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.

El Cuadro 3.3-11 muestra los resultados del criterio C6.

Se observa que la macrozona norte posee nivel 1 en las cuencas de río San José, río Copiapó, río Huasco y río Choapa, mientras que en la macrozona centro destacan las cuencas de río Petorca, río Ligua, río Maipo y río Rapel.

Cuadro 3.3-11 Priorización Criterio C6

Macrozona	Cuenca DGA	Áreas Restricción	Áreas Prohibición	% Cuenca	Prioridad
Norte	Río Lauca	0	0	0,00%	3
	Río Lluta	1	0	26,04%	2
	Río San José	0	1	10,69%	1
	Pampa del Tamarugal	2	0	35,29%	2
	Río Loa	1	0	25,36%	2
	Salar de Atacama	1	0	9,80%	2
	Río Copiapó	2	4	64,21%	1
	Río Huasco	3	0	57,34%	1
	Río Elqui	5	0	41,62%	2
	Río Limarí	7	0	29,90%	2
	Río Choapa	5	0	87,67%	1
Centro	Río Petorca	5	0	99,77%	1
	Río Ligua	7	0	99,88%	1
	Río Aconcagua	5	0	28,21%	2
	Río Maipo	22	0	51,12%	1
	Río Rapel	18	0	61,45%	1
	Río Mataquito	1	0	72,69%	2
	Río Maule	1	0	1,22%	2

Fuente: Elaboración Propia en base a información DGA.

3.3.7 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 (ver B-08 del Anexo B). 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.

El Cuadro 3.3-12 muestra los resultados del criterio C7.

Cuadro 3.3-12 Priorización Criterio C7

Macrozona	Cuenca DGA	Obras	Prioridad
Norte	Río Lauca	0	3
	Río Lluta	0	3
	Río San José	0	3
	Pampa del Tamarugal	3	2
	Río Loa	7	1
	Salar de Atacama	0	3
	Río Copiapó	13	1
	Río Huasco	4	2
	Río Elqui	6	1
	Río Limarí	5	1
	Río Choapa	4	2
Centro	Río Petorca	4	2
	Río Ligua	0	3
	Río Aconcagua	15	1
	Río Maipo	12	1
	Río Rapel	16	1
	Río Mataquito	2	2
	Río Maule	14	1
Sur	Río Itata	6	1
	Río Bío-Bío	7	1
	Río Imperial	5	1
	Río Toltén	1	2
	Río Valdivia	0	3
	Río Bueno	4	2
	Río Puelo	0	3
	Río Yelcho	0	3
	Islas Chiloé y Circundantes	0	3
Austral	Río Palena y Costeras Límite X Región	0	3
	Río Aysén	1	2
	Río Baker	0	3
	Río Pascua	0	3
	Islas entre límite Región y Canal Ancho y Estrecho de la Concepción	0	3
	Cost. entre Seno Andrew y Río Holleberg e islas al oriente	0	3
	Cost. entre Laguna Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes	0	3

Fuente: Elaboración Propia en base a información DGA.

3.4 SELECCIÓN DE CUENCAS PRIORIZADAS

Los 7 criterios definidos y calculados anteriormente han permitido categorizar las cuencas de estudio en 3 niveles de priorización, para cada uno de ellos. Para realizar 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 3.4-1 muestra los pesos asignados a cada uno de los criterios diferenciando entre macrozonas norte y centro, y macrozonas sur y austral.

Cuadro 3.4-1 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.

Los Cuadros 3.4-2 y 3.4-3 muestran un resumen de los niveles de priorización asignados a las cuencas de estudio para cada uno de los criterios. A estos valores se les aplicó la ponderación presentada en el Cuadro 3.4-1, obteniéndose los valores presentados en los Cuadros 3.4-4 y 3.4-5.

Cuadro 3.4-2 Resumen Jerarquía Macrozonas Norte y Centro

Macrozona	Cuenca DGA	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
Norte	Río Lauca	3	3	3	3	3	3	3
	Río Lluta	2	3	2	2	2	2	3
	Río San José	2	3	2	2	1	1	3
	Pampa del Tamarugal	1	3	2	1	1	2	2
	Río Loa	2	1	2	2	2	2	1
	Salar de Atacama	2	3	3	3	3	2	3
	Río Copiapó	1	2	2	1	1	1	1
	Río Huasco	3	2	3	2	3	1	2
	Río Elqui	3	2	2	1	1	2	1
	Río Limarí	1	1	1	1	2	2	1
	Río Choapa	2	2	1	2	2	1	2
Centro	Río Petorca	2	3	3	2	1	1	2
	Río Ligua	2	3	3	2	1	1	3
	Río Aconcagua	1	2	2	1	2	2	1
	Río Maipo	1	1	2	1	2	1	1
	Río Rapel	2	2	1	1	2	1	1
	Río Mataquito	3	2	2	3	3	2	2
	Río Maule	1	1	2	3	3	2	1

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 3.4-3 Resumen Jerarquía Macrozonas Sur y Austral

Macrozona	Cuenca DGA	C1	C2	C3	C7
Sur	Río Itata	3	1	1	1
	Río Bío-Bío	1	2	1	1
	Río Imperial	1	1	2	1
	Río Toltén	2	1	2	2
	Río Valdivia	1	3	2	3
	Río Bueno	2	3	3	2
	Río Puelo	3	3	3	3
	Río Yelcho	2	3	3	3
	Islas Chiloé y Circundantes	3	3	3	3
Austral	Río Palena y Costeras Límite X Región	2	3	2	3
	Río Aysén	1	2	2	2
	Río Baker	1	3	2	3
	Río Pascua	1	3	3	3
	Islas entre límite Región y Canal Ancho y Estrecho de la Concepción	3	3	3	3
	Costeras entre Seno Andrew y Río Hollemberg e islas al oriente	3	1	3	3
	Costeras entre Laguna Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes	3	3	3	3

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 3.4-4 Evaluación Jerarquía por Peso Macrozonas Norte y Centro

Macrozona	Cuenca DGA	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	TOTAL
Norte	Río Lauca	0,60	0,75	0,30	0,45	0,54	0,24	0,12	3,00
	Río Lluta	0,40	0,75	0,20	0,30	0,36	0,16	0,12	2,29
	Río San José	0,40	0,75	0,20	0,30	0,18	0,08	0,12	2,03
	Pampa del Tamarugal	0,20	0,75	0,20	0,15	0,18	0,16	0,08	1,72
	Río Loa	0,40	0,25	0,20	0,30	0,36	0,16	0,04	1,71
	Salar de Atacama	0,40	0,75	0,30	0,45	0,54	0,16	0,12	2,72
	Río Copiapó	0,20	0,50	0,20	0,15	0,18	0,08	0,04	1,35
	Río Huasco	0,60	0,50	0,30	0,30	0,54	0,08	0,08	2,40
	Río Elqui	0,60	0,50	0,20	0,15	0,18	0,16	0,04	1,83
	Río Limarí	0,20	0,25	0,10	0,15	0,36	0,16	0,04	1,26
Río Choapa	0,40	0,50	0,10	0,30	0,36	0,08	0,08	1,82	
Centro	Río Petorca	0,40	0,75	0,30	0,30	0,18	0,08	0,08	2,09
	Río Ligua	0,40	0,75	0,30	0,30	0,18	0,08	0,12	2,13
	Río Aconcagua	0,20	0,50	0,20	0,15	0,36	0,16	0,04	1,61
	Río Maipo	0,20	0,25	0,20	0,15	0,36	0,08	0,04	1,28
	Río Rapel	0,40	0,50	0,10	0,15	0,36	0,08	0,04	1,63
	Río Mataquito	0,60	0,50	0,20	0,45	0,54	0,16	0,08	2,53
	Río Maule	0,20	0,25	0,20	0,45	0,54	0,16	0,04	1,84

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 3.4-5 Evaluación Jerarquía por Peso Macrozonas Sur y Austral

Macrozona	Cuenca DGA	C1	C2	C3	C7	TOTAL
Sur	Río Itata	0,90	0,35	0,25	0,10	1,60
	Río Bío-Bío	0,30	0,70	0,25	0,10	1,35
	Río Imperial	0,30	0,35	0,50	0,10	1,25
	Río Toltén	0,60	0,35	0,50	0,20	1,65
	Río Valdivia	0,30	1,05	0,50	0,30	2,15
	Río Bueno	0,60	1,05	0,75	0,20	2,60
	Río Puelo	0,90	1,05	0,75	0,30	3,00
	Río Yelcho	0,60	1,05	0,75	0,30	2,70
	Islas Chiloé y Circundantes	0,90	1,05	0,75	0,30	3,00
Austral	Río Palena y Costeras Límite X Región	0,60	1,05	0,50	0,30	2,45
	Río Aysén	0,30	0,70	0,50	0,20	1,70
	Río Baker	0,30	1,05	0,50	0,30	2,15
	Río Pascua	0,30	1,05	0,75	0,30	2,40
	Islas entre límite Región y Canal Ancho y Estrecho de la Concepción	0,90	1,05	0,75	0,30	3,00
	Costeras entre Seno Andrew y Río Hollemberg e islas al oriente	0,90	0,35	0,75	0,30	2,30
	Costeras entre Laguna Blanca, Seno Otway, canal Jerónimo y Magallanes	0,90	1,05	0,75	0,30	3,00

Fuente: Elaboración Propia.

3.5 CONCLUSIONES

Los resultados anteriores permiten definir directamente las 2 cuencas por macrozona para ser estudiadas en detalle, sin embargo, la información analizada refleja que la macrozona austral posee un déficit de estaciones y extensión de registros que impide realizar una evaluación adecuada para cumplir con los objetivos del estudio. Debido a lo anterior, se decidió, en conjunto con la DGA, seleccionar solo una cuenca en la macrozona austral, compensándolo con la selección de una cuenca adicional en la macrozona norte, la cual posee una extensión norte-sur mayor, abarcando mayor variabilidad climática.

El resultado final se muestra en el Cuadro 3.5-1.

Cuadro 3.5-1 Cuenas 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.

En los capítulos siguientes, los análisis que se realizarán se enfocarán en las cuencas seleccionadas.

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

4.1 INTRODUCCIÓN

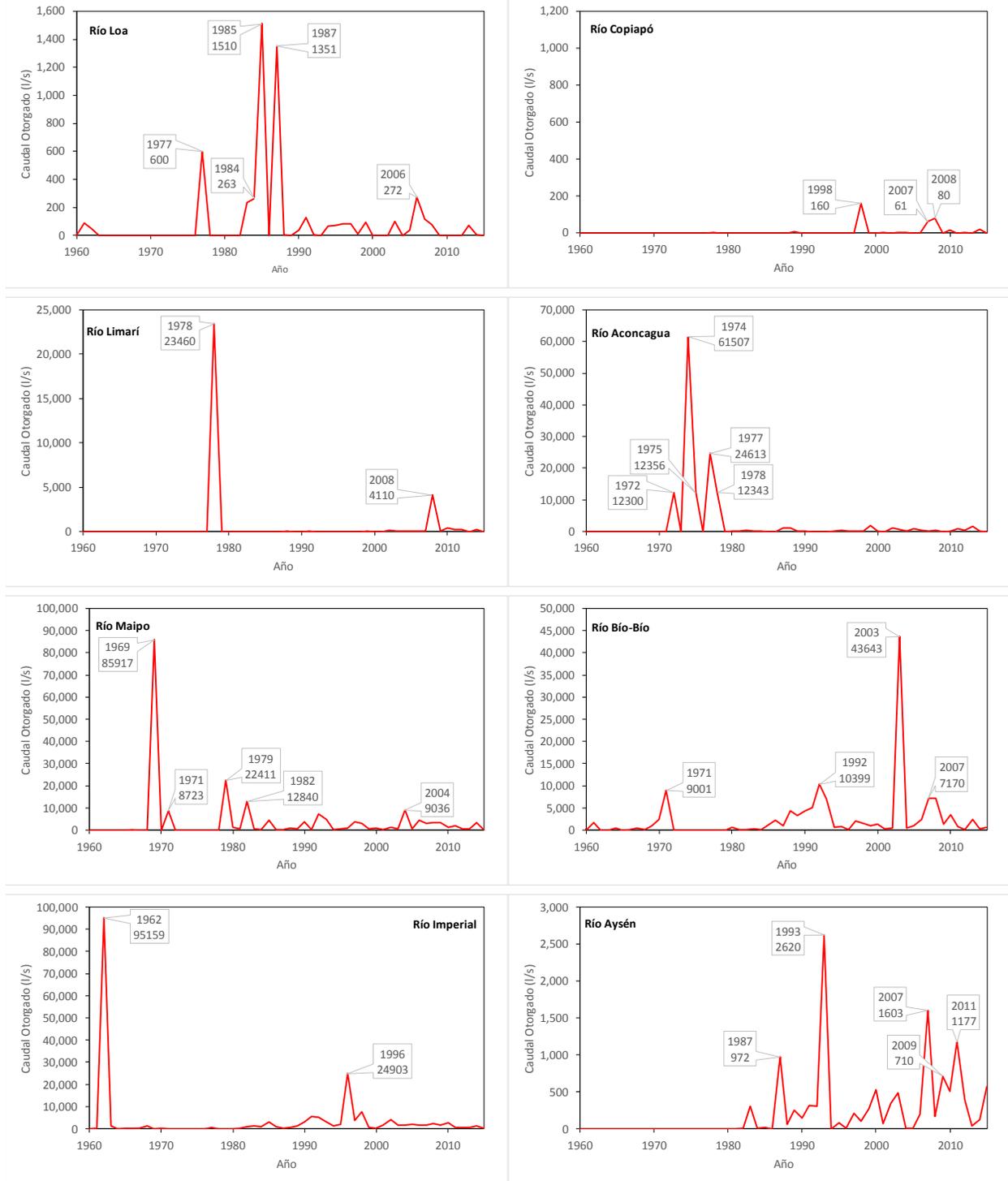
Producto de la distinción entre los regímenes hidrológicos de las macrozonas consideradas en el análisis, la relación entre oferta hidrológica y los usos del agua fue abordado en el capítulo anterior a través de 2 criterios: El estrés hídrico superficial y el estrés hídrico subterráneo.

El presente capítulo 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. En efecto, el actual análisis se centra en la diferencia entre la oferta hídrica y el caudal de demanda (representado por la evolución del otorgamiento de derechos), sin considerar las posibles interferencias en el ejercicio de cada derecho. Asimismo, cabe destacar que el presente análisis es representativo de una situación simplificada del sistema hídrico de las cuencas estudiadas y no corresponden a un caudal posible de otorgar para nuevos derechos de aprovechamiento de aguas.

4.2 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL OTORGAMIENTO DE DERECHOS

Para cada una de las cuencas seleccionadas se realizó un análisis de la evolución en el tiempo del otorgamiento de los derechos de aguas en base a la información actualizada disponible en el CPA. De este modo, se calculó para cada año desde 1910 a 2015 el caudal total otorgado, correspondiente a derechos permanentes y consuntivos.

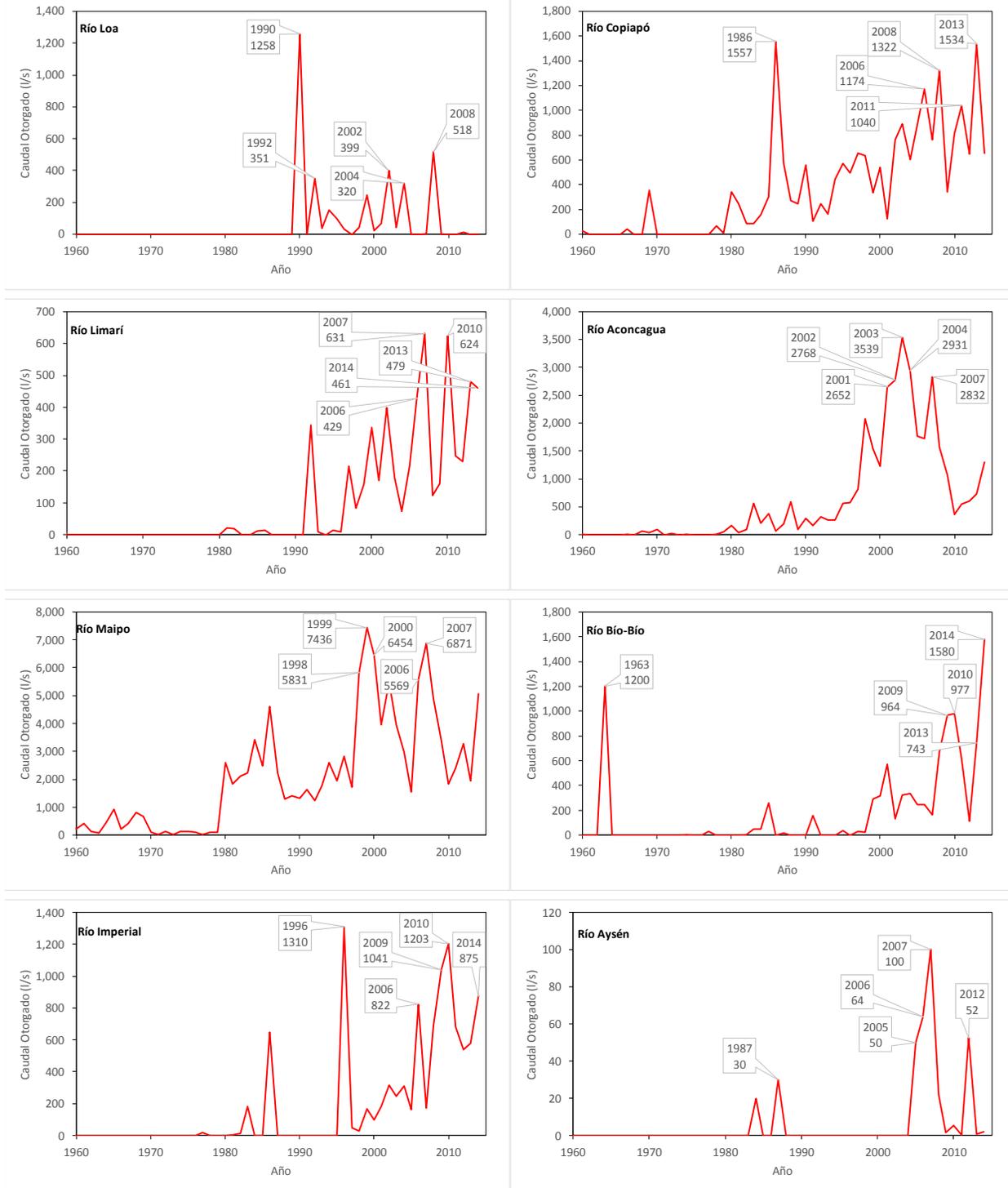
Es importante mencionar que la evolución se analizó utilizando la fecha de resolución del derecho, la cual representa el momento de constitución del derecho y en algunos casos, de su regularización. Las Figuras 4.2-1 y 4.2-2 muestran, para el periodo 1960 – 2015, la evolución del caudal permanente y consuntivo otorgado año a año para derechos superficiales y del caudal definitivo y consuntivo otorgado para derechos subterráneos, respectivamente, destacándose los 5 valores de mayor magnitud.



Nota: Valor superior de la etiqueta indica el año, mientras que el valor inferior indica la magnitud.

Fuente: Elaboración Propia en base a CPA.

Figura 4.2-1 Evolución Derechos Permanentes y Consuntivos Superficiales



Nota: Valor superior de la etiqueta indica el año, mientras que el valor inferior indica la magnitud.

Fuente: Elaboración Propia en base a CPA.

Figura 4.2-2 Evolución Derechos Definitivos y Consuntivos Subterráneos

El Cuadro 4.2-1 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. La evolución temporal acumulada de los derechos es presentada de manera gráfica en el acápite 4.4.

Cuadro 4.2-1 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.

4.3 OFERTA HÍDRICA POR CUENCA

Si bien la oferta hídrica es una variable que depende de una serie de factores asociados principalmente a la situación climática de la zona, para el presente análisis se considerará como una constante asociada a la cuenca y es obtenida en base a estudios públicos existentes.

La oferta hídrica superficial para derechos permanentes en un punto se asocia al caudal de 85% de probabilidad de excedencia en régimen natural, por lo que para el presente análisis se ha priorizado la búsqueda de este caudal asociado al total de la cuenca, es decir, a su desembocadura (DGA, 2008). Sin embargo, este caudal en régimen natural ha sido pocas veces estimado, ya que la mayor parte de las cuencas en estudio se encuentran altamente intervenidas. Sólo en algunos casos se tiene esa información cuando se ha realizado la modelación de la cuenca incluyendo la generación de caudales en base a modelos pluviales o nivo-pluviales. En esos casos donde ha sido posible obtener con mayor certeza la oferta hídrica de la cuenca (por ejemplo, las cuencas de Aconcagua y Maipo, con caudales en régimen natural generado para los periodos 1950-1999 y 1950-2005, respectivamente). En otros estudios, el caudal en régimen natural ha sido estimado como un caudal medio anual promedio, el cual es mayor a la oferta hídrica (cuencas Loa, Copiapó, Limarí, Bío-Bío, Imperial y Aysén).

El Cuadro 4.3-1 muestra los valores de la oferta hídrica o caudal medio para cada una de las cuencas en base a antecedentes públicos, los cuales se presentan en el Anexo A. En tanto, el Cuadro 4.3-2 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 (ver Cuadro 2.2-1).

Cuadro 4.3-1 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.

(**): Cuenca 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 4.3-2 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.

4.4 EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA RELACIÓN ENTRE OFERTA HÍDRICA Y DERECHOS

En base a los resultados anteriores, se calculó la diferencia entre la oferta hídrica y los derechos otorgados. De este modo, la disponibilidad hídrica en una cuenca es máxima (e igual a la oferta) cuando no existen derechos otorgados, mientras que se vuelve nula desde el momento en que los derechos superan a la oferta hídrica. Todo lo anterior, asociado a los derechos permanentes y consuntivos.

En base a la evolución temporal de la asignación de derechos de aguas y a la oferta hídrica de cada cuenca, se han generado los gráficos mostrados en las Figuras 4.4-1 y 4.4-2, para los casos superficial y subterráneo, respectivamente. En todos los gráficos, la línea roja representa la oferta hídrica constante en el tiempo, la línea azul representa la evolución de los derechos otorgados y la zona achurada en verde representa la diferencia entre los valores anteriores (indicada como disponibilidad hídrica).

Para la Figura 4.4-1 es importante destacar que sólo los gráficos asociados a las cuencas del río Aconcagua y Maipo muestran una oferta hídrica asociada al caudal de 85% de probabilidad de excedencia, mientras que el resto muestra el valor del caudal medio anual de la cuenca, por lo que la disponibilidad en este último caso se encuentra sobreestimado, en relación a un caudal 85% o de tipo permanente.

Para la cuenca del río Aconcagua, se aprecia que en la actualidad los derechos permanentes y consuntivos otorgados superan en casi 6 veces la oferta hídrica de la cuenca, la que fue sobrepasada cercano al año 1974. En el caso de la cuenca del río Maipo, la oferta es superada en prácticamente el doble y fue igualada aproximadamente el año 1977.

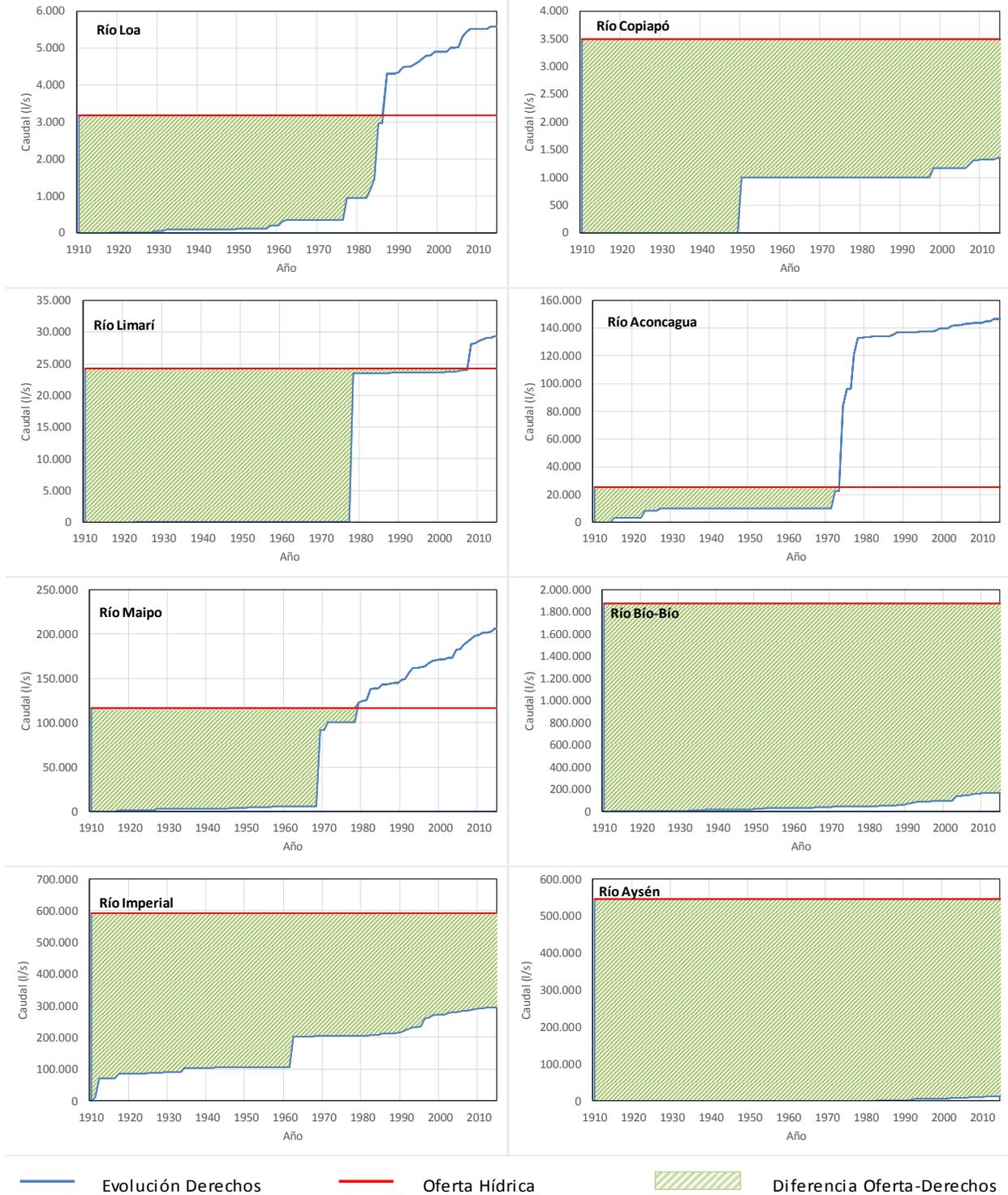
Para las cuencas de los ríos Loa y Limarí, se aprecia que, a pesar de encontrarse la oferta hídrica sobreestimada, ésta es de todos modos superada actualmente por la cantidad de derechos otorgados.

Diferente situación se observa en el resto de las cuencas, ya que en ellas la oferta hídrica es mucho mayor a los derechos otorgados. Sin embargo, al encontrarse la oferta hídrica sobreestimada, no es posible realizar ninguna conclusión precisa al respecto.

En relación a la Figura 4.4-2, se observa que actualmente los derechos otorgados superan en gran medida la oferta hídrica subterránea para las cuencas de las macrozonas norte y centro. En este sentido, la cuenca más afectada es la del río Copiapó, en que la oferta es sobrepasada en más de 4 veces, mientras que para el resto la oferta es superada entre 1,5 y 2,5 veces.

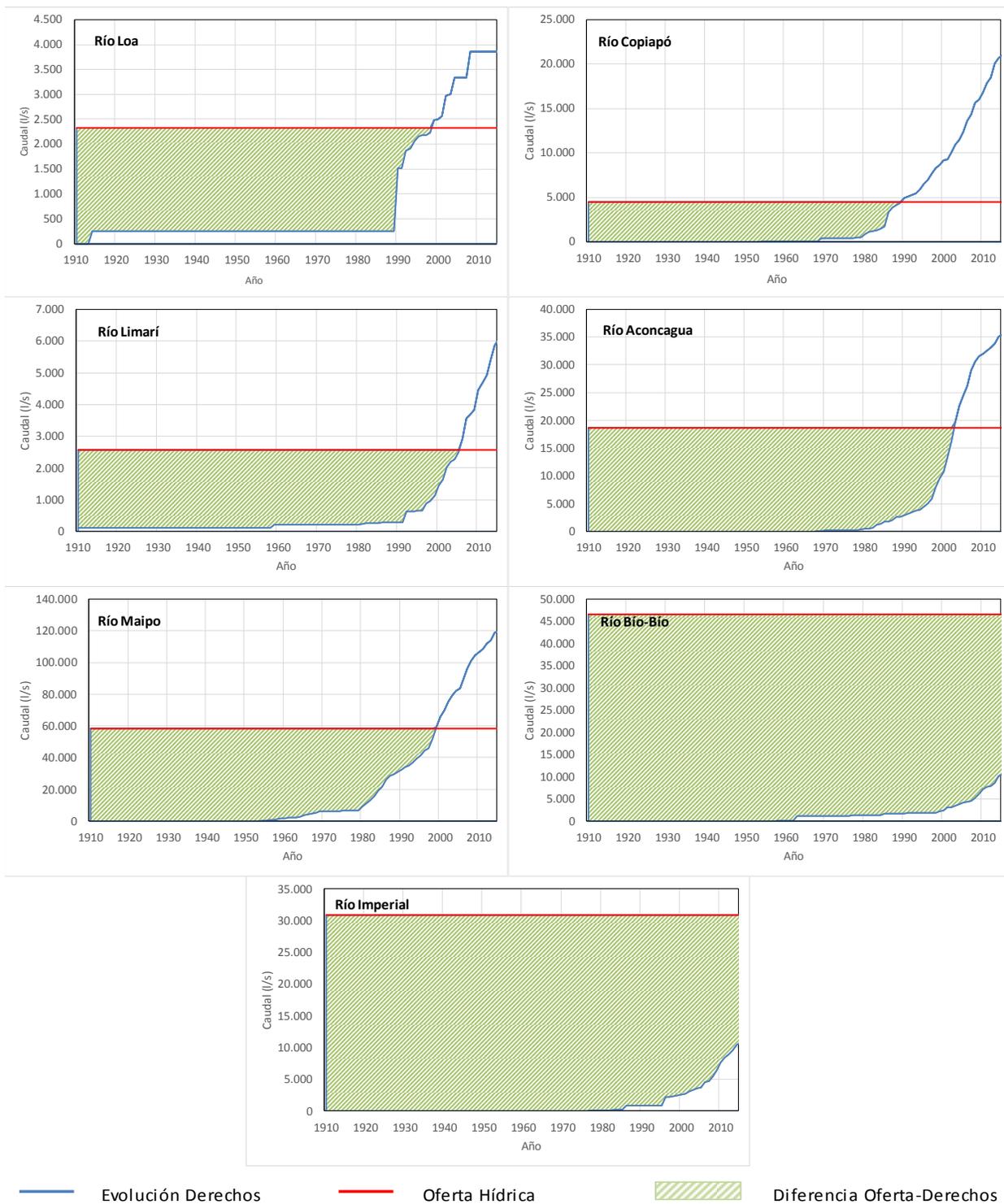
A diferencia del caso superficial, la oferta subterránea fue superada por los derechos otorgados de manera más tardía. De este modo, la oferta hídrica subterránea se superó aproximadamente en el año 1990 para las cuencas de los ríos Loa y Copiapó, mientras que para las cuencas de los ríos Limarí, Aconcagua y Maipo esto ocurrió después del año 2000.

En el caso de las cuencas de los ríos Bío-Bío e Imperial, la oferta hídrica supera por mucho a la magnitud de los derechos otorgados, mientras que para la cuenca del río Aysén no se dispone de suficiente información como para realizar el análisis.



Fuente: Elaboración Propia en base a CPA.

Figura 4.4-1 Evolución Temporal de Derechos de Aprovechamiento y Oferta Hídrica Superficial



Fuente: Elaboración Propia en base a CPA.

Figura 4.4-2 Evolución Temporal de Derechos de Aprovechamiento y Oferta Hídrica Subterránea

4.5 CONCLUSIONES

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 (DGA, 2008) en su definición de disponibilidad hídrica. Por lo tanto, en los casos en que la oferta es mayor que los derechos, no significa necesariamente que hay un caudal disponible para otorgar nuevos derechos de aprovechamiento. Del mismo modo la situación opuesta no significa que realmente existe una magnitud tal de sobreotorgamiento de derechos.

La demanda hídrica ha sido representada por la evolución de la constitución de derechos de agua en base a la fecha de resolución del derecho. La oferta hídrica, que en estricto rigor depende de las condiciones climáticas de cada sector, para los efectos del presente análisis, se estimó constante y su valor fue obtenido desde los antecedentes consultados. Este caudal se ha estimado en régimen natural solo para las cuencas de los ríos Aconcagua y Maipo, mientras que para el resto se asocia al caudal medio anual promedio, el cual se estima mayor a la oferta.

El análisis de los caudales de oferta y demanda superficial muestra otorgamiento de derechos por sobre la oferta hídrica en la cuenca de los ríos Aconcagua (de casi 6 veces) y Maipo. Misma situación se observa para los ríos Loa y Limarí, a pesar de encontrarse sobreestimado su valor. En los casos restantes, donde la oferta corresponde al caudal medio, aún se observa que los derechos constituidos no superan la oferta hídrica.

La situación del sistema subterráneo presenta 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.

Los resultados presentados en este capítulo deben ser interpretados de manera conservadora, debido a que implica una serie de supuestos en base a la información disponible en la base de datos del CPA. Para obtener resultados de manera más precisa se requiere un análisis detallado de los informes técnicos y expedientes asociados a los derechos de aguas.

CAPÍTULO 5 INFORMACIÓN BASE Y METODOLOGÍA

5.1 INTRODUCCIÓN

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.

5.2 CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE BASE DE DATOS

A continuación, se presenta la metodología y proceso de construcción y validación de la base de datos utilizada en el presente estudio. Este punto está enfocado principalmente al análisis de las variables precipitación y temperatura.

5.2.1 Generalidades

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.

Estos procedimientos se automatizaron de manera tal que las labores de relleno y consistencia de la información fueran más expeditas, pero siempre manteniendo una revisión crítica.

El periodo de análisis varió para cada macrozona, debido a la disparidad de longitud de registro entre ellas. Finalmente, el proceso culminó satisfactoriamente, pudiendo tener series de tiempo lo suficientemente confiables para los análisis expuestos en este estudio.

Por medio de las Figuras B-10 y B-11 del Anexo B, se observa la disponibilidad de información de precipitación y temperatura para cada una de las cuencas de estudios, las que permiten identificar de mejor manera los periodos con mayor completitud de información.

5.2.2 Metodología de Relleno y Análisis de Consistencia

A continuación, se describe la metodología empleada para cada agregación temporal de relleno.

Relleno Anual

El proceso de relleno se puede describir en los siguientes pasos:

- 1) Se seleccionan las estaciones de referencia con la mejor correlación y disponibilidad de datos para rellenar el resto de las estaciones.
- 2) Utilizando una regresión lineal de valores anuales, los datos faltantes de la estación a rellenar son estimados utilizando la estación de referencia que presenta la mejor correlación mediante la ecuación:

$$y_f = m_a x_{ra} + n_a \quad \text{Ecuación 5.2-1}$$

Donde y_f representa el valor anual a rellenar, m_a y n_a representan los coeficientes de la relación lineal entre la estación a rellenar y la estación de referencia, y x_{ra} representa el valor anual de la estación de referencia.

- 3) Se seleccionan tres estaciones de buena disponibilidad de información para formar la estación patrón, la cual será utilizada para estimar las curvas dobles acumuladas de referencia (CDA).
- 4) Se compara la consistencia temporal de la estación patrón con las estaciones que forman parte de este. De existir inconsistencias se seleccionan otras estaciones para formar el patrón.
- 5) Se calcula la CDA de la estación a rellenar y se compara con la CDA patrón. De haber inconsistencias, se corrigen los valores de la estación a rellenar, asumiendo que los valores más cercanos al tiempo presente son los "correctos".
- 6) Una vez corregidos por CDA, se procede a corregir los valores mensuales.

Relleno Mensual

El relleno mensual puede describirse en los siguientes pasos:

- 1) Se utiliza la estación de correlación más alta con la estación a corregir para rellenar los datos mensuales. La ecuación de la corrección es la siguiente:

$$y_f = m_{am} x_{rm} + n_{am} \quad \text{Ecuación 5.2-2}$$

Donde y_f representa el valor mensual a rellenar, m_{am} y n_{am} representan los coeficientes de la relación lineal mensual entre la estación a rellenar y la estación de referencia, y x_{rm} representa el valor mensual de la estación de referencia.

- 2) Con los valores mensuales rellenados se calcula un valor total (para precipitaciones) o un valor medio anual (para temperaturas). Es posible que este valor anual derivado de los valores mensuales nuevos sea distinto al valor anual corregido en los pasos anteriores.
- 3) De haber diferencias, se corrigen los valores mensuales, primero ajustando los valores mensuales que originalmente fueron rellenados (se presume que estos podrían ser la fuente de la diferencia en primera instancia). Los valores mensuales rellenados se ajustan de tal manera que la suma de precipitaciones mensuales durante el año en cuestión sea equivalente a la precipitación total anual derivada del análisis de las CDA anuales. En el caso de las temperaturas, se ajustan las temperaturas mensuales de tal manera que la temperatura media anual sea consistente con la derivada del análisis de las CDA anuales.

Si después de este ajuste no hay concordancia entre los valores anuales derivados de los nuevos valores mensuales y el valor anual derivado del relleno anual, se procede a corregir todos los meses del año proporcionalmente. Esta situación se puede dar por ejemplo si es que el paso anterior da como resultado “precipitaciones negativas” (lo que claramente no es realista). En este caso se ajustan los valores observados originales a la baja para que la suma de los valores mensuales rellenados sea consistente con el relleno anual de datos. Otras metodologías (Fernández y Salas, 1995) sugieren que para preservar la variabilidad natural entre dos series de tiempo se debe agregar una componente de error aleatorio a la ecuación 5.2-1 y 5.2-2. En este caso no se utilizó dicho criterio y para el desarrollo del estudio se privilegió el uso de estaciones que mostrasen alta correlación y que no presentaran grandes vacíos. Es importante recalcar que un escenario óptimo considera la aplicación de la metodología de Fernández y Salas (1995), sobre todo en condiciones de alta incerteza (i.e., bajas correlaciones) y donde se deben rellenar periodos extensos, combinado con una simulación estocástica de Monte Carlo para así poder ofrecer intervalos de confianza a la estimación del dato faltante.

5.2.3 Resultados del Procedimiento de Relleno

A continuación, se presentan los resultados del proceso metodológico de relleno y consistencia siguiendo la secuencia lógica del algoritmo implementado. Se presentan ejemplos de cada paso, dado lo impráctico de presentar cada resultado de relleno para cada cuenca analizada. La cantidad de estaciones rellenadas por cuenca se presentan en el Cuadro 5.2-1.

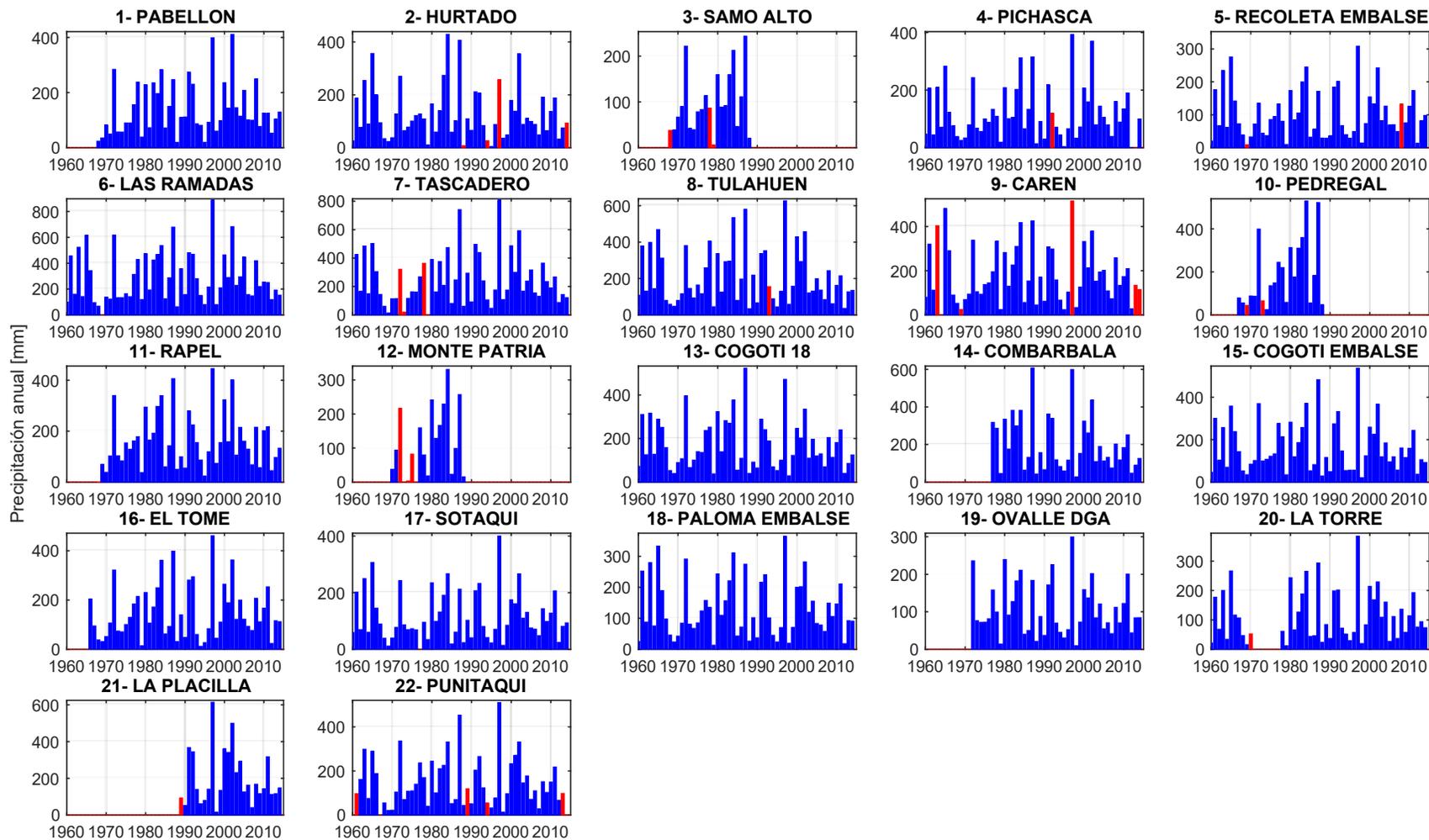
Cuadro 5.2-1 Estaciones Disponibles por Cuenca

Macrozona	Cuenca	N° de estaciones de precipitación	N° de estaciones de temperatura
Norte	Loa	27	10
	Copiapó	9	4
	Limarí	22	6
Centro	Aconcagua	18	4
	Maipo	39	11
Sur	Bío-Bío	27	7
	Imperial	22	4
Austral	Aysén	11	8

Fuente: Elaboración Propia.

Como se mencionó anteriormente, resulta impráctico el proceso de rellenar decenas de estaciones sin pasar por una automatización, debido a la elevada cantidad de información a procesar y pensando en la posibilidad también de extender el relleno a toda la base de datos del CR2 si fuese necesario. Por esta razón se realizó una automatización para el procedimiento de relleno. Esta automatización debe incluir todos los pasos anteriores y resultar en la misma precisión que un “operador manual” podría lograr. Los pasos que se han seguido en la implementación del relleno de forma semi-automática son los siguientes.

- l) Selección de las estaciones que están dentro del límite geográfico de la cuenca de interés. Solo se eligieron estaciones con 10 años o más de datos disponibles pre-relleno. La Figura 5.2-1 muestra un ejemplo del diagnóstico de la información para la cuenca del río Limarí.



Nota: Los valores mostrados en rojo representan valores inválidos debido a la presencia de datos faltantes en la serie histórica de datos mensuales.
Fuente: Elaboración Propia.

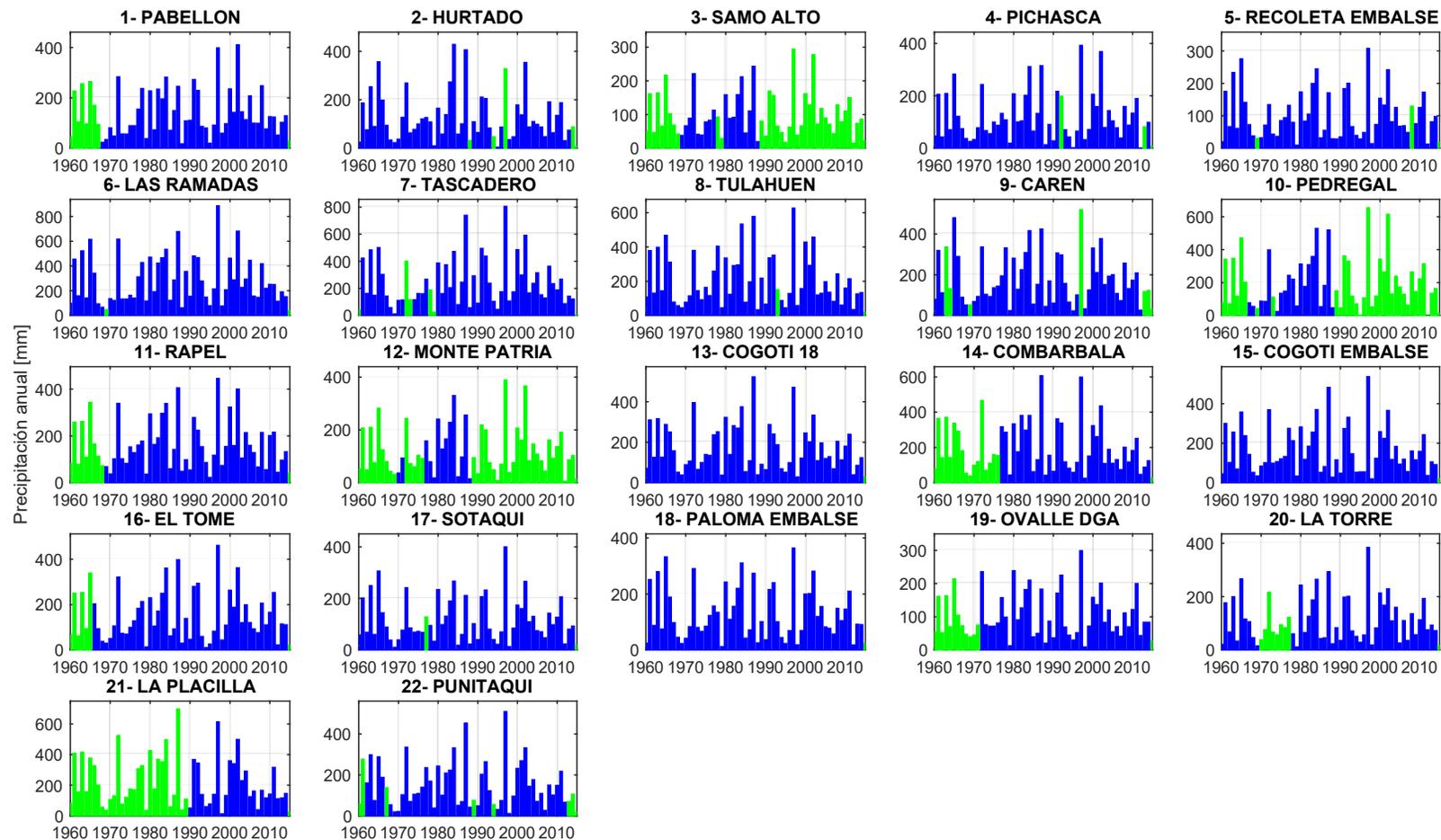
Figura 5.2-1 Series de tiempo de las estaciones de precipitación dentro de la cuenca del Río Limarí.

- II) Identificación de la estación con mejor correlación y mayor disponibilidad de datos que pueda ser usada para rellenar. Se hizo una selección de periodo en que se generarán los datos rellenados.

Luego de la identificación de las estaciones, se procede a calcular la correlación de cada estación con todo el resto. Se seleccionan las estaciones de mayor correlación para relleno asegurándose que sean aquellas con una buena disponibilidad de información, entendiéndose esto como aquellas estaciones que presentan una extensión suficiente como para cubrir el máximo del periodo 1960-2015. Para cada estación a rellenar se escoge la estación de relleno con mayor correlación. En caso de que exista información faltante en las estaciones utilizadas para rellenar, se escoge un grupo de estaciones alternativas que serán utilizadas para rellenar las estaciones que lo requieran.

- III) Relleno de datos anuales faltantes o incorrectos mediante correlación lineal entre estación de relleno y estación a rellenar.

Los resultados del proceso de relleno se muestran en la Figura 5.2-2.



Nota: Los valores marcados en verde corresponden a valores que fueron rellenados utilizando correlaciones con estaciones cercanas.

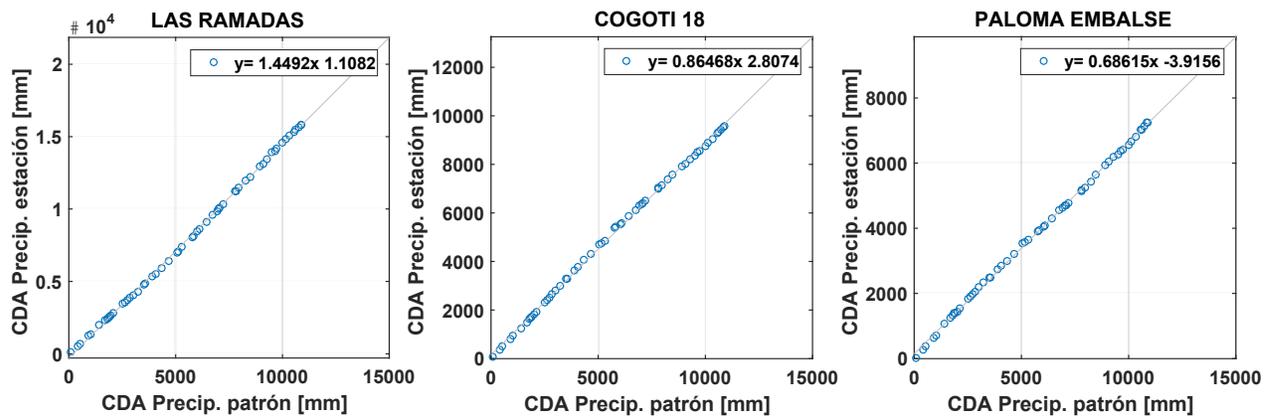
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.2-2 Resultados de relleno de valores anuales de precipitación para la cuenca del Río Limarí.

Se debe tener presente que el algoritmo rellena por defecto todas las series en el periodo de análisis. Si se tiene en consideración que la extensión de una serie meteorológica no debiese superar el 50% de su longitud de registro, existen estaciones que no correspondería utilizarse para el análisis temporal u espacial en este estudio, debido a que incorporan una cantidad mayor de información de otra estación más que la propia, induciendo a posibles errores. Sin embargo, se presenta de igual forma este relleno, pues es parte de la automatización del proceso en sí.

- IV) Selección de tres estaciones para formar CDA patrón y comprobación de consistencia de éste. Luego se procede a graficar todas las CDA y a seleccionar las estaciones que presentan inconsistencias con el patrón.

Luego de realizado el relleno anual, se escogen tres estaciones para formar la estación patrón de las curvas doble acumuladas (CDAs). Estas estaciones fueron elegidas en base a disponibilidad de información y correlación con el resto de las estaciones. El patrón fue chequeado por inconsistencias internas, volviéndose a escoger tres estaciones en caso de que se vean datos erróneos. Un ejemplo de chequeo de consistencia para el patrón escogido para la cuenca del Limarí se muestra en la Figura 5.2-3.

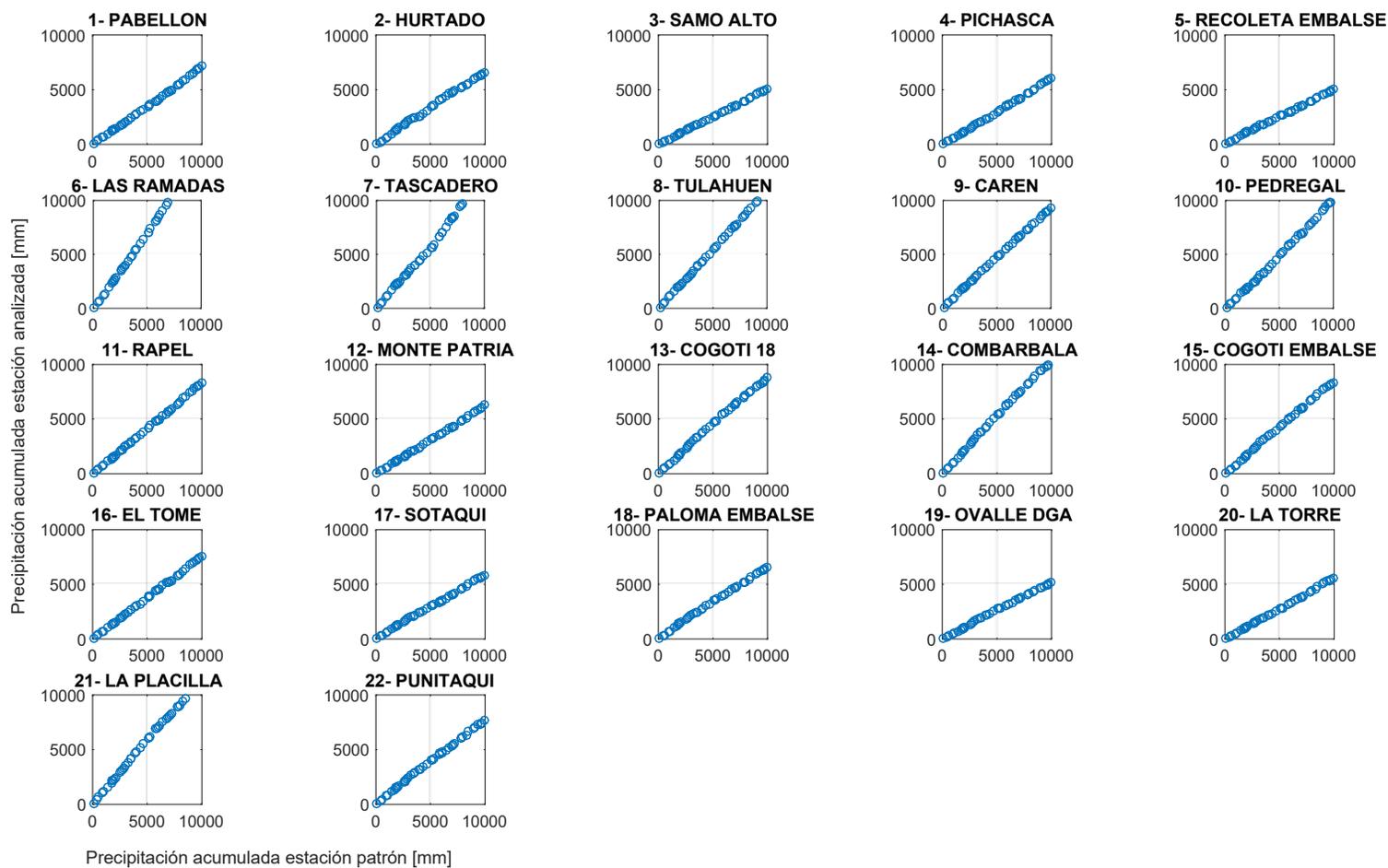


Nota: El eje-x representa los valores del patrón, mientras que el eje-y representa los valores de la estación a chequear.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.2-3 Ejemplo de chequeo de estaciones utilizadas para formar patrón.

Luego de la comprobación de la consistencia de las estaciones que forman el patrón, se procede a verificar la consistencia de cada una de las estaciones de la cuenca. Esta comprobación se hace de forma manual, verificando cada una de las CDAs de la cuenca. La Figura 5.2-4 presenta las CDA de todas las estaciones de la cuenca del Limarí. Cada una de estas curvas fue examinada visualmente con criterio experto, buscando aquellas estaciones en que podrían existir inconsistencias en los datos históricos.

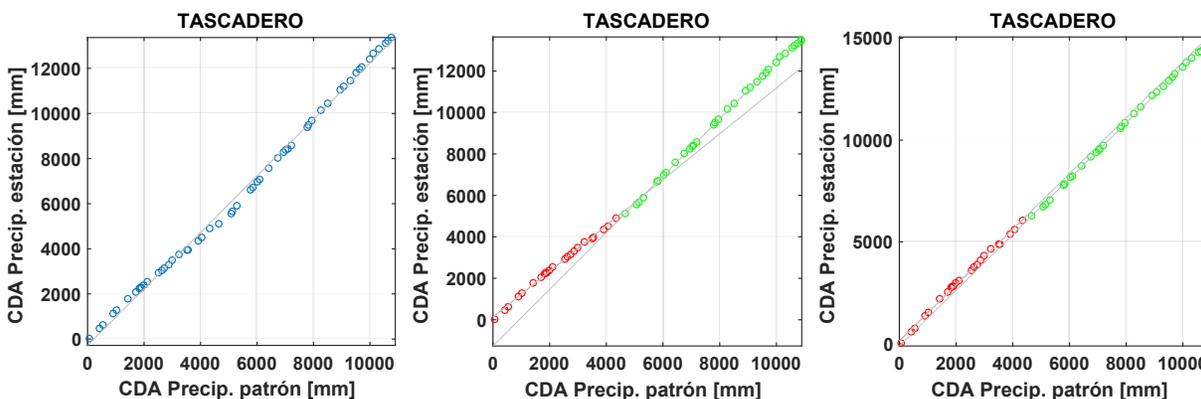


Nota: El eje-x corresponde a la precipitación acumulada en la estación patrón, mientras que el eje-y a la precipitación en la estación analizada. Los valores van de 0 a 15.000 mm para ambos ejes.
 Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.2-4 CDA de todas las estaciones de precipitación de la cuenca del Río Limarí.

Luego, se procedió a examinar en detalle cada una de las estaciones, determinando en que zona se presentaban valores anómalos. Los valores más antiguos fueron corregidos utilizando la pendiente de los valores más recientes (que se consideran consistentes). Un ejemplo de esto es presentado en la Figura 5.2-5. Para efectos de este informe, los valores de la CDA fueron graficados siguiendo una convención distinta a la tradicional: el valor de origen representa el valor más antiguo de la serie histórica. Se utilizó esta convención por motivos prácticos al momento de programar las rutinas de procesamiento. Es importante aclarar que esta diferencia de representación gráfica no tiene ninguna consecuencia en los valores corregidos.

- V) Corrección semi-automática de valores de las estaciones de acuerdo a input manual. El input consiste en identificar los valores donde se ve un quiebre y los valores donde se presume que los datos son consistentes. Calculando la diferencia entre las dos pendientes se corrigen los valores inconsistentes.



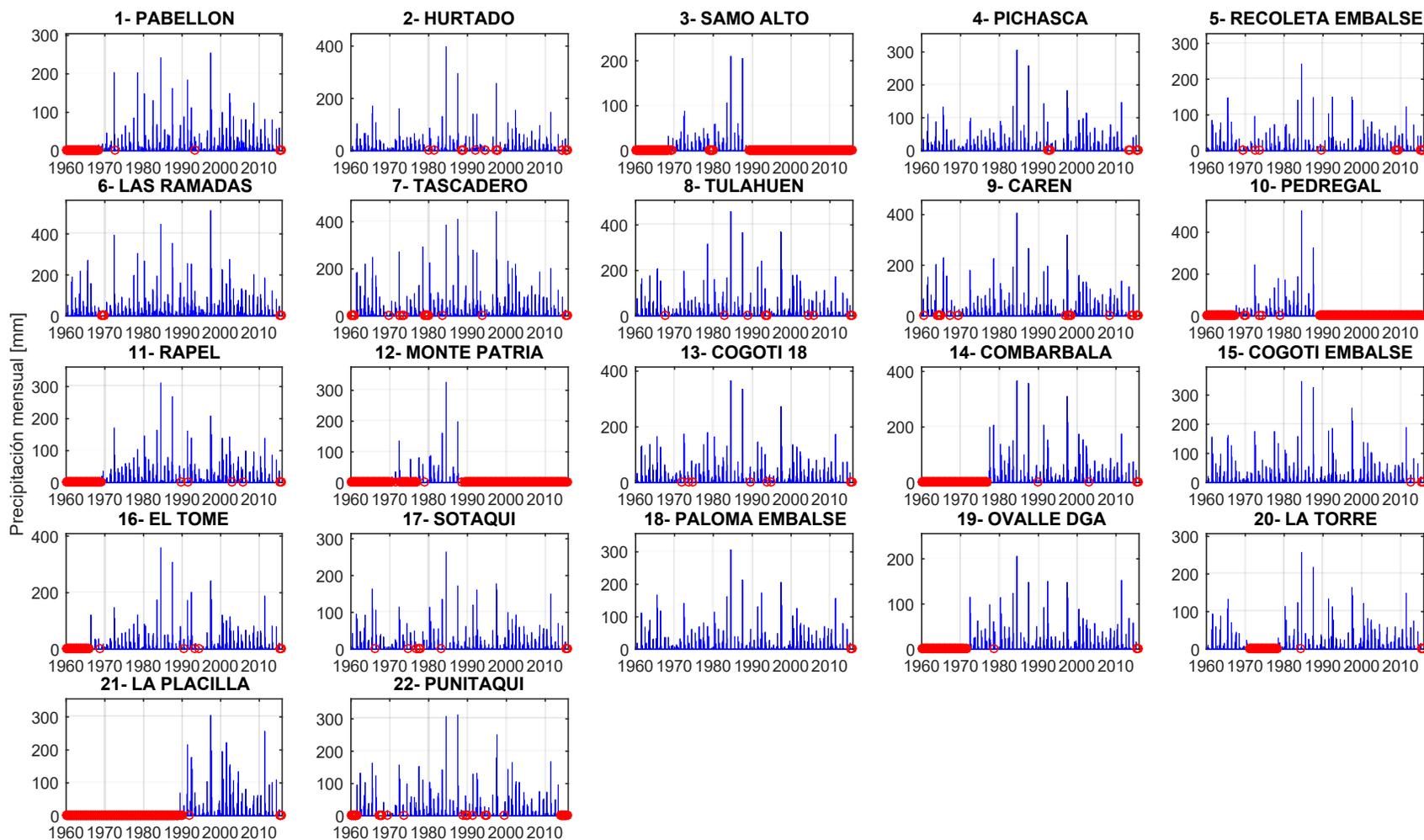
Nota: El panel izquierdo muestra los valores originales. El panel central muestra los valores originales, con los puntos en rojo identificados como inconsistentes (leve inconsistencia). Los puntos en verde muestran los puntos que se usarán para calcular la pendiente de referencia. En el panel derecho se muestran los puntos ya corregidos.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.2-5 Ejemplo de corrección de CDA para la estación Pirque.

- VI) Finalizada la corrección anual se pasa a la corrección mensual de valores.

Primero se grafican los valores mensuales y se calculan las correlaciones mensuales de todas las estaciones. Luego se seleccionan varias estaciones que servirán para rellenar al resto, en base a su completitud de datos y calidad de información. Una visión de la información antes de pasar por el proceso de relleno (pre-relleno) puede observarse en la Figura 5.2-6.



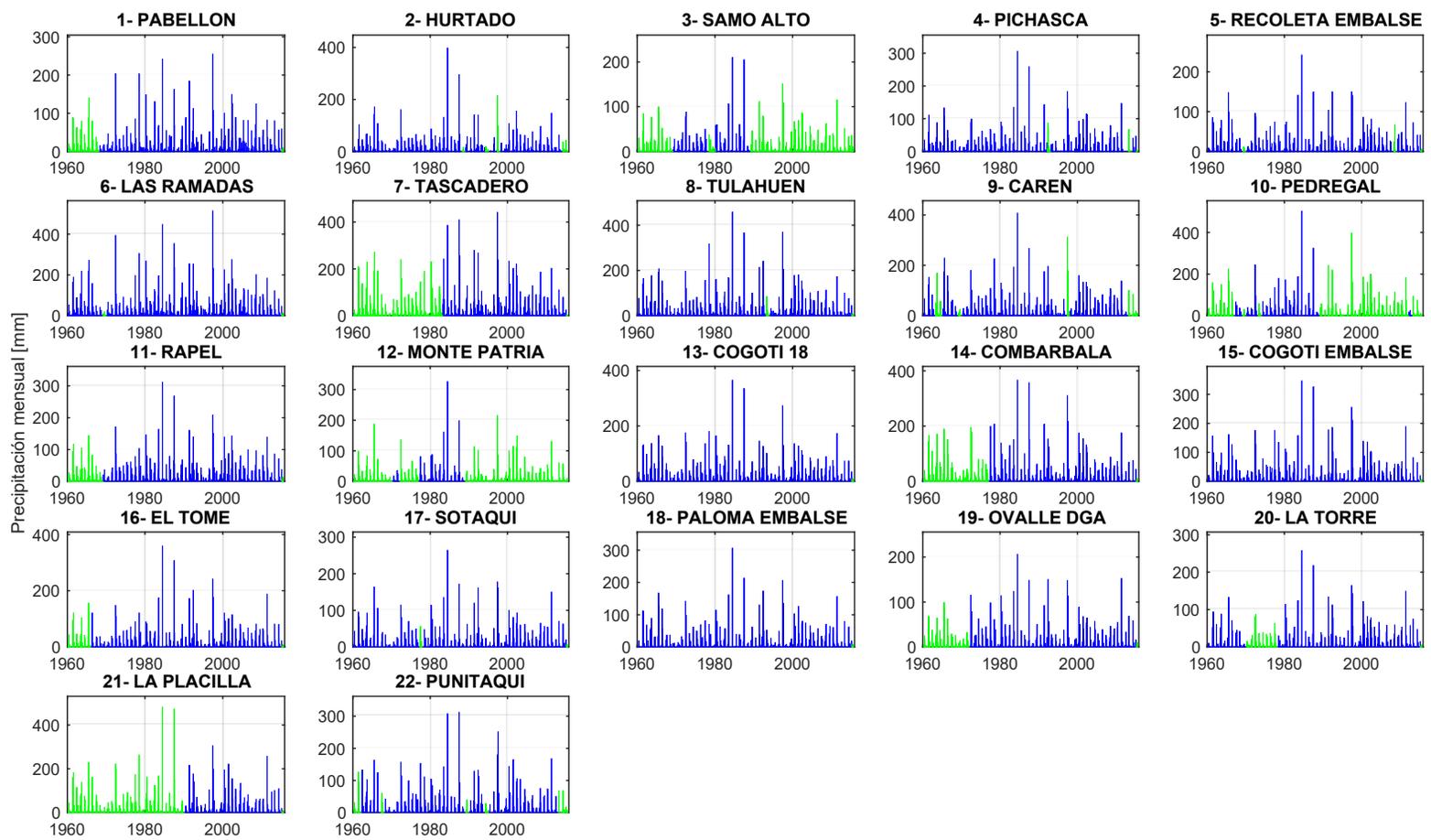
Nota: Los círculos rojos denotan meses en que no existe información o solo información incompleta.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.2-6 Relleno de valores de precipitación mensual en periodo 1960 a 2014 para la cuenca del Río Limarí.

- VII) Relleno de valores mensuales utilizando estación de mejor correlación, y utilizando relaciones distintas para cada mes.
- VIII) Recorrección de valores mensuales para lograr consistencia con los valores anuales corregidos.

Los datos mensuales de cada mes son rellenos utilizando una regresión lineal con la estación de referencia que presentó la mejor correlación, obteniéndose datos mensuales históricos para todas las estaciones. Luego de ser rellenos se procede a ajustar los valores mensuales de acuerdo a los valores anuales encontrados en la fase de relleno anual, obteniéndose una serie histórica de valores mensuales consistente con los valores anuales rellenos. La Figura 5.2-7 muestra la serie de tiempo finalizada de datos históricos mensuales.



Nota: Los datos originales se muestran en azul, mientras que los datos rellenados o corregidos se muestran en verde. Los círculos rojos denotan meses en que no existe información o solo información incompleta luego del relleno (para Limarí no existió este problema).

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.2-7 Serie datos históricos mensuales rellenados finales en cuenca del río Limarí.

Los pasos I al VIII fueron aplicados para cada una de las cuencas de interés y, salvo excepciones, la mayoría presentó una adecuada correlación y relleno exitoso. Un cuadro resumen de las cuencas analizadas y su disponibilidad de información se presentan en el Cuadro 5.2-2. Para cada cuenca se incluye una recomendación de las mejores estaciones en cuanto a disponibilidad y calidad de la información. Las estaciones presentadas son aquellas que necesitaron un mínimo de datos rellenos o corregidos (menores al 10%). En caso de que no exista un mínimo de tres estaciones que cumplan dicho criterio, se mencionan las estaciones de mejor calidad. La ubicación de las estaciones utilizadas en los análisis detallados en este capítulo se presenta en las Figuras B-12 a B-27 pertenecientes al Anexo B. En el Anexo C se presentan los resultados de la metodología de relleno utilizada para las cuencas, mientras que el Anexo D presenta la estadística rellena, en conjunto con sus estadísticos más relevantes.

Cuadro 5.2-2 Resumen de Información y Observaciones Respecto a cada Cuenca.

Cuenca	N° de estaciones de precip. recomendadas	N° de estaciones de temp. recomendadas	Observaciones
Loa	27 El Loa Calama AD (1) Calama (1) Chiu-Chiu (1) Lequena (2) Parshall N°2 (1) Inacaliri (2) Conchi Embalse (1) Quillagua (1) Linzor (2) Toconce (2) Ayquina (2)	10 El Loa Calama AD	<p>Precipitación: Si bien se rellenan meses faltantes entre los años 1975 a 2015, en general las correlaciones entre las distintas estaciones fueron bajas. Se recomienda utilizar aquellas estaciones de precipitación que tengan una baja cantidad de datos rellenos, tales como El Loa Calama AD, Calama (ambas de 1975 a 2015), Parshall N2, Inacaliri o Toconce. Para precipitaciones se dividió la cuenca en dos grupos. El primer grupo (Loa 1) corresponde a precipitaciones características de la precordillera desérticas (precipitaciones esporádicas y muy bajas). El segundo grupo (Loa 2) corresponde a estaciones de la precordillera desértica (mayores precipitaciones durante el año). Las figuras fueron generadas con esta convención, pero los datos fueron entregados en una base de datos unificada. El grupo al cual pertenece cada estación aparece entre paréntesis en el listado de estaciones recomendadas.</p> <p>La mayoría de las curvas CDA de Loa no fueron posibles de corregir adecuadamente ya que no se encontró un patrón que fuese consistente con todas las estaciones. Es posible que muchas de estas estaciones tengan eventos de precipitación aislados y por ende sea difícil crear una estación patrón de referencia que sea consistente a través de todo el dominio. Se recomienda revisar las CDA post-relleno de las estaciones escogidas para el análisis y entender las limitaciones del método. Existen dos meses de la serie histórica de alguna de las estaciones que no pudieron ser rellenos mediante correlaciones por falta de información. Se rellenan estos meses utilizando el promedio histórico del mes, multiplicado por el porcentaje de precipitación anual del mes previo y el posterior. En general estos meses son de precipitaciones muy bajas, del orden de 0 a 3 milímetros.</p> <p>Temperatura: Se recomienda utilizar estación El Loa Calama AD entre 1970 y 2015. Se puede también utilizar la estación Parshall N 2 entre 1970 y 2015, aunque su calidad es menor a la de El Loa Calama AD.</p>

Cuenca	N° de estaciones de precip. estaciones recomendadas	N° de estaciones de temp. estaciones recomendadas	Observaciones
Copiapó	9 Manflas Lautaro Embalse Copiapó Jorquera en la Guardia Desierto de Atacama Caldera A.P.	4 Copiapó DMC Lautaro Embalse	Precipitación: Se rellenaron los meses faltantes para el periodo 1960-2015. Temperatura: Baja correlación y disponibilidad de datos hace difícil relleno para las temperaturas, se recomienda utilizar estaciones Lautaro Embalse entre 1970 y 2015 y Copiapó DMC entre 1970 y 2015.
Limarí	22 Pichasca Recoleta Embalse Cogotí Embalse Sotaqui Paloma Embalse Punitaqui Rapel El Tomé Hurtado Tulahuén Carén Cogotí 18	6 Las Ramadas Carén Cogotí Embalse Paloma Embalse	Precipitación: Se rellenaron los meses faltantes para el periodo 1960-2015. Temperatura: Se rellenó para el periodo 1970-2015. Se recomienda no usar las estaciones Hurtado o Recoleta Embalse dado que las correlaciones que se obtuvieron para relleno no eran adecuadas (del orden de 0,5), por lo que gran parte de los datos rellenos de estas estaciones podrían no tener la calidad adecuada para los objetivos de un análisis temporal.
Aconcagua	18 Riecillos Catemu Estero Rabuco Vilcuya San Felipe Resguardo Los Patos Lo Rojas	4 Vilcuya	Precipitación: Se rellenaron los meses faltantes para el periodo 1960-2015. Temperatura: Baja correlación entre estaciones de temperatura y falta de información adecuada dificultó el relleno de esta variable. Se recomienda utilizar los datos no-rellenados para Vilcuya entre los años 1967-2010, y entre 1980-2010 para el resto de las estaciones.
Maipo	39 Rincón de los Valles Caleu Terraza Oficinas DGA Cerrillos de Leyda Quinta Normal Colliguay Carmen de las Rosas	11 Quinta Normal Pudahuel	Se rellenaron precipitaciones en meses faltantes en el periodo 1960-2015, temperaturas para el periodo 1970-2015.
Bío-Bío	27 Cerro El Padre Quilaco Mulchén Los Ángeles Las Achiras	7 Quilaco	Precipitación: Se rellenaron los meses faltantes para el periodo 1960-2015. Temperaturas: Se rellenaron valores faltantes entre 1970 y 2015. Como recomendación, debido a la mejor información disponible observada, se recomienda utilizar la estación Quilaco entre 1970-2015 como una buena estación base.

Cuenca	N° de estaciones de precip. estaciones recomendadas	N° de estaciones de temp. estaciones recomendadas	Observaciones
Imperial	22 Lumaco Quillén Lautaro Pueblo Nuevo (Temuco) Vilcún Maquehue	4 Maquehue Temuco	Precipitación: Se rellenaron los meses faltantes para el periodo 1960-2015. Temperatura: Se rellenaron valores faltantes entre 1970 y 2015. Como recomendación, debido a la mejor información disponible observada, se recomienda utilizar la estación Maquehue entre 1970-2015 como una buena estación base.
Aysén	11 Teniente Vidal Puerto Aysén Balmaceda	8 Puerto Aysén Teniente Vidal Balmaceda	Se rellenaron precipitaciones faltantes para el periodo 1960-2015, temperaturas para el periodo 1970-2015. Se recomienda utilizar las estaciones Tte. Vidal y Balmaceda entre 1970-2015.

Fuente: Elaboración Propia.

5.2.3.1 Resultados Relleno Estadística Pluviométrica

Completado el proceso de relleno de información pluviométrica, se construyó el Cuadro 5.2-3 donde se resumen las principales características de las cuencas en estudio subdivididas por macrozona.

Cuadro 5.2-3 Resumen Estadística Pluviométrica Rellenada.

Macrozona	Cuenca	Estación	Precip. Media Anual (mm)	Precip. Media 2010 - 2014 (mm)	Fracción PP *	Régimen 2010 - 2014 **				
						2010	2011	2012	2013	2014
Norte	Río Loa	Calama	6,5	8,0	1,23	N	H	S	H	MH
		El Loa Calama AD	3,4	6,3	1,86	H	H	N	N	MH
		Linzor	156,6	145,0	0,93	N	MH	N	S	MS
	Río Copiapó	Jorquera en la Guardia	15,3	16,8	1,10	H	H	MS	H	MH
		Lautaro Embalse	33,8	47,5	1,40	MH	H	N	H	MH
		Desierto de Atacama Caldera AP	41,9	53,9	1,28	N	MH	S	N	H
	Río Limarí	Las Ramadas	153,2	122,8	0,80	N	N	MS	N	S
		Paloma Embalse	131,5	111,8	0,85	H	H	MS	N	N
		Punitaqui	287,4	193,5	0,67	N	H	S	S	N
Centro	Río Aconcagua	Riecillos	383,3	273,7	0,71	S	MS	S	MS	MS
		San Felipe	204,7	138,7	0,68	N	S	N	MS	S
		Lo Rojas	512,6	260,9	0,51	S	MS	H	MS	N
	Río Maipo	San Antonio (Punta Panul)	358,1	224,9	0,63	S	S	N	MS	MS
		San José de Maipo Retén	310,6	201,0	0,65	S	MS	H	S	S
		Quinta Normal Santiago	480,1	338,3	0,70	N	MS	S	MS	S

Macrozona	Cuenca	Estación	Precip. Media Anual (mm)	Precip. Media 2010 - 2014 (mm)	Fracción PP *	Régimen 2010 - 2014 **				
						2010	2011	2012	2013	2014
Sur	Río Bío-Bío	Laguna Malleco	931,1	923,9	0,99	MS	S	S	N	N
		Las Achiras	1.029,3	895,6	0,87	N	N	S	MS	S
		Río Bío-Bío en Desembocadura	2.988,6	2.541,5	0,85	S	N	MS	S	MH
	Río Imperial	Vilcún	1.139,2	939,3	0,82	S	N	S	S	S
		Puerto Saavedra	1.148,4	920,7	0,80	MS	S	MS	MS	MS
		Maquehue Temuco AD	1.604,9	1.443,4	0,90	MS	S	MS	MS	MS
Austral	Río Aysén	Puerto Aysén	2.544,8	2.547,7	1,00	H	N	S	N	H
		Teniente Vidal	1.059,0	1.023,9	0,97	N	MS	N	N	H
		Balmaceda AD	577,4	519,7	0,90	N	MS	H	S	S

(*): Razón entre la precipitación media del periodo 2010-2014 respecto a la precipitación media anual.

(**): MH muy húmedo; H húmedo; N: normal; S seco; MS muy seco.

Fuente: Elaboración Propia.

5.2.3.2 Resultados Relleno Estadística de Temperatura

Como resultado del proceso de relleno de información de temperatura, se presenta el Cuadro 5.2-4 donde se resumen las principales características de las cuencas en estudio.

Cuadro 5.2-4 Resumen Estadística de Temperatura Rellenada.

Macrozona	Cuenca	Estación	Temp. Media Anual (°C)	Temp. Media 2010 - 2014 (°C)	Fracción T*
Norte	Río Loa	Calama	12,7	13,3	1,05
		El Loa Calama AD	10,1	9,9	0,98
	Río Copiapó	Jorquera en la Guardia	16,8	16,7	1,00
		Lautaro Embalse	19,5	19,3	0,99
	Río Limarí	Las Ramadas	17,0	16,7	0,98
		Paloma Embalse Punitaqui	17,0 16,4	17,7 16,6	1,04 1,02
Centro	Río Aconcagua	Riecillos	15,3	15,4	1,01
		San Felipe	14,8	14,5	0,98
		Lo Rojas	15,1	15,2	1,00
	Río Maipo	San Antonio (Punta Panul)	14,8	14,5	0,98
		San José de Maipo Retén	14,9	15,6	1,05
		Quinta Normal Santiago	8,7	8,9	1,02

Macrozona	Cuenca	Estación	Temp.	Temp.	Fracción
Sur	Río Bío-Bío	Laguna Malleco	14,0	14,3	1,03
		Las Achiras	8,9	9,3	1,05
		Río Bío-Bío en Desembocadura	12,7	13,8	1,08
	Río Imperial	Vilcún	11,6	11,8	1,02
		Puerto Saavedra	12,1	12,2	1,01
		Maquehue Temuco AD	8,6	8,7	1,01
Austral	Río Aysén	Puerto Aysén	9,3	9,3	1,00
		Teniente Vidal	6,3	6,6	1,05
		Balmaceda AD	7,0	7,4	1,06

(*): Razón entre la temperatura media del periodo 2010-2014 respecto a la temperatura media anual.

Fuente: Elaboración Propia.

Analizando los resultados del cuadro anterior, se puede comentar que tanto para la macrozona austral como sur, existen aumentos (y mantención) de temperatura consistentes en las estaciones de costa, valle y cordillera. Para las macrozonas centro y norte en general se observan comportamientos disímiles. Para la macrozona centro se observan aumentos de temperatura para las estaciones de cordillera, pero difieren su comportamiento en valle y costa. Por otro lado, la macrozona Norte, presenta cambios, pero bastante más erráticos, siendo los más importantes los ocurridos en la cuenca del Limarí, con sus aumentos de temperatura en valle y costa. La cuenca del Copiapó prácticamente no presenta cambios en esas estaciones y la cuenca del Loa solo aumenta en la estación de Calama.

5.2.4 Escalas de Agregación Temporal

Para los fines del estudio, se han escogido tres agregaciones temporales para cada cuenca, anual, de invierno y de verano. Producto de que los regímenes hidrológicos de las cuencas seleccionadas son distintos, la definición de cada una de las agregaciones se ha hecho para respetar dicho régimen en base a la inspección de curvas de variación estacional y de criterio experto. Las agregaciones se presentan en el Cuadro 5.2-5.

Cuadro 5.2-5 Agregaciones Temporales para las Cuencas Seleccionadas.

Cuenca	Período Invierno ■	Período Verano ■	Meses												
			E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Loa	ENE-ABR	MAY-DIC	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Limarí	ABR-SEP	OCT-MAR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Copiapó	ABR-SEP	OCT-MAR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Aconcagua	ABR-SEP	OCT-MAR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Maipo	ABR-SEP	OCT-MAR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Bío-Bío	ABR-NOV	DIC-MAR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Imperial	ABR-DIC	ENE-MAR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Aysén	ABR-DIC	ENE-MAR	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

Fuente: Elaboración Propia.

Por ejemplo, en el caso de la precipitación para la cuenca del río Copiapó, el periodo de invierno corresponde a la suma de las precipitaciones entre los meses de enero a abril, mientras que su periodo de verano corresponde a la suma de las precipitaciones entre los meses de mayo a diciembre (inclusive). En el caso de la temperatura, la única diferencia es que los periodos se calculan con el promedio de los valores y no con las sumas.

5.3 METODOLOGÍAS DE ANÁLISIS

A continuación, se presentan las metodologías utilizadas para el análisis de las diferentes variables hidrometeorológicas, cuyos resultados serán presentados en el capítulo siguiente.

5.3.1 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.

Comprender el patrón espacial que tiene una variable constituye un conocimiento básico para detectar la presencia de microclimas, la dependencia de factores orográficos, la variación que tiene la magnitud conforme se presentan cambios en la latitud (en la medida que se aleja del eje de Ecuador) y la variabilidad que se observa desde costa a cordillera.

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. El objetivo de esta metodología es incorporar los factores fisiográficos y geomorfológicos de las cuencas en estudio y utilizarlos para distribuir espacialmente las variables. El resultado de este capítulo proveerá de la variabilidad espacial de la precipitación y temperatura para cada una de las cuencas estudiadas con la mejor información disponible en cada una de ellas.

Como parte del análisis espacial de las variables de interés se construyeron modelos topoclimáticos de temperatura y precipitación. Su objetivo principal es representar la

información hidrometeorológica de una manera espacialmente distribuida, resultando en una estimación de los valores de variables que normalmente se miden en un solo punto. Este acápite presenta la definición de los modelos, limitaciones de éstos, la metodología y los resultados obtenidos.

5.3.1.1 Definición y Alcances

Un modelo topoclimático (Qiyao et al., 1991; Hijamns et al., 2005; Canessa, 2006) consiste en una relación matemática entre variables topográficas o geográficas (elevación, aspecto, latitud, longitud, etc.) y el valor de una variable meteorológica (precipitación media total anual, temperatura media anual, etc.) para un dominio regional determinado. La variable estudiada puede ser una variable medida para un periodo de tiempo dado (por ejemplo, temperatura para el mes de enero 1986) o una variable climatológica (por ejemplo, temperatura para el mes de enero entre 1986 y 2016).

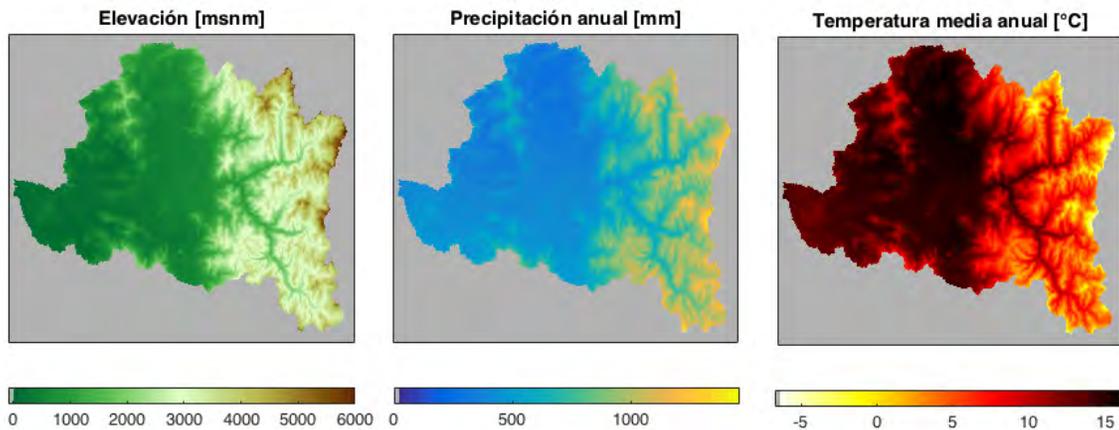
Los modelos topoclimáticos pueden construirse para dominios regionales debido a la inherente relación entre el clima y la fisiografía de una determinada zona. Un ejemplo de esta relación es la disminución de la temperatura con la elevación en la cordillera, o el gradiente de precipitaciones que existe entre el desierto de Atacama y el sur de Chile (influencia de la latitud en la precipitación). Estas relaciones entre fisiografía y clima pueden formalizarse vía modelos matemáticos, como por ejemplo modelos lineales (regresión múltiple) o no-lineal (spline cúbica, por ejemplo), y en la práctica constituyen interpoladores de datos climáticos en base a datos observados y variables topográficas. Una de las ventajas de los modelos topoclimáticos es que permiten estimar la distribución espacial de una variable climatológica sin la necesidad de llevar a cabo simulaciones con modelos numéricos meteorológicos u otros métodos de mayor complejidad computacional, pero sin dejar de lado la influencia de la fisiografía en la meteorología. Métodos de interpolación que no consideran las variables fisiográficas tendrán un rendimiento sumamente pobre en zonas complejas como los Andes o zonas en las cuales se observan variaciones climáticas latitudinales importantes.

Para este estudio se plantea la utilización de un modelo de regresión múltiple, el cual ha dado resultados exitosos en ejercicios aplicados anteriormente en el país (Morales et al., 2006; Díaz et al., 2010; Díaz et al., 2011).

Un modelo topoclimático de regresión múltiple puede ser descrito de la siguiente manera (Ecuación 5.3-1):

$$F(x_0, x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=0}^n a_j x_j \quad \text{Ecuación 5.3-1}$$

Donde los coeficientes a_j representan los coeficientes que multiplican las variables topográficas o geográficas x_j . La variable climatológica modelada está representada por la función F . Los coeficientes a_j son obtenidos utilizando los datos climatológicos observados F como variable dependiente a las variables topográficas y geográficas x_j . La Figura 5.3-1 presenta un ejemplo de la aplicación de un modelo topoclimático simplificado para la cuenca del río Maipo. El primer cuadro de la figura presenta el mapa de elevaciones de la cuenca. El segundo y tercer cuadro presentan la precipitación anual y temperatura media anual, respectivamente. Ambas variables fueron derivadas utilizando modelos topoclimáticos generados utilizando datos de elevación, coordenada UTM Este y coordenada UTM Norte. Los parámetros de los modelos topoclimáticos generados fueron estimados utilizando los datos de 39 estaciones de precipitaciones y 11 estaciones de temperatura dentro de la cuenca. La resolución espacial de este ejercicio fue de 30m x 30m.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-1 Ejemplo de generación de modelo topoclimático para la cuenca del Río Maipo utilizando la base de datos CR2.

En el presente estudio se utilizaron de manera experimental modelos topoclimáticos para distribuir la climatología observada de las variables relevantes en cada una de las cuencas estudiadas. Se presenta esta metodología como una alternativa (basada en relaciones físicas) al uso de isoyetas e isotermas, las cuales son trazadas en general de forma manual.

5.3.1.2 Metodología de aplicación

Para cada una de las cuencas de las distintas macrozonas de este estudio se seleccionaron las estaciones con longitud y calidad de datos adecuados, calculándose el promedio climatológico de las variables de interés (precipitaciones de verano, invierno, y anuales, temperaturas de verano, invierno y anuales). Se utilizaron los datos ya rellenados y con

control de calidad realizado en capítulos anteriores. A partir de la base de datos de elevación se derivaron las variables fisiográficas exposición al norte (Molotch et al., 2005) y pendiente. Además de la elevación, la variable exposición norte se escogió debido a su posible importancia en términos del balance radiativo (i.e., una mayor exposición norte se traduce en mayor radiación). Esta variable consiste en un índice que representa la exposición al norte de un punto. Se consideraron, además de las variables geográficas latitud y longitud. Este paso da como resultado una caracterización geográfica y fisiográfica para cada una de las estaciones, además de los valores climatológicos de cada una de las variables de interés (variable dependiente del modelo de regresión múltiple).

Luego, utilizando el software *Matlab* y la función *fitlm* se ajustó un modelo de regresión múltiple en la base de datos para cada cuenca, utilizando las variables independientes mencionadas anteriormente como predictores de la variable climatológica. Es importante recalcar que el software utilizado no es indispensable y que existen diversas herramientas similares gratuitas (como por ejemplo el software estadístico *R*) para llevar a cabo el ajuste. Para cada una de las variables y cuencas analizadas se obtuvo una relación entre las variables dependientes e independientes. Para la precipitación se emplearon las variables elevación, pendiente, latitud, longitud y exposición al norte. Estas variables fueron elegidas como manera de incorporar las variaciones orográficas de precipitación (aproximadas por la incorporación de elevación, pendiente y exposición al norte de los modelos) además de las variaciones debido a climas marítimos (longitud) y variaciones Norte-Sur (latitud). Para la temperatura debido al menor número de estaciones no era posible incorporar el mismo set de variables predictoras y se utilizaron las variables elevación, latitud y longitud como predictores. En el caso de la temperatura el efecto de la elevación es probablemente el más importante (en la escala de las cuencas evaluadas en este estudio), seguido de variaciones debido a cercanías al mar (longitud) y posibles variaciones Norte-Sur del clima (latitud).

Los modelos topoclimáticos fueron aplicados a cada cuenca, y los resultados son presentados en los acápites 6.2.1 (precipitación) y 6.3.1 (temperatura). Los modelos detallados (i.e., la función matemática resultante del ajuste de los modelos) se presentan en el Anexo E. Un ejemplo de esta función matemática para la precipitación total anual del río Copiapó se presenta a continuación en la ecuación 5.3-2:

$$PP_{\text{anual}} = 0,01423 * H - 17,705 * S - 7,5123 * N + 0,20657 * Lt + 33,213 * Ln - 1.004,5$$

Ecuación 5.3-2

En este caso, las variables utilizadas en el modelo corresponden a las siguientes, con las unidades detalladas:

Elevación: H (m s.n.m.)
Pendiente: S (°)
Exposición Norte: N (-), definido como el valor $N = \cos(\text{aspecto}) * \sin(\text{pendiente})$, y cuyo valor va desde -1 a 1, donde -1 corresponde a un valor de exposición sur y 1 corresponde a un valor de exposición norte (Molotch et al., 2005).
Latitud: Lt (°)
Longitud: Ln (°)

Otro ejemplo se presenta para la temperatura media anual de la cuenca del río Maipo (ecuación 5.3-3):

$$T_{\text{anual}} = -0,0043345 * H + 2,4094 * Lt + 3,9288 * Ln + 376,1 \quad \text{Ecuación 5.3-3}$$

En esta última ecuación se utiliza la misma convención de variables y unidades que fue utilizada en el caso de la precipitación para sus variables independientes. En el caso de la temperatura se exploró la influencia del factor exposición norte y no se encontró que mejorara el modelo, posiblemente debido a que en general las estaciones de temperatura se encuentran en zonas planas y por ende el efecto de la exposición a la radiación podría no ser importante.

5.3.2 Análisis Temporal

Siguiendo la línea metodológica del estudio, ya se ha visto la distribución espacial que siguen las variables de precipitación y temperatura para las cuencas seleccionadas. Esta información orienta respecto de cuáles son las zonas en que se puede concentrar los valores de la variable, así como también de su dependencia orográfica, entre otras.

Sin embargo, caracterizar la variabilidad espacial es sólo un paso. 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. Los métodos utilizados en este estudio se han utilizado ampliamente en la comunidad científica y se encuentran validados en la literatura (Ghil, M., et al, 2002) principalmente aquellos que permiten dar a conocer la recurrencia de las series (ciclos), como su evolución temporal.

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, 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.

En el caso del análisis de tendencias, éste, debido principalmente a su carácter programable, ha sido aplicado a todas las estaciones seleccionadas dentro de las cuencas en estudio.

Como parte del análisis temporal de las variables se busca entender posibles cambios que éstas han experimentado durante el periodo histórico de análisis. En particular se busca evaluar si han existido tendencias al alza o a la baja dentro del periodo de estudio, o si han existido cambios significativos en la forma de “saltos” en la serie histórica (por ejemplo, cambios de promedio climatológico entre dos periodos de la serie). El acápite 5.3.2.2 presenta la metodología utilizada para evaluar los posibles cambios en las series observadas.

Como análisis extra, a modo de lograr una mejor interpretación de los resultados obtenidos para cada una de las estaciones dentro de las cuencas estudiadas, se elaboraron índices regionales para cada una de las variables analizadas, en cada una de las cuencas. Estos índices regionales cumplen el rol de “resumir” la información observada en cada una de las estaciones en una sola métrica regional. Los análisis de tendencias y cambios presentados en el acápite 5.3.2.2 son replicados para estos índices regionales mediante la metodología presentada en el acápite 5.3.7, mientras que los resultados en el acápite 6.2.2 (precipitaciones) y 6.3.2 (temperatura).

5.3.2.1 Análisis Espectral

Para la determinación de las frecuencias y ciclos irregulares de las series de tiempo, debido a que este estudio requiere de una base estadística amplia, se han escogido una serie de conceptos cuyos únicos objetivos es proveer al lector de una competencia básica para examinar y entender los procedimientos que se aplicarán en el estudio. No es objetivo del mismo proveer de toda la base científica-matemática de cada uno de estos análisis, pero sí de los conceptos que hay detrás de las diversas formulaciones y criterios. Estas definiciones han sido adaptadas de publicaciones científicas relativas al análisis de series de tiempo, en particular los textos de Wilks (2007), Jenkins (2008) y Cryer (2009).

Estacionariedad de una Serie

En el análisis de series de tiempo, existen diversos requisitos que deben cumplir las series analizadas. Uno de los más comunes es que las series analizadas cumplan con ser estacionarias.

Usualmente tiende a aceptarse la estacionareidad de una serie de tiempo bajo el concepto de la *estacionareidad-débil*. Esto se cumple cuando tanto los momentos de primer y segundo orden, esto es, media y varianza de una serie, no cambian en el tiempo. Esto suele medirse a través de test de hipótesis de diferencias de media (test de Student de 2 “colas”) y test de varianzas (Test de Fisher, Wilcoxon, etc). Otra manera de verificar la estacionareidad de una serie es a través de la función de autocorrelación (usualmente descrita como ACF en la literatura), la cual correlaciona la serie original consigo misma, pero desfasada en pasos de tiempo positivos. Las formas que puede exhibir esta función, en particular su decaimiento conforme aumenta el paso del tiempo, es sinónimo del carácter estacionario del proceso. Más detalles de esta definición pueden encontrarse en la literatura, por ejemplo, Fuller (1996), Kendall y Ord (1990), Wilks (2007).

Tratamiento preliminar de la información: Estandarización y remoción de tendencia

Adicionalmente a la estacionareidad, es común remover la tendencia que pueda tener una serie de tiempo. Esto se hace simplemente calculando una regresión lineal sobre los datos y, de encontrarse una tendencia significativa, se sustrae dicha regresión a los datos originales.

Del mismo modo, es usual estandarizar la serie. Lo más común suele ser centrarla respecto de su valor medio, pero en algunos casos, aparte de centrar la serie, se divide por la varianza de la misma. Esta forma también se conoce como “normalización” pues representa la expresión estadística de la distribución “normal” (Ghil., et al (2000)).

Filtros en series de tiempo

Usualmente, una serie de tiempo es la suma de una señal más un ruido. Es decir, existe una componente “estable” o harmónica, más una componente aleatoria o caótica, que en muchos casos distorsiona la serie en sí.

Esto es muy común de observar en series de tiempo que poseen resoluciones horarias, debido a la variabilidad inherente de algunos fenómenos en el día.

En estos casos, es común aplicar un “filtro”. Un filtro no es más que una función cuyo objetivo es “suavizar” la serie original, dejando otra más limpia, de mejor asimilación. En la literatura (Cryer (2009)), existen diversas funciones que sirven para este propósito, siendo las más comunes los filtros de pasa baja, también llamados las “medias móviles”. En el estudio de series de tiempo es aconsejable aplicar un filtro para aumentar la potencia de la señal y disminuir su ruido. A esto se le conoce comúnmente como el aumentar la razón entre señal y ruido.

Análisis de Frecuencia y Ciclos Harmónicos

Es importante tener en cuenta que el análisis de frecuencia involucra la representación de una serie de tiempo en términos de su contribución en diferentes escalas de tiempo. Por ejemplo, una serie de temperaturas horarias tendrá una fuerte variación a una escala diaria (correspondiente al ciclo diurno influenciado por el sol), pero también a una escala anual (influenciada por las estaciones del año). Si se analizara la caracterización de estas escalas, se notaría que, para un lag de 24 horas representativo de un ciclo diario, tanto los mínimos y máximos entre días tendrían relación. Lo mismo ocurriría para $24h \cdot 365 = 8.760$ horas, que corresponden al ciclo anual. Dicho de otra manera, el aporte que generan los ciclos regulares de 24 y 8.760 horas representa gran parte del total de la variabilidad del fenómeno.

El análisis armónico consiste en la representación de estas fluctuaciones o variaciones en una serie de tiempo, como la suma de una serie de funciones trigonométricas, en particular “senos” y “cosenos”. Estas funciones se dicen “harmónicas” en el sentido en que son escogidas para tener frecuencias que presentan múltiplos enteros de la frecuencia fundamental ($2\pi/n$) determinada por el tamaño de la muestra de la serie de datos (Wilks (2007) y Jenkins (2008)).

En otras palabras, cualquier serie de tiempo que presente una cantidad de datos “n” puede ser representada exactamente como una serie que pase a través de cada uno de sus puntos, mediante la agregación de “n/2” ciclos o funciones armónicos mediante la expresión:

$$y_t = \bar{y} + \sum_{k=1}^{n/2} \left\{ A_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) + B_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{n}\right) \right\} \quad \text{Ecuación 5.3-4}$$

Dónde:

\bar{y} : promedio de la serie.

K: entero.

N: número de datos.

T: paso de tiempo.

A_k y B_k : amplitud de los armónicos.

Siguiendo con la descomposición de la serie, las funciones “seno” y “coseno” hacen que las funciones “harmónicas” sean ortogonales. Lo esencial de esta propiedad es que permite cuantificar el porcentaje de varianza de cada ciclo armónico a través del cálculo del coeficiente de regresión estadístico “R²” para cada k-ésimo armónico como:

$$R_k^2 = \frac{\left(\frac{n}{2}\right)C_k^2}{(n-1)s_y^2} \quad \text{Ecuación 5.3-5}$$

Donde C_k representa la amplitud del k-ésimo armónico y S_y no es más que la varianza de la serie de tiempo. En términos conceptuales, el numerador de la expresión anterior representa la suma de los cuadrados de la regresión para el k-ésimo armónico. Mientras tanto el denominador representa la suma total de los cuadrados (conocido en estadística como el SST).

Más aún, dado que cada ciclo armónico provee de una información independiente de la serie analizada, la varianza explicada por el total de los armónicos escogidos para representar una serie puede ser descrito como:

$$R^2 = \sum R_k^2 \quad \text{Ecuación 5.3-6}$$

Si todos los “n/2” ciclos armónicos son utilizados para representar a una serie particular, la expresión anterior es exactamente 1. La relevancia entonces de un armónico en la reconstrucción de la serie, se evalúa entonces a través de R_k^2 , en otras palabras, mientras más relevante es este, mayor es el porcentaje de variabilidad que explica y por ende presentará un coeficiente de regresión mayor.

Una analogía precisa para este tipo de conceptos es el análisis de componentes principales, que como su nombre lo dice, trata de capturar las partes o componentes esenciales de una serie de tiempo, en particular, aquellas que capturen la mayor varianza particular, y por ende, total de la serie.

En ese caso particular se afirma que una serie puede descomponerse a través del cálculo de los vectores y valores propios que representan su espacio (para mayor detalle consultar Wilks (2007)). En este caso los vectores propios y valores propios representan las funciones armónicas y los ciclos armónicos respectivamente. Cuando se habla del k-ésimo valor propio de la serie se está haciendo referencia intrínsecamente a la amplitud característica del k-ésimo armónico. Por lo que la varianza explicada por el k-ésimo valor propio, se escribe también como el cociente entre el valor propio calculado y la suma de todos los valores propios de la serie.

Espectro o Periodograma

El poder o espectro de una serie de tiempo no es más que la gráfica entre la amplitud C_k^2 como una función de la frecuencia. Usualmente la amplitud se escala, en cuyo caso los puntos que se dibujan o calculan son también proporcionales al cuadrado de las amplitudes. En muchos casos se aplica una escala logarítmica. Esto es particularmente útil

para detectar si las variaciones de una serie están dominadas sólo por pocas frecuencias y para graficar los intervalos de confianza de la estimación de los espectros (Wilks (2007)).

El eje de las abscisas está compuesto por " $n/2$ " frecuencias ($1/\text{tiempo}$), siendo la más pequeña de estas la frecuencia fundamental ($2\pi/n$), la cual corresponde a la onda que ejecuta un solo ciclo sobre los " n " datos. La mayor frecuencia (asociada a " $n/2 = \pi$ ") se denomina la frecuencia de Nyquist. Representa la onda que ejecuta un ciclo completo sobre sólo 2 intervalos de tiempo y que ejecuta " $n/2$ " ciclos sobre el total de los datos. Esta frecuencia depende de la resolución de la información original e impone una importante limitación sobre la información disponible sobre un análisis espectral.

En palabras más simples el rango de frecuencias que se observa en un espectro abarca desde la menor frecuencia detectable, es decir, $1/n$ (la frecuencia fundamental) hasta la frecuencia de Nyquist de 0,5.

Es en los peaks de estos espectros donde se detectan aquellas frecuencias dominantes, las que a su vez se corresponden con un periodo o ciclo, dado que el periodo de una onda corresponde al inverso de la frecuencia. En otras palabras, el periodo " t_k ", correspondiente al periodo del k -ésimo armónico, especifica la cantidad de tiempo requerida por un ciclo de una determinada frecuencia " f_k " para poder completarse. Asociar periodos con las estimaciones del periodograma o poder espectral de una serie permite visualizar las escalas de tiempo en las cuales están ocurriendo las variaciones más relevantes en la serie (Wilks (2007)).

Significancia de un periodo o frecuencia

Al igual que en muchos "test" estadísticos, es necesario detectar aquellos periodos dominantes o aquellos irregulares, dependiendo del fenómeno que se esté analizando, asociado a un nivel de confianza.

En el caso de la hidrología, es común ver en el análisis de frecuencias de series, por ejemplo, de caudales medios mensuales, precipitaciones máximas en 24 horas, etc. Todos esos análisis de frecuencia tienen algo en común. Su objetivo es detectar cual es la distribución empírica. Si bien eso requiere tanto de una gráfica de ajuste, suele también acompañarse de un indicador estadístico, por ejemplo, un test "chi-cuadrado" el cual provee un indicador para aceptar o rechazar una determinada distribución. Este valor se calcula en función de los datos de la muestra y permite, en conjunto con la examinación gráfica, decidir la mejor distribución de los datos.

En el análisis espectral, existen también este tipo de pruebas. Todos los espectros suelen compararse con el espectro de un modelo autoregresivo de orden 1 (AR(1)) (Wilks (2007)),

Ghil., et al (2000)). Un modelo autoregresivo no es más que un modelo estadístico que describe el valor de una variable en función de su estado anterior. Se dice que algunos fenómenos en la naturaleza son “ruidos blancos” (autoregresivo de orden 0) o ruidos rojos (autoregresivos de orden 1). Por lo tanto para aceptar la validez de una frecuencia, y por ende un periodo asociado a ella, se requiere que ésta sea superior (mayor) al espectro de un ruido rojo o AR(1).

Esta condición es ampliamente aceptada por la comunidad científica, y lo que usualmente se escoge, es que esta comparación sea significativa sobre un nivel de confianza del 90%. En el caso de este estudio, se ha exigido una significancia del 95%.

Es importante, finalmente, recordar que la detección que se busca en este estudio apunta a las frecuencias y periodos irregulares, es decir, aquellos ciclos distintos al anual y al estacional. Es normal y conocido que las series analizadas tengan una variabilidad anual y estacional, pero esto es propio de la climatología de la zona y a la existencia inequívoca de las estaciones del año. Sin embargo, ciclos de más longitud (2 a 11 años) pueden estar relacionados a fenómenos climáticos de otra escala, como lo son ENSO (El Niño Oscilación del Sur), PDO (Oscilación Decadal del Pacífico) y otros.

5.3.2.2 Métodos de análisis estadísticos y metodología de aplicación

Para la determinación de las frecuencias y ciclos irregulares de las series de tiempo de cada cuenca se utilizó el software SSA-MTM Toolkit de la Universidad de California UCLA (Ghil, M., et al, 2002).

Esta herramienta sintetiza una batería de pruebas estadísticas conducentes a detectar los periodos o ciclos irregulares de las series de tiempo. Ha sido ampliamente utilizada en la comunidad científica, es gratuita y funciona bajo ambiente UNIX. La razón de la utilización obedece a que dentro de los métodos estadísticos que posee implementados, destacan 3: El análisis singular espectral o SSA, el método de los “multitapers” (MTM) y el método de la máxima entropía (MEM). El primero actúa como filtro de la serie original y para efectuar una reconstrucción asociada a los ciclos harmónicos irregulares, previa inspección. Los otros dos métodos (MTM y MEM) calculan de diversas formas el poder espectral de la serie, permitiendo identificar las frecuencias estadísticamente significativas (irregulares) a un 95% de nivel confianza, permitiendo entonces, calcular el periodo a dicho ciclo como el inverso de la frecuencia.

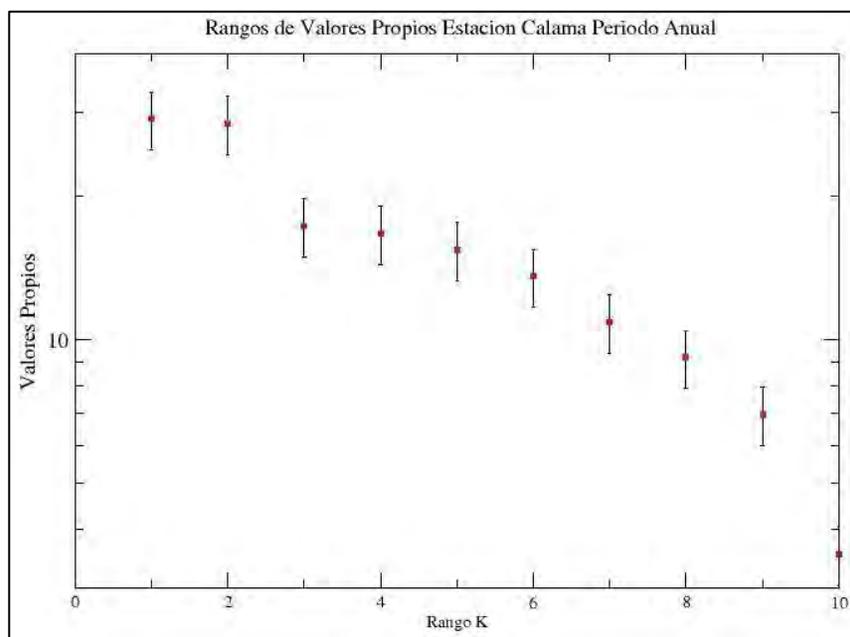
Rubio y McPhee (2010) aplicaron estos métodos para la detección de periodos irregulares a una serie de caudales desde la VII a X región. A continuación, se realiza una breve descripción de los métodos a utilizar.

Análisis Singular Espectral: SSA

Existen diversas metodologías para aplicar el análisis espectral. Una de ellas es el análisis singular espectral o SSA, donde se realizan intentos para discriminar entre la señal significativa como un todo, o en su defecto como partes individuales, más una componente aleatoria. Dicha componente aleatoria se describe como un ruido blanco, aunque actualmente esta parte se está descomponiendo con un ruido rojo (AR (1)). Esto se debe principalmente a que las series climáticas y otras series de carácter geofísico tienden a tener mayores amplitudes y bajas frecuencias.

El SSA analiza o sigue la amplitud y modulación de la fase de la señal. En este caso se utilizó el SSA como un filtro a cada serie de tiempo y así remover el ruido de cada serie. El método exige definir el nivel de confianza (95%), el tamaño de la ventana de análisis y el número de valores propios (número de armónicos) a presentarse. Adicionalmente el método permite realizar un test de tendencia (Mann-Kendall) y permite aislar la componente representativa de esta.

Un ejemplo de la aplicación de este método puede observarse en la Figura 5.3-2.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-2 Aplicación del método del análisis singular espectral (SSA).

El producto de esta fase es la selección de las componentes que son representativas de un posible ciclo irregular. Dichas componentes se detectan por aquellos pares de valores propios cuya varianza explicada es indistinguible entre ellas. En términos gráficos, cuando

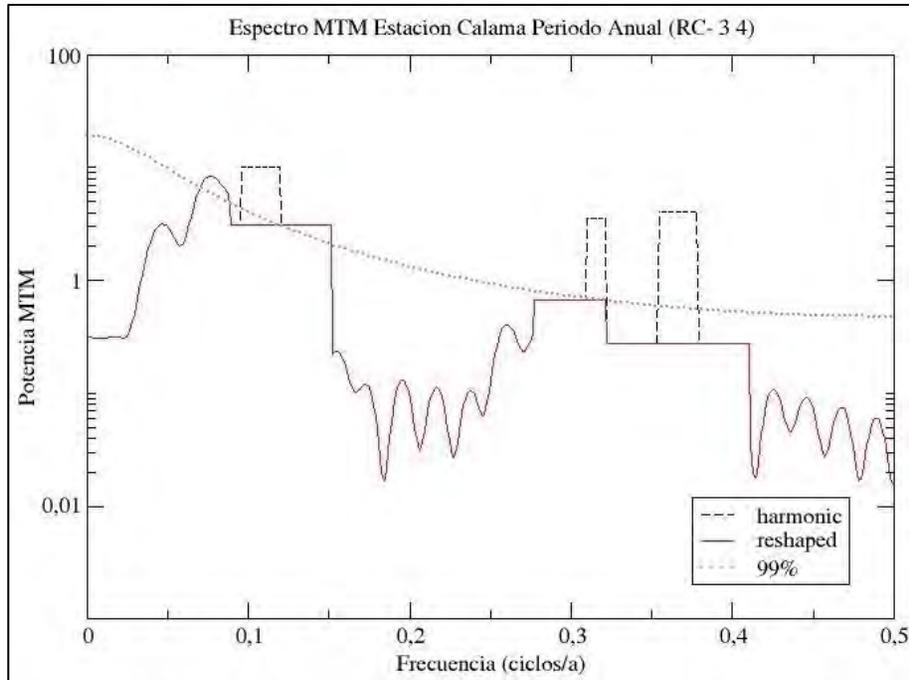
el respectivo valor propio asociado al k-ésimo armónico junto con su nivel de confianza, es prácticamente idéntico al k-ésimo consecutivo.

Finalmente se reconstruye una serie para cada par de valores propios encontrados.

Método de los “Multitapers”: MTM

Una vez aplicado el SSA se procedió a utilizar una técnica llamada “Multitaper” (MTM) (Ghil, M., et al, 2002). La principal diferencia de éste método con otros, es que no necesita de una función “a priori” de los datos, sino que se enfoca en reducir la varianza espectral utilizando un pequeño set o conjunto de “tapers” o filtros, en vez de la utilización de sólo uno como en las metodologías clásicas. Para elegir estos “tapers” se sigue un proceso de optimización, en el cuál se obtiene una familia de funciones conocidas como “Discrete Prolate Spheroidal Sequences (DPSS)” que permiten resolver el problema de la variabilidad minimizando la merma fuera de una banda de frecuencia conocida como la frecuencia de Rayleigh. Este método suele ser menos heurístico que los métodos no-paramétricos tradicionales y al utilizar una familia de “tapers” se obtienen estimadores con menor varianza que los métodos tradicionales. Este método ha sido utilizado principalmente pues es capaz de detectar periodos significativos en series de tiempo más cortas (Robertson y Mechoso 1996).

En otras palabras, este método permite la estimación de un espectro de una serie cuya longitud no es extensa y adicionalmente detecta al 95% de nivel de confianza los ciclos armónicos de la serie reconstruida en el paso anterior y que por ende son atribuibles a ciclos no regulares. Un ejemplo de este espectro o periodograma se presenta en la Figura 5.3-3.



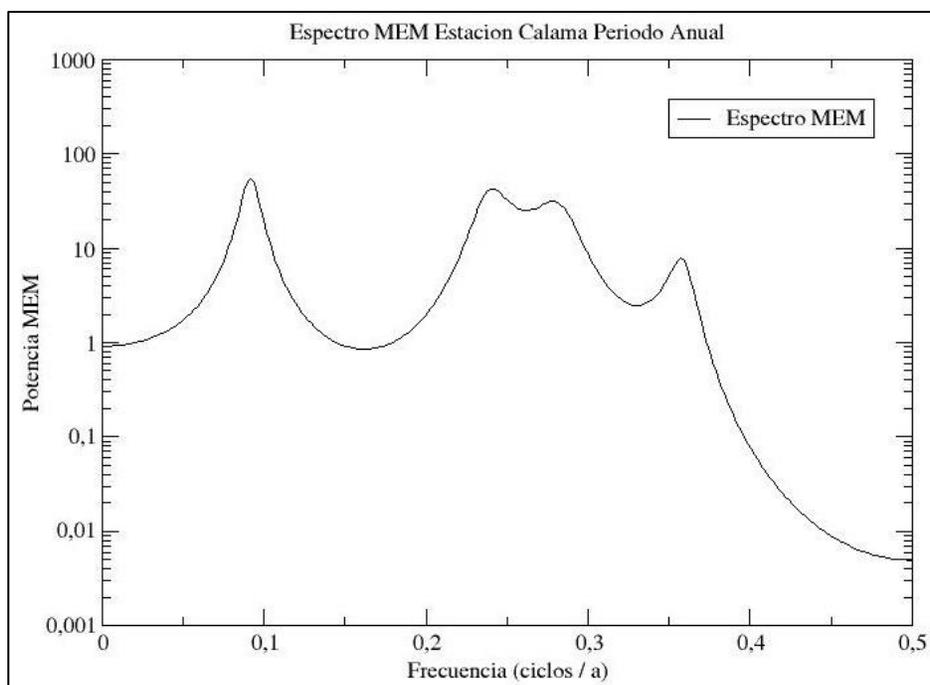
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-3 Espectro MTM asociado a la estación Calama.

Método de la Máxima Entropía: MEM

Para corroborar las periodicidades encontradas se decidió recurrir a otro método de análisis, el de la Máxima Entropía (MEM). La Entropía es en realidad un concepto que permite “medir” de alguna manera el Caos y Energía de un sistema. Un enfoque de este método (Ghil, M., et al, 2002), está basado en aproximar las series bajo estudio por un modelo auto regresivo (AR) de orden M , $AR(M)$. Sin duda este procedimiento tiene por objetivo reconstruir o calcular la densidad espectral asociada a la serie. Los coeficientes de autocorrelación del modelo AR son calculados optimizando el número $M \leq M$ de estos coeficientes, es decir, hasta que orden de antecedencia se considera en el modelo. En este caso se ha escogido como número de orden $M=10$, que representa los pares de valores propios y el tamaño de la ventana de análisis escogido en el SSA.

Un ejemplo del poder espectral obtenido con el método MEM se puede apreciar en la Figura 5.3-4.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-4 Espectro MEM asociado a la estación Calama.

Procedimiento de aplicación

La Figura 5.3-5 muestra el resumen de los métodos aplicados y sus productos esenciales para el análisis temporal.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-5 Esquema metodológico del procedimiento de análisis temporal.

Siguiendo con los conceptos descritos en el acápite anterior, los pasos para el análisis pueden resumirse como:

Paso 1: Cálculo de las tres agregaciones temporales de las series de tiempo (anual, invierno y verano) para las estaciones de precipitación y temperatura.

Paso 2: Estandarización de la variable y remoción de tendencia. Este paso lo hace automáticamente el software SSA-MTM Toolkit.

Paso 3: Aplicación de un filtro a la serie temporal. En este caso se ha escogido el método SSA.

Paso 4: A través del método SSA, seleccionar aquellos pares de valores propios asociados a los ciclos irregulares.

Paso 5: Reconstrucción de la serie con las componentes seleccionadas. Llamaremos a esta serie SSA-RC.

Paso 6: Cálculo del poder espectral de la serie SSA-RC a través del método de los "multitapers" (MTM).

Paso 7: Selección de las frecuencias significativas al 95% de confianza.

Paso 8: Verificación de las frecuencias significativas mediante el cálculo del poder espectral de la serie SSA-REC a través del método de la máxima entropía MEM.

Paso 9: Recopilación de los periodos obtenidos.

5.3.2.3 Análisis de Cambios en Series de Tiempo

En el campo del diseño hidrológico muchas veces se asume la invariabilidad de los regímenes hídricos en el tiempo. Cuando se consideran periodos de tiempo relativamente extensos (del orden de 30 años o más) este supuesto ha sido en general tomado como válido. Sin embargo, debido al cambio climático, la validez de este concepto está siendo cada vez más cuestionada (Milly et al., 2007). Los cambios introducidos en el sistema climático por la influencia del hombre podrían ya estar manifestándose, especialmente en variables como la temperatura o variables hidrológicas directamente afectadas por esta. Dado esto, surge la necesidad de evaluar los cambios observados en variables hidrometeorológicas durante el periodo histórico reciente y así determinar si han existido cambios relevantes en las variables. Esta evaluación debe ser realizada mediante estadísticos robustos de manera de minimizar la posibilidad de que se detecten cambios que no son estadísticamente significativos en las series observadas.

Para evaluar los cambios en las series hidrometeorológicas se contemplan tres test estadísticos distintos. En primer lugar, se utiliza el test de tendencia de Mann-Kendall. Este test evalúa los cambios monotónicos en tendencias en una serie de tiempo (Helsel y Hirsch, 1992; Cortés et al., 2011). El test ordena las series observadas y analiza la frecuencia de los cambios monotónicos en los datos: no es influenciado por los valores observados, sino que, por el orden de estos, y por ende a diferencia de otras métricas (como por ejemplo regresiones lineales) no es afectado por valores anómalos o fuera de rango. El test ha sido utilizado en diversos estudios para el territorio nacional, incluyendo el estudio realizado por Cortés et al. (2011) que evaluó posibles cambios en regímenes hidrológicos chilenos, y el realizado por Pellicciotti et al. (2007), el cual evaluó cambios en las variables hidrometeorológicas de la cuenca del Aconcagua. Para los efectos de este

proyecto se utilizó el test de Mann-Kendall para identificar la magnitud de las tendencias observadas en las variables hidrometeorológicas de interés. Se recomienda al lector seguir la metodología descrita en Cortés et al. (2011) donde se detallan los aspectos matemáticos e implementación del test de tendencias. El test de Mann-Kendall fue implementado para toda la duración de la serie histórica tanto de precipitaciones como de temperaturas.

El test de Mann-Kendall tiene como resultado el estadístico de tendencias de Kendall, el que puede tomar un valor de entre -1 y 1, con valores negativos implicando una posible tendencia negativa y valores positivos una posible tendencia positiva. Cuando el estadístico indica un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica: valores consecutivos son siempre mayores/menores que el valor anterior. Un valor de 0 del estadístico denota una tendencia “plana”, en que hay igual cantidad de miembros de la serie de tiempo que se incrementan y decrecen respecto al valor anterior. En las figuras de resultados de tendencia se muestra el valor del indicador obtenido para cada una de las estaciones dentro de las cuencas de análisis.

El segundo test aplicado para evaluar los cambios en las series hidrometeorológicas consiste en el test de Behrens-Fisher (o test t de Student con varianza desconocida; Lehman y D’Abrera, 2006). Este test busca determinar si las medias de dos sets de datos son distintas sin tener información respecto a las varianzas de cada uno de las muestras. El resultado del test es binario, ya que se indica simplemente si las medias son distintas, pero no se indica la magnitud del cambio como parte de los resultados.

Finalmente, el tercer test aplicado para evaluar los cambios corresponde al test F de varianzas equivalentes. Este test busca determinar si dos muestras de datos presentan distintas varianzas. El test está descrito en detalle por Markowski y Markowski (1990).

Los test t de Student y el test F fueron aplicados comparando los datos de los periodos 1960-1986 y 1987-2014. En el caso de la temperatura, a pesar de contar con datos solo desde 1970 en adelante, se eligió la misma separación temporal para mantener la consistencia entre los test aplicados a la precipitación y temperatura.

Todos los test se han aplicado sobre la serie de datos rellenada para cada cuenca.

5.3.3 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. De acuerdo a von Storch y Zwiers (2004), 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). Se dice entonces que si $X(t)$ es estacionaria (donde $X(t)$ representa una serie de tiempo), se debe cumplir que:

- $X(t)$ tiene la misma distribución de probabilidad F para todo t .
- Para todo t_1 y t_2 , los parámetros de la distribución conjunta de $X(t_1)$ y $X(t_2)$ dependen sólo del desfase $|t_1 - t_2|$.

Para la mayoría de los propósitos, el demostrar que una función cumple la estacionariedad fuerte suele ser reemplazado por un criterio de estacionariedad débil. Dicho criterio se resume en que el proceso $X(t)$ debe cumplir 2 condiciones:

- La media de todos los procesos es independiente del tiempo, esto es, que la media ($E(X(t))$) es constante para todo "t".
- El momento de orden 2 (varianza) $E(X(t_1)X(t_2))$ es una función exclusivamente del desfase $|t_1 - t_2|$. Una consecuencia directa de esta condición es que la varianza del proceso, $\text{Var}(X(t))$, no cambia en el tiempo.

Para cumplir con ambos criterios la hipótesis de estacionariedad es dividida en dos análisis: La estacionalidad y la tendencia.

El análisis de tendencia permite concluir si la serie en efecto presentará la misma media en todo el tiempo, mientras que la estacionalidad se mide a través de la función de autocorrelación, más conocida como ACF, la cual se detalla más abajo.

De esta manera, se analizarán las estaciones de caudal de interés para así poder establecer el cumplimiento de la hipótesis de estacionariedad a ser empleada en análisis subsiguientes.

Para evaluar la estacionalidad de una serie de tiempo, Box y Jenkins (1976) proponen determinar la Función de Autocorrelación (o "Autocorrelation Function", ACF) de la serie. Dicha función se define como la relación de la serie de tiempo consigo misma desfasada en periodos de tiempo iguales (retardos o "lags").

En general, para los procesos hidrológicos catalogados como autoregresivos (AR), la prueba de estacionariedad (que demuestra la estacionalidad), viene del estudio de las ecuaciones de Yule-Walker (Cryer y Chan, 2008). En 1976, Box y Jenkins demostraron que la correlación ρ_k de un proceso autoregresivo debe decaer a cero en la medida que el desfase aumente. Por lo tanto, la manera más directa de probar la estacionariedad de una serie de tiempo es la determinación de la función de autocorrelación ACF y de la autocorrelación parcial PACF junto con un análisis de tendencia. Si dicha función decae exponencialmente en el tiempo se podrá concluir que el proceso es estacionario.

Por lo tanto, el primer paso metodológico para abordar la verificación de la estacionareidad es construir las funciones ACF y PACF para cada una de las series proporcionadas.

Para determinar la ACF de una serie de tiempo se determina la correlación entre la serie completa consigo misma (retardo equivalente a 0). Esta correlación debe ser igual a 1 por construcción, ya que se correlaciona una serie de datos consigo mismo. Luego, se determina la correlación de la serie con ella misma desfasada en periodos de tiempo incrementales, desde un retardo de 1 hasta $N/4$, donde N es la longitud de la serie. Finalmente se grafica la correlación para cada retardo y se analiza.

Otra manera propuesta por Box y Jenkins de analizar la estacionareidad de series de tiempo es mediante la evaluación de la Función de Autocorrelación Parcial (o Partial Autocorrelation Function, PACF). La PACF es similar a la ACF, con la diferencia de que se le aplica a cada valor observado una transformación mediante la cual se le resta la componente de covarianza de la serie de tiempo.

Ambas funciones, la ACF y la PACF permiten determinar el grado de explicación de la serie a partir de la serie en sí misma. Si existe tal grado de explicación (dado un nivel de confianza, generalmente un 95%), es posible explicar la serie original mediante una combinación lineal de elementos de la misma serie. Los modelos que permiten explicar la serie de tiempo empleando el enfoque de las ACF y PACF corresponden a modelos autorregresivos y/o de media móvil. Así, por ejemplo, un modelo autorregresivo corresponde a la explicación de una variable mediante observaciones de ella misma correspondiente a periodos anteriores, añadiéndose un término de error. Aquel que se construye a partir de medias móviles explica el valor de una determinada variable en función de un valor independiente y una sucesión de errores correspondientes a periodos precedentes, ponderados convenientemente.

Para cada una de las series de tiempo, se evaluaron los resultados de las ACF y las PACF, dando como resultado un indicador preliminar acerca de la estacionalidad de cada una de las series de tiempo. Luego de este indicador preliminar, se evaluó la estacionareidad de las series mediante un test de tendencia. El test de tendencia utilizado corresponde al test de Mann-Kendall. El test de tendencia indica la existencia de cambios en el largo plazo de las series de tiempo analizadas y se usó como indicador secundario para el análisis de estacionareidad. Estos resultados son presentados en el acápite 6.4.2.

5.3.4 Metodología de Análisis de la Evapotranspiración

Para poder realizar la caracterización de la evapotranspiración, se revisó una serie de estudios y publicaciones, los cuales fueron presentados en el acápite 2.2 y Anexo A.

Para efectos del presente análisis, en primer lugar, se revisó el Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987), en el cual se generaron mapas de evapotranspiración, con isolíneas medias anuales (mm/año) que se refieren a la evapotranspiración real de las superficies naturales. Éstas se interrumpen en las zonas regadas, ya que en estos sectores la evapotranspiración real corresponde a la evapotranspiración real de los cultivos, supuesta similar a la potencial. Para el cálculo de la evapotranspiración media desde superficies naturales se utilizó el método de Turc, el cual permite estimar el déficit de escorrentía a partir la precipitación media anual y temperatura media anual. De acuerdo a lo indicado en el estudio, en las zonas donde la información disponible permitió una buena estimación de la precipitación, escorrentía y temperatura, el ajuste de Turc fue aceptable. La evapotranspiración en las zonas de riego se determinó a partir de estudios parciales en los cuales se determinó la evapotranspiración potencial de los cultivos y de algunos tipos de vegetación natural en base al método de Blaney y Criddle, el cual básicamente requiere información de temperaturas medias mensuales, número de horas de sol y tipo de cultivo o vegetación.

A continuación, se revisó la información correspondiente al Atlas Agroclimático de Chile, dispuesta por el Centro de Información de Recursos Naturales en su visualizador de datos espaciales online (CIREN, 1993). En este estudio se definieron distritos agroclimáticos los cuales son áreas que presentan condiciones agroclimáticas homogéneas, que fueron delimitadas y caracterizadas por variables relevantes para la agricultura. En particular, la información se presenta en cuadros para cada distrito, en las cuales se identifica, entre muchas otras variables, la evapotranspiración potencial media mensual y anual. De acuerdo a lo que se indica en la descripción del proyecto, los datos utilizados corresponden a estudios realizados entre 1982 y 1988, con información de series climáticas de la DMC, DGA, ENDESA, SAG, INIA, entre otros.

Posteriormente se revisó el estudio de Cálculo y Cartografía de la Evapotranspiración Potencial en Chile (CNR, 1997), en el cual se generó una cartografía de isolíneas de evapotranspiración potencial (mm/año) sobre una base cartográfica detallada, dando cuenta del comportamiento espacial de esta variable en todo el territorio nacional. Complementariamente, se crearon “zonas de distribución” en todo el país, correspondientes a sectores en los cuales la distribución porcentual de los doce meses que componen la evapotranspiración potencial anual se distribuyen de manera similar. A partir de la información generada en este estudio, la CNR creó un software computacional el año 2000, a partir del cual es posible estimar la evapotranspiración potencial anual y mensual de cualquier punto coordinado de Chile. La metodología implementada para estimar la ETP mensual, consistió principalmente en la aplicación del método de Penman, y en aquellos lugares donde no fue posible se aplicó las fórmulas empíricas de Turc, Ivanov y el método de la bandeja de evaporación. Estas fórmulas fueron ajustadas mediante coeficientes de regresión teniendo como referencia la ecuación de Penman, la cual, según se detalla en el

estudio, es la de mayor confiabilidad y es la más adecuada frente a la diversidad de condiciones climáticas del país. Una vez que se obtuvieron los valores mensuales de ETP en las estaciones meteorológicas, se calculó la ETP anual, a partir de la cual se trazaron las isóneas de ETP, con apoyo de cartas de curvas de nivel.

Finalmente, se revisó el estudio Evapotranspiración de Referencia para Determinación de Demandas de Riego en Chile (CNR, 2015), en el cual se generaron mapas de evapotranspiración de referencia (ET₀) para todo Chile, a través de herramientas cartográficas de alta resolución espacial. El cálculo de la ET₀ se llevó a cabo de acuerdo a la metodología de Penman-Monteith, según la relación:

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 u_2)} \quad \text{Ecuación 5.3-7}$$

- ET₀: evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹).
R_n: radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻² día⁻¹).
G: flujo de calor del suelo (MJ m⁻² día⁻¹).
T: temperatura media del aire a 2 metros de altura (°C).
u₂: velocidad del viento a 2 metros de altura (m s⁻¹).
e_s: presión de vapor de saturación (kPa).
e_a: presión real de vapor (kPa).
(e_s - e_a): déficit de saturación del aire (kPa).
Δ: pendiente de la curva de presión de vapor de saturación vs temperatura (kPa °C⁻¹).
γ: constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

Preliminarmente se calcularon las demandas de ET₀ para cuatro localidades a lo largo de Chile, para series de tiempo de 60 o más años. De esta manera se identificó una tendencia creciente de la ET₀ en el tiempo, pero que no es estadísticamente significativa.

Posteriormente, se preparó una base climática donde se compiló información de temperatura, precipitación, radiación solar, humedad relativa de estaciones DMC, DGA e instituciones públicas y privadas (universidades, instituciones y entidades privadas). Se compilaron series de datos de aproximadamente 600 estaciones, considerando el periodo 1980-2010. Lo anterior se complementó con la información climática del Atlas Agroclimático de Chile, el que fue actualizado al periodo de referencia. El resto de las variables fueron obtenidas de estudios aplicados en Chile, o se derivaron a partir de relaciones entre los parámetros de la base de datos.

A partir de la información expuesta, se aprecia que el estudio CNR (2015) es el que presenta la información de evapotranspiración más actualizada y con un mayor nivel de detalle

espacial, debido a que sus resultados son archivos de superficie GIS rasters para todo el territorio nacional. De esta manera, la caracterización de la ETo se realiza en las cuencas seleccionadas considerando esta fuente como referencia y es presentada en el acápite 6.5.

5.3.5 Metodología de Caracterización Nival

Una cuenca aportante a un cauce se puede conceptualizar como un sistema con flujos de entrada y salida. Dichos flujos de entrada y salida dan origen a los procesos hidrológicos, entre los que se encuentran el flujo subterráneo, la escorrentía superficial, la evaporación, entre otros. El entendimiento y estimación precisa de cada uno de sus flujos es esencial para determinar la disponibilidad hídrica para diferentes usos.

Para las zonas cordilleranas de Chile la precipitación anual se acumula en forma de nieve entre los meses de junio y septiembre (rango que varía dependiendo de la elevación del sector). De esta forma, la estimación de la acumulación de nieve se convierte en un aspecto fundamental para cualquier actividad que requiera agua, dado que el volumen de escorrentía superficial de gran parte del año corresponde al derretimiento proveniente del manto nival y/o a su almacenamiento en forma subterránea.

En concordancia con lo señalado previamente, el objetivo principal de este análisis es 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. El detalle de la metodología aplicada se presenta a continuación, mientras su resultado, que corresponde a ensambles de valores distribuidos de EA para las cuencas seleccionadas, en el acápite 6.6.

En este acápite se presentan tres análisis:

- 1) Caracterización de la climatología de cada una de las cuencas de estudio para las cuales existía la posibilidad de obtener las estimaciones de EA. Estas cuencas corresponden al río Copiapó y río Limarí (Macrozona Norte), río Aconcagua y río Maipo (Macrozona Centro) y río Itata (Macrozona Sur). Debido a limitaciones de disponibilidad de imágenes Landsat (necesarias para la metodología empleada) no se pudo realizar una estimación para las cuencas del Loa y las cuencas de más al sur del río Itata.
- 2) Caracterización de la variabilidad de largo plazo de las cuencas analizadas mediante análisis de tendencias de las series de tiempo.
- 3) Análisis de los efectos de la sequía comparando dos años característicos.

Este trabajo se basa en la metodología presentada por Margulis *et al.*, (2015) y Cortés *et al.*, (2016). El objetivo principal de la metodología presentada por los autores es reconstruir el equivalente en agua (EA o SWE, por sus siglas en inglés) histórico sobre cuencas que tengan una componente nival importante.

La metodología se puede dividir en dos etapas:

- 1) Simulación del comportamiento de la nieve sobre la zona de estudio: en esta etapa se busca obtener una estimación inicial del comportamiento histórico de variables del manto, especialmente del equivalente en agua.
- 2) La estimación inicial obtenida a través de la simulación es actualizada usando una técnica matemática llamada asimilación de datos. Esta técnica combina la información del modelo con las imágenes del satélite Landsat, obteniendo una estimación del equivalente en agua de mayor precisión que la original. Finalmente, este procedimiento puede ser validado utilizando datos tomados en terreno en caso de que existan.

En la primera etapa de la metodología presentada por Margulis *et al.* (2015) se utiliza el modelo de superficie terrestre SSiB3 (Yang *et al.*, 1997; Xue *et al.*, 2003) acoplado a un modelo de derretimiento nival (*Snow Depletion Curve*, Donald *et al.*, 1995; Liston, 2004). Los detalles de los procesos representados y de la validación de estos modelos en un contexto de hidrología de montaña se encuentran en Giroto *et al.* (2014a; 2014b) y Margulis *et al.* (2015). Los dos modelos son utilizados para estimar inicialmente el EA y la fracción cubierta de nieve (o fSCA por sus siglas en inglés). Los modelos han sido utilizados para modelar cuencas chilenas de la zona central y centro-norte, con resultados exitosos (Cortés *et al.*, 2013; Cortés *et al.*, 2014b; Cortés *et al.*, 2016).

El modelo SSiB3 requiere ser forzado por variables meteorológicas como temperatura, radiación, viento, etc., las cuales son obtenidas mediante la desagregación de las variables meteorológicas del reanálisis climatológico MERRA¹. Las variables utilizadas del reanálisis están relacionadas al balance energético del manto. Estas variables incluyen temperatura, radiación de onda corta, radiación de onda larga incidente, viento, humedad relativa y presión. Las variables son escaladas desde la resolución original de MERRA (0,5° latitud x 0,67° longitud) a la resolución del modelo de simulación nival (180 (m)).

Los modelos empleados en la simulación nival son utilizados para generar un ensamble (de 100 corridas) de estimaciones *a priori* de equivalente en agua y fSCA, para cada uno de los píxeles de las cuencas, a escala horaria. Cada corrida es forzada por una versión perturbada de los inputs meteorológicos, de manera de muestrear la incerteza asociado a estos inputs.

¹ Disponible en <http://gmao.gsfc.nasa.gov>

Las variables meteorológicas perturbadas corresponden a la radiación, temperatura y precipitación.

La radiación es perturbada con una función dependiente de la cobertura nubosa, asignando mayor incerteza a aquellos días en que MERRA detecta presencia de nubes (Margulis *et al.*, 2015).

La temperatura es perturbada de acuerdo a una función normalmente distribuida, centrada en -2°C y con varianza de 2°C . Este valor fue determinado a partir de estudios anteriores, los cuales sugieren la presencia de un sesgo de las temperaturas de MERRA en zonas elevadas (Yi *et al.*, 2015).

Para la precipitación se utilizó un factor multiplicativo uniformemente variado entre 0,5 y 3, lo cual permite representar la incerteza de precipitación en zonas montañosas, no solo del valor del factor multiplicativo, sino que de la función de error asociada. Considerando que la precipitación aumenta con la elevación, un factor menor a 1,0 implica la existencia de flujos de masa negativos, por ejemplo, debido a redistribuciones causadas por viento o por gravedad. Los valores mayores representan escenarios en los cuales la precipitación es mayor, debido a un efecto orográfico, o para representar flujos de masa positivos que no son directamente representados por la física del modelo nival. El rango de valores del factor multiplicativo fue determinado utilizando los resultados de la implementación del modelo de nieves en la zona central de Chile (Cortés *et al.*, 2016).

Luego de obtener el ensamble de estimaciones *a priori* en la primera etapa de la metodología, se emplea una metodología de asimilación de datos (segunda etapa) que utiliza datos de los satélites Landsat 5, 7 y 8 para actualizar los estados del modelo y obtener una estimación más precisa. La variable a asimilar consiste en valores de fSCA, medidos por los satélites antes mencionados. Los valores de fSCA asimilados (que provienen de la observación del satélite) son comparados con el ensamble de valores de fSCA simulados (obtenidos del modelo nival y del modelo de derretimiento).

El fSCA fue obtenido de los satélites Landsat 5, Landsat 7 y Landsat 8 (sensores TM, ETM+ y OLI, respectivamente) usando un algoritmo de descomposición espectral (Painter *et al.*, 2003; Cortés *et al.*, 2014a) que considera las diferencias espectrales de los distintos sensores. Debido a la saturación de las bandas 1 a 3 del sensor Landsat TM (Landsat 5) y Landsat ETM+ (Landsat 7), se utilizó un umbral de bandas saturadas para evitar la asimilación de píxeles afectados por saturación. El umbral fue fijado en dos bandas (no se utilizaron observaciones que presenten saturación en 2 o más bandas en la asimilación). Otros autores (Rittger *et al.*, 2013) han asumido 100% de cobertura de nieve cuando esto ocurre, pero en

este caso se evitó utilizar este supuesto ya que podría introducir valores artificialmente altos de fSCA, lo cual induciría valores erróneos en el esquema de asimilación de datos.

Dada la configuración orbital de Landsat, en general, se espera una observación cada 16 días para cada pixel. Este tiempo que corresponde al paso del satélite Landsat por sobre cada punto de adquisición, de acuerdo a los parámetros de la órbita del satélite y configuración del sensor. Esto significa que cada pixel pueda tener aproximadamente 23 puntos de datos, por satélite y por año. Entre 1985 y 1998 sólo existen datos de Landsat 5, mientras que entre 1999 y 2011 coexisten Landsat 5 y Landsat 7. A partir de finales del 2011 sólo está disponible Landsat 7, hasta el año 2013, cuando entra en funcionamiento Landsat 8. Dada la presencia de dos satélites al mismo tiempo, el número de observaciones puede llegar hasta 46 para algunos pixeles (en condiciones ideales, sin nubes) o incluso mayor en los sectores en que existe un traslape de las adquisiciones de Landsat.

Del total de imágenes adquiridas por el sensor, solo un porcentaje de estas son utilizables en el algoritmo de asimilación de datos. Muchas imágenes fueron descartadas por presencia de nubes, zonas con sombras altas, sombras de nubes, errores de georreferencia, falta parcial de información debido a falla parcial en la instrumentación del satélite (Landsat 7 a partir del 2003) y saturación del sensor.

El método de asimilación consiste en un *Particle Batch Smoother* (PBS, o interpolador de partículas) propuesto por Margulis *et al.* (2015), descrito además por otros autores (Arulampalam *et al.*, 2002; Moradkhani *et al.*, 2005; Zhou *et al.*, 2006). El PBS utiliza los mismos miembros del ensamble *a priori* inicial para generar el ensamble *a posteriori* (después de la asimilación). La única diferencia entre los ensambles *a priori* y *a posteriori* proviene de la asignación de los pesos de cada uno de los miembros del ensamble (100 corridas) de acuerdo a su cercanía con la variable asimilada (fSCA) proveniente de la imagen satelital. La metodología se presenta de forma resumida en este informe.

Inicialmente, a cada uno de los miembros del ensamble *a priori* generado utilizando los modelos de nieve se le asigna un peso equivalente $w_j^- = \frac{1}{N}$, con N el número de miembros del ensamble (100). Esto se traduce en que cada uno de los miembros del ensamble es equiprobable respecto al otro. Luego de obtener los datos observados de Landsat, se emplea la ecuación 5.3-8 y los pesos son actualizados (ensamble *a posteriori*):

$$w_j^+ = c_0 p_{z|y}(Z|Y) w_j^- = \frac{c_0}{N} p_{z|y}(Z|Y) \quad \text{Ecuación 5.3-8}$$

Donde la función de verosimilitud $p_{z|y}$ (*likelihood function*) puede ser expresada como:

$$p_{z|y}(Z|Y) = p_V[Z - M_j^-] = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^{N_{obs}|C_V|}}} \exp(-0.5(Z - M_j^-)^T C_V^{-1}(Z - M_j^-)) \quad \text{Ecuación 5.3-9}$$

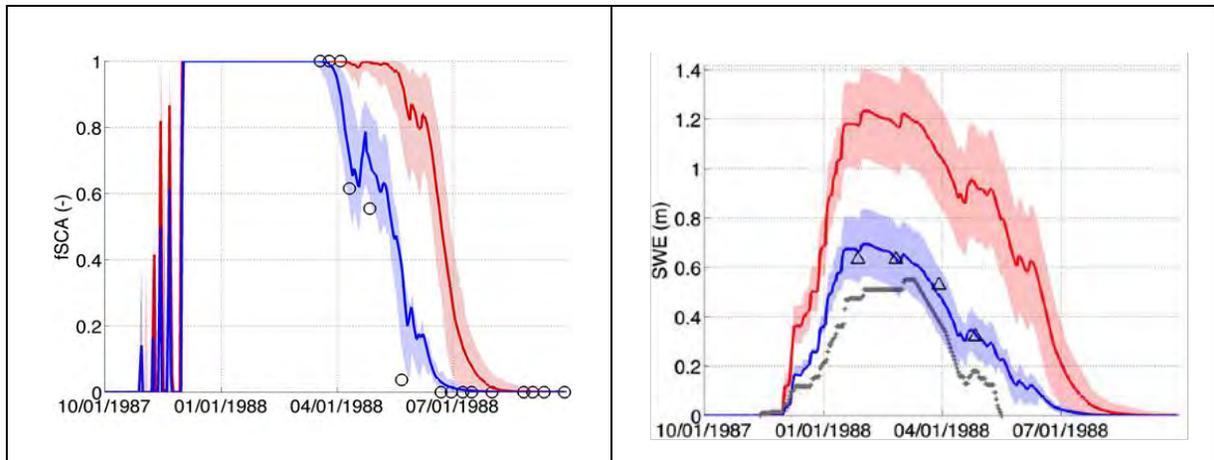
Donde $p_V(V)$ representa la función de probabilidad del vector de observaciones Z , y M representa el vector de observaciones simuladas (en este caso, el modelo de nieve que simula fSCA). N_{obs} representa el número de observaciones dentro de la ventana de asimilación. La matriz de error de fSCA C_V fue fijada en una diagonal unitaria multiplicada por 0,15 basado en los resultados de Cortés *et al.* (2014). Esta matriz representa el error medio de las observaciones de fSCA de Landsat. Las ecuaciones 5.3-8 y 5.3-9 proveen de un mecanismo para actualizar los pesos del ensamble. Luego, se pueden obtener los estadísticos del ensamble *a priori* y *a posteriori* con los nuevos pesos actualizados utilizando las ecuaciones 5.3-10 y 5.3-11:

$$\text{Prior: } Y_j^- = SWE_j^-, \quad w_j^- = \frac{1}{N} \quad \text{Ecuación 5.3-10}$$

$$\text{Posterior: } Y_j^+ = Y_j^- = SWE_j^-, \quad w_j^+ = \frac{c_0}{N} p_V(Z - M_j^-) \quad \text{Ecuación 5.3-11}$$

Para que el ensamble *a posteriori* tenga una función de distribución de probabilidad (FDP) válida, se deben normalizar los pesos con la constante de normalización $c_0 = N / \sum_j p_V(Z - M_j^-)$. El proceso de asimilación asignará mayor peso a aquellos miembros del ensamble que muestren un valor de fSCA que esté más cerca de los valores de fSCA observados por el satélite.

Luego de la asimilación, se pueden obtener los estadísticos del ensamble de datos. Estos estadísticos incluyen el promedio, mediana, e intervalo de confianza del 25-75%. Para este informe se utiliza la mediana dado que se trata de un ensamble probabilístico: la mediana representa el miembro del ensamble ubicado en la probabilidad del 50% (valores mayores o menos son equiprobables). Un ejemplo del sistema de asimilación se presenta en la Figura 5.3-6, y un esquema de los pasos dentro del sistema se presenta en la Figura 5.3-7.



Nota: (Izquierda) Se muestra el ensamble a priori de cobertura nival fraccional (fSCA, en rojo), con su respectivo rango de incerteza debido a la perturbación de las forzantes meteorológicas. (Derecha) Se muestra el ensamble a priori de equivalente en agua (EA, en rojo), con su respectivo rango de incerteza. Los círculos representan las observaciones de fSCA del satélite Landsat, las cuales son asimiladas. Finalmente, se muestra el ensamble a posteriori después de la asimilación (en azul para ambas variables) con el nuevo rango de incerteza asociado. En el gráfico de la derecha se muestran los valores de EA observados en un snow pillow (puntos grises) y en una ruta de nieve (triángulos).

Figura 5.3-6 Ejemplo del sistema de asimilación de datos para un pixel ubicado en la Sierra Nevada, California (Margulis et al., 2015).

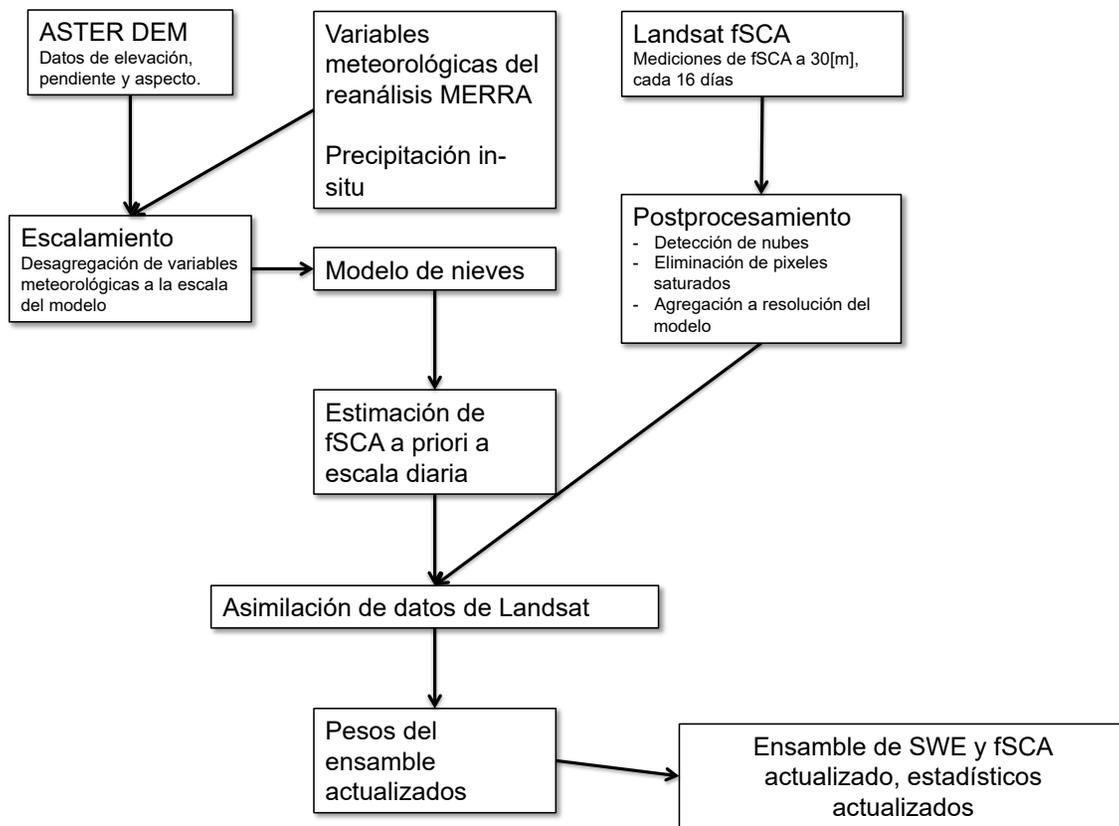


Figura 5.3-7 Esquema del algoritmo de modelación y asimilación de nieve, utilizado en este trabajo.

5.3.6 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.

A partir del método desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) para abstracciones de precipitación, descrito por V.T. Chow (1996), al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales, se desarrolló la relación empírica que permite estimar para un evento hidrológico la parte de precipitación total (P) que logra transformarse en escorrentía directa (E). Lo anterior se presenta en la ecuación 5.3-12.

$$E = \frac{(P - 0,2 \cdot R_{\max})^2}{P + 0,8 \cdot R_{\max}} \quad \text{Ecuación 5.3-12}$$

En esta formulación se observa que la relación entre escorrentía directa y precipitación depende de la retención máxima del suelo (R_{\max}).

Por otro lado, al representar en gráficas la información de P y E en muchas cuencas, el Soil Conservation Service (SCS) encontró curvas empíricas que estandarizó definiendo un número adimensional de curva (CN , curva número), tal que $0 < CN < 100$. Este número se define para superficies impermeables y superficies de agua como $CN=100$; mientras que para superficies naturales $CN < 100$. Es decir, los valores de curva número se asocian a cada tipo de cuenca.

Del mismo modo, la capacidad de retención máxima (R_{\max}) depende de las características del suelo y de las condiciones climáticas de la zona analizada. Así, la curva número y la capacidad de retención máxima se relacionan por la ecuación 5.3-13.

$$CN = \frac{1.000}{10 + \frac{R_{\max}}{25,4}} \quad \text{Ecuación 5.3-13}$$

Por otro lado, la capacidad de retención máxima (R_{\max}) se relaciona con la capacidad de almacenamiento inicial máxima $(I_a)_{\max}$, a través de la relación experimental descrita en la ecuación 5.3-14.

$$(I_a)_{\max} = 0,2 \cdot R_{\max} \quad \text{Ecuación 5.3-14}$$

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.

Según las variables y las relaciones antes definidas, la infiltración mediante esta metodología se calcula según el siguiente procedimiento:

a) Definición de curva número asociada a la cuenca: CN

b) Cálculo de capacidad de retención máxima (mm) en función de la curva número (CN) seleccionada:

$$R_{\max} = 25,4 \cdot \left(\frac{1.000}{CN} - 10 \right) \quad \text{Ecuación 5.3-15}$$

c) Precipitación total correspondiente a un evento hidrológico (mm): P

d) Escorrentía directa (mm): E

$$E = \frac{(P - 0,2 \cdot R_{\max})^2}{P + 0,8 \cdot R_{\max}} \quad \text{Ecuación 5.3-16}$$

e) Capacidad de almacenamiento inicial máxima (mm):

$$(I_a)_{\max} = 0,2 \cdot R_{\max} \quad \text{Ecuación 5.3-17}$$

f) Almacenamiento inicial (mm):

$$\text{si } P > (I_a)_{\max} \rightarrow I_a = (I_a)_{\max}; \text{ si } P < (I_a)_{\max} \rightarrow I_a = P \quad \text{Ecuación 5.3-18}$$

g) Retención de almacenamiento (mm):

$$R = P - E - I_a \quad \text{Ecuación 5.3-19}$$

h) Infiltración de escorrentía (mm):

$$(Inf)_E = \alpha \cdot E, \alpha \text{ es un coeficiente empírico.} \quad \text{Ecuación 5.3-20}$$

i) Infiltración de almacenamiento inicial (mm):

$$(Inf)_{I_a} = \beta \cdot I_a, \beta \text{ es un coeficiente empírico.} \quad \text{Ecuación 5.3-21}$$

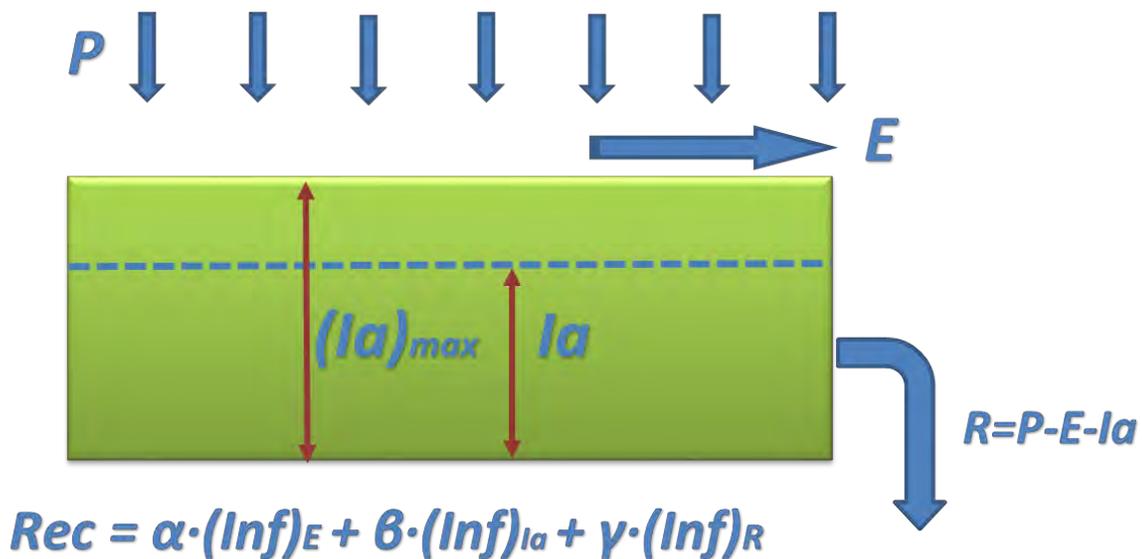
j) Infiltración de la retención de almacenamiento (mm):

$$(Inf)_R = \gamma \cdot R, \gamma \text{ es un coeficiente empírico.} \quad \text{Ecuación 5.3-22}$$

k) Infiltración o recarga total de agua subterránea (mm):

$$Rec = (Inf)_E + (Inf)_{I_a} + (Inf)_R \quad \text{Ecuación 5.3-23}$$

En la Figura 5.3-8 se presenta un esquema con la metodología empleada.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-8 Esquema Conceptual Metodología Curva Numero

Respecto a la determinación de la curva número en las ocho cuencas seleccionadas, según lo publicado en Maidment (1993), el valor que se debe adoptar en cada una de éstas es un número constante, el cual es función del tipo de suelo, utilización y tratamiento de suelo, condiciones de la superficie de terreno y la condición de humedad antecedente del suelo. Sin embargo, de acuerdo a lo planteado en el trabajo de Stowhas (2003), la adopción de valores promedios constantes de curva número en cuencas heterogéneas no refleja adecuadamente el comportamiento de esta variable. Lo anterior, se debe a que la curva número debe variar en función de la magnitud de la precipitación, alcanzando valores máximos para precipitaciones bajas y tendiendo a valores bajos para precipitaciones de gran magnitud. Según se detalla en dicha publicación, este efecto es especialmente relevante al considerar precipitaciones de bajo periodo de retorno y en zonas áridas o semiáridas, donde la infiltración es una variable importante.

De esta manera, se consideró la metodología planteada por Saavedra y Stowhas (2003) para la determinación de la curva número, quienes analizaron una serie de tormentas históricas ocurridas en Chile y establecieron sus valores de precipitación total y escorrentía directa. Esto les permitió evaluar las pérdidas por infiltración y el valor empírico de la curva número, de acuerdo al método propuesto por el National Resources Conservation Service (NRCS, 1972). Como resultado de su análisis establecieron una dependencia decreciente entre el valor de la curva número y la magnitud de la precipitación, proponiendo una modificación a la aplicación del método, introduciendo un nivel de infiltración inicial variable dependiente de la precipitación.

Conforme a lo anterior, para la determinación de la curva número en el presente estudio, se utilizaron las expresiones correspondientes a las cuencas cercanas estudiadas por Saavedra y Stowhas (2003) en Chile; con similares altitudes, tipos de suelos y régimen de precipitaciones; por lo que se consideraron representativas de las cuencas en estudio. En las siguientes expresiones se presentan las ecuaciones ajustadas utilizadas.

- Cuenca Loa - Cuenca Copiapó
 $CN(Huasco) = 40 + 60 \cdot \exp(-0,0200 \cdot P)$ - Condición Humedad II **Ecuación 5.3-24**
- Cuenca Limarí
 $CN(Limarí) = 70 + 30 \cdot \exp(-0,0240 \cdot P)$ - Condición Humedad II **Ecuación 5.3-25**
- Cuenca Aconcagua - Cuenca Maipo
 $CN(Choapa) = 68 + 32 \cdot \exp(-0,0448 \cdot P)$ - Condición Humedad II **Ecuación 5.3-26**
- Cuenca Bío-Bío - Cuenca Imperial - Cuenca Itata
 $CN(Bío - Bío) = 49,4 + 50,6 \cdot \exp(-0,0107 \cdot P)$ - Condición Humedad I **Ecuación 5.3-27**

Donde:

P : Precipitación total (mm).

Para generar series sintéticas de precipitación anual representativas en las cuencas estudiadas, y así determinar las series de recarga en éstas, se utilizó la información de los mapas topoclimáticos de precipitación media anual de las cuencas; la información de las series de precipitación de las tres estaciones utilizadas en el análisis temporal de precipitación de cada cuenca; y la información espacial de las estaciones de precipitación recomendadas indicadas en el acápite 5.2.3 y presentadas en el Cuadro 5.2-5.

De esta manera, el procedimiento realizado en cada una de las cuencas fue el siguiente:

- Se construyeron subdivisiones geométricas espaciales, conocidas como polígonos de Thiessen, asociadas a cada estación de precipitación recomendada en la cuenca.
- Las subdivisiones generadas se agruparon de manera tal que en cada cuenca se generaron tres sectores. Para estos se consideró como base las subdivisiones asociadas a las tres estaciones utilizadas en los análisis temporales (estación base), y que se encuentran distribuidas espacialmente en cada cuenca. Así, las subdivisiones identificadas en el punto anterior se agruparon en las vecindades de las estaciones mencionadas, tal como se presenta en las Figuras 5.3-9 y 5.3-10.
- En cada una de las tres estaciones base se calculó la precipitación media anual ($P_{M.A.EB}$) de la estadística.

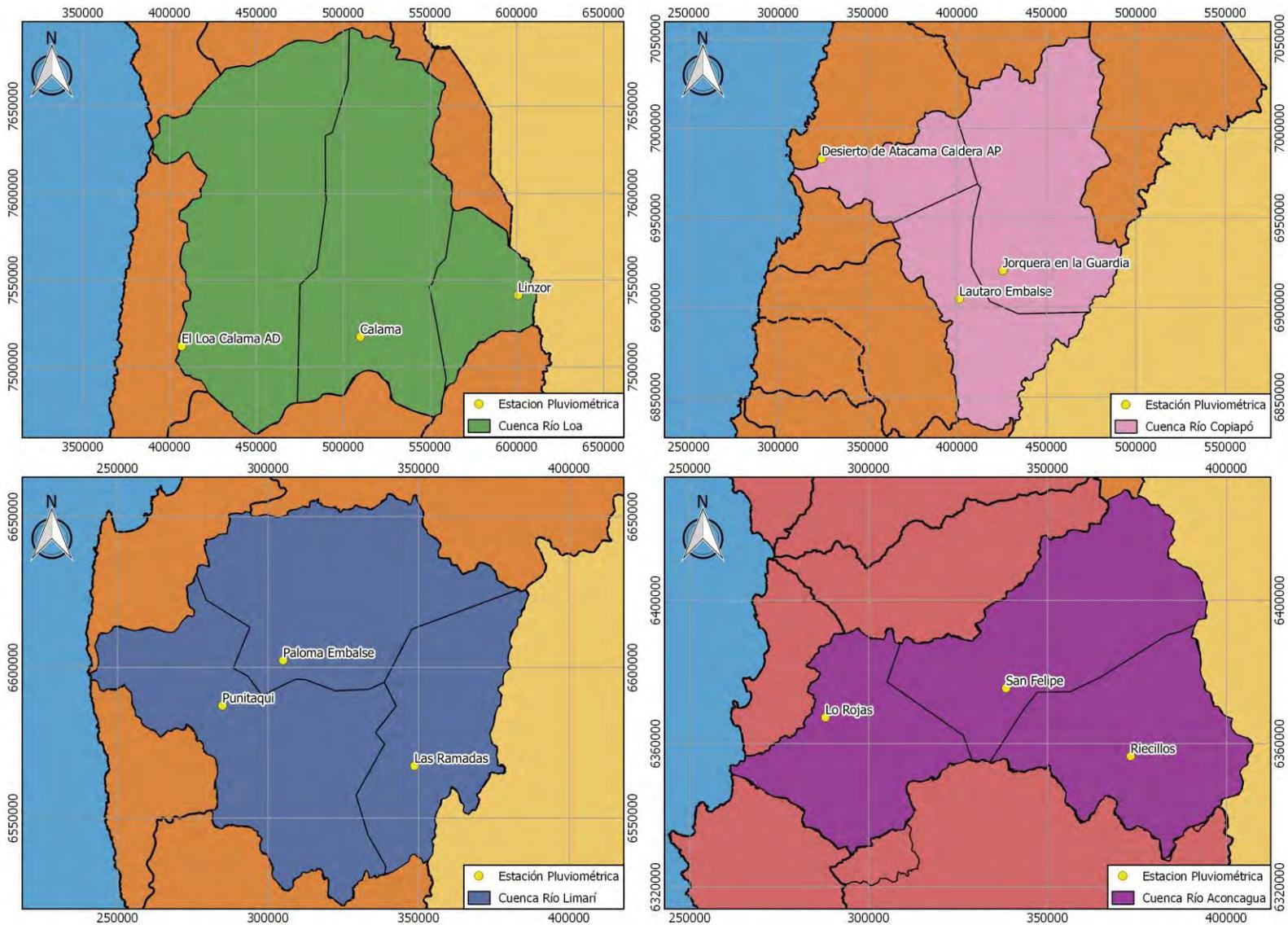
- En cada uno de los tres sectores se calculó la precipitación media anual, a partir de la información dispuesta en el mapa climático ($P_{M.A.S}$).
- Se calcularon factores de transposición en cada sector, según lo indicado en la ecuación 5.3-28.

$$FT_S = P_{M.A.S} / P_{M.A.EB} \quad \text{Ecuación 5.3-28}$$

- Finalmente, se calculó la estadística de precipitación anual asociada a cada sector (Pp_S), multiplicando la precipitación de cada estación base (Pp_{EB}) por su factor de transposición (FT_S), de acuerdo a lo indicado en la ecuación 5.3-29.

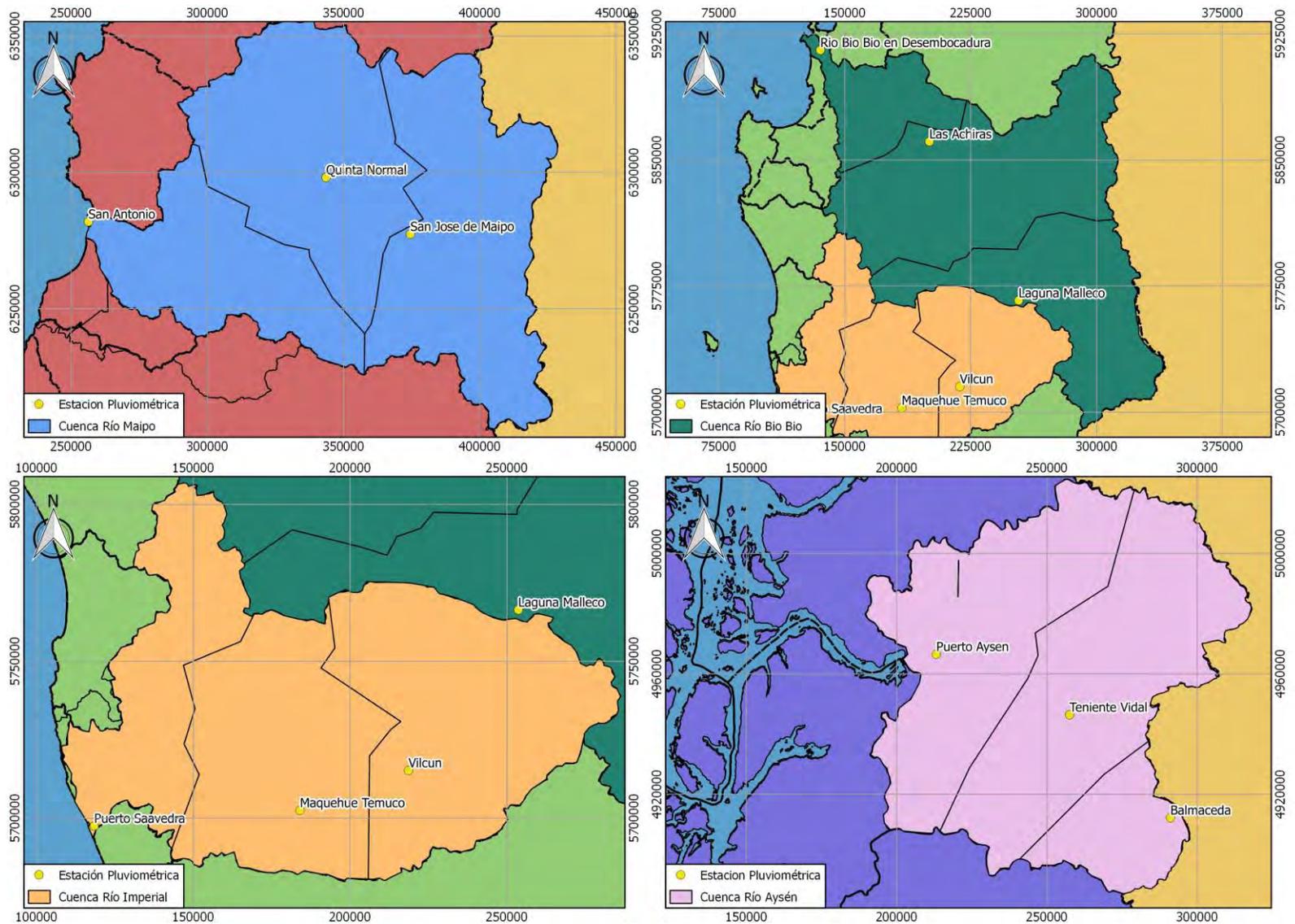
$$Pp_S = FT_S \cdot Pp_{EB} \quad \text{Ecuación 5.3-29}$$

Los resultados de la aplicación de esta metodología se presentan en el acápite 6.7.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-9 Distribución de Sectores de Recarga en Cuencas Loa, Copiapó, Limarí y Aconcagua



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 5.3-10 Distribución de Sectores de Recarga en Cuencas Maipo, Bío-Bío, Imperial y Aysén

5.3.7 Metodología de Construcción del Indicador Regional

Debido a la alta variabilidad que las estaciones pueden presentar entre ellas (incluso dentro de una misma cuenca), es necesario emplear métricas agregadas por cuenca que presenten menos ruido. Estas métricas deben ser capaces de presentar una señal clara de cambio dado que el análisis individual de cada una de las estaciones podría no ser suficiente como para plantear conclusiones respecto a los posibles cambios observados debido a la variabilidad que presentan entre ellas. Para este propósito se propone un indicador regional de cada cuenca, derivado de la metodología propuesta por Masiokas et al. (2006). La metodología de construcción y los resultados de la aplicación del indicador regional se presentan a continuación.

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.

Para el caso de la precipitación se consideran las anomalías calculadas como la fracción de la precipitación promedio observada en la estación. El cálculo del indicador para precipitación se presenta en la Ecuación 5.3-30

$$\text{Ind}_{PP} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad \text{Ecuación 5.3-30}$$

Donde “n” corresponde al número de estaciones y A_i viene dada por la siguiente ecuación:

$$A_i = \frac{PP_t}{\overline{PP}_t} \quad \text{Ecuación 5.3-31}$$

PP_t la precipitación total observada durante un año o estación en particular

\overline{PP}_t el promedio histórico de la precipitación total del periodo anual, invierno o verano.

Un valor de indicador de 0,5 representa una precipitación total anual, de invierno, o verano, 50% del valor promedio histórico. Un valor del indicador de 2,0 representa una precipitación total anual, de invierno, o verano, el doble del valor promedio histórico.

Para el caso de temperatura se considera la desviación respecto a la temperatura promedio observada en la estación. La desviación de temperatura se calcula como la diferencia entre la temperatura observada y la temperatura promedio. Este cálculo se muestra en la Ecuación 5.3-32 y 5.3-33.

$$\text{Ind}_T = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad \text{Ecuación 5.3-32}$$

Donde A_i viene dada por la siguiente Ecuación:

$$A_i = T_t - \bar{T}_t \quad \text{Ecuación 5.3-33}$$

T_t la temperatura media observada durante un año o estación en particular

\bar{T}_t la temperatura media, promediada para todo el registro histórico, del periodo anual, invierno o verano analizado

Un indicador de temperatura de un valor de -1 representa una temperatura 1°C observada (durante el año o durante una de las dos estaciones) menor al promedio histórico. Un indicador de temperatura de un valor de 1 representa una temperatura de 1°C observada (durante el año o durante una de las dos estaciones) mayor al promedio histórico.

Para el caso de la precipitación, un valor mayor a 1,0 del indicador representa un superávit, mientras que para la temperatura un valor mayor a 0 representa un calentamiento respecto al valor promedio climatológico. Para la precipitación, un valor entre 0 y 1 representa un déficit. Para el caso de la temperatura, un valor negativo representa un enfriamiento respecto al valor promedio histórico. El cálculo del indicador regional se lleva a cabo por cada una de las cuencas analizadas en este estudio.

Una de las ventajas de la utilización de indicadores regionales es que son robustos en una zona de alta variabilidad fisiográfica. Como se mencionó anteriormente, las cuencas Andinas presentan diferencias significativas en variables como la elevación, por lo que estaciones relativamente cercanas pueden presentar valores significativamente distintos entre sí. Al utilizar indicadores regionales se homogeniza la serie de datos de manera tal que se puedan generar promedios entre las distintas estaciones. Los indicadores regionales obtenidos mediante esta metodología para las cuencas en estudio se presentan en el acápite 6.8.

5.4 CONCLUSIONES

La serie de metodologías detalladas en el presente capítulo han sido aplicadas a las variables hidrometeorológicas correspondientes, lo que ha permitido realizar un análisis profundo de su comportamiento.

Si bien existen metodologías que podrían ser aplicadas a cualquier variable hidrometeorológica (mapas topoclimáticos, análisis temporal, etc.), su utilización se ve limitada por la cantidad de información existente, por lo que cada una de las variables hidrometeorológicas de estudio son analizadas de acuerdo a las metodologías aplicables a la calidad de información existente.

CAPÍTULO 6 CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS

6.1 INTRODUCCIÓN

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. Los resultados obtenidos permiten la realización de un análisis detallado del comportamiento de las variables, así como también de su situación promedio en aquellas en que no se dispone de una larga data.

6.2 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.

6.2.1 Análisis Espacial y Modelos Topoclimáticos

A continuación, por medio de figuras y cuadros, se muestran los resultados de la aplicación de los modelos topoclimáticos para cada de las cuencas que se evaluaron en este estudio. Cada una de las figuras presenta el resultado final de la aplicación del modelo. Los cuadros de resumen presentan los detalles de los modelos ajustados (se presenta el valor R^2 y además el error cuadrático medio) para cada una de las cuencas, además de las observaciones respecto a cada una de las aplicaciones. Se consideraron solamente estaciones dentro de la cuenca para validar los modelos.

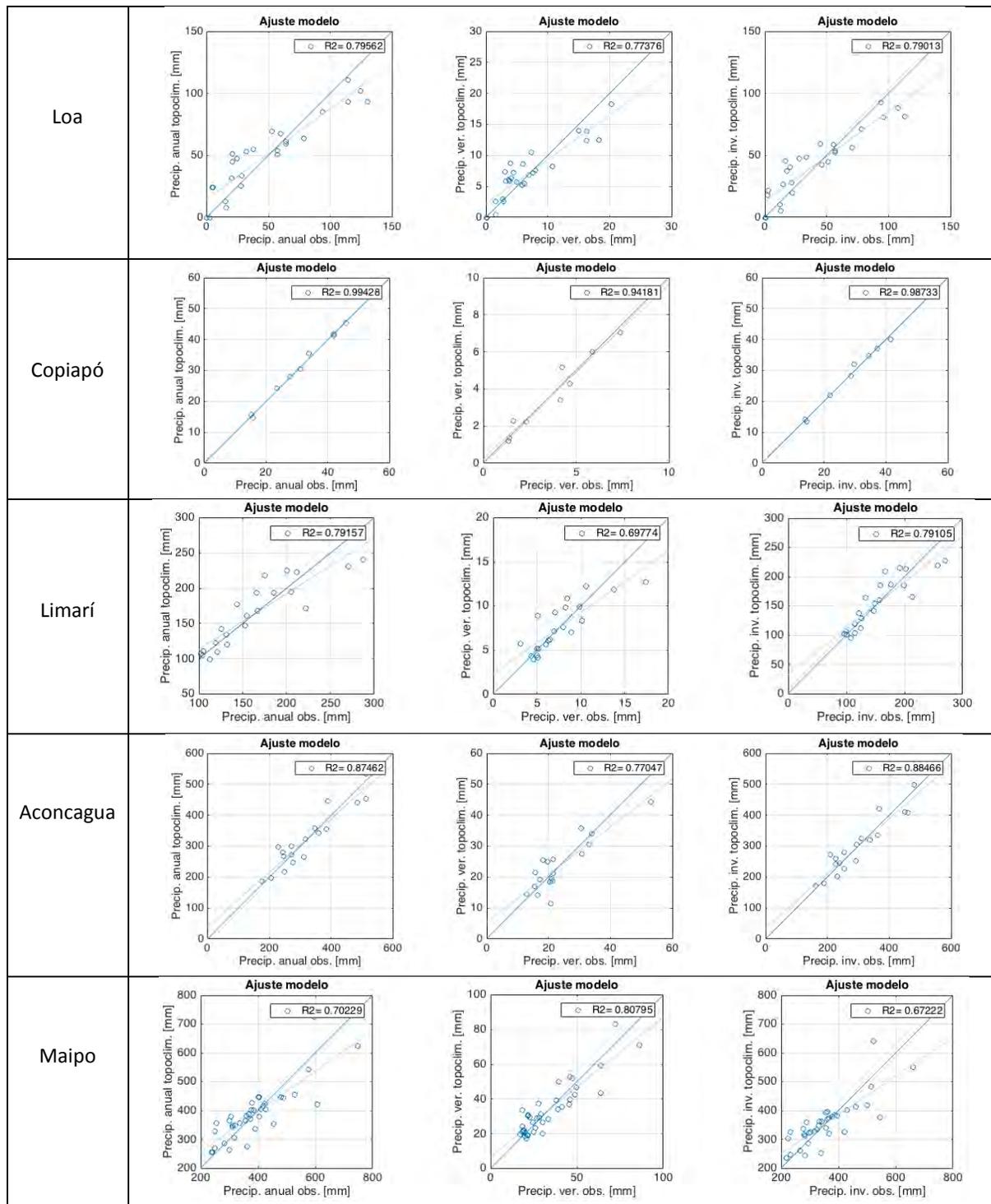
Cuadro 6.2-1 Resumen de la aplicación de los modelos topoclimáticos en cada una de las cuencas de estudio para la variable precipitación

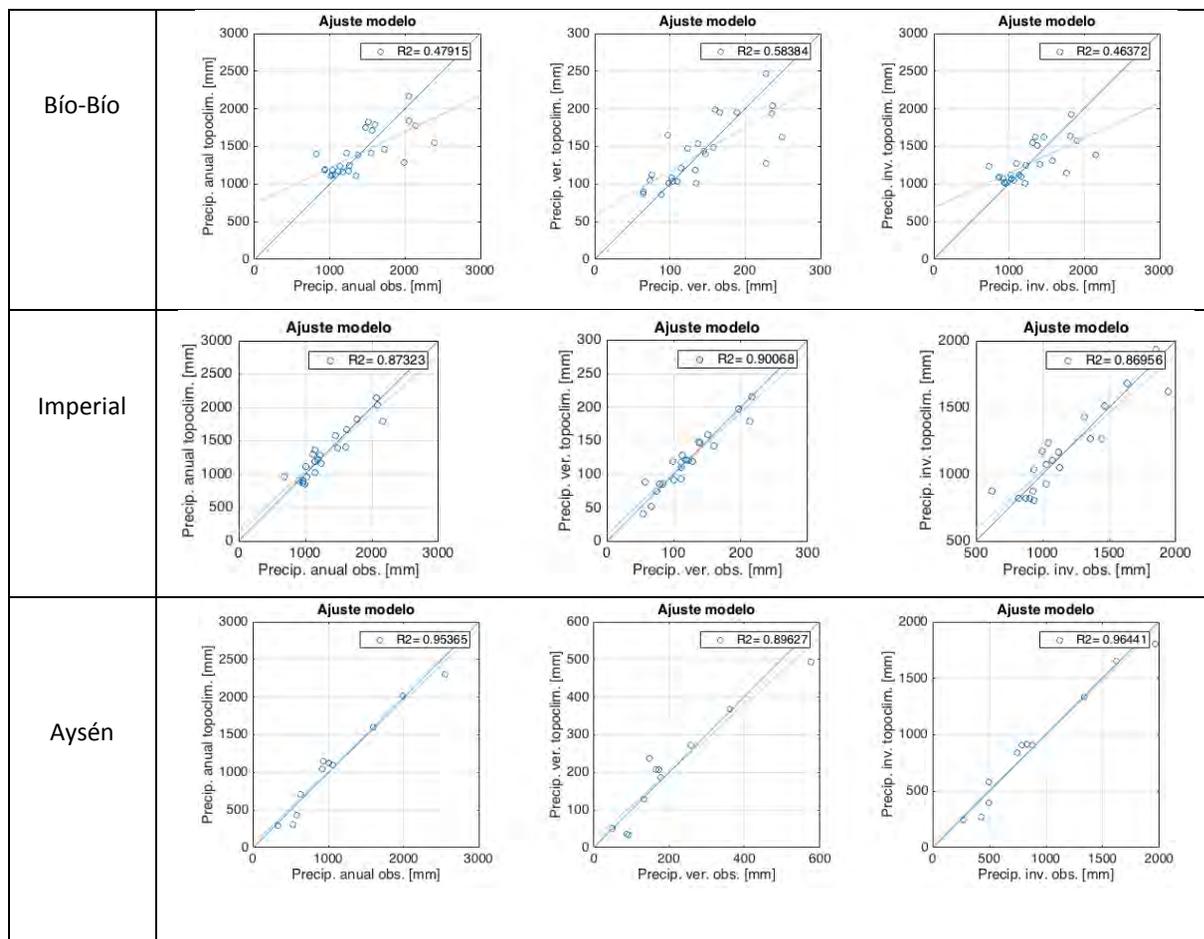
Cuenca	Ajuste Anual (R ²)	Ajuste Invierno (R ²)	Ajuste Verano (R ²)	ECM Anual (mm)	ECM Invierno (mm)	ECM Verano (mm)	Observaciones
Loa	0,80	0,79	0,77	15,80 (33,7%)	13,90 (34,9%)	2,41 (35,2%)	Si bien se observa un ajuste regular del modelo, es posible que la complejidad del régimen climático de la cuenca del Loa haya dificultado en obtener un modelo más robusto.
Copiapó	0,99	0,99	0,94	0,84 (2,8%)	0,96 (3,6%)	0,35 (12,7%)	Buen ajuste de la precipitación a las variables independientes utilizadas en el modelo.
Limarí	0,79	0,79	0,70	23,30 (14,3%)	22,10 (14,2%)	1,79 (23,8%)	Ajuste regular en comparación a las otras cuencas.
Aconcagua	0,88	0,89	0,77	35,20 (11%)	31,40 (10,6%)	4,51 (19,1%)	Buen ajuste de la precipitación a las variables independientes utilizadas en el modelo.
Maipo	0,70	0,67	0,81	60,40 (15,6%)	55,90 (15,8%)	7,24 (21,4%)	Ajuste regular en comparación a las otras cuencas.
Bío-Bío	0,48	0,46	0,58	301,00 (21,3%)	267,00 (21%)	35,90 (25,5%)	El ajuste observado para Bío-Bío fue el más débil observado.
Imperial	0,87	0,87	0,90	144,00 (10,9%)	130,00 (10,9%)	14,20 (11,8%)	Buen ajuste de la precipitación a las variables independientes utilizadas en el modelo.
Aysén	0,95	0,96	0,90	140,00 (12,7%)	96,00 (10,7%)	46,20 (22,8%)	Buen ajuste de la precipitación a las variables independientes utilizadas en el modelo.

Nota: ECM = Error Cuadrático Medio.

Fuente: Elaboración Propia.

Los gráficos de ajuste de los valores observados de precipitación se muestran a continuación para precipitaciones anuales, de verano y de invierno en la Figura 6.2-1. El eje “x” muestra la variable observada en cada una de las estaciones, mientras que el eje “y” muestra la variable estimada para cada una de las estaciones en base al modelo topoclimático estimado.

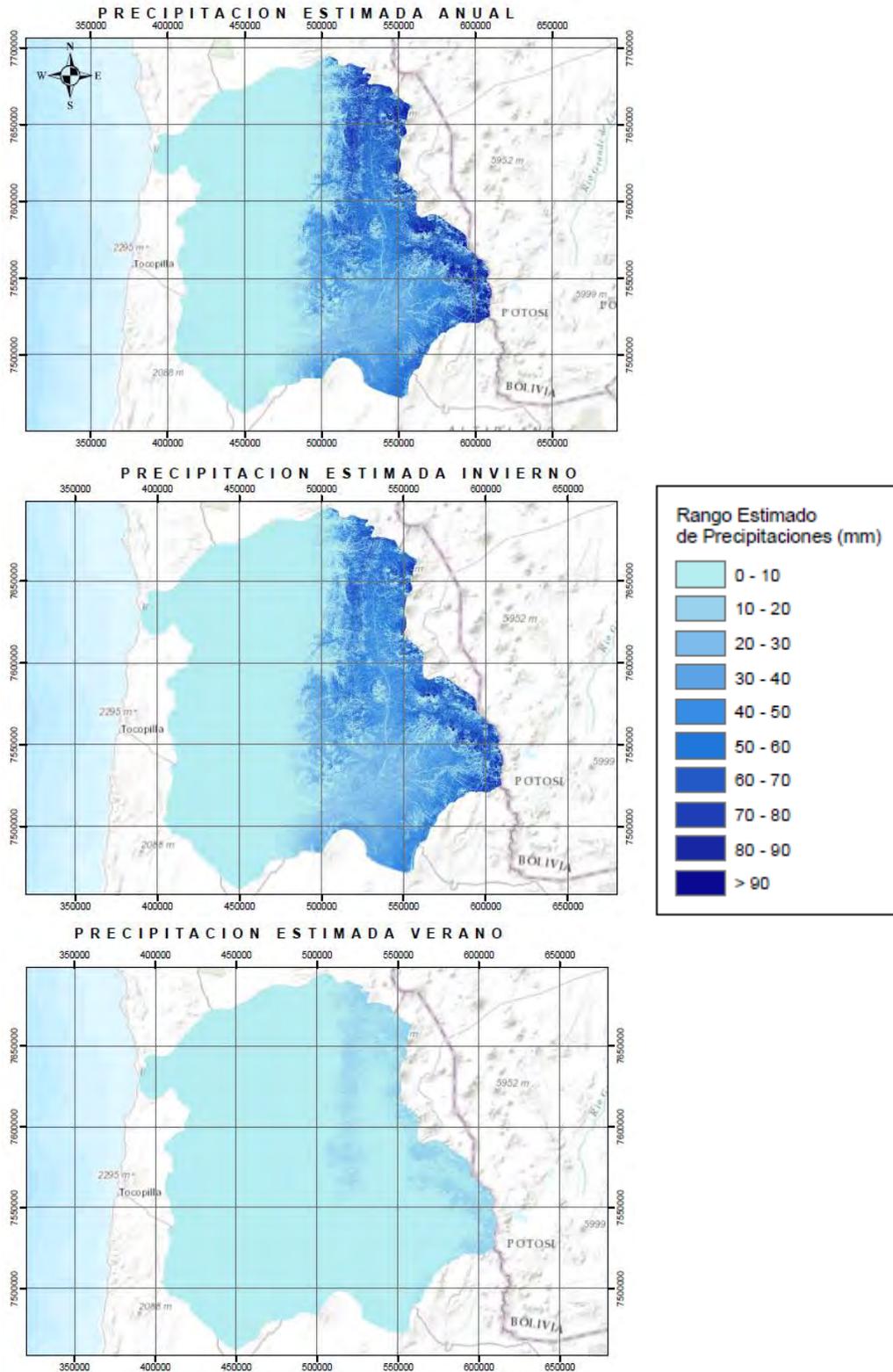




Fuente: Elaboración Propia.

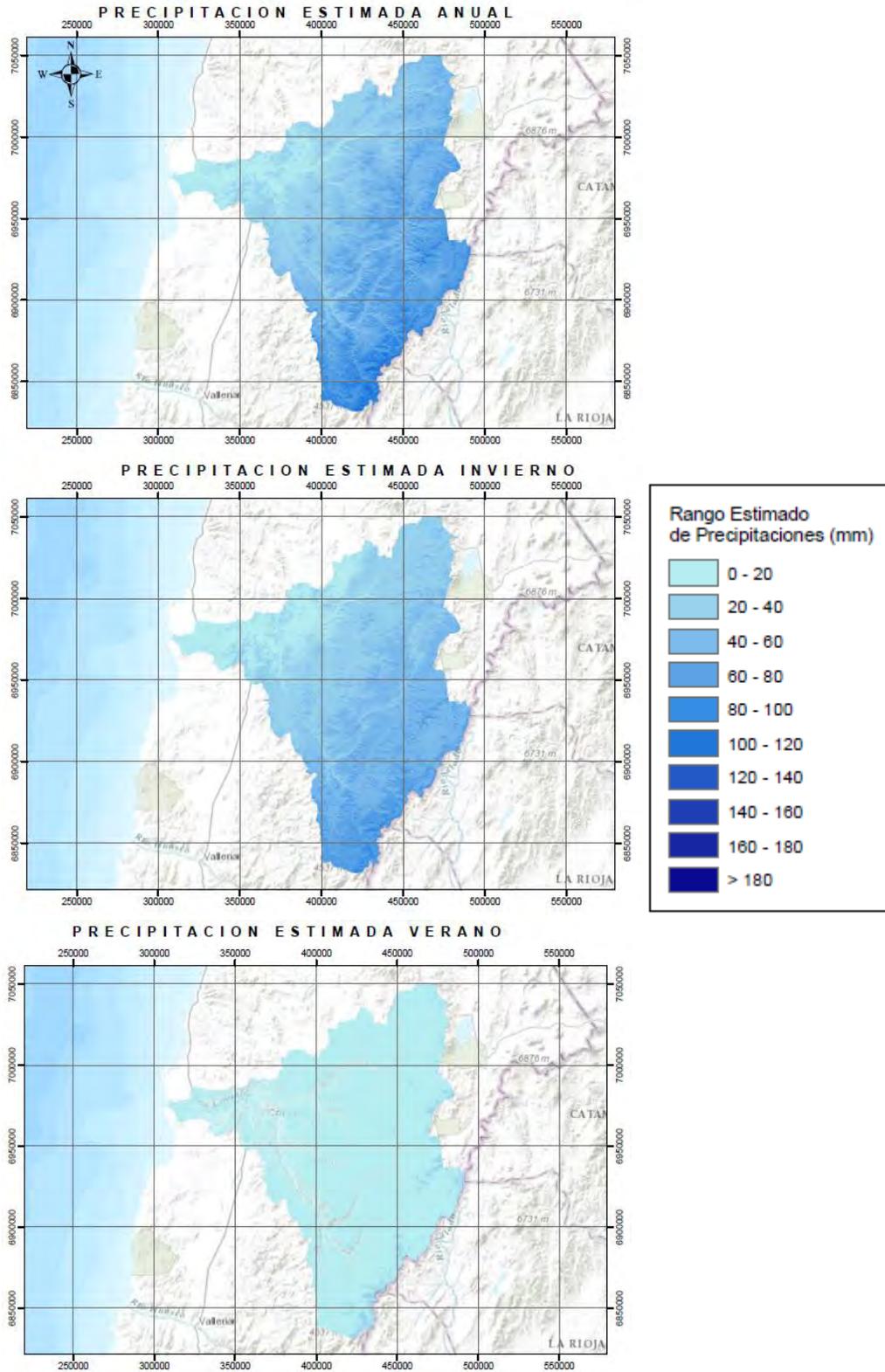
Figura 6.2-1 Ajuste de los modelos topoclimáticos para precipitación

A continuación, en las Figuras 6.2-2 a 6.2-9, se presentan las estimaciones distribuidas de precipitación para cada una de las cuencas seleccionadas. Los resultados se presentan como mapas distribuidos de precipitación total anual, invierno y verano. Debido a la alta variabilidad de la precipitación entre cada una de las cuencas se utilizó una escala de colores distinta para cada figura. Es importante además notar que las precipitaciones de verano de cada una de estas cuencas es en general un orden de magnitud menor que las precipitaciones de invierno o anuales, por lo que muchas veces los rangos empleados para visualizar los resultados no permiten apreciar la variabilidad espacial de precipitación estival.



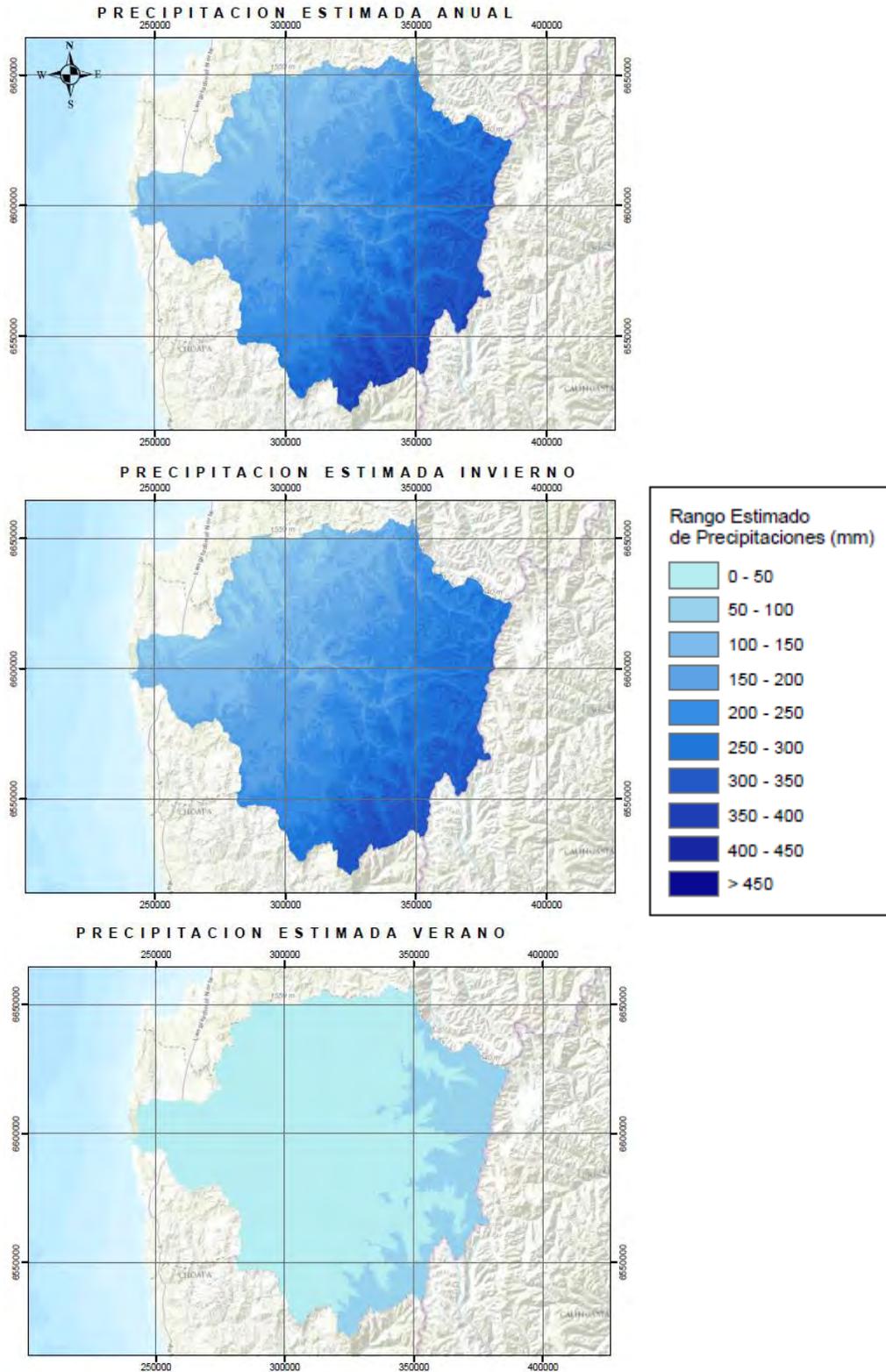
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-2 Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Loa



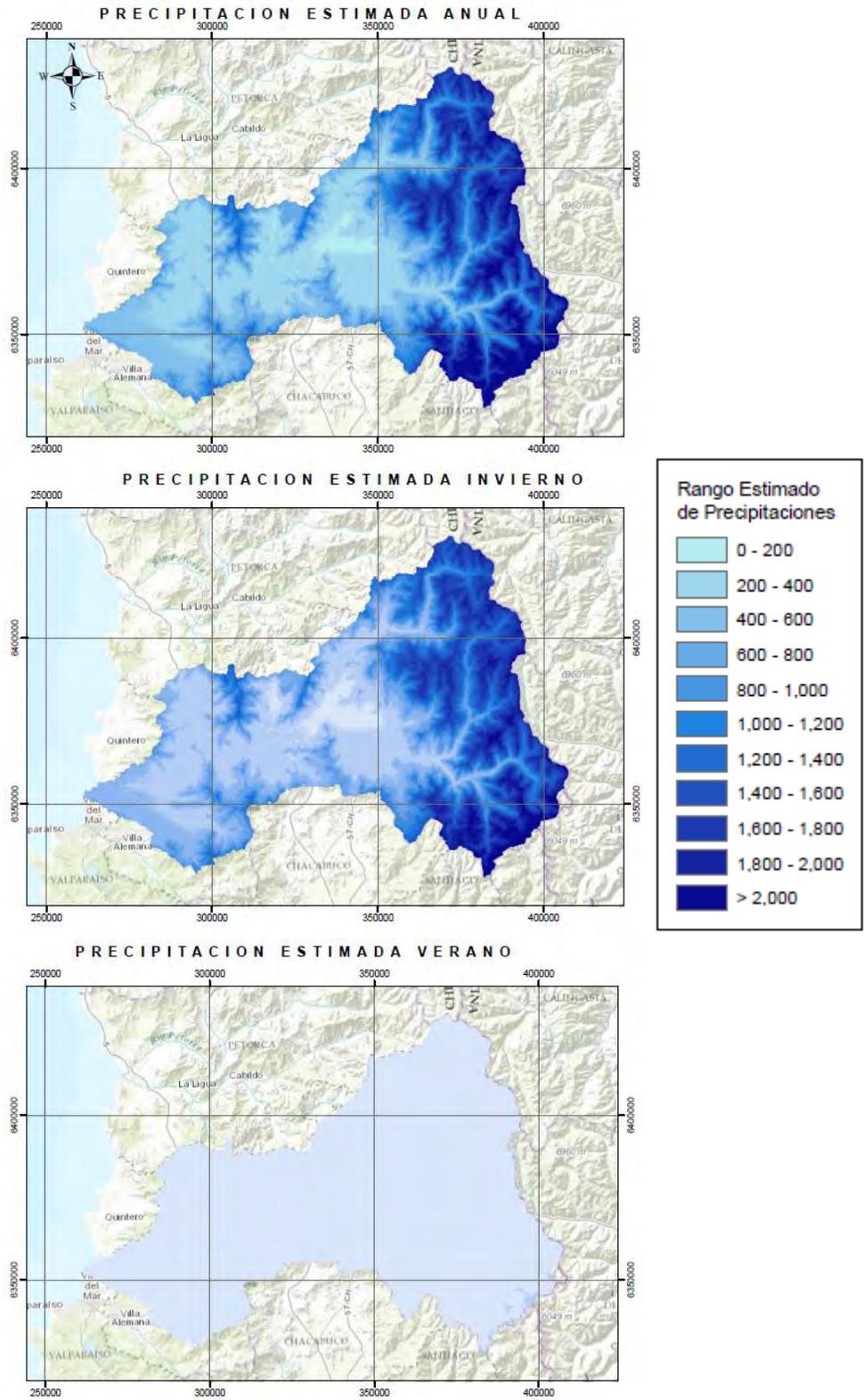
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-3 Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Copiapó



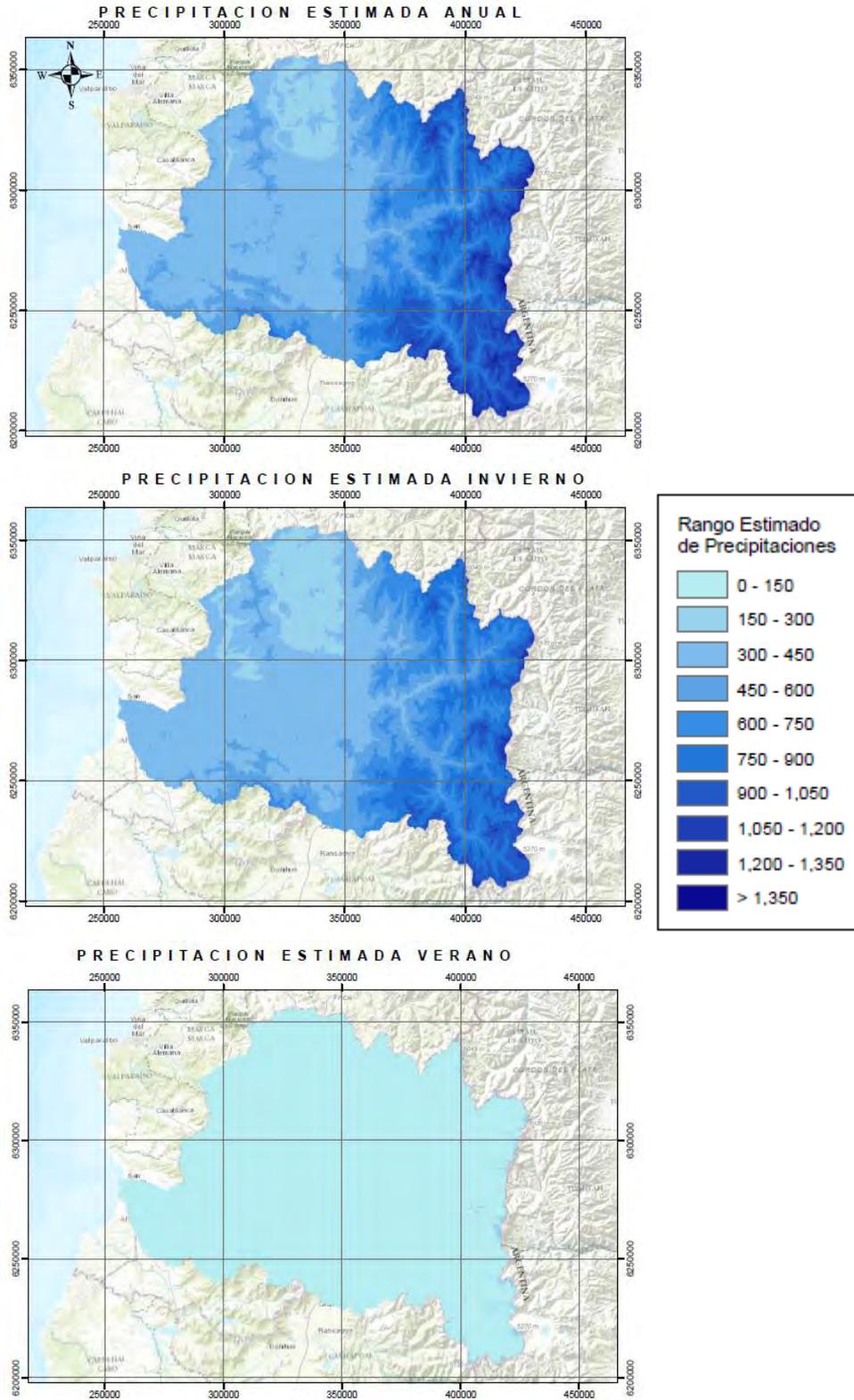
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-4 Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Limarí



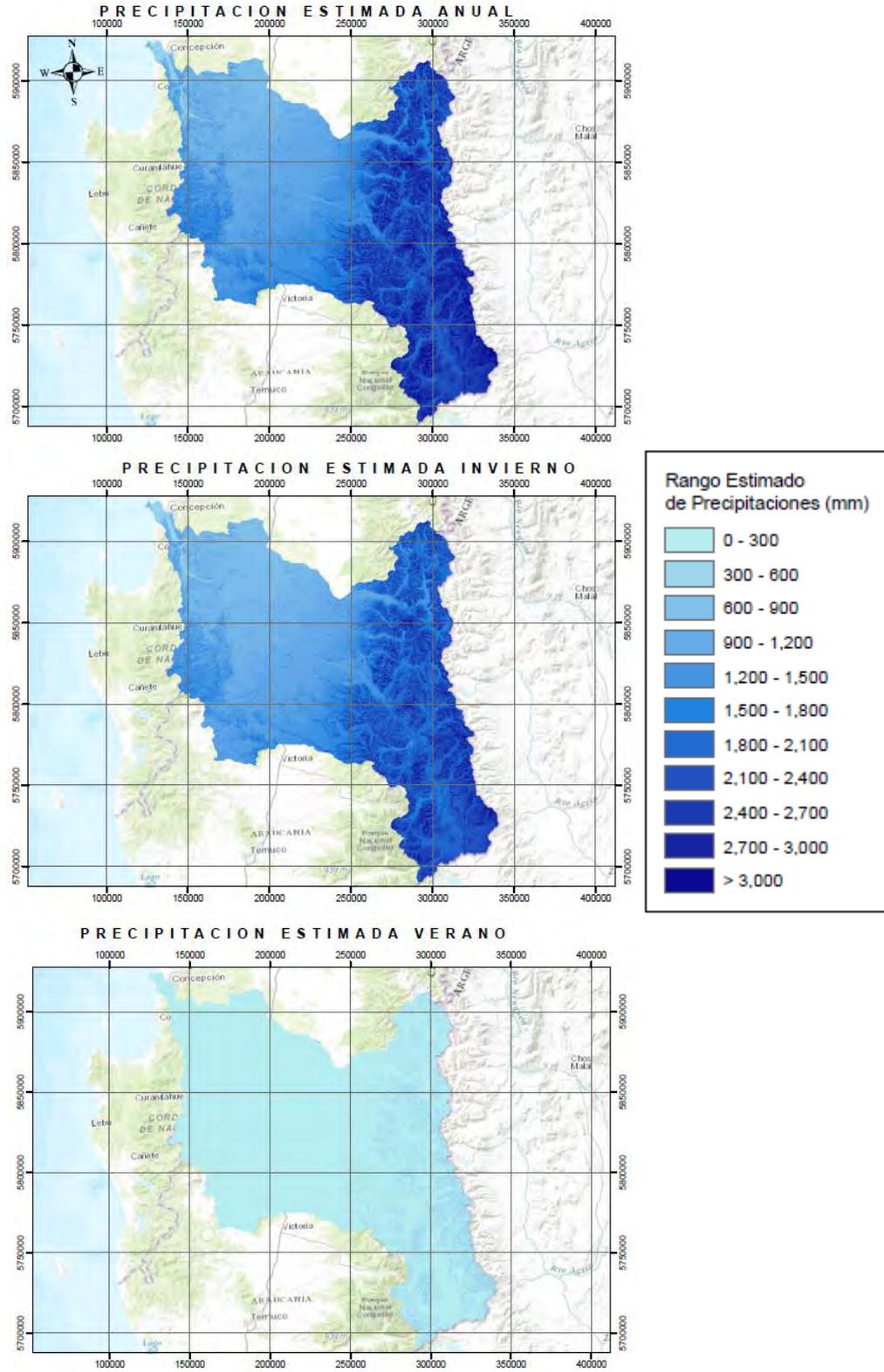
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-5 Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Aconcagua



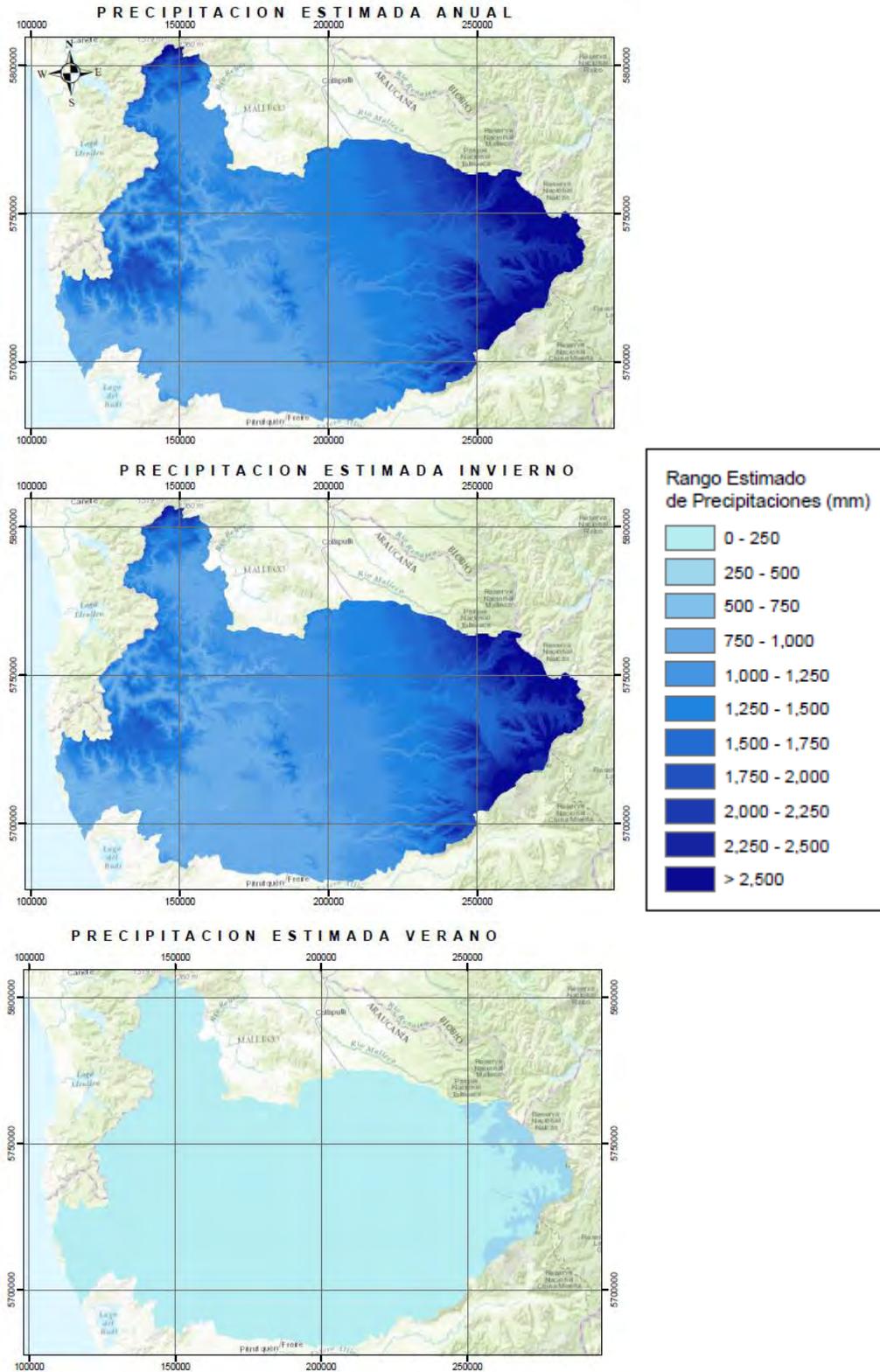
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-6 Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Maipo



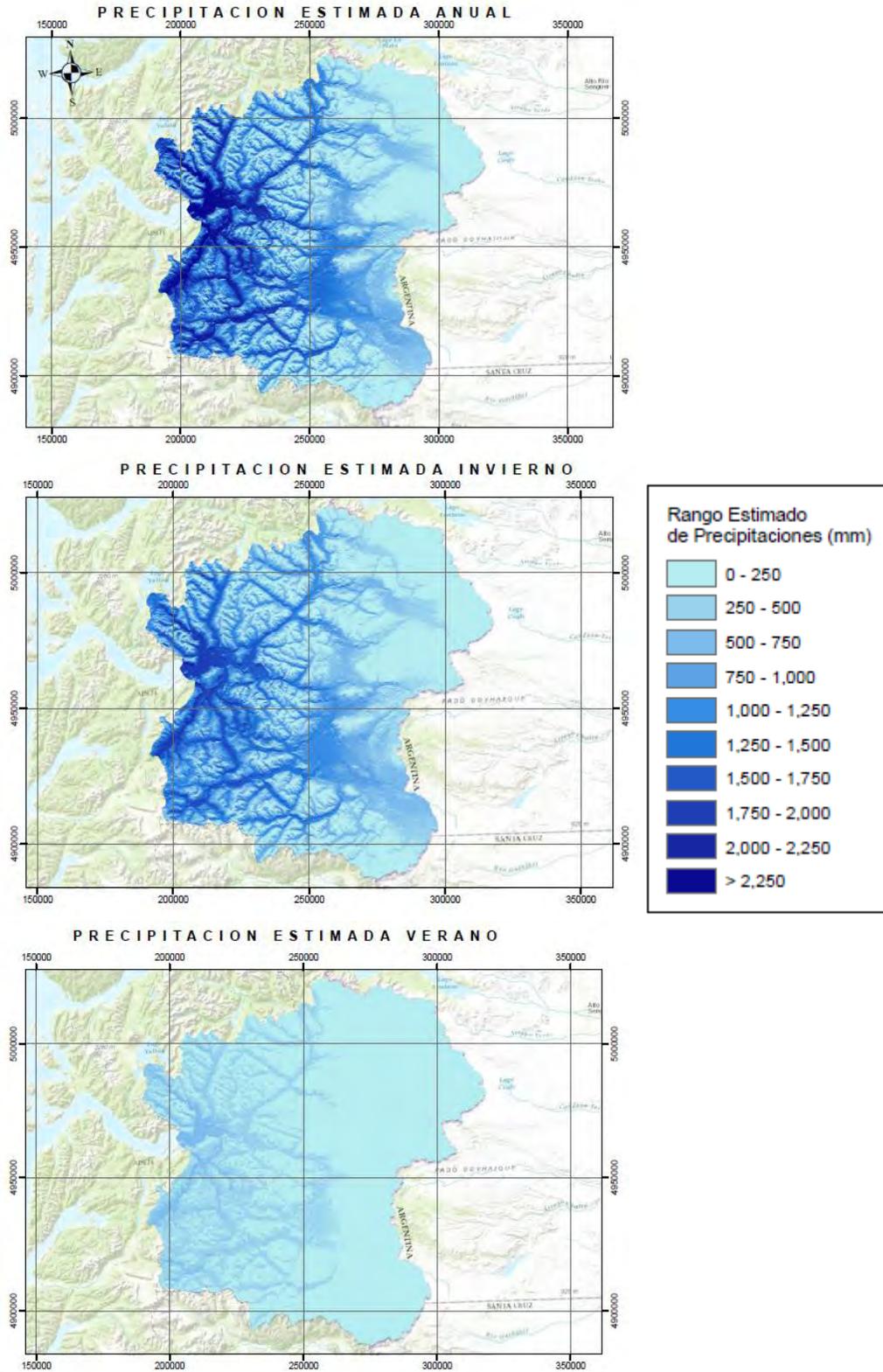
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-7 Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Bío-Bío



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-8 Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Imperial



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-9 Precipitación estimada del modelo topoclimático para cuenca del Río Aysén

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 (Viale y Núñez, 2011). 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 (donde virtualmente no se tienen precipitaciones significativas) 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.

Es importante mencionar que los modelos topoclimáticos de precipitación presentados en este trabajo son experimentales y tienen limitaciones asociadas. La principal limitante está dada por el número de estaciones utilizadas para ajustar los modelos. Un bajo número de estaciones no permite obtener relaciones robustas entre la precipitación y las variables fisiográficas de interés. Por ejemplo, para las cuencas del río Aconcagua y río Maipo no existe una red adecuada de monitoreo de precipitaciones en elevaciones mayores a 3.000 m s.n.m. Esto resulta en que las precipitaciones estimadas para aquellas elevaciones pueden presentar sesgos negativos o positivos (sin posibilidad de realmente verificar las estimaciones). En el caso del río Aconcagua se obtuvieron precipitaciones totales anuales del orden de 3.000 mm para los sectores más altos de la cordillera, lo que a juicio de este consultor no es realista. Una precipitación de tal magnitud resultaría en mantos nivales del orden de más de 10 metros de profundidad en años normales.

El resultado obtenido para Aconcagua (Figura 6.2-5) ejemplifica la necesidad de contar con mejores redes de monitoreo en altura. Una red de monitoreo adecuada no solo permitiría obtener una mejor caracterización climatológica de las precipitaciones observadas, pero además permitiría realizar estimaciones distribuidas de precipitaciones en tiempo cuasi-real. El concepto de modelo topoclimático no es solamente aplicable desde un punto de vista histórico, pero además puede ser propuesto como un método de estimar la distribución espacial de precipitaciones acontecidas durante un periodo dado. Si bien el método es una estimación y en ningún caso podría reemplazar un monitoreo espacialmente denso de las variables de interés, ofrecería la posibilidad de contar con estimaciones espacialmente distribuidas basadas en relaciones físicas reales entre los valores monitoreados y las variables fisiográficas de interés, lo que sería de gran utilidad para elaborar modelos hidrológicos avanzados, calibrados con información distribuida en vez de información puntual. Considerando que esta aplicación no necesita un registro histórico prolongado se podrían ajustar modelos topoclimáticos con un número de estaciones mayor al presentado

en este trabajo, y por ende obtener (en teoría) relaciones más robustas. En términos computacionales un sistema como el propuesto no presenta complicaciones mayores y además requiere menos recursos que un sistema de modelación meteorológica en tiempo real.

6.2.2 Análisis Temporal Precipitaciones

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

6.2.2.1 Análisis Espectral de las Precipitaciones

Los Cuadros 6.2-2 a 6.2-9 presentan los periodos detectados para cada una de las cuencas analizadas para las distintas agregaciones temporales evaluadas, tanto para las variables precipitación como temperatura.

Macrozona Norte

Es importante recordar que en la macrozona norte se han escogido las cuencas del río Loa, Copiapó y Limarí.

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. Esto permite suponer la existencia de una influencia orográfica o de la presencia de un clima particular, en especial en la zona cordillerana.

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. Cabe destacar la detección de un periodo de 22,5 años para esta estación, pero si bien tiene la significancia estadística, podría no ser representativo de la escala de tiempo utilizada, debido a que un ciclo de 22 años en una serie de 55 sólo puede ser apreciado un máximo de 2 veces.

Cuadro 6.2-2 Periodos detectado a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Loa.

Estación	Periodo Estadística	Valores Propios	Tendencia	Frecuencias	Años / Ciclo	Frecuencias MEM	Años / Ciclo MEM
Linzor	Añual	(1,2) - -	7 8 - -	0,11 - - - - -	9,2 - - - - -	0,08 0,16 - -	12,5 6,3 - -
	Invierno Precipitación	(7,8) - -	6 - - -	0,25 0,42 - - - -	3,9 2,4 - - - -	- - - - -	- - - - -
	Verano	(3,4) (6,7) -	1 - - -	0,26 0,50 0,25 0,50 0,17 - -	3,9 2,0 3,9 2,0 5,9 - -	- - - - -	- - - - -
Calama	Añual	(1,2) (3,4) -	- - - -	0,26 0,10 0,36 - - - -	3,9 9,8 2,8 - - - -	0,24 - - - -	4,2 - - - -
	Invierno Precipitación	(5,6) (8,9) -	- - - -	0,21 0,22 0,38 0,14 0,49 - -	4,8 4,5 2,7 7,0 2,0 - -	0,07 - - - -	14,3 - - - -
	Verano	(3,4) (5,6) -	- - - -	0,12 0,14 0,33 0,49 - - - -	8,7 7,3 3,0 2,1 - - - -	0,25 - - - -	4,0 - - - -
El Loa Calama AD	Añual	(3,4) (7,8) -	10 - - -	0,48 0,40 0,48 - - - -	2,1 2,5 2,1 - - - -	0,13 0,22 - -	7,7 4,5 - -
	Invierno Precipitación	(3,4) (6,7) -	- - - -	0,04 0,42 0,21 - - - -	22,5 2,4 4,9 - - - -	0,28 - - - -	3,6 - - - -
	Verano	(3,4) - - -	10 - - -	0,17 - - - -	5,8 - - - -	0,12 0,24 - -	8,3 4,2 - -
El Loa Calama AD	Añual	(7,8) (8,9) -	1 2 - -	0,12 0,43 0,13 0,40 0,15 0,44 -	8,1 2,3 7,6 2,5 6,9 2,3 -	- - - - -	- - - - -
	Invierno Temperatura	(4,5) (5,6) (9,10)	1 2 - -	0,30 0,49 0,13 0,37 0,30 0,48 -	3,4 2,1 7,9 2,7 3,4 2,1 -	0,17 - - - -	5,9 - - - -
	Verano	(3,4) - - -	1 - - -	0,14 0,29 - - - -	6,9 3,4 - - - -	- - - - -	- - - - -
Parshall N2	Añual	(6,7) - - -	2 3 5 -	0,38 - - - - -	2,7 - - - - -	0,34 0,20 - -	2,9 5,0 - -
	Invierno Temperatura	(1,2) - - -	8 - - -	0,26 - - - - -	3,8 - - - - -	0,09 - - - -	11,1 - - - -
	Verano	(6,7) - - -	2 - - -	0,34 - - - - -	2,9 - - - - -	0,19 - - - -	5,3 - - - -

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.2-3 Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Copiapó.

Estación	Periodo Estadística	Valores Propios	Tendencia	Frecuencias	Años / Ciclo	Frecuencias MEM	Años / Ciclo MEM
Jorquera en la Guardia	Añual	(3,4) - - -	7 - - -	0,37 - - - - -	2,7 - - - - -	0,21 0,28 - -	4,8 3,6 - -
	Invierno Precipitación	(3,4) (5,6) (6,7)	7 - - -	0,04 0,31 0,40 0,31 0,44 - -	27,5 3,2 2,5 3,2 2,3 - -	0,18 - - - -	5,6 - - - -
	Verano	(3,4) - - -	10 - - -	0,34 - - - - -	2,9 - - - - -	0,15 0,28 - -	6,7 3,6 - -
Lautaro Embalse	Añual	(3,4) - - -	5 - - -	0,29 - - - - -	3,5 - - - - -	0,22 0,37 - -	4,5 2,7 - -
	Invierno Precipitación	(3,4) - - -	5 - - -	0,24 - - - - -	4,1 - - - - -	0,28 0,37 - -	3,6 2,7 - -
	Verano	(3,4) (5,6) (7,8)	- - - -	0,25 0,25 0,37 0,34 0,08 0,44 -	4,0 4,0 2,7 2,9 13,1 2,3 -	- - - - -	- - - - -
Desierto de Atacama Caldera AP	Añual	(6,7) - - -	8 - - -	0,28 - - - - -	3,5 - - - - -	0,14 0,43 - -	7,1 2,3 - -
	Invierno Precipitación	(4,5) (6,7) -	8 - - -	0,28 0,48 0,21 0,30 - - - -	3,6 2,1 4,7 3,3 - - - -	0,14 - - - -	7,1 - - - -
	Verano	(5,6) (7,8) (9,10)	- - - -	0,31 0,50 0,15 0,31 0,48 0,04 -	3,3 2,0 6,5 3,2 2,1 27,5 -	- - - - -	- - - - -
Lautaro Embalse	Añual	(7,8) - - -	1 - - -	0,38 - - - - -	2,7 - - - - -	0,36 0,22 0,12 -	2,8 4,5 8,3 -
	Invierno Temperatura	(3,4) (5,6) -	- - - -	0,21 0,44 0,23 - - - -	4,8 2,3 4,3 - - - -	0,19 - - - -	5,3 - - - -
	Verano	(3,4) (5,6) -	1 - - -	0,25 0,30 0,25 0,47 - - - -	4,0 3,3 4,1 2,1 - - - -	0,05 - - - -	20,0 - - - -
Copiapo DMC	Añual	(5,6) - - -	- - - -	0,30 - - - - -	3,3 - - - - -	0,11 0,19 0,34 -	9,1 5,3 2,9 -
	Invierno Temperatura	(5,6) (6,7) -	- - - -	0,13 0,32 0,13 0,32 0,15 0,30 -	7,6 3,1 7,8 3,1 6,5 3,3 -	- - - - -	- - - - -
	Verano	(5,6) - - -	1 - - -	0,21 - - - - -	4,8 - - - - -	0,26 0,33 - -	3,8 3,0 - -

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.2-4 Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Limarí.

Estación	Periodo Estadística	Valores Propios	Tendencia	Frecuencias	Años / Ciclo	Frecuencias MEM	Años / Ciclo MEM
Paloma Embalse	Anual	(3,4) (5,6) (8,9)	- - - -	0,13 0,31 0,21 0,31 - - -	7,5 3,3 4,7 3,2 - - -	0,40 - - -	2,5 - - -
	Invierno Precipitación	(3,4) (5,6) (8,9)	- - - -	0,31 0,22 0,13 0,38 0,31 - -	3,3 4,6 7,5 2,6 3,3 - -	- - - -	- - - -
	Verano	(7,8) - -	4 5 - -	0,25 - - - - -	3,9 - - - - -	0,21 0,27 0,48 -	4,8 3,7 2,1 -
Punitaqui	Anual	(5,6) (6,7) -	- - - -	0,31 0,30 0,35 - - -	3,3 3,3 2,8 - - -	0,05 - - -	20,0 - - -
	Invierno Precipitación	(5,6) - -	- - - -	0,31 - - - - -	3,3 - - - - -	0,28 0,05 - -	3,6 20,0 - -
	Verano	(1,2) (2,3) -	- - - -	0,36 0,08 0,36 0,50 0,36 - -	2,8 13,1 2,8 2,0 2,8 - -	- - - -	- - - -
Las Ramadas	Anual	(1,2) - -	8 10 - -	0,36 - - - - -	2,7 - - - - -	- - - -	- - - -
	Invierno Precipitación	(1,2) (3,4) -	8 9 - -	0,38 0,36 0,21 0,45 - - -	2,6 2,8 4,8 2,2 - - -	- - - -	- - - -
	Verano	(4,5) (6,7) (8,9)	- - - -	0,40 0,30 0,40 0,50 0,23 0,40 0,49	2,5 3,4 2,5 2,0 4,3 2,5 2,0	0,04 - - -	25,0 - - -
Las Ramadas	Anual	(7,8) - -	5 - - -	0,31 0,49 - - - - -	3,2 2,0 - - - - -	0,34 - - -	2,9 - - -
	Invierno Temperatura	(1,2) (3,4) -	- - - -	0,16 0,25 0,28 0,16 - - -	6,3 3,9 3,6 6,1 - - -	0,19 - - -	5,3 - - -
	Verano	(2,3) (5,6) -	1 - - -	0,20 0,32 0,50 0,25 0,32 - -	5,0 3,1 2,0 4,0 3,1 - -	- - - -	- - - -
Cogoti Embalse	Anual	(5,6) - -	1 - - -	0,34 - - - - -	3,0 - - - - -	0,19 - - -	5,3 - - -
	Invierno Temperatura	(5,6) - -	1 - - -	0,31 0,50 - - - - -	3,2 2,0 - - - - -	- - - -	- - - -
	Verano	(7,8) - -	1 - - -	0,24 - - - - -	4,2 - - - - -	0,40 - - -	2,5 - - -
Paloma Embalse	Anual	(3,4) (5,6) (7,8)	1 - - -	0,21 0,17 0,23 0,50 - - -	4,7 5,9 4,3 2,0 - - -	0,28 - - -	3,6 - - -
	Invierno Temperatura	(4,5) - -	1 - - -	0,29 - - - - -	3,4 - - - - -	0,34 0,16 - -	2,9 6,3 - -
	Verano	(1,2) (7,8) -	- - - -	0,27 0,50 0,27 - - - - -	3,7 2,0 3,7 - - - - -	- - - -	- - - -

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.2-5 Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Aconcagua.

Estación	Periodo Estadística	Valores Propios	Tendencia	Frecuencias	Años / Ciclo	Frecuencias MEM	Años / Ciclo MEM
Riecillos	Anual	(1,2) (3,4) -	5 - - -	0,20 0,40 0,22 0,40 - - -	4,9 2,5 4,5 2,5 - - -	0,05 0,45 - -	20,0 2,2 - -
	Invierno Precipitación	(3,4) (7,8) -	- - - -	0,40 0,40 0,30 - - - - -	2,5 2,5 3,3 - - - - -	0,05 - - -	20,0 - - -
	Verano	(5,6) (8,9) -	1 - - -	0,31 0,40 0,23 0,31 0,30 0,40 -	3,2 2,5 4,4 3,2 3,3 2,5 -	- - - -	- - - -
San Felipe	Anual	(3,4) - -	- - - -	0,22 - - - - -	4,5 - - - - -	0,05 0,19 0,38 -	20,0 5,3 2,6 -
	Invierno Precipitación	(5,6) - -	3 - - -	0,07 0,49 - - - - -	13,7 2,0 - - - - -	0,04 0,12 0,22 0,37	25,0 8,3 4,5 2,7
	Verano	(5,6) - -	4 - - -	0,36 - - - - -	2,8 - - - - -	0,01 0,14 0,33 -	100,0 7,1 3,0 -
Lo Rojas	Anual	(1,2) (3,4) (9,10)	- - - -	0,21 0,39 0,39 0,21 0,13 0,30 -	4,8 2,6 2,6 4,7 7,5 3,3 -	- - - -	- - - -
	Invierno Precipitación	(3,4) (6,7) -	- - - -	0,08 0,21 0,21 0,08 - - - - -	13,1 4,7 4,7 12,6 - - - -	0,35 0,50 - -	2,9 2,0 - -
	Verano	(1,2) - -	8 - - -	0,13 0,38 0,50 - - - - -	7,7 2,6 2,0 - - - - -	- - - -	- - - -
Vilcuya	Anual	(7,8) - -	1 - - -	0,50 - - - - -	2,0 - - - - -	0,11 0,44 - -	9,1 2,3 - -
	Invierno Temperatura	(5,6) - -	9 - - -	0,24 - - - - -	4,2 - - - - -	0,22 0,26 - -	4,5 3,8 - -
	Verano	(9,10) - -	1 - - -	0,18 - - - - -	5,5 - - - - -	0,24 0,44 - -	4,2 2,3 - -
Quillota	Anual	(3,4) (6,7) -	1 - - -	0,04 0,40 0,14 0,29 0,40 - -	22,5 2,5 7,2 3,5 2,5 - -	0,11 0,26 0,36 -	9,1 3,8 2,8 -
	Invierno Temperatura	(1,2) (3,4) (5,6)	- - - -	0,20 0,21 0,04 0,29 0,15 0,29 -	5,1 4,8 22,5 3,4 6,6 3,4 -	0,08 - - -	12,5 - - -
	Verano	(3,4) (6,7) (9,10)	1 - - -	0,29 0,12 0,29 0,18 0,45 0,35 -	3,5 8,5 3,5 5,5 2,2 2,9 -	- - - -	- - - -
Lliu-Lliu Embalse	Anual	(2,3) (4,5) (7,8)	- - - -	0,11 0,24 0,11 0,21 0,29 - -	8,9 4,2 8,8 4,8 3,5 - -	0,46 - - -	2,2 - - -
	Invierno Temperatura	(1,2) (7,8) -	3 - - -	0,11 0,25 0,11 0,22 - - -	9,2 4,0 9,1 4,5 - - -	0,07 0,37 - -	14,3 2,7 - -
	Verano	(2,3) - -	1 - - -	0,24 - - - - -	4,2 - - - - -	0,18 0,26 - -	5,6 3,8 - -

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.2-6 Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Maipo.

Estación	Periodo	Estadística	Valores Propios	Tendencia	Frecuencias	Años / Ciclo	Frecuencias MEM	Años / Ciclo MEM
San Antonio (Pta. Panul)	Añual		(2,3) (4,5) -	8 - - -	0,22 0,40 0,17 0,39 - - -	4,6 2,5 5,8 2,5 - - -	- - - -	- - - -
	Invierno	Precipitación	(4,5) - -	8 - - -	0,21 0,39 - - - -	4,9 2,6 - - - -	0,17 - - -	5,9 - - -
	Verano		(8,9) - -	- - - -	0,24 - - - -	4,1 - - - -	0,04 - - -	25,0 - - -
Quinta Normal Santiago	Añual		(9,10) - -	8 - - -	0,13 0,26 - - - -	7,7 3,8 - - - -	0,32 - - -	3,1 - - -
	Invierno	Precipitación	(1,2) - -	7 - - -	0,37 - - - -	2,7 - - - -	0,05 0,22 - -	20,0 4,5 - -
	Verano		(1,2) - -	- - - -	0,15 0,49 - - - -	6,6 2,0 - - - -	0,11 - - -	9,1 - - -
San José de Maipo Retén	Añual		(2,3) (7,8) -	- - - -	0,40 0,25 0,39 0,30 - - -	2,5 4,1 2,6 3,3 - - -	0,04 - - -	25,0 - - -
	Invierno	Precipitación	(7,8) - -	1 - - -	0,30 - - - -	3,3 - - - -	0,04 0,27 0,32 0,44	25,0 3,7 3,1 2,3
	Verano		(3,4) - -	- - - -	0,34 0,41 - - - -	2,9 2,4 - - - -	- - - -	- - - -
Pudahuel Santiago	Añual		(4,5) - -	1 3 - -	0,25 0,40 - - - -	4,0 2,5 - - - -	0,22 0,27 - -	4,5 3,7 - -
	Invierno	Temperatura	(1,2) (7,8) -	3 10 - -	0,23 0,28 0,15 - - - -	4,4 3,5 6,6 - - - -	0,13 - - -	7,7 - - -
	Verano		(4,5) (7,8) -	1 2 - -	0,49 0,25 0,49 0,13 0,38 - -	2,0 4,0 2,0 7,4 2,7 - -	0,27 - - -	3,7 - - -
El Yeso Embalse	Añual		(2,3) (4,5) (8,9)	1 - - -	0,24 0,14 0,21 0,32 0,42 - -	4,2 7,2 4,7 3,1 2,4 - -	0,11 - - -	9,1 - - -
	Invierno	Temperatura	(1,2) - -	6 - - -	0,20 - - - -	5,0 - - - -	0,18 - - -	5,6 - - -
	Verano		(5,6) - -	1 - - -	0,33 0,49 - - - -	3,0 2,0 - - - -	0,31 0,46 - -	3,2 2,2 - -
Melipilla	Añual		(9,10) - -	3 - - -	0,35 0,45 - - - -	2,9 2,2 - - - -	0,18 - - -	5,6 - - -
	Invierno	Temperatura	(3,4) (7,8) -	2 5 - -	0,38 0,38 0,28 0,49 - - -	2,6 2,6 3,5 2,1 - - -	0,13 0,25 - -	7,7 4,0 - -
	Verano		(7,8) (9,10) -	2 - - -	0,45 0,22 0,42 0,37 - - -	2,2 4,5 2,4 2,7 - - -	0,20 0,50 - -	5,0 2,0 - -

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.2-7 Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Bío-Bío.

Estación	Periodo	Estadística	Valores Propios	Tendencia	Frecuencias	Años / Ciclo	Frecuencias MEM	Años / Ciclo MEM
Laguna Malleco	Añual		(5,6) - -	1 3 - -	0,39 - - - -	2,5 - - - -	0,18 0,42 0,47 -	5,6 2,4 2,1 -
	Invierno	Precipitación	(5,6) - -	1 - - -	0,17 0,43 - - - -	5,9 2,3 - - - -	0,39 - - -	2,6 - - -
	Verano		(4,5) - -	7 8 - -	0,11 0,19 - - - -	9,1 5,2 - - - -	0,08 0,14 0,26 0,45	12,5 7,1 3,8 2,2
Las Achiras	Añual		(2,3) (5,6) -	1 - - -	0,16 0,38 0,12 - - - -	6,4 2,7 8,5 - - - -	0,08 0,42 - -	12,5 2,4 - -
	Invierno	Precipitación	(5,6) - -	1 - - -	0,38 - - - -	2,6 - - - -	0,17 0,33 - -	5,9 3,0 - -
	Verano		(8,9) - -	10 - - -	0,29 0,36 - - - -	3,5 2,8 - - - -	0,24 0,39 - -	4,2 2,6 - -
Rio Bio Bio en Desembocadura	Añual		(1,2) (4,5) (8,9)	10 - - -	0,13 0,13 0,42 0,33 - - -	7,9 7,5 2,4 3,0 - - -	0,25 - - -	4,0 - - -
	Invierno	Precipitación	(2,3) - -	10 - - -	0,16 0,44 - - - -	6,1 2,3 - - - -	0,19 0,41 - -	5,3 2,4 - -
	Verano		(8,9) - -	10 - - -	0,37 - - - -	2,7 - - - -	0,17 0,32 - -	5,9 3,1 - -
Lonquimay	Añual		(7,8) - -	1 2 - -	0,38 - - - -	2,6 - - - -	0,21 0,42 - -	4,8 2,4 - -
	Invierno	Temperatura	(4,5) - -	1 2 3 7	0,26 0,44 - - - -	3,8 2,3 - - - -	0,12 - - -	8,3 - - -
	Verano		(4,5) (8,9) -	1 - - -	0,17 0,43 0,17 0,44 - - -	6,0 2,3 5,9 2,3 - - -	0,13 0,20 0,30 -	7,7 5,0 3,3 -
Quilaco	Añual		(7,8) - -	1 2 - -	0,28 - - - -	3,5 - - - -	0,21 0,43 - -	4,8 2,3 - -
	Invierno	Temperatura	(5,6) - -	1 - - -	0,50 - - - -	2,0 - - - -	0,19 0,47 - -	5,3 2,1 - -
	Verano		(7,8) - -	1 2 - -	0,44 - - - -	2,3 - - - -	0,19 0,26 0,39 -	5,3 3,8 2,6 -
Angol (La Mona)	Añual		(2,3) - -	1 - - -	0,14 - - - -	7,4 - - - -	0,37 - - -	2,7 - - -
	Invierno	Temperatura	(4,5) - -	1 - - -	0,44 - - - -	2,3 - - - -	0,08 0,19 - -	12,5 5,3 - -
	Verano		(6,7) - -	1 2 - -	0,21 - - - -	4,7 - - - -	0,11 0,29 0,40 -	9,1 3,4 2,5 -

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.2-8 Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Imperial.

Estación	Periodo	Estadística	Valores Propios	Tendencia	Frecuencias	Años / Ciclo	Frecuencias MEM	Años / Ciclo MEM
Vilcún	Anual		(7,8) (9,10) -	- - - -	0,23 0,33 0,18 0,33 0,21 - -	4,4 3,1 5,7 3,0 4,8 - -	- - - -	- - - -
	Invierno	Precipitación	(5,6) - -	- - - -	0,38 - - - -	2,6 - - - -	0,02 0,13 0,35 0,41	50,0 7,7 2,9 2,4
	Verano		(1,2) - -	8 - - -	0,20 - - - -	5,0 - - - -	- - - -	- - - -
Puerto Saavedra	Anual		(5,6) (9,10) -	8 - - -	0,20 0,38 0,33 0,40 0,19 - -	4,9 2,6 3,1 2,5 5,4 - -	0,26 - - -	3,8 - - -
	Invierno	Precipitación	(8,9) - -	- - - -	0,23 0,31 0,40 - - - -	4,4 3,3 2,5 - - - -	0,18 - - -	5,6 - - -
	Verano		(9,10) - -	6 - - -	0,28 0,42 - - - -	3,5 2,4 - - - -	0,14 - - -	7,1 - - -
Maquehue Temuco AD.	Anual		(1,2) (9,10) -	- - - -	0,13 0,26 0,10 0,25 - - - -	7,9 3,9 9,9 4,0 - - - -	0,07 - - -	14,3 - - -
	Invierno	Precipitación	(3,4) - -	- - - -	0,42 - - - -	2,4 - - - -	0,15 0,35 - -	6,7 2,9 - -
	Verano		(1,2) (4,5) (7,8)	- - - -	0,22 0,30 0,20 0,29 0,13 0,40 -	4,5 3,3 4,9 3,5 8,0 2,5 -	0,07 - - -	14,3 - - -
Malalcahuello	Anual		(7,8) - -	4 - - -	0,14 0,29 - - - -	7,1 3,4 - - - -	0,12 0,26 0,32 -	8,3 3,8 3,1 -
	Invierno	Temperatura	(1,2) - -	4 6 - -	0,26 - - - -	3,9 - - - -	0,02 0,23 0,36 0,50	50,0 4,3 2,8 2,0
	Verano		(2,3) - -	1 - - -	0,23 - - - -	4,3 - - - -	0,04 - - -	25,0 - - -
Puerto Saavedra	Anual		(7,8) - -	1 - - -	0,19 - - - -	5,2 - - - -	0,13 0,21 0,34 -	7,7 4,8 2,9 -
	Invierno	Temperatura	(5,6) - -	1 - - -	0,26 0,40 - - - -	3,9 2,5 - - - -	0,22 - - -	4,5 - - -
	Verano		(6,7) (9,10) -	1 - - -	0,41 0,34 0,50 0,41 - - - -	2,4 2,9 2,0 2,4 - - - -	0,13 0,20 0,45 -	7,7 5,0 2,2 -
Maquehue Temuco AD.	Anual		(3,4) (5,6) -	- - - -	0,24 0,45 0,41 0,24 0,49 - -	4,2 2,2 2,4 4,2 2,1 - -	0,09 - - -	11,1 - - -
	Invierno	Temperatura	(1,2) - -	- - - -	0,43 - - - -	2,3 - - - -	0,05 0,30 - -	20,0 3,3 - -
	Verano		(9,10) - -	1 - - -	0,14 0,50 - - - -	7,0 2,0 - - - -	0,11 0,35 0,47 -	9,1 2,9 2,1 -

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.2-9 Periodos detectados a un nivel de confianza del 95% para la cuenca del río Aysén.

Estación	Periodo	Estadística	Valores Propios	Tendencia	Frecuencias	Años / Ciclo	Frecuencias MEM	Años / Ciclo MEM
Teniente Vidal	Anual		(3,4) (5,6) (7,8)	1 - - -	0,24 0,11 0,50 0,31 0,19 - -	4,2 9,3 2,0 3,3 5,3 - -	- - - -	- - - -
	Invierno	Precipitación	(7,8) - -	1 - - -	0,23 - - - -	4,3 - - - -	0,20 0,33 - -	5,0 3,0 - -
	Verano		(7,8) - -	- - - -	0,13 - - - -	7,4 - - - -	0,20 0,37 - -	5,0 2,7 - -
Balmaceda	Anual		(4,5) (7,8) -	1 - - -	0,18 0,28 0,15 0,22 - - - -	5,7 3,6 6,9 4,5 - - - -	0,34 - - -	2,9 - - -
	Invierno	Precipitación	(5,6) (7,8) -	1 - - -	0,35 0,49 0,49 0,23 - - - -	2,9 2,0 2,0 4,4 - - - -	- - - -	- - - -
	Verano		(4,5) (6,7) -	8 10 - -	0,42 0,36 0,41 - - - -	2,4 2,8 2,5 - - - -	0,16 0,27 - -	6,3 3,7 - -
Puerto Aysen	Anual		(5,6) - -	1 - - -	0,26 0,39 - - - -	3,9 2,6 - - - -	- - - -	- - - -
	Invierno	Precipitación	(5,6) - -	1 - - -	0,11 0,35 - - - -	9,1 2,9 - - - -	0,37 0,14 - -	2,7 7,1 - -
	Verano		(2,3) (7,8) (9,10)	1 6 - -	0,18 0,32 0,25 0,41 0,32 - -	5,6 3,1 4,1 2,4 3,1 - -	- - - -	- - - -
Puerto Aysen	Anual		(3,4) - -	- - - -	0,23 - - - -	4,3 - - - -	0,26 0,05 0,42 -	3,8 20,0 2,4 -
	Invierno	Temperatura	(6,7) - -	- - - -	0,11 0,34 - - - -	9,0 2,9 - - - -	0,09 0,36 - -	11,1 2,8 - -
	Verano		(2,3) (5,6) (7,8)	- - - -	0,34 0,50 0,17 0,26 0,49 - -	3,0 2,0 5,7 3,9 2,0 - -	- - - -	- - - -
Teniente Vidal	Anual		(1,2) - -	3 4 - -	0,20 - - - -	4,9 - - - -	0,16 0,23 0,45 -	6,3 4,3 2,2 -
	Invierno	Temperatura	(1,2) - -	- - - -	0,23 - - - -	4,3 - - - -	0,07 - - -	14,3 - - -
	Verano		(7,8) - -	1 - - -	0,30 - - - -	3,3 - - - -	0,15 0,44 - -	6,7 2,3 - -
Balmaceda	Anual		(1,2) - -	- - - -	0,23 - - - -	4,3 - - - -	0,06 - - -	16,7 - - -
	Invierno	Temperatura	(3,4) - -	- - - -	0,43 - - - -	2,3 - - - -	0,38 0,11 0,08 -	2,6 9,1 12,5 -
	Verano		(4,5) - -	1 - - -	0,42 - - - -	2,4 - - - -	0,07 0,28 - -	14,3 3,6 - -

Fuente: Elaboración Propia.

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, lo que comunica de la importante variabilidad que se tiene para esta estación del año, posiblemente marcada por la presencia de inviernos altiplánicos.

Es importante destacar que el método MEM ha detectado frecuencias adicionales en la mayoría de las agregaciones temporales. Para la zona cordillerana se ha detectado un ciclo de 12 años (al límite de la capacidad de detección) y otro de 7,7 años para la zona costera en términos de precipitación.

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).

Para la agregación anual de la precipitación las tres estaciones analizadas presentan ciclos de 3 a 5 años, pero la estación costera añade un ciclo de 7 años, fenómeno observado en la cuenca del Loa.

Para la agregación de invierno, la estación Jorquera en la Guardia (cordillerana) presenta un ciclo de 2 a 5 años, más un ciclo anómalo de 27,5 años. Este ciclo corresponde aproximadamente a la mitad de la longitud del registro, por lo que podría tratarse del ciclo asociado a la frecuencia de Nyquist. Producto de la elevada estimación, no se recomienda tomar este ciclo como válido a interpretación, pese a que se reconoce su significancia estadística. Para las otras estaciones de precipitación, los ciclos encontrados son levemente mayores, aunque preservan su orden de magnitud.

En el caso de la agregación de verano, las estaciones que presentan mayor variabilidad en sus ciclos irregulares de precipitación son Lautaro Embalse y Desierto de Atacama Caldera AP. La mayor diferencia se concentra en la detección de un periodo de 13,1 años en la estación Lautaro Embalse y uno de 27,5 años en la estación costera. Al igual que en la agregación anual, dicho periodo debe de tratarse con suma cautela, pero el de 27,5 años se considera fuera de la escala de frecuencias admisibles del test.

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, siendo los mayores los de la estación La Paloma Embalse (depresión intermedia).

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, y al contrario de la agregación de invierno, son las estaciones más altas las que presentan un mayor espectro de periodos (2 a 4 años para la estación Las Ramadas; 2, 13 años para la estación Punitaqui).

Este análisis da entender que esta llamada “influencia orográfica” que se destacó en la cuenca del río Loa, podría sólo ser la influencia de un clima local, que va perdiendo su influencia conforme aumenta la latitud.

Macrozona Centro

En la macrozona centro se han escogido las cuencas de los ríos Aconcagua y Maipo.

En la cuenca del río Aconcagua, para la agregación anual de la precipitación, se observan ciclos entre 3 y 5 años. La mayor variabilidad en ciclos lo tiene la estación Lo Rojas, representante de la zona costera, la cual advierte de ciclos de 2, 3, 5 e incluso 7 años de recurrencia. Las estaciones San Felipe (depresión intermedia) y Riecillos (zona cordillerana) exhiben un ciclo común de 5 años, pero la estación Riecillos además posee un ciclo bianual. Lo más significativo ocurre con la estación Lo Rojas, que exhibe un ciclo de 12 a 13 años, el cual también es observado en la estación San Felipe, lo que podría indicar el efecto de una forzante decadal en la zona.

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. Los mayores periodos están asociados a la estación Quinta Normal, mientras que la estación San Antonio (costera) presenta ciclos acotados de 2,5 y 6 años. Por otra parte, la estación San José de Maipo (cordillera) presenta ciclos no mayores a 4 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 la estación Quinta Normal (2 y 7 años), seguidos de la estación San Antonio (4 años) y la estación San José de Maipo (2-3 años).

Macrozona Sur

En la macrozona sur se han escogido las cuencas de los ríos Bío-Bío e Imperial.

Para la agregación anual de precipitación, tanto la estación Laguna Malleco (cordillerana) como la estación Río Bío-Bío en Desembocadura presentan ciclos menores de 2,5 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. Se debe tener presente que los principales índices de forzantes externas como ENSO y NAO en la zona norte tienden a disminuir su influencia pasada la VII región. Los efectos de ENSO ya no están ligados a las magnitudes de la precipitación, sino que a la variabilidad de la misma.

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, 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, lo que ratifica la posible influencia de una escala decadal. La zona baja presenta ciclos de 2 y 3 años.

Macrozona Austral

En la macrozona austral se ha escogido la cuenca del río Aysén, que además es la cuenca que informa de longitudes de registros menores y de peor calidad.

La agregación anual de precipitación reconoce ciclos de 4, 6 y 7 años para la estación Balmaceda (zona alta u cordillerana), mientras que para la estación Tte. Vidal (zona media) se observan ciclos de 3, 5 y 9 años, nuevamente 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.

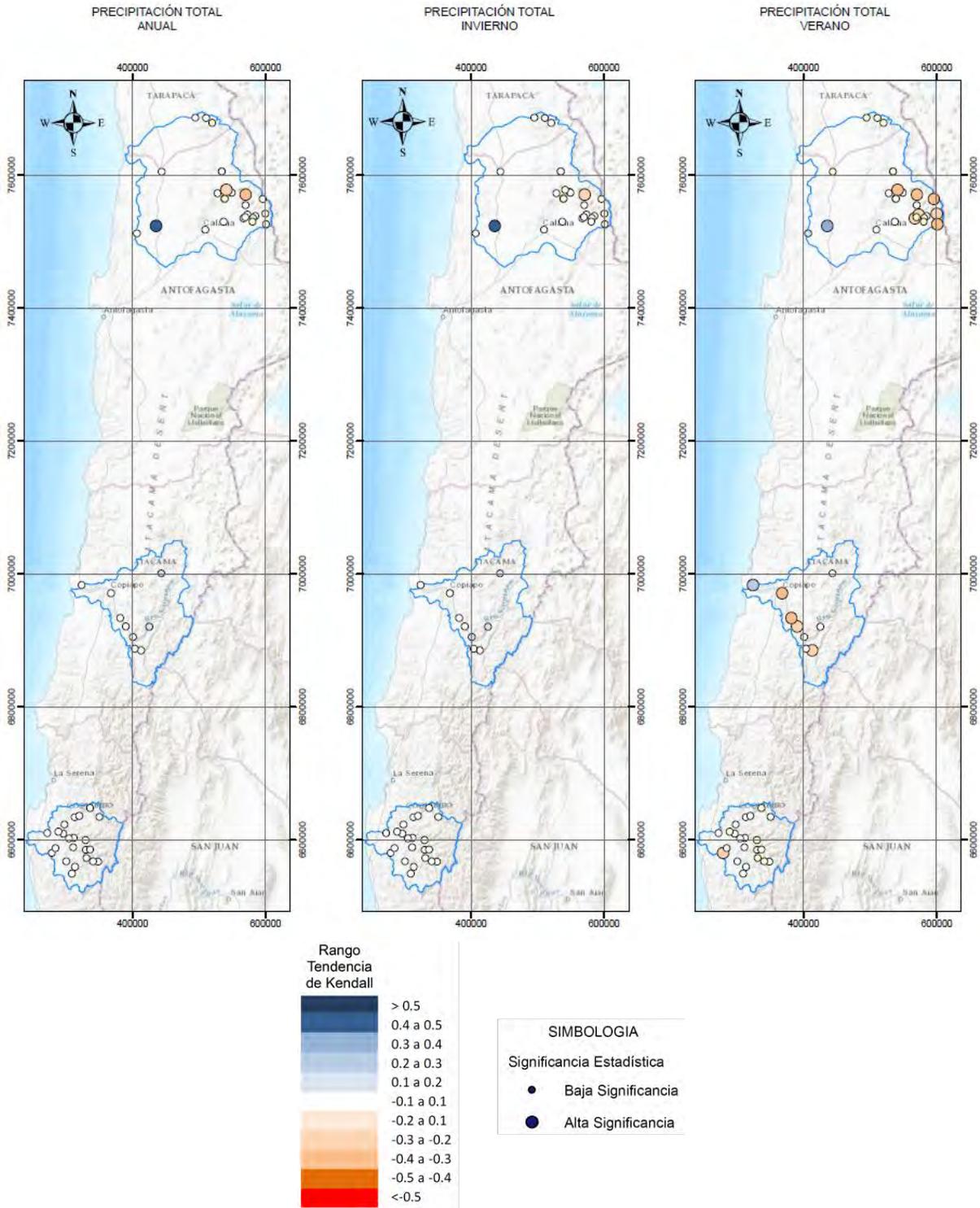
La agregación de invierno informa de ciclos de 2, 3 y 4 años para la zona alta, de 4 años para la zona media y de 3, 7 y 9 años para la zona baja (estación Puerto Aysén). En este último caso se vuelve a ratificar la posible influencia de una forzante externa con un ciclo decadal.

La agregación temporal de verano informa de variados ciclos detectados para la precipitación. En el caso de la zona alta, se confirma un ciclo de 2 a 3 años (MTM) mientras que MEM adiciona un ciclo de 6 años. La zona media tiene ciclos de 3, 5 y 7 años (los dos primeros detectados sólo con MEM) y la zona baja en la estación Puerto Aysén informa ciclos de 2, 3, 4 y 6 años.

El Anexo F presenta los resultados gráficos asociados a la aplicación de la metodología de este capítulo.

6.2.2.2 Análisis de Cambios en Series de Tiempo de las Precipitaciones

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la aplicación de los test descritos en el acápite 5.3.2.2. Los resultados se ilustran para cada una de las distintas macrozonas. En primer lugar, se presentan los resultados del test de Mann-Kendall en las Figuras 6.2-10 a 6.2-13. En cada una de estas láminas los círculos de diámetro pequeño representan diferencias estadísticamente no significativas, mientras que los círculos de diámetro mediano representan los resultados estadísticamente significativos. El nivel de significancia utilizado corresponde a un p-valor de 0,05 (95%).



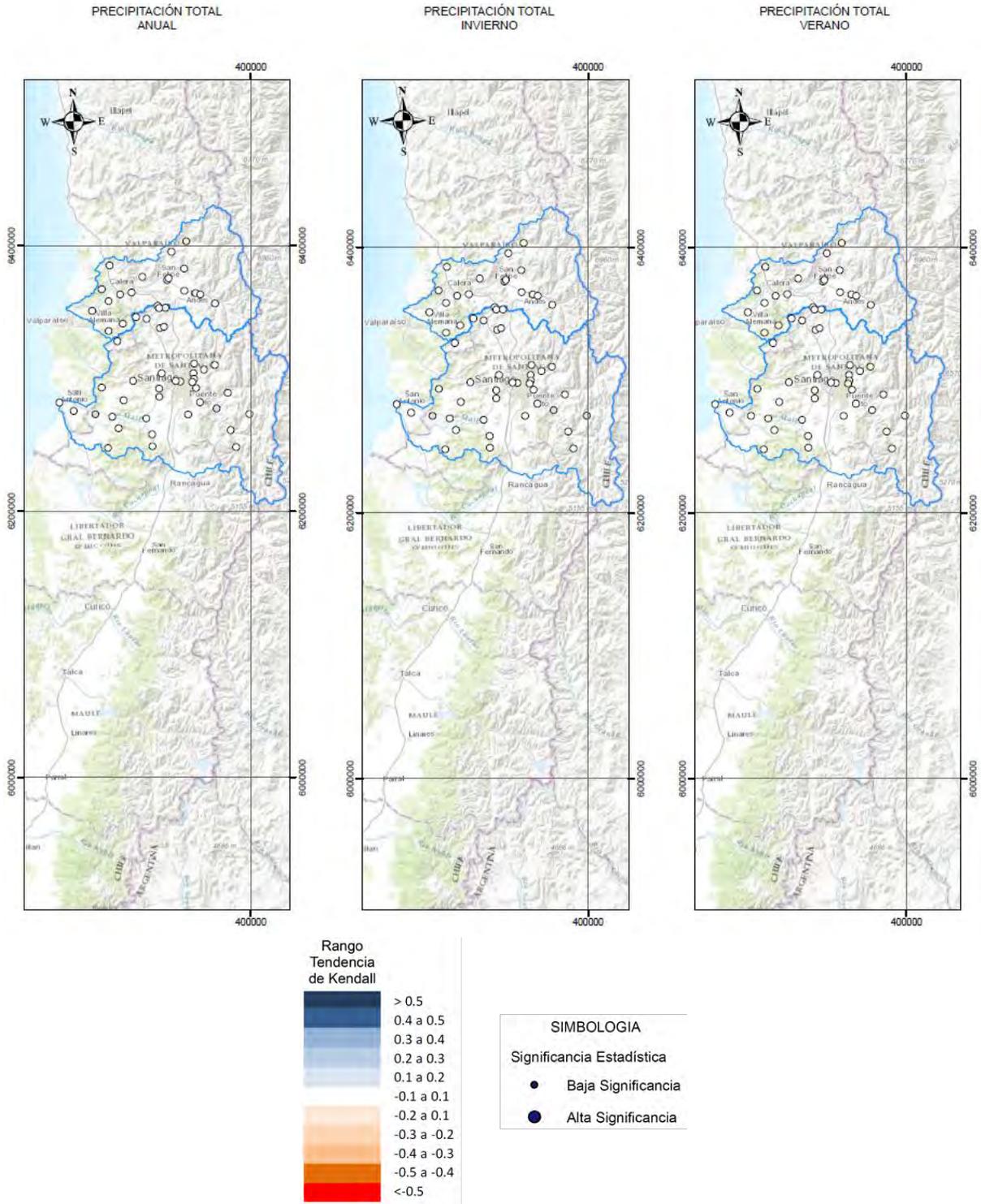
Notas:

(1): Un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica: valores consecutivos son siempre mayores/menores que el valor anterior. Un valor de 0 denota una tendencia “plana”, con igual cantidad de registros que se incrementan y decrecen respecto al valor anterior.

(2): Análisis aplicado sobre el registro total, correspondiente al periodo 1960 – 2014.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-10 Resultado de test de Mann-Kendall para precipitación, macrozona Norte.



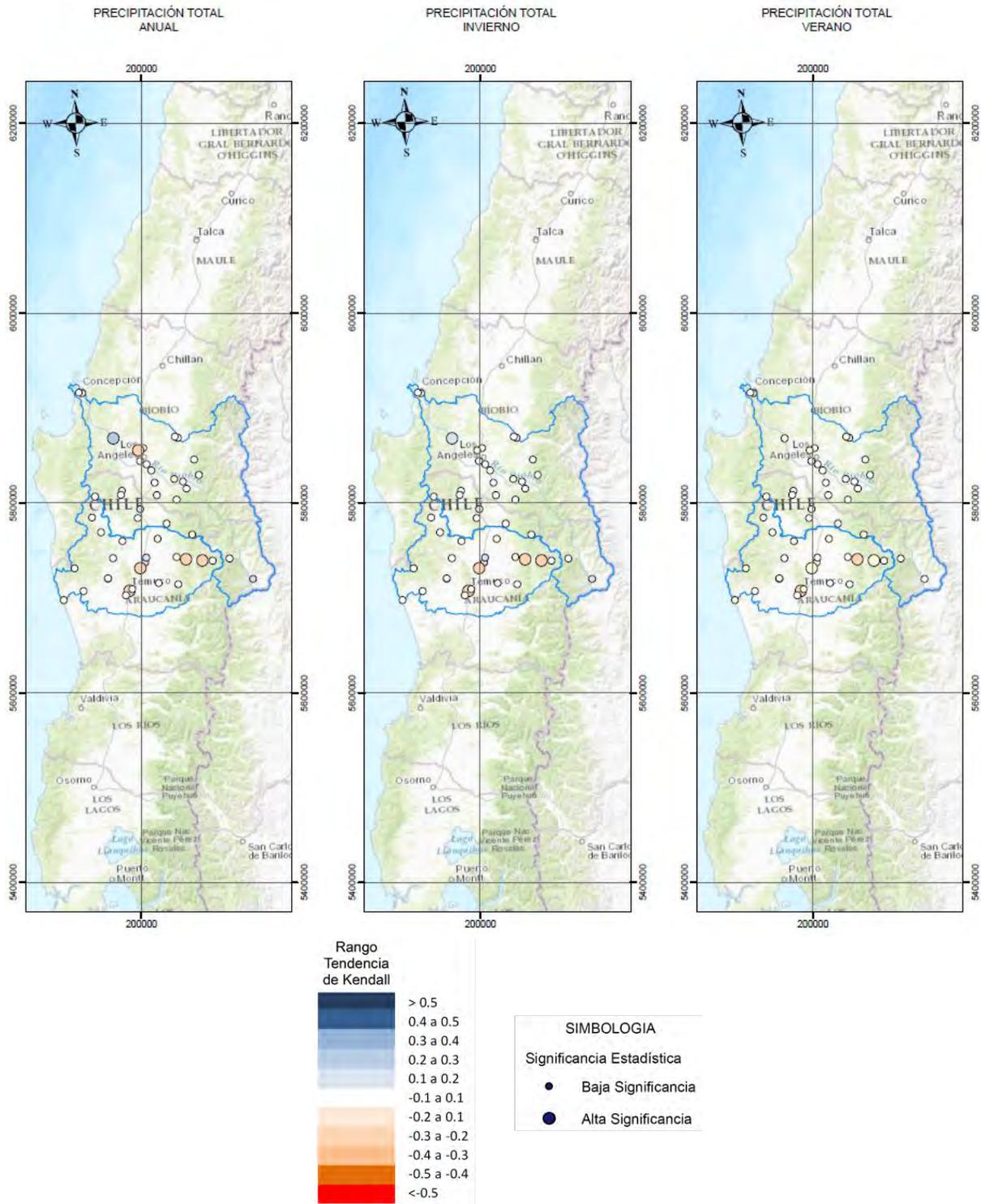
Notas:

(1): Un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica: valores consecutivos son siempre mayores/menores que el valor anterior. Un valor de 0 denota una tendencia "plana", con igual cantidad de registros que se incrementan y decrecen respecto al valor anterior.

(2): Análisis aplicado sobre el registro total, correspondiente al periodo 1960 – 2014.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-11 Resultado de test de Mann-Kendall para precipitación, macrozona Centro.



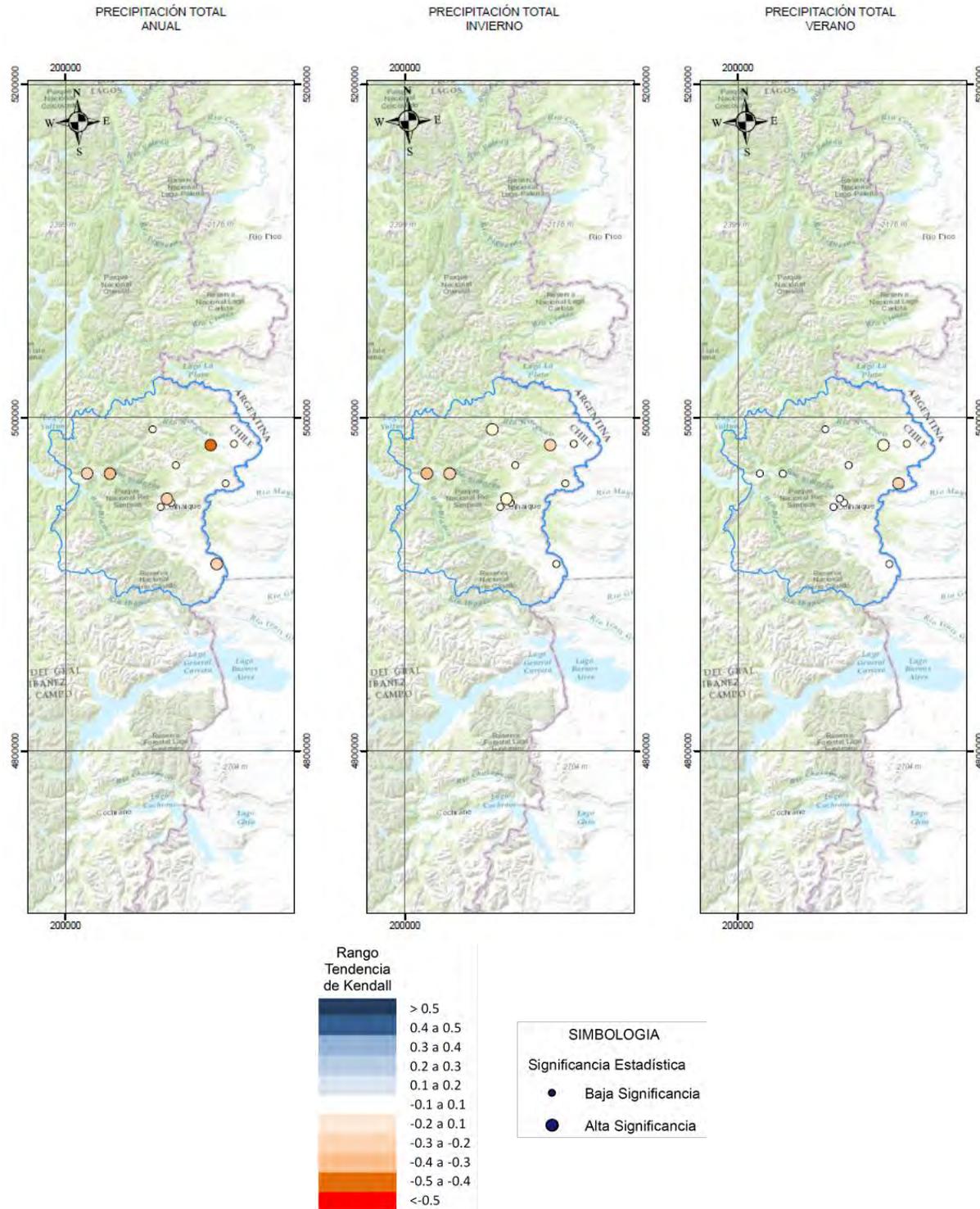
Notas:

(1): Un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica: valores consecutivos son siempre mayores/menores que el valor anterior. Un valor de 0 denota una tendencia “plana”, con igual cantidad de registros que se incrementan y decrecen respecto al valor anterior.

(2): Análisis aplicado sobre el registro total, correspondiente al periodo 1960 – 2014.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-12 Resultado de test de Mann-Kendall para precipitación, macrozona Sur.



Notas:

(1): Un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica: valores consecutivos son siempre mayores/menores que el valor anterior. Un valor de 0 denota una tendencia "plana", con igual cantidad de registros que se incrementan y decrecen respecto al valor anterior.

(2): Análisis aplicado sobre el registro total, correspondiente al periodo 1960 – 2014.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-13 Resultado de test de Mann-Kendall para precipitación, macrozona Austral.

Los resultados del test de Mann-Kendall para precipitación en la macrozona Norte muestran un leve declive de las precipitaciones cordilleranas en la cuenca del río Loa. El cambio es significativo sólo para algunas estaciones (dos para precipitaciones totales anuales, una para precipitación total de invierno y seis para precipitación total de verano). Existe una estación cercana a la costa que presenta una tendencia positiva de precipitaciones, la estación Coya Sur. Es importante aclarar que la cuenca del Loa presenta un régimen de precipitaciones muy variable. Las estaciones en el desierto presentan varios años sin precipitación intercalados por algunos años con precipitaciones del orden de decenas de milímetros, mientras que las zonas cordilleranas presentan un régimen de precipitaciones relacionado a la presencia del “invierno altiplánico”. La gran variabilidad interanual en las precipitaciones de esta cuenca conduce a que sea difícil interpretar tendencias como un resultado robusto, especialmente considerando que la situación “normal” de esta zona es una situación con ausencia prolongada de lluvia.

Para el río Copiapó los resultados del test de Mann-Kendall muestran un leve declive de las precipitaciones de verano en la zona sur de la cuenca. Este declive no se propaga a los resultados para las precipitaciones totales anuales o de invierno, las cuales en general aportan la mayoría de la precipitación de la cuenca. Para el río Limarí las tendencias encontradas no son estadísticamente significativas. Este resultado se repite en la cuenca el río Aconcagua y el río Maipo (macrozona Centro). Para la macrozona Sur, dentro del río Imperial se presentan algunas estaciones con leves tendencias negativas, pero en general tanto esta cuenca como la cuenca del Bío-Bío no presentan tendencias significativas.

Para la macrozona Austral las tendencias son más marcadas: las precipitaciones totales anuales y de invierno presentan tendencias negativas significativas tanto en la parte baja (clima más oceánico) como en la parte alta (clima de estepa) de la cuenca.

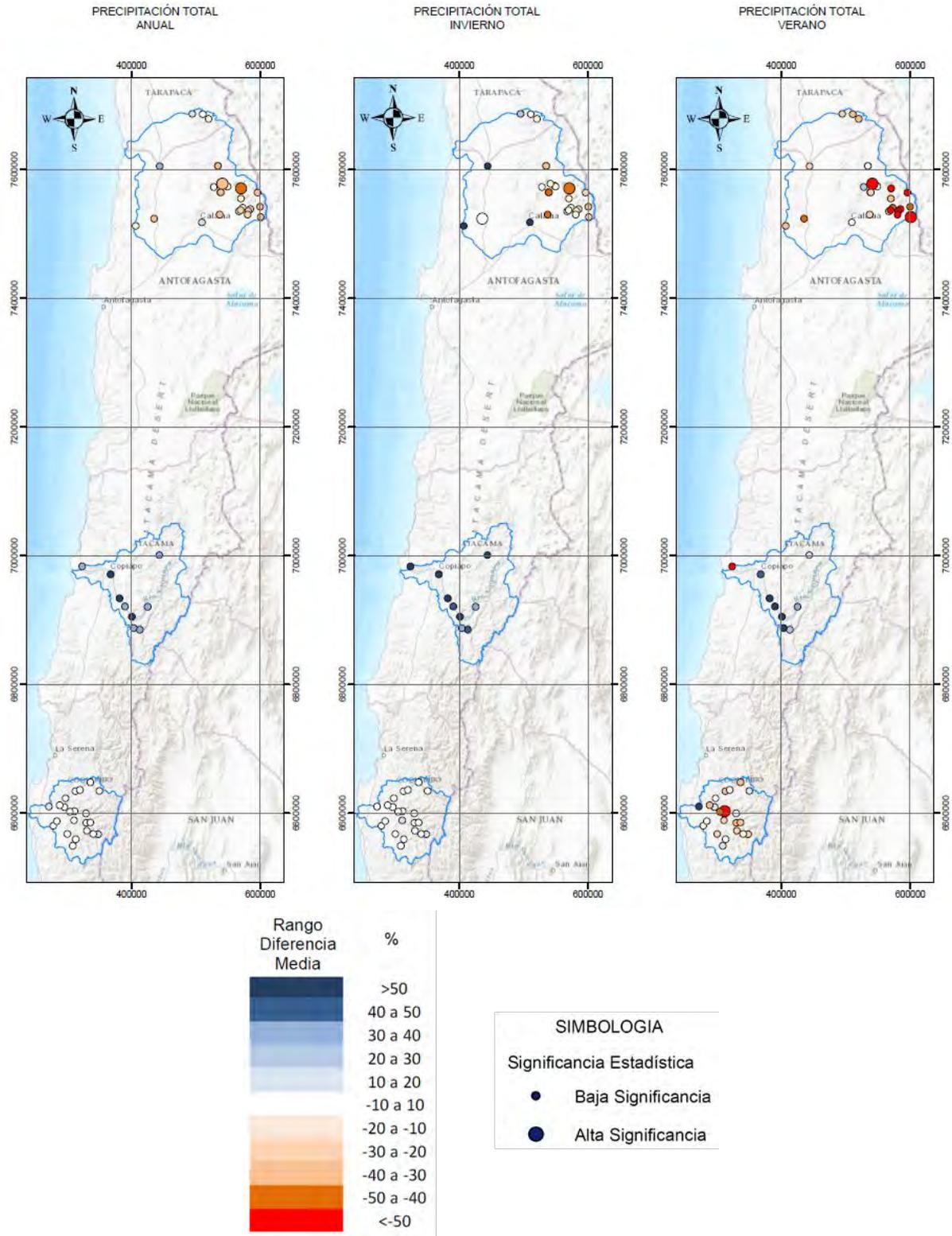
Si bien los resultados del test de tendencias de Mann-Kendall sugieren que no ha habido una alteración marcada de las precipitaciones a nivel país entre 1960 y 2014 (exceptuando casos como la cuenca del río Aysén y la zona alta del río Loa), es importante destacar lo siguiente:

Aunque la mayoría de las estaciones no presentaron tendencias significativas, la gran mayoría de las estaciones que presentaron resultados significativos presentaron tendencias negativas.

Hubo sólo una estación que presentó tendencias positivas y significativas dentro de la cuenca del río Loa, la estación Coya Sur.

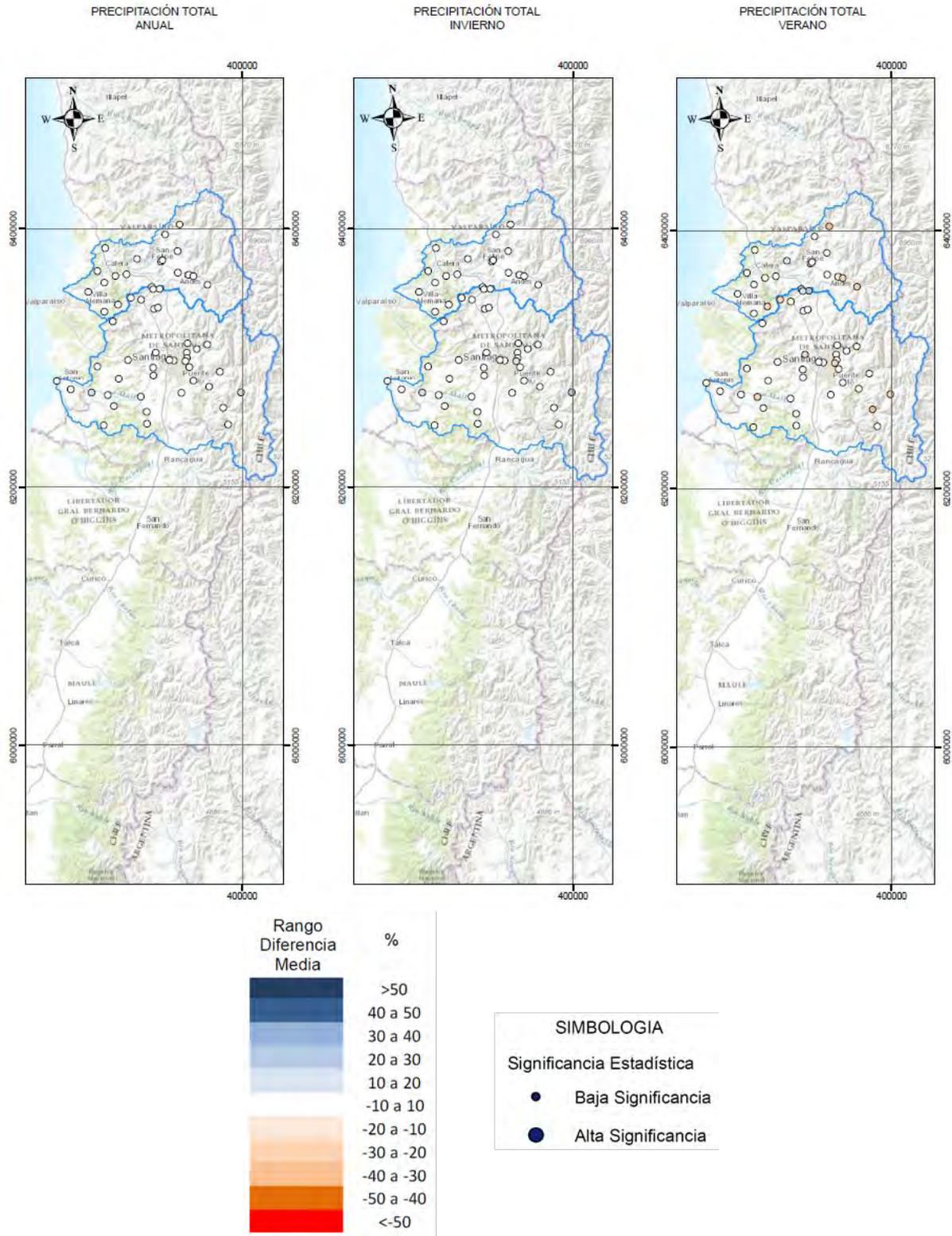
Las proyecciones de cambio climático para Chile en general sugieren un decaimiento en las precipitaciones. Recientemente, Boisier et al. (2015) concluyeron que la mega sequía que ha experimentado Chile en los últimos años se debe a la presencia del cambio climático. En el trabajo de Boisier et al. (2015) se evaluaron tendencias desde 1979 en adelante, encontrándose que casi todas las estaciones presentan tendencias negativas en la precipitación observada. Los resultados acá obtenidos son consistentes con los señalados en el trabajo de Boisier et al. (2015), aunque no se detectaron cambios estadísticamente significativos en la mayoría de las estaciones debido a la diferencia de periodos analizados. Es posible que una reevaluación de estos resultados en 5 o 10 años más efectivamente resulte en una detección significativa de las posibles tendencias negativas.

Además del test de Mann-Kendall se realizaron tests de cambios en las medias de los periodos 1960-1986 y 1987-2014. Este análisis tiene como objetivo complementar el anterior y analizar la posible presencia de “saltos” en la serie de tiempo que puedan haber resultado en un cambio en los regímenes de precipitaciones. Mediante el análisis de cambios de medias además se pueden detectar tendencias no-monotónicas en la serie de tiempo que el test de tendencias de Mann-Kendall no pudo detectar. Las Figuras 6.2-14 a 6.2-17 muestran las diferencias porcentuales de precipitación entre los periodos mencionados. En cada una de estas láminas los círculos de diámetro pequeño representan diferencias estadísticamente no significativas, mientras que los círculos de diámetro mediano representan los resultados estadísticamente significativos. El nivel de significancia utilizado corresponde a un p-valor de 0,05 (95%). Los valores utilizados en la generación de las figuras presentadas se incluyen en el Anexo G.



Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.
Fuente: Elaboración Propia.

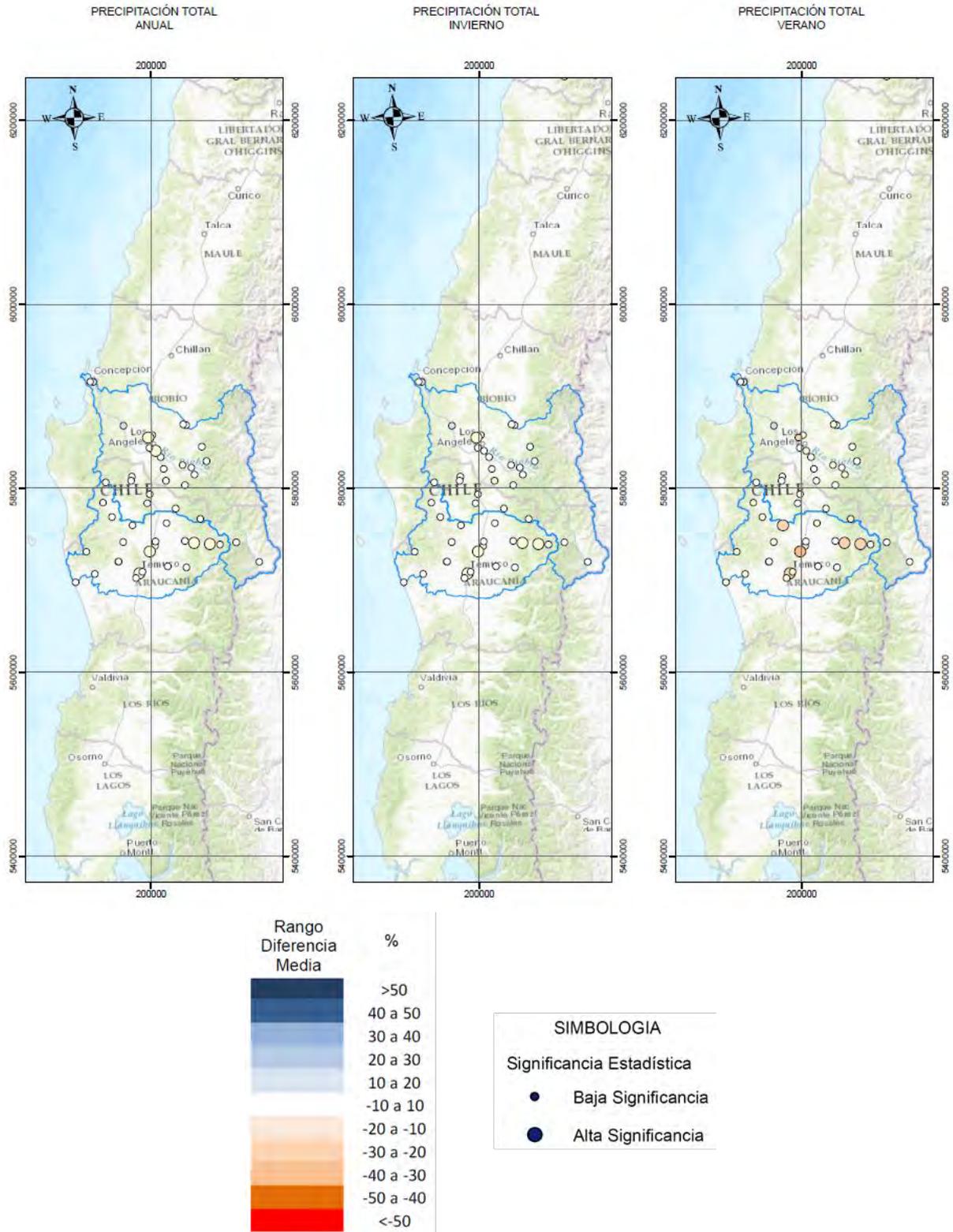
Figura 6.2-14 Resultado de test de cambios en la media de precipitación, macrozona Norte



Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.

Fuente: Elaboración Propia.

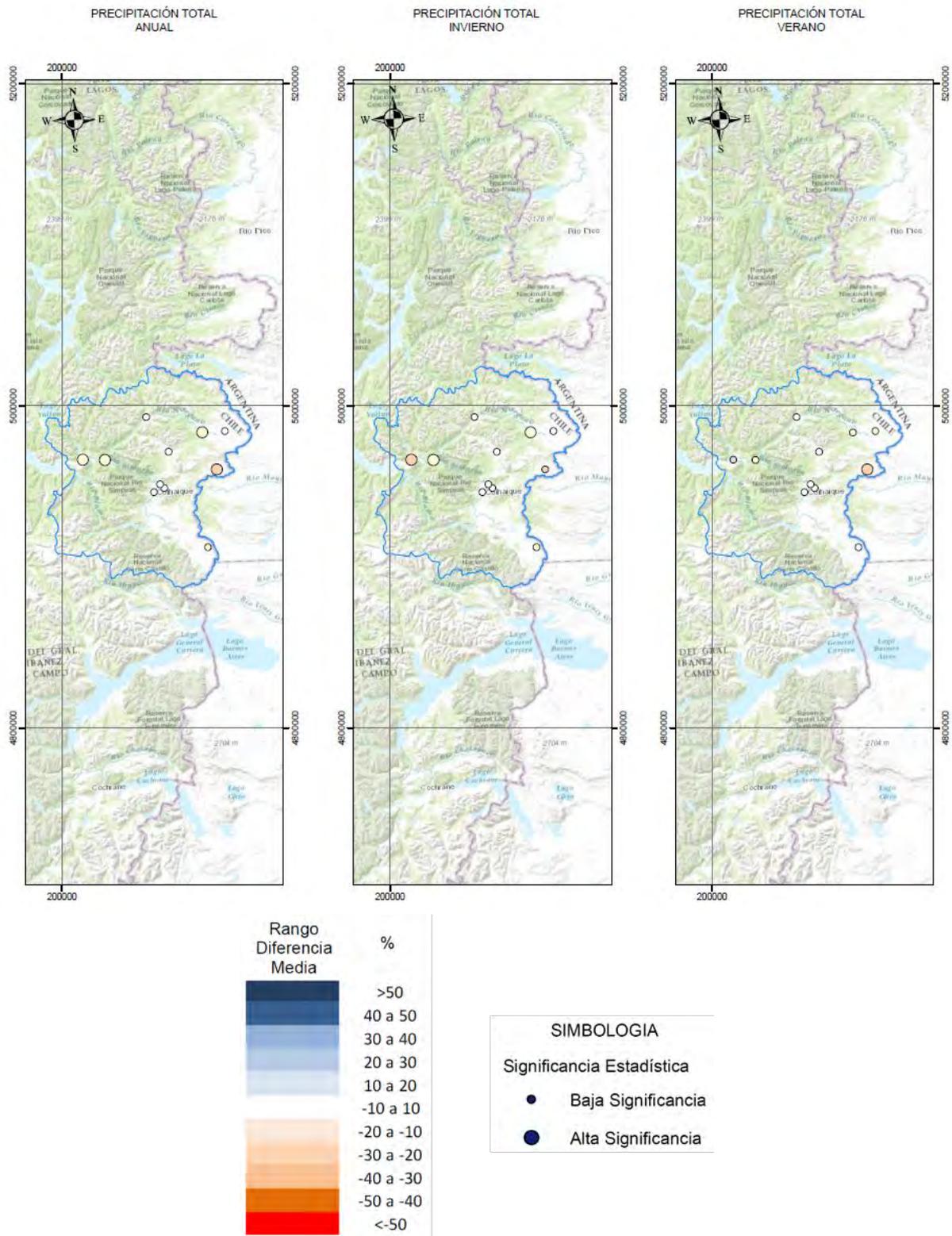
Figura 6.2-15 Resultado de test de cambios en la media de precipitación, macrozona Centro.



Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-16 Resultado de test de cambios en la media de precipitación, macrozona Sur.



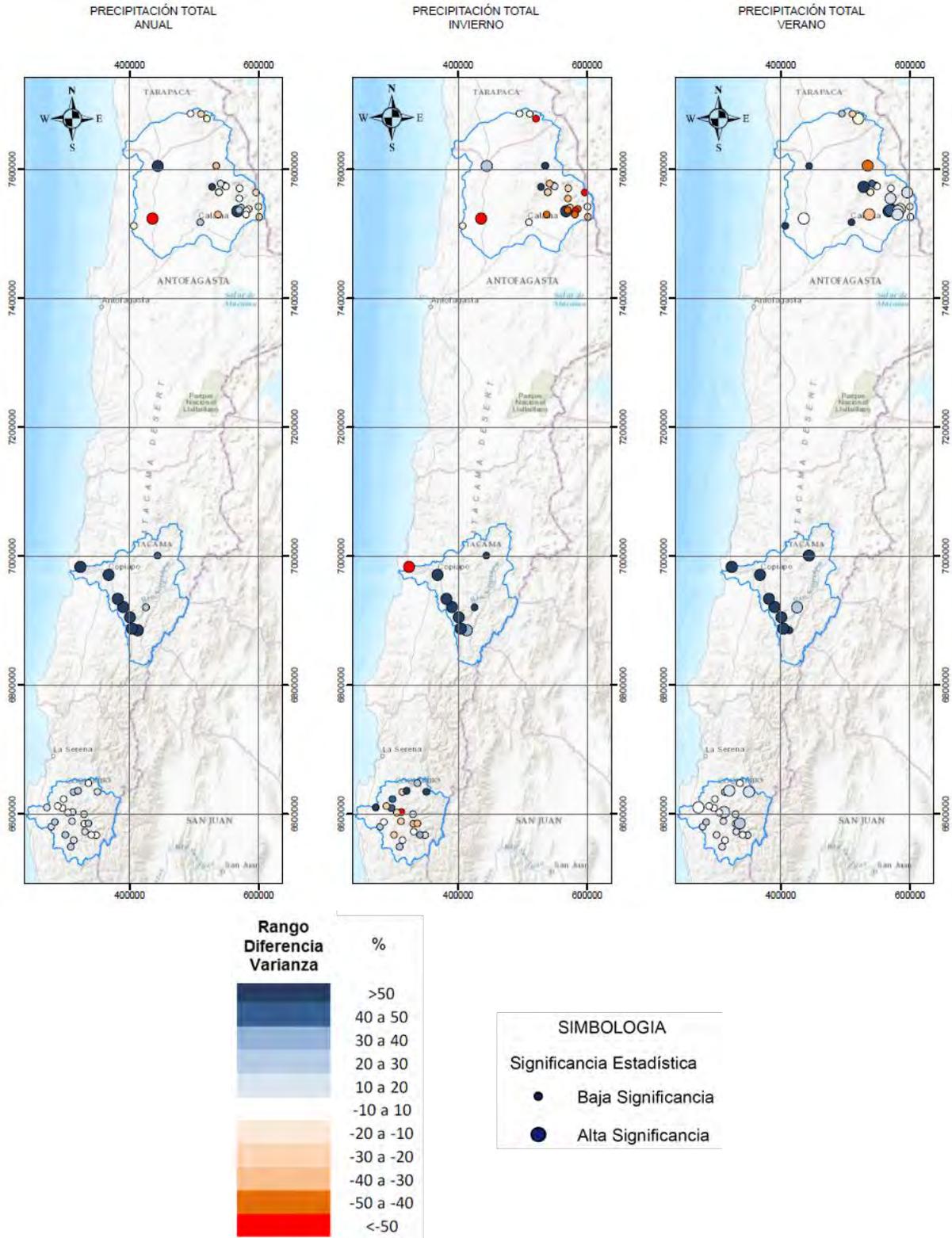
Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-17 Resultado de test de cambios en la media de precipitación, macrozona Austral.

Dentro de la macrozona Norte la cuenca del río Loa es la única que presentó cambios significativos en las precipitaciones identificados por el test de diferencia de medias. Los resultados indican 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. La cuenca del río Copiapó muestra algunas estaciones con incrementos de precipitaciones, sin embargo, estos cambios son estadísticamente no significativos. Los resultados para la cuenca del río Limarí sugieren un decaimiento de las precipitaciones durante el periodo 1987-2014 para la época de verano, sin embargo, sólo una de las estaciones analizadas presenta tendencias estadísticamente significativas. Es importante recalcar que la variabilidad inter-anual de estas cuencas es alta debido a que se tienen muchos años con precipitaciones totales en general bajas intercalados por años de precipitaciones extremadamente altas. Esto da como resultado que las medias de los periodos analizados puedan ser afectadas de manera importante por la presencia de un valor alto. Se recomienda en general tomar los resultados del test de Mann-Kendall como mejor indicador de la presencia de tendencias debido a su mayor resistencia a valores “outlier” en las series de tiempo.

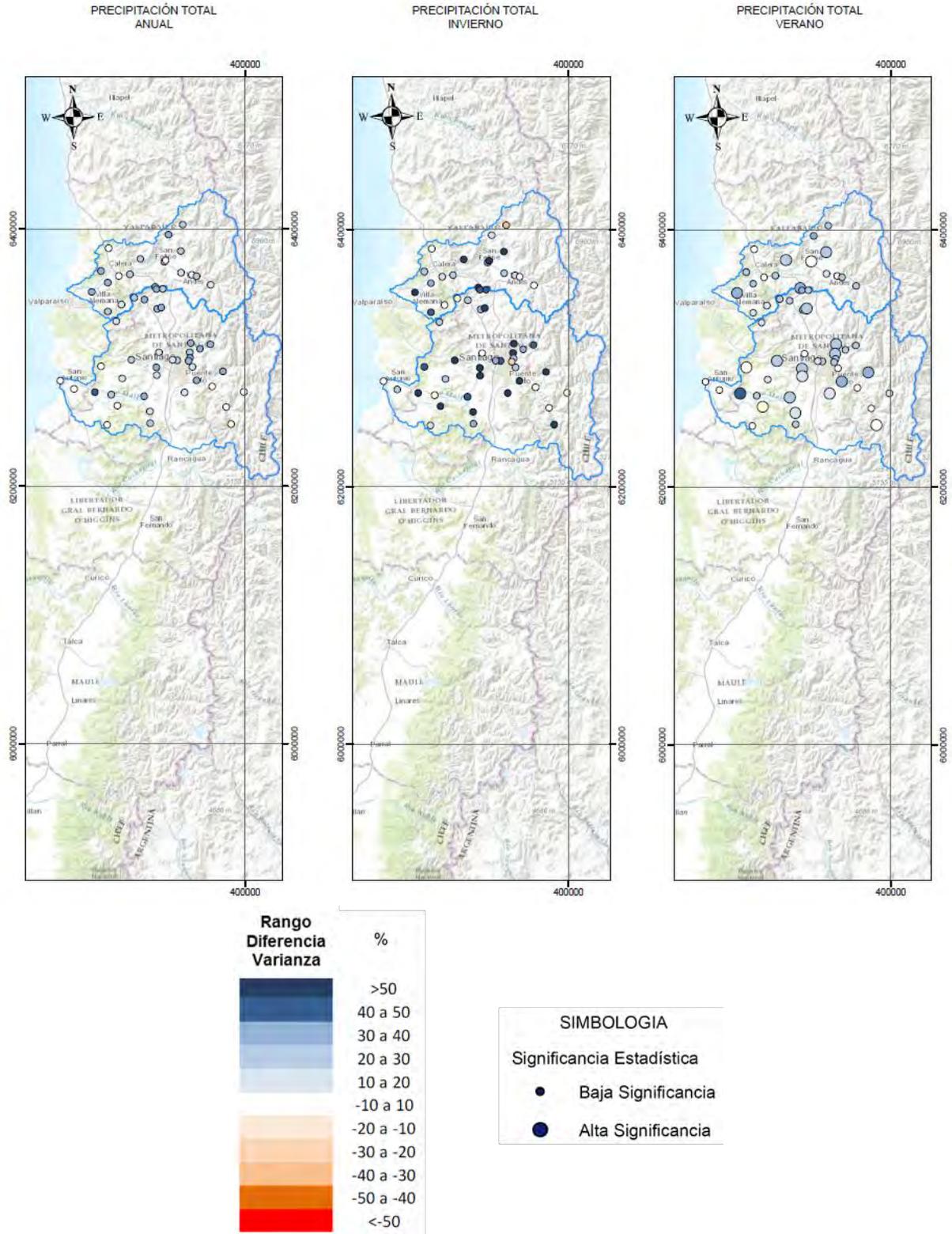
Para la macrozona Centro no se observa ningún cambio en el régimen de precipitaciones de los dos periodos analizados. Para la macrozona Sur se confirman los resultados del test de Mann-Kendall, con unas pocas estaciones mostrando descensos leves en las precipitaciones, pero la mayoría mostrando un régimen inalterado de precipitaciones. Los mayores cambios se observan durante la época de verano en estaciones de la depresión intermedia y pre-cordilleranas de la cuenca del río Imperial. Dentro de esta cuenca la mayoría de las estaciones no presenta tendencias importantes y por ende no se puede hablar de una señal robusta. 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%. No se presenta una señal clara de cambio distribuida por toda la cuenca.

A continuación, en las Figuras 6.2-18 a 6.2-21, se presentan los resultados del test de cambio en la varianza del periodo 1987-2014 con respecto al periodo 1960-1986. En cada una de estas láminas los círculos de diámetro pequeño representan diferencias estadísticamente no significativas, mientras que los círculos de diámetro mediano representan los resultados estadísticamente significativos. El nivel de significancia utilizado corresponde a un p-valor de 0,05 (95%). Los valores utilizados en la generación de las figuras presentadas se incluyen en el Anexo G.



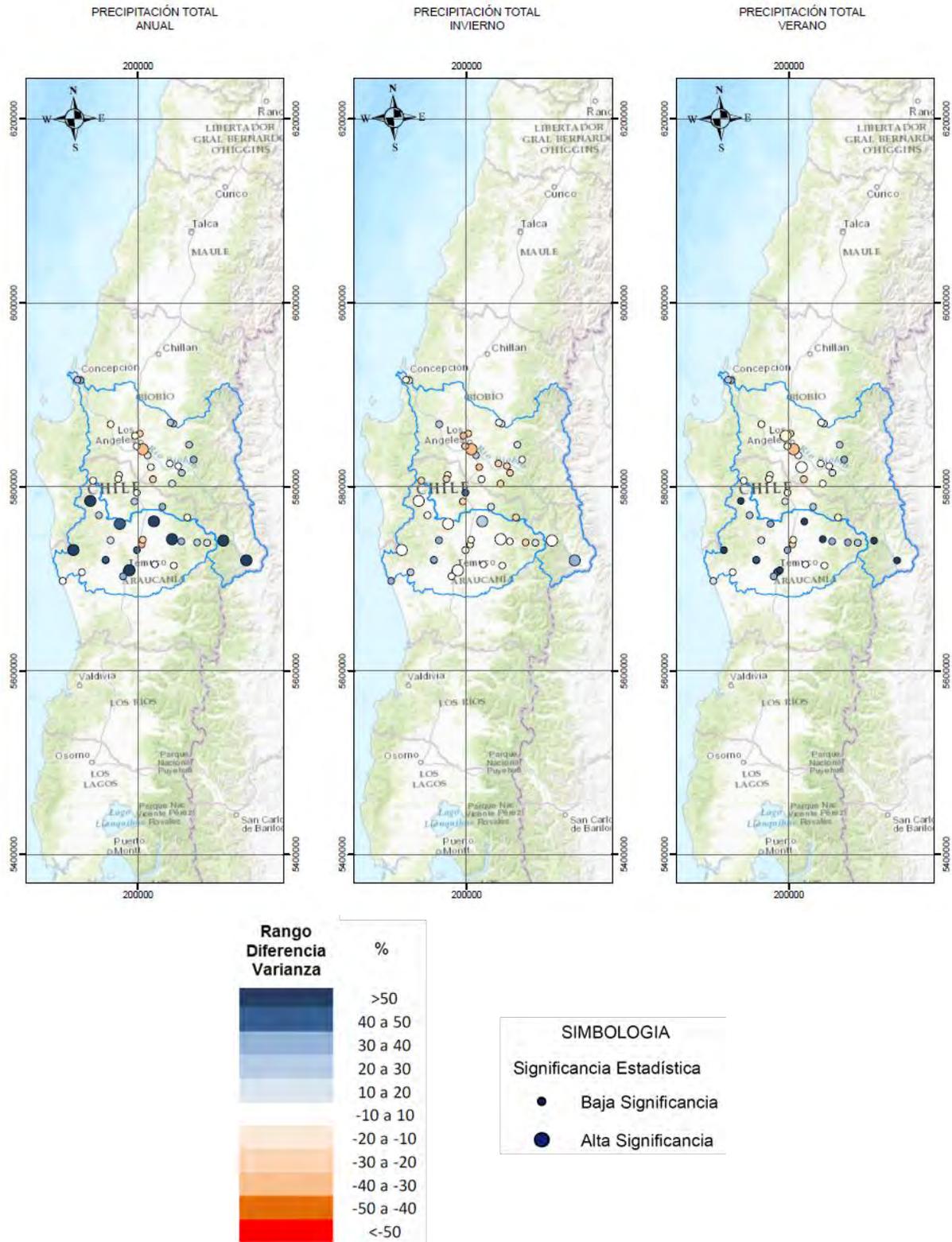
Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-18 Resultado de test de cambios en la varianza de precipitación, macrozona Norte.



Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.
Fuente: Elaboración Propia.

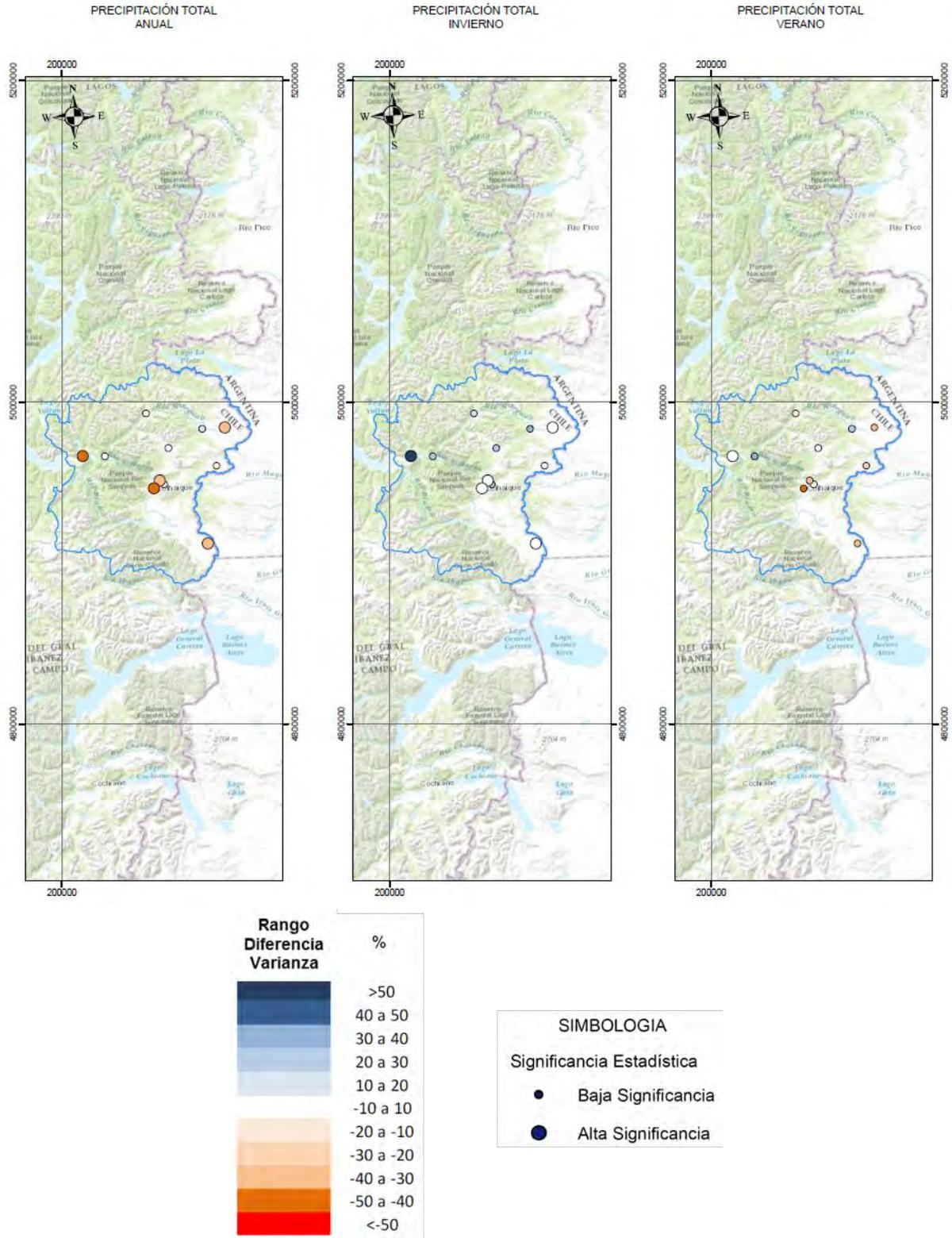
Figura 6.2-19 Resultado de test de cambios en la varianza de precipitación, macrozona Centro.



Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-20 Resultado de test de cambios en la varianza de precipitación, macrozona Sur.



Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-21 Resultado de test de cambios en la varianza de precipitación, macrozona Austral.

Los resultados del test de cambio de varianza para la macrozona Norte muestran diferencias importantes entre las tres cuencas (río Loa, río Copiapó y río Limarí). 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. Este tipo de fenómenos en general no se presenta en las zonas centro o sur del país debido a que los regímenes de precipitación en estas zonas provienen están relacionados a general a eventos de escala sinóptica y no eventos convectivos.

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 es explorado más en detalle en el análisis de los indicadores regionales, pero 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. Al igual que la macrozona Norte, este resultado es explorado de forma más detallada utilizando los indicadores regionales, los cuales permiten visualizar de manera más directa los cambios de varianza que utilizando sólo los resultados de los tests estadísticos.

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.

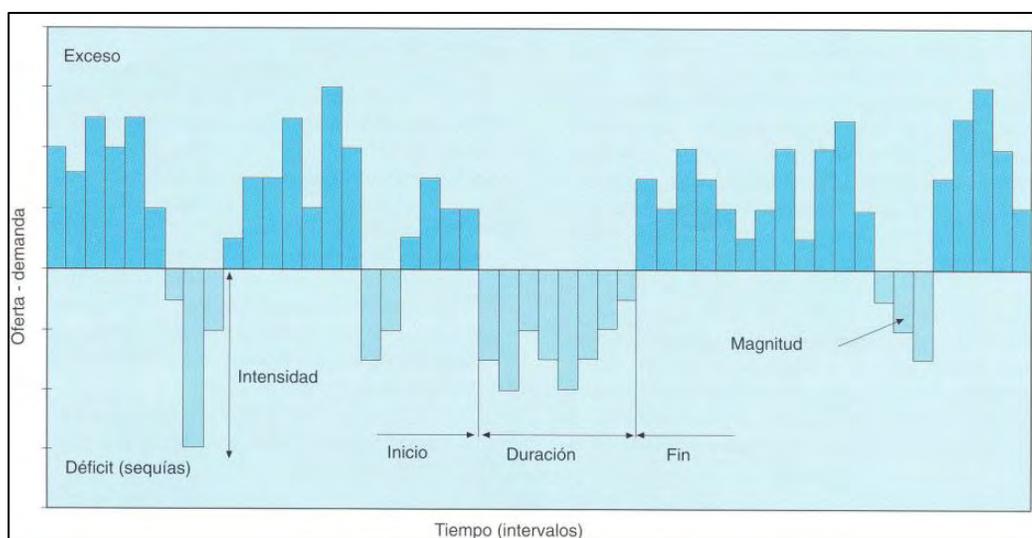
En el caso de la macrozona austral, representada por la cuenca del río Aysén, se observa una reducción de la varianza anual en cinco estaciones. Es probable que esta reducción en la varianza anual sea atribuible a la reducción (no-significativa) observada durante el periodo de verano.

6.2.2.3 Variabilidad en Régimen de Precipitaciones

Análisis de Sequía

Utilizando la estadística pluviométrica rellena mediante la metodología presentada en el acápite 5.2, se analizaron los periodos de sequías en cada cuenca en estudio,

considerando como periodo de sequía aquel 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, la Figura 6.2-22 presenta estos términos de manera gráfica de acuerdo a Fernandez (1997). Los resultados para cada macrozona se presentan en los Cuadros 6.2-10 a 6.2-13.



Fuente: Fernández, 1997.

Figura 6.2-22 Definición Intensidad, Magnitud, y Duración.

Cuadro 6.2-10 Periodos de Sequía Macrozona Norte

Cuenca	Estación	Pm Anual (mm)	Inicio	Fin	Duración (años)	Intensidad (mm)	Magnitud (mm)
Río Loa	Calama	3,4	1979	1982	4	3,4	12,9
			1988	1991	4	2,5	7,6
			1993	1995	3	3,4	8,1
			1997	1999	3	2,9	6,8
			2006	2010	5	3,4	14,2
Río Loa	El Loa Calama AD	6,5	1977	1982	6	6,5	31,7
			1985	1991	7	6,5	35,0
			1993	1995	3	6,2	15,3
			1997	1999	3	6,1	14,7
			2006	2010	5	6,5	28,5
Río Loa	Linzor	156,6	1977	1979	3	77,6	160,5
			1989	1993	5	124,1	332,3
			2001	2004	4	147,8	270,1
			2006	2010	5	147,4	446,3
			2012	2014	3	149,6	257,1

Cuenca	Estación	Pm Anual (mm)	Inicio	Fin	Duración (años)	Intensidad (mm)	Magnitud (mm)
Río Copiapó	Jorquera en la Guardia	41,9	1963	1966	4	28,8	72,3
			1968	1971	4	41,9	108,9
			1973	1975	3	23,4	42,8
			1977	1979	3	37,4	77,3
			1993	1996	4	37,9	66,3
			2003	2006	4	33,9	93,1
	Lautaro Embalse	33,8	1966	1979	14	33,8	253,9
			1993	1996	4	33,8	116,2
			2003	2009	7	32,8	129,6
	Desierto de Atacama Caldera AP	15,3	1973	1976	4	12,8	38,7
1993			1996	4	15,3	60,6	
2006			2009	4	14,3	47,6	
Río Limarí	Las Ramadas	287,4	1967	1971	5	239,1	964,4
			1973	1976	4	153,5	575,8
			1993	1996	4	206,9	423,6
			2009	2014	6	170,4	536,8
	Paloma Embalse	131,5	1967	1971	5	107,9	363,7
			1973	1976	4	64,2	168,6
			1988	1990	3	105,2	228,9
			1993	1996	4	107,7	285,7
			2005	2007	3	73,8	175,5
			2012	2014	3	113,4	192,7
	Punitaqui	153,2	1967	1971	5	131,4	419,0
			1973	1976	4	62,1	165,4
			1988	1990	3	110,2	289,8
			1993	1996	4	121,2	325,1
			2005	2010	6	126,0	307,4
2012			2014	3	85,9	213,7	

Nota: Los registros destacados corresponden al máximo valor dentro de la categoría indicada para cada estación.

Fuente: Elaboración Propia.

Dentro de la cuenca del río Loa, si bien existen ciertos periodos comunes de sequía, para las 2 primeras estaciones se detectan solo hasta el periodo 2006-2010. 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. Sin embargo, el periodo también es registrado en tramos por la estación Jorquera en la Guardia.

Se observa que, en general, las intensidades resultan ser mayores en los primeros periodos, pese a que hay una transición de este efecto en las estaciones Lautaro y Desierto Atacama, donde el peak ocurre después del 1988. Finalmente, al igual que para la cuenca del río Loa, no se detecta de manera consistente un periodo de sequía entre los años 2010 y 2014.

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.

Cuadro 6.2-11 Periodos de Sequía Macrozona Centro

Cuenca	Estación	Pm Anual (mm)	Inicio	Fin	Duración (años)	Intensidad (mm)	Magnitud (mm)
Río Aconcagua	Riecillos	512,6	1966	1971	6	418,7	1.372,8
			1973	1976	4	191,3	550,8
			1988	1990	3	334,8	650,3
			1994	1996	3	308,9	699,2
			2009	2014	6	321,2	1.387,7
	San Felipe	204,7	1960	1962	3	51,6	136,0
			1967	1969	3	156,0	398,7
			1988	1990	3	143,2	312,0
			1993	1996	4	119,3	314,6
			2009	2014	6	111,1	351,3
	Lo Rojas	383,3	1960	1964	5	153,4	479,5
			1967	1971	5	299,9	673,3
			1988	1990	3	259,4	510,6
			1993	1996	4	181,2	554,6
			2009	2011	3	182,3	367,7
Río Maipo	San Antonio (Punta Panul)	358,1	1960	1962	3	121,5	279,7
			1966	1971	6	327,8	990,7
			1988	1990	3	268,6	532,6
			1994	1996	3	121,1	291,9
			2009	2011	3	135,5	340,0
	San José de Maipo Retén	480,1	1960	1962	3	237,3	644,2
			1964	1971	8	389,8	1.446,0
			1973	1976	4	127,6	320,3
			1994	1996	3	247,1	443,0

Cuenca	Estación	Pm Anual (mm)	Inicio	Fin	Duración (años)	Intensidad (mm)	Magnitud (mm)
Río Maipo	Quinta Normal Santiago	310,6	1960	1962	3	102,5	245,9
			1967	1969	3	241,4	481,3
			1979	1981	3	68,3	94,1
			1994	1996	3	136,9	345,9
			2009	2014	6	166,4	583,2

Nota: Los registros destacados corresponden al máximo valor dentro de la categoría indicada para cada estación.

Fuente: Elaboración Propia.

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.

Cuadro 6.2-12 Periodos de Sequía Macrozona Sur

Cuenca	Estación	Pm Anual (mm)	Inicio	Fin	Duración (años)	Intensidad (mm)	Magnitud (mm)
Río Bío-Bío	Laguna Malleco	2.988,6	1967	1971	5	587,9	1.647,8
			1973	1977	5	1.407,8	3.652,3
			1988	1990	3	875,6	1.910,1
			2007	2014	8	1.154,4	3.611,1
	Las Achiras	1.029,3	1960	1964	5	572,3	1.337,5
			1973	1976	4	381,5	942,4
			1988	1990	3	164,3	358,2
			1998	2001	4	538,7	812,6
			2003	2005	3	257,0	467,2
			2011	2014	4	424,3	675,8
	Río Bío-Bío en Desembocadura	931,1	1973	1976	4	123,3	385,4
			1987	1990	4	130,9	306,3
			2007	2014	8	290,7	567,7
Río Imperial	Vilcún	1.604,9	1960	1964	5	675,0	2.419,6
			1985	1988	4	466,9	1.271,8
			2012	2014	3	234,2	659,3
	Puerto Saavedra	1.139,2	1987	1990	4	237,2	621,2
			2009	2014	6	277,4	1.011,6
	Maquehue Temuco AD	1.148,4	1986	1990	5	332,7	807,4
2010			2014	5	279,5	1.138,1	

Nota: Los registros destacados corresponden al máximo valor dentro de la categoría indicada para cada estación.

Fuente: Elaboración Propia.

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.

Los periodos de sequía observados previos al año 1988 son escasos en la macrozona, presentándose eventos con mayor regularidad en la cuenca del río Bío-Bío.

Cuadro 6.2-13 Periodos de Sequía Macrozona Austral

Cuenca	Estación	Pm Anual (mm)	Inicio	Fin	Duración (años)	Intensidad (mm)	Magnitud (mm)
Río Aysén	Puerto Aysén	2.544,8	1980	1984	5	485,7	995,0
			1986	1989	4	403,5	1.069,3
			1995	2009	15	1.037,9	4.729,8
			2011	2014	4	224,3	343,7
	Teniente Vidal	1.059,0	1970	1974	5	271,3	734,3
			1980	1989	10	383,6	1.826,7
			1991	1993	3	168,7	404,6
	Balmaceda AD	577,4	1972	1974	3	146,4	319,0
			1980	1984	5	247,2	592,5
			1987	1989	3	173,4	286,5
			2001	2003	3	138,2	224,5
			2006	2011	6	250,8	526,7

Nota: Los registros destacados corresponden al máximo valor dentro de la categoría indicada para cada estación.

Fuente: Elaboración Propia.

La macrozona, vista de una manera general, 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.

Se observa que, como ha sido constante en el análisis del resto de las macrozonas, se presenta un aumento en la cantidad de eventos de sequía en el periodo posterior al año 1988, lo cual incluye eventos extremos de intensidad y duración.

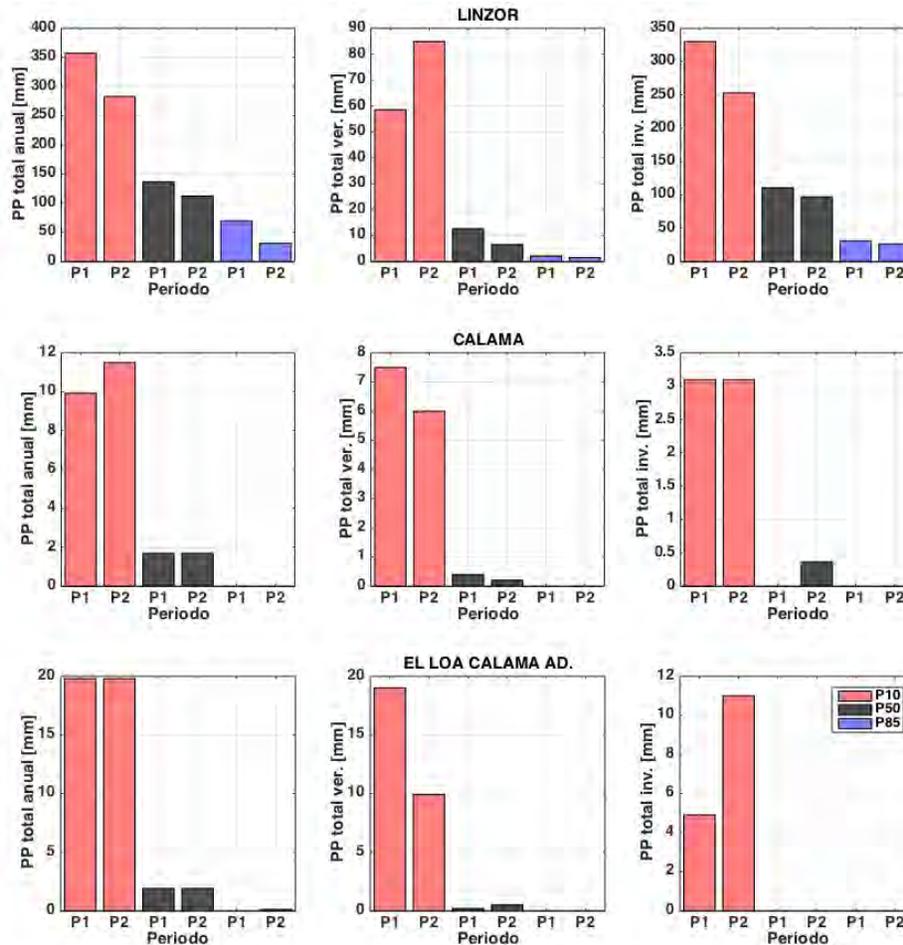
Análisis de la Variabilidad de Precipitaciones

En este acápite se presentan los resultados del análisis de cambios en las precipitaciones en las estaciones meteorológicas de interés. Se analizaron tres distintas probabilidades de excedencia: 10%, 50% y 85%. El periodo analizado consiste en los años hidrológicos 1960-2014, dividido en dos periodos principales de comparación, 1960 a 1989 y 1985 a 2014 (30 años cada uno, definidos como periodos P1 y P2 respectivamente en el texto). Estos periodos fueron utilizados para todas las cuencas, a excepción de la cuenca de río Loa. Para esta cuenca debido a la reducida disponibilidad de datos (sólo se cuenta con datos de 1975 al 2014) se utilizaron los periodos 1975 al 2004 y 1985 al 2014 como periodos P1 y P2. La longitud de al menos 29 años con los que se definen los periodos de análisis responde a obtener resultados con validez estadística.

Para cada cuenca, y para las tres estaciones seleccionadas en el acápite de análisis temporal, se estimaron las precipitaciones con probabilidad de excedencia P10, P50 y P85 para cada uno de los periodos utilizando el método de Weibull. Se estimaron los valores anuales y los valores estacionales de invierno y verano. Además, se estimaron los valores mensuales de manera de poder contar con valores de referencia para las Curvas de Variación Estacional (CVE) de cada una de las estaciones.

Las Figuras 6.2-23 a 6.2-30 presentan de manera gráfica los valores detallados para cada una de las estaciones presentados en el Anexo H. A su vez, junto a cada una de las figuras se presenta un breve análisis de los principales cambios observados en las estaciones representativas. Utilizando de igual forma el método de Weibull, se ha generado de manera complementaria un gráfico matricial representando las probabilidades de excedencia para la serie anual, el cual se observa en la Figura B-29 perteneciente al Anexo B.

Cabe destacar que las agregaciones temporales presentadas aquí (anual, invierno y verano) son las mismas agregaciones que ya fueron descritas en el Acápite 5.2.4, particularmente en el Cuadro 5.2-5.

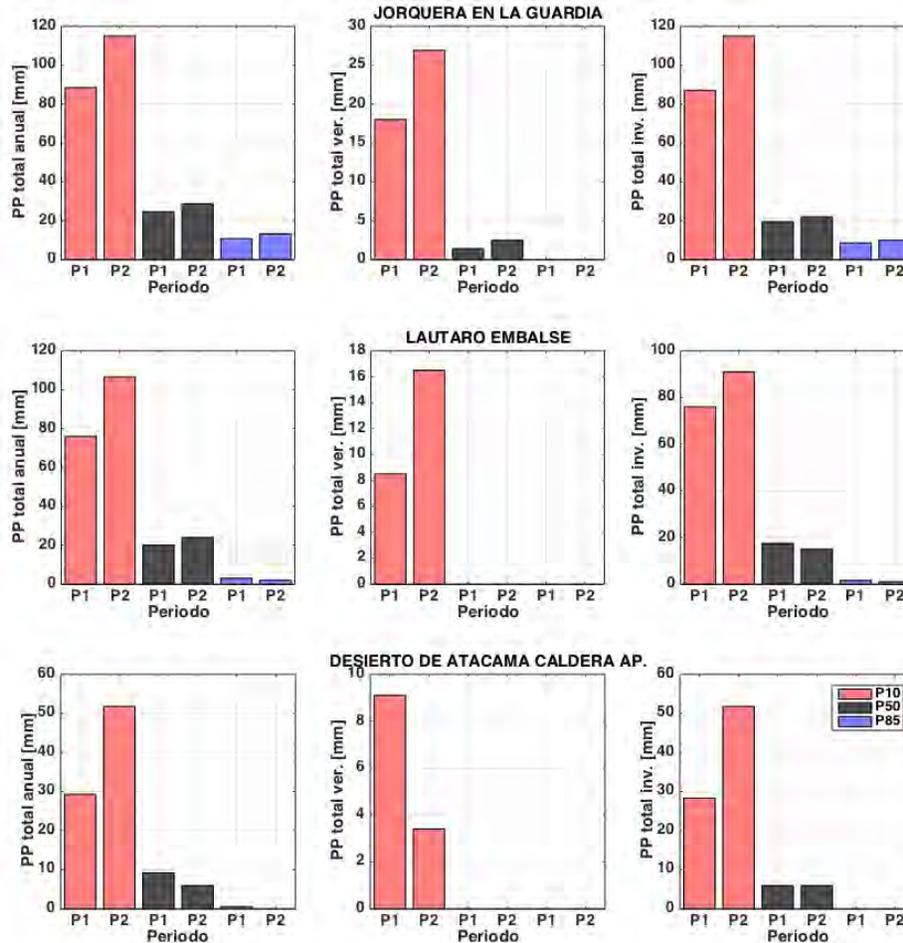


Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1975 - 2004 y 1985 - 2014 respectivamente.
 - (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
 - (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.
- Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-23 Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Loa.

Para la cuenca del río Loa se observa una reducción de las precipitaciones en la estación Linzor para las probabilidades de excedencia 50 y 85%. No se aprecian cambios consistentes en el resto de las estaciones analizadas. Es importante recalcar que las precipitaciones sobre esta cuenca son extremadamente reducidas con una alta variabilidad interanual, por lo que los cambios detectados podrían ser producto de la variabilidad natural y no necesariamente signo de algún cambio significativo en el régimen de precipitaciones. De acuerdo a la metodología de Weibull, es posible que algunas de las estaciones (tal como se aprecia en la figura) presenten valores P50 o P85 iguales a 0.

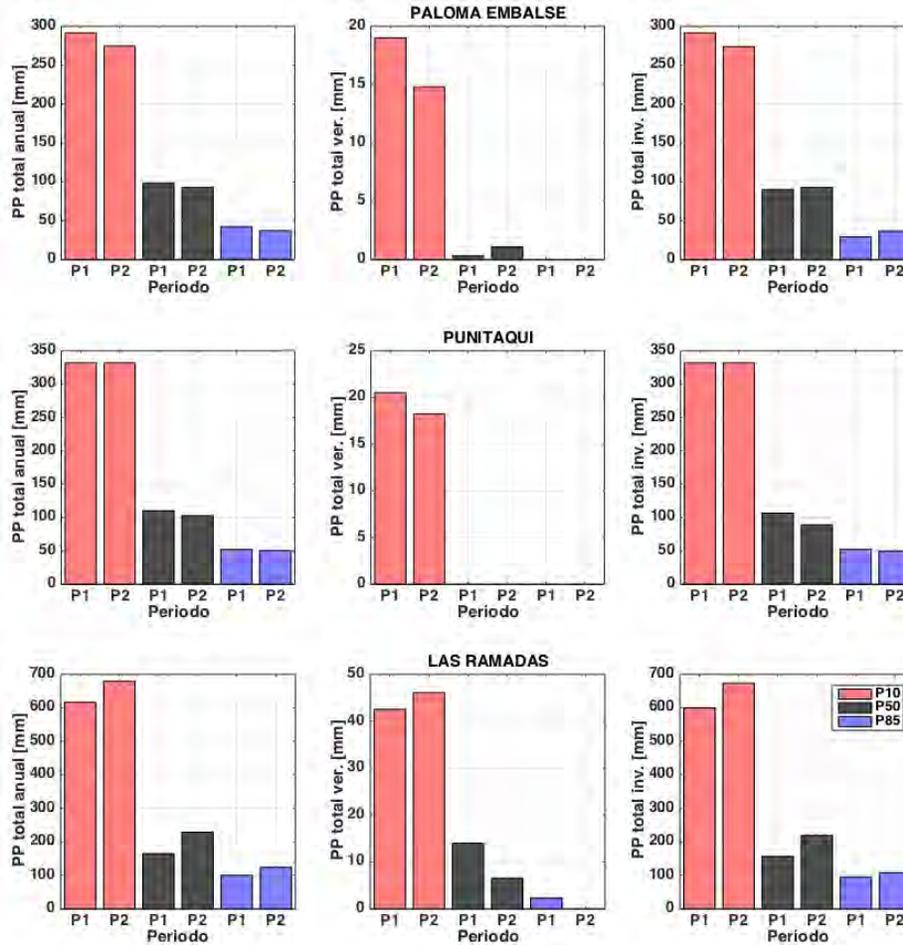


Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
 - (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
 - (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.
- Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-24 Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Copiapó.

Se observa en general un aumento consistente de las precipitaciones P10 anuales para todas las estaciones, y para los periodos de invierno y verano exceptuando la estación Desierto de Atacama Caldera. Esta estación muestra un descenso de las precipitaciones P10. El aumento generalizado de las precipitaciones P10 no debe tomarse como una señal clara de incremento en el régimen de precipitaciones debido a que solo corresponde a eventos extremos de probabilidad de excedencia del 10% en una zona de clima árido.

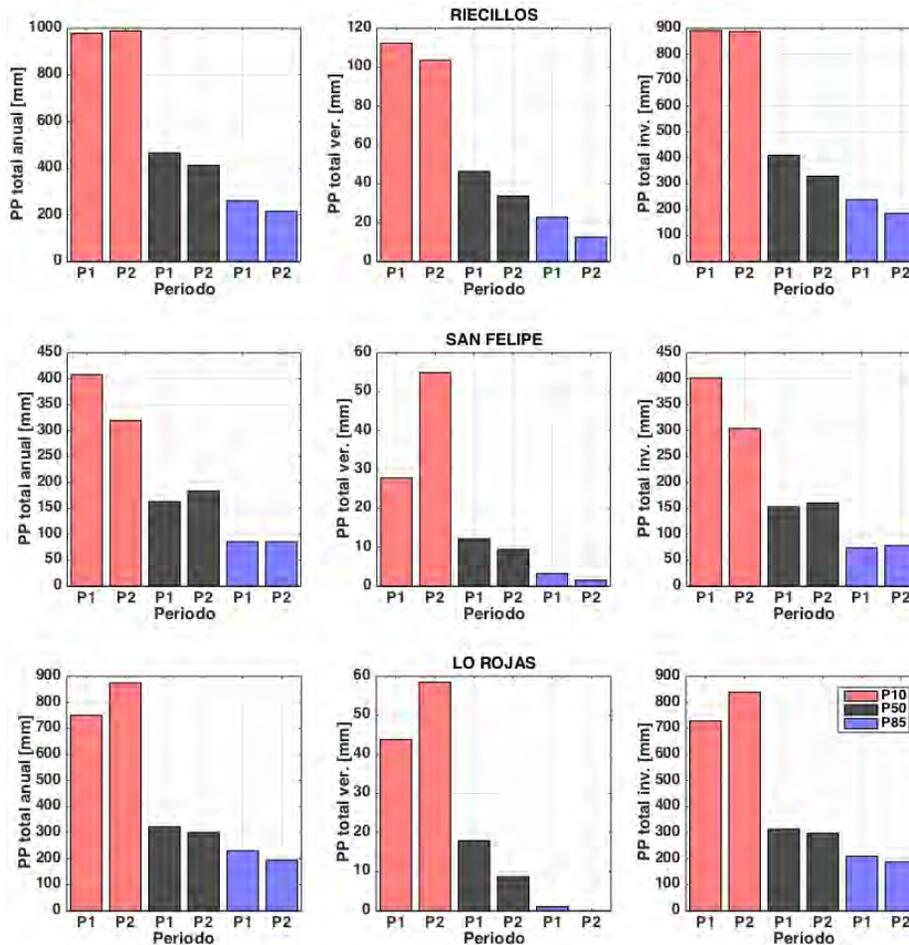


Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
 - (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
 - (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.
- Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-25 Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Limarí.

Para la cuenca del río Limarí no se observan cambios significativos en el régimen de precipitaciones. Las estaciones muestran signos inconsistentes, por ejemplo, Las Ramadas presenta un aumento de sus precipitaciones durante el año y durante el invierno, pero una reducción en precipitaciones P50 y P85 para el verano. La estación Punitaqui presenta un descenso leve en precipitaciones P50 y P85, y La Paloma presenta un aumento de sus precipitaciones P10 para todas las temporadas.

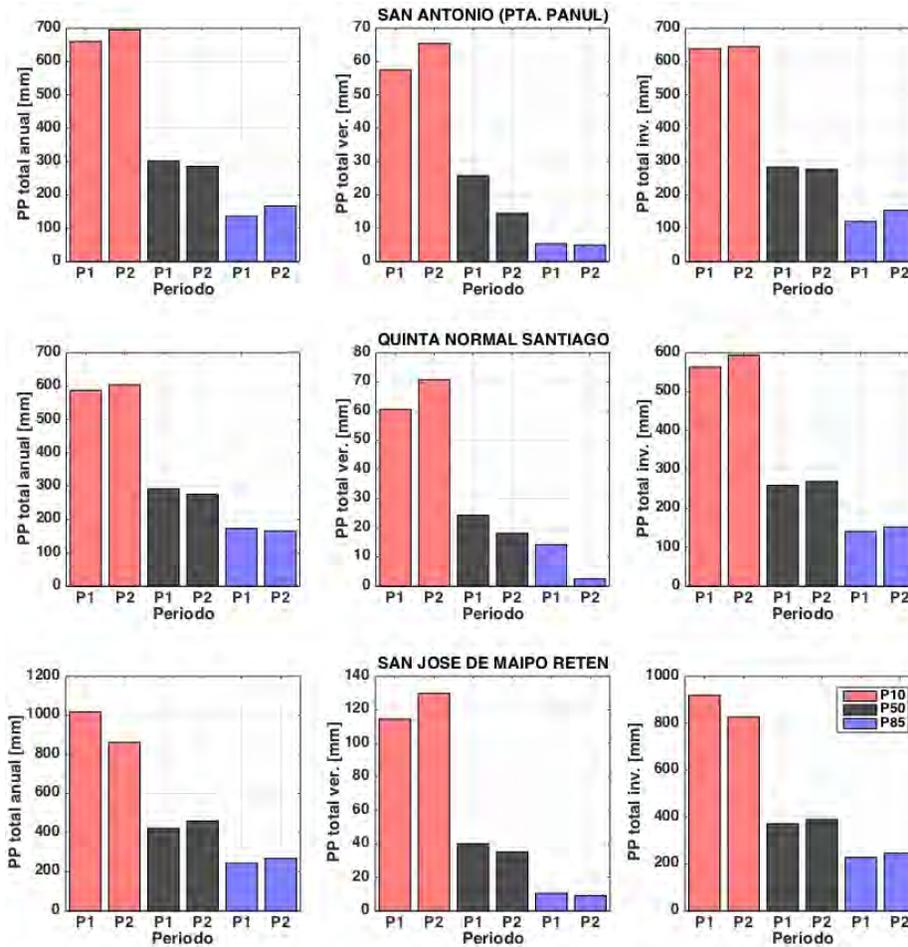


Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
 - (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
 - (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.
- Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-26 Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Aconcagua

Para la cuenca del río Aconcagua se observa una leve señal de incremento en P10 para verano en las estaciones San Felipe y Lo Rojas, esta última mostrando incrementos en precipitaciones anuales y estacionales para P10. Es importante mencionar que de las 27 combinaciones posibles de probabilidad de excedencia/estaciones analizadas, 16 mostraron un cambio negativo de P1 a P2, mientras que sólo 3 mostraron un cambio positivo. El resto mostró cambios muy leves ya sea positivos o negativos, o neutros.

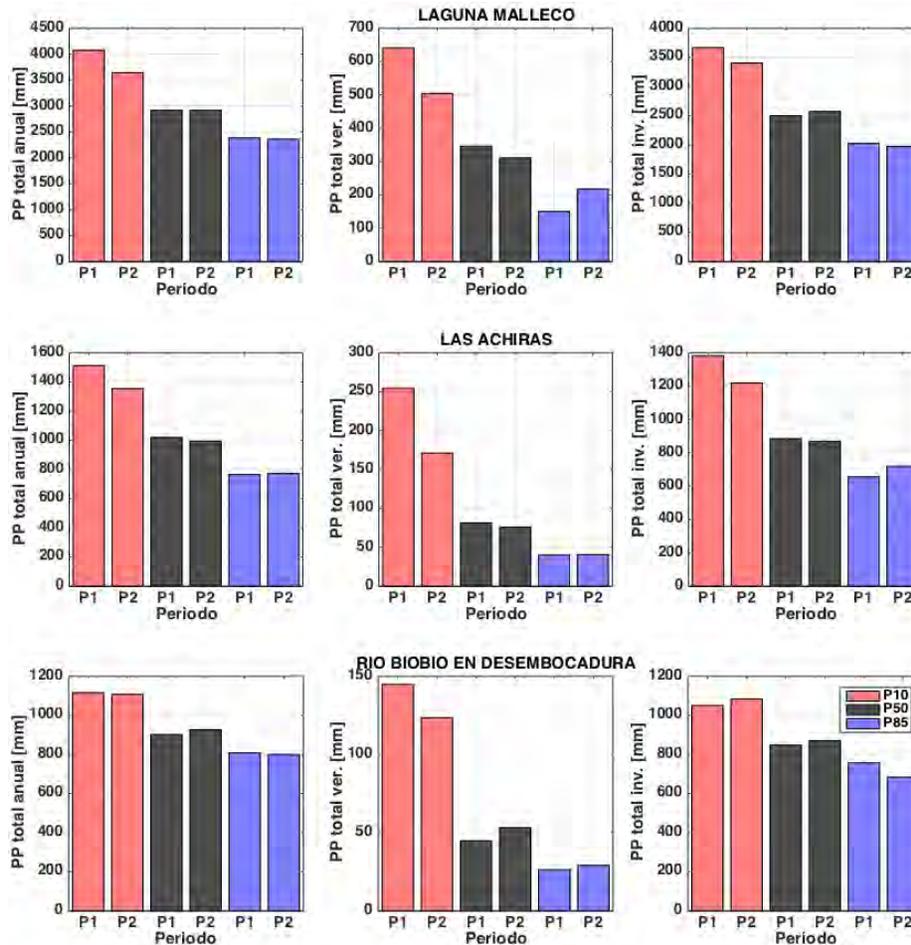


Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
 - (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
 - (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.
- Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-27 Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Maipo.

Para la cuenca del río Maipo no se observa un patrón de cambios consistente, a excepción de una reducción de las precipitaciones P50 durante el periodo de verano para las tres estaciones. Para el resto de las métricas se aprecian cambios negativos y positivos sin una señal clara.

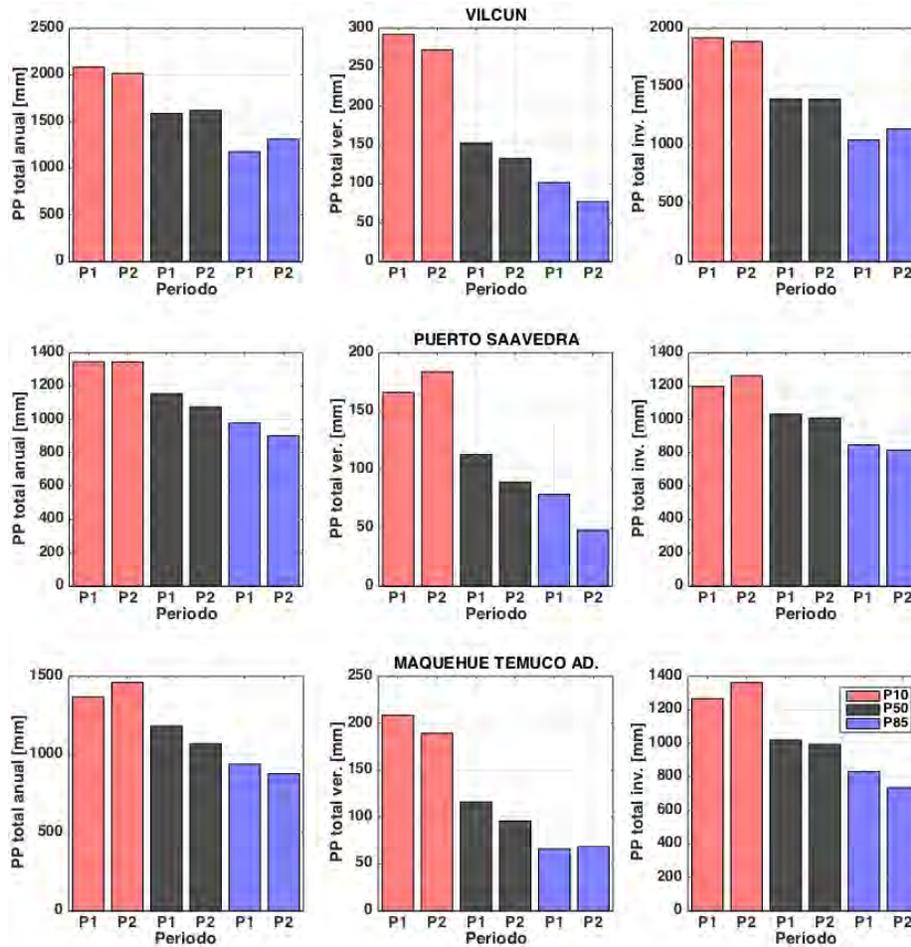


Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
 - (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
 - (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.
- Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-28 Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Bío-Bío.

Para la cuenca del río Bío-Bío se observan en general reducciones para los valores P10 en todas las estaciones y agregaciones temporales. No se observa un patrón consistente para el resto de las probabilidades de excedencia.

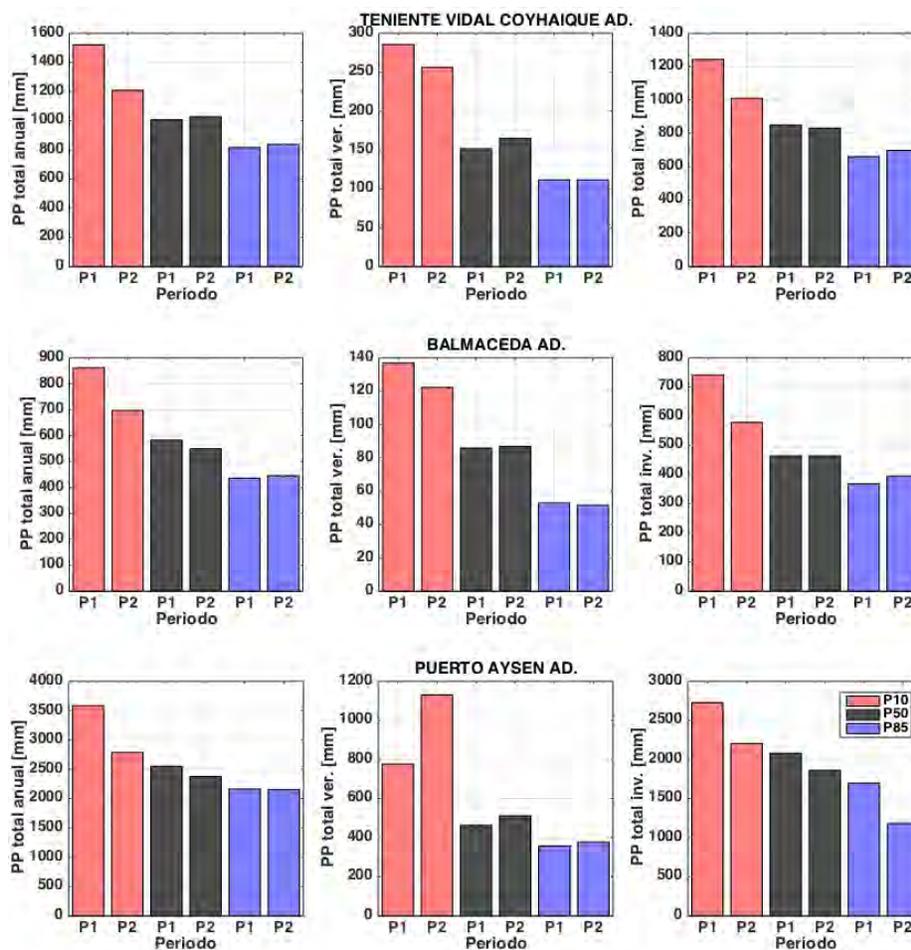


Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
 - (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
 - (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.
- Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-29 Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Imperial.

Para la cuenca del río Imperial se observa una reducción consistente de las precipitaciones en las P50 y P85 para las tres estaciones analizadas en el periodo de verano, y para dos de las estaciones en el periodo de invierno y anual.



Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
 - (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
 - (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.
- Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-30 Cambios en las probabilidades de excedencia en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Aysén.

Para la cuenca del río Aysén se observa para casi todos los casos una reducción de las precipitaciones P10 para las tres estaciones en todos los periodos. Para el resto de las probabilidades de excedencia el cambio no es significativo y no se observa un patrón consistente.

El resumen de la variación para cada probabilidad de excedencia por macrozona, y para cada estación seleccionada por cuenca, puede apreciarse en los Cuadros 6.2-14 a 6.2-16.

Cuadro 6.2-14 Resumen de la variación porcentual de la precipitación asociada al 10% (P10) de probabilidad de excedencia en todas las estaciones seleccionadas por macrozona.

MZ	CUENCA	ESTACIÓN	P10											
			ANUAL				INVIERNO				VERANO			
			TOTAL	P1	P2	VAR. [%]	TOTAL	P1	P2	VAR. [%]	TOTAL	P1	P2	VAR. [%]
Norte	Loa	9 : EL LOA CALAMA AD.	19.8	19.8	19.8	0.0%	5.1	4.9	11.0	124.5%	15.4	19.0	9.9	-47.9%
		5 : CALAMA	9.9	9.9	11.5	16.0%	3.1	3.1	3.1	0.0%	6.0	7.5	6.0	-20.0%
		22 : LINZOR	357.0	357.0	283.0	-20.7%	280.4	330.0	253.0	-23.3%	58.5	58.5	84.8	45.0%
	Copiapó	9 : DESIERTO DE ATACAMA CALDERA AP.	37.7	29.3	51.8	76.8%	37.7	28.3	51.8	83.0%	3.4	9.1	3.4	-62.6%
		4 : LAUTARO EMBALSE	97.5	76.0	106.5	40.1%	81.0	76.0	91.0	19.7%	13.0	8.5	16.5	94.1%
		1 : JORQUERA EN LA GUARDIA	94.8	88.4	115.0	30.1%	74.0	87.0	115.0	32.2%	20.2	18.0	26.9	49.4%
	Limarí	22 : PUNITAQUI	299.0	332.0	332.0	0.0%	298.5	332.0	332.0	0.0%	20.0	20.5	18.2	-11.0%
		18 : PALOMA EMBALSE	279.9	291.3	274.7	-5.7%	275.4	291.3	273.6	-6.1%	17.0	19.0	14.8	-22.1%
		6 : LAS RAMADAS	536.5	616.5	679.4	10.2%	510.0	599.5	673.4	12.3%	42.5	42.5	46.1	8.5%
Centro	Aconcagua	14 : LO ROJAS	661.9	750.6	874.4	16.5%	646.9	728.5	839.4	15.2%	54.5	43.8	58.5	33.6%
		6 : SAN FELIPE	376.9	407.7	319.1	-21.7%	354.9	401.3	304.1	-24.2%	39.0	27.8	54.9	97.5%
		1 : RIECILLOS	886.2	978.3	988.8	1.1%	851.7	891.4	887.1	-0.5%	103.5	112.2	103.5	-7.8%
	Maipo	2 : SAN ANTONIO (PTA. PANUL)	622.0	660.5	695.0	5.2%	613.0	638.0	644.6	1.0%	58.6	57.5	65.4	13.7%
		37 : QUINTA NORMAL SANTIAGO	480.9	587.1	604.3	2.9%	444.6	563.5	593.8	5.4%	62.8	60.6	70.8	16.8%
		6 : SAN JOSE DE MAIPO RETEN	765.8	1018.0	862.1	-15.3%	731.4	919.0	827.0	-10.0%	114.5	114.5	129.8	13.4%
Sur	Bío-Bío	25 : RIO BIOBIO EN DESEMBOCADURA	1108.0	1115.8	1108.0	-0.7%	1078.5	1049.9	1083.7	3.2%	123.5	144.9	123.5	-14.8%
		22 : LAS ACHIRAS	1437.7	1512.5	1354.3	-10.5%	1345.0	1381.7	1219.0	-11.8%	193.2	254.5	171.0	-32.8%
		15 : LAGUNA MALLECO	3818.4	4074.6	3642.6	-10.6%	3470.1	3667.3	3401.8	-7.2%	599.5	641.0	504.1	-21.4%
	Imperial	21 : PUERTO SAAVEDRA	1345.8	1346.5	1345.8	-0.1%	1258.7	1198.3	1262.0	5.3%	166.3	166.0	184.0	10.8%
		22 : MAQUEHUE TEMUCO AD.	1403.9	1367.7	1460.7	6.8%	1308.3	1267.1	1362.5	7.5%	189.2	208.4	189.2	-9.2%
		19 : VILCUN	2019.0	2083.8	2015.4	-3.3%	1887.0	1917.5	1887.0	-1.6%	272.0	292.0	272.0	-6.8%
Austral	Aysén	9 : PUERTO AYSEN AD.	3129.2	3583.8	2786.1	-22.3%	2513.8	2727.8	2203.7	-19.2%	778.9	776.2	1130.6	45.7%
		10 : TENIENTE VIDAL COYHAIQUE AD.	1321.5	1520.2	1208.1	-20.5%	1045.2	1242.8	1009.6	-18.8%	281.3	285.4	256.1	-10.3%
		11 : BALMACEDA AD.	771.7	861.9	696.1	-19.2%	663.5	740.7	578.6	-21.9%	122.2	136.9	122.2	-10.7%

Notas:

(1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.

(2): Colores en verde indican variaciones porcentuales máximas positivas. Color blanco a celeste indican variaciones porcentuales positivas. Colores rojos indican variaciones porcentuales negativas.

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.2-15 Resumen de la variación porcentual de la precipitación asociada al 50% (P50) de probabilidad de excedencia en todas las estaciones seleccionadas por macrozona.

MZ	CUENCA	ESTACIÓN	P50											
			ANUAL				INVIERNO				VERANO			
			TOTAL	P1	P2	VAR. [%]	TOTAL	P1	P2	VAR. [%]	TOTAL	P1	P2	VAR. [%]
Norte	Loa	9 : EL LOA CALAMA AD.	2.0	1.9	1.9	0.0%	0.0	0.0	0.0	-	0.5	0.2	0.5	150.0%
		5 : CALAMA	1.7	1.7	1.7	0.0%	0.1	0.0	0.4	-	0.3	0.4	0.2	-50.0%
		22 : LINZOR	117.8	136.5	112.2	-17.8%	98.7	110.5	97.0	-12.2%	7.5	12.7	6.5	-48.8%
	Copiapó	9 : DESIERTO DE ATACAMA CALDERA AP.	7.7	9.2	5.9	-35.9%	5.9	5.9	5.9	0.0%	0.0	0.0	0.0	-
		4 : LAUTARO EMBALSE	21.2	20.0	24.0	20.0%	17.5	17.5	15.0	-14.3%	0.0	0.0	0.0	-
		1 : JORQUERA EN LA GUARDIA	26.9	24.4	28.7	17.4%	21.6	19.4	22.0	13.4%	2.0	1.4	2.5	78.6%
	Limarí	22 : PUNITAQUI	110.0	110.0	102.5	-6.8%	106.5	106.5	89.0	-16.5%	0.0	0.0	0.0	-
		18 : PALOMA EMBALSE	101.3	97.9	92.7	-5.3%	95.6	90.0	92.7	3.0%	1.1	0.3	1.1	266.7%
		6 : LAS RAMADAS	220.2	164.5	228.4	38.8%	213.3	156.5	218.7	39.7%	11.7	14.0	6.5	-53.6%
Centro	Aconcagua	14 : LO ROJAS	321.9	321.9	300.7	-6.6%	300.7	313.0	296.7	-5.2%	10.2	17.9	8.7	-51.4%
		6 : SAN FELIPE	183.2	163.0	183.2	12.4%	160.2	153.1	160.2	4.6%	11.4	12.2	9.4	-23.0%
		1 : RIECILLOS	447.2	465.7	411.9	-11.6%	390.7	409.7	328.8	-19.7%	37.6	46.3	33.7	-27.2%
	Maipo	2 : SAN ANTONIO (PTA. PANUL)	301.3	301.3	285.4	-5.3%	281.0	283.1	276.7	-2.2%	18.0	25.8	14.5	-43.8%
		37 : QUINTA NORMAL SANTIAGO	291.9	291.9	275.8	-5.5%	269.3	259.2	269.3	3.9%	21.9	24.3	18.1	-25.5%
		6 : SAN JOSE DE MAIPO RETEN	434.0	421.4	459.0	8.9%	380.1	371.0	389.5	5.0%	35.6	40.0	35.1	-12.3%
Sur	Bío-Bío	25 : RIO BIOBIO EN DESEMBOCADURA	931.7	902.1	926.5	2.7%	870.3	848.7	870.3	2.5%	53.2	44.8	53.2	18.7%
		22 : LAS ACHIRAS	1013.5	1019.5	993.5	-2.6%	880.3	884.8	869.5	-1.7%	81.3	81.3	75.9	-6.6%
		15 : LAGUNA MALLECO	2939.3	2917.5	2917.5	0.0%	2572.9	2500.1	2572.9	2.9%	342.0	345.8	311.0	-10.1%
	Imperial	21 : PUERTO SAAVEDRA	1151.0	1154.7	1074.9	-6.9%	1031.5	1031.5	1008.3	-2.3%	111.2	112.8	89.0	-21.1%
		22 : MAQUEHUE TEMUCO AD.	1187.2	1182.5	1068.4	-9.6%	1019.1	1019.1	992.4	-2.6%	110.0	116.1	95.6	-17.7%
		19 : VILCUN	1637.0	1586.0	1620.0	2.1%	1465.6	1392.0	1391.1	-0.1%	144.1	152.5	132.5	-13.1%
Austral	Aysén	9 : PUERTO AYSEN AD.	2450.6	2549.0	2375.3	-6.8%	1971.0	2079.5	1860.3	-10.5%	511.7	463.6	511.7	10.4%
		10 : TENIENTE VIDAL COYHAIQUE AD.	1028.2	1006.1	1027.5	2.1%	868.5	849.6	830.1	-2.3%	163.7	151.4	164.8	8.9%
		11 : BALMACEDA AD.	567.8	582.5	549.3	-5.7%	474.1	464.3	464.3	0.0%	89.7	85.8	86.8	1.2%

Notas:

(1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.

(2): Colores en verde indican variaciones porcentuales máximas positivas. Color blanco a celeste indican variaciones porcentuales positivas. Colores rojos indican variaciones porcentuales negativas.

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.2-16 Resumen de la variación porcentual de la precipitación asociada al 85% (P85) de probabilidad de excedencia en todas las estaciones seleccionadas por macrozona.

MZ	CUENCA	ESTACIÓN	P85											
			ANUAL				INVIERNO				VERANO			
			TOTAL	P1	P2	VAR. [%]	TOTAL	P1	P2	VAR. [%]	TOTAL	P1	P2	VAR. [%]
Norte	Loa	9 : EL LOA CALAMA AD.	0.0	0.0	0.1	-	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	-
		5 : CALAMA	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	-
		22 : LINZOR	31.2	69.4	31.2	-55.1%	26.0	31.0	26.0	-16.1%	2.1	2.1	1.5	-28.6%
	Copiapó	9 : DESIERTO DE ATACAMA CALDERA AP.	0.0	0.5	0.0	-100.0%	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	-
		4 : LAUTARO EMBALSE	2.0	3.0	2.0	-33.3%	1.0	1.6	1.0	-36.3%	0.0	0.0	0.0	-
		1 : JORQUERA EN LA GUARDIA	12.0	10.7	13.2	23.4%	8.5	8.5	9.9	16.5%	0.0	0.0	0.0	-
	Limarí	22 : PUNITAQUI	50.3	52.0	50.3	-3.3%	49.2	52.0	49.2	-5.3%	0.0	0.0	0.0	-
		18 : PALOMA EMBALSE	37.1	42.5	37.1	-12.7%	29.1	29.1	36.8	26.5%	0.0	0.0	0.0	-
		6 : LAS RAMADAS	117.0	99.5	123.9	24.5%	98.9	94.5	107.6	13.9%	0.0	2.3	0.0	-100.0%
Centro	Aconcagua	14 : LO ROJAS	201.0	229.9	193.5	-15.8%	193.4	209.3	187.5	-10.4%	0.0	1.0	0.0	-100.0%
		6 : SAN FELIPE	85.4	85.3	85.4	0.1%	78.2	73.8	78.2	6.0%	1.2	3.2	1.5	-53.1%
		1 : RIECILLOS	215.2	260.8	215.2	-17.5%	185.9	238.1	185.9	-21.9%	14.6	22.7	12.5	-44.9%
	Maipo	2 : SAN ANTONIO (PTA. PANUL)	158.4	135.7	166.7	22.9%	140.2	120.1	153.6	27.9%	3.0	5.3	4.9	-8.3%
		37 : QUINTA NORMAL SANTIAGO	165.4	172.8	165.1	-4.5%	149.9	140.9	152.2	8.0%	2.9	14.2	2.5	-82.4%
		6 : SAN JOSE DE MAIPO RETEN	243.3	242.8	267.7	10.3%	227.5	227.5	245.5	7.9%	9.0	10.5	9.0	-14.3%
Sur	Bío-Bío	25 : RIO BIOBIO EN DESEMBOCADURA	801.4	807.8	800.2	-0.9%	741.0	757.0	683.7	-9.7%	27.7	26.2	29.0	11.0%
		22 : LAS ACHIRAS	748.6	764.8	772.3	1.0%	638.5	655.8	719.8	9.8%	38.5	40.0	40.5	1.3%
		15 : LAGUNA MALLECO	2360.6	2385.4	2360.6	-1.0%	2016.8	2026.3	1970.8	-2.7%	150.0	150.0	217.0	44.7%
	Imperial	21 : PUERTO SAAVEDRA	948.4	978.0	902.0	-7.8%	823.5	848.0	815.8	-3.8%	66.3	78.6	48.0	-38.9%
		22 : MAQUEHUE TEMUCO AD.	912.7	937.6	876.2	-6.5%	825.7	830.4	736.1	-11.4%	65.7	65.9	68.3	3.6%
		19 : VILCUN	1247.2	1178.0	1312.0	11.4%	1119.5	1041.7	1137.0	9.1%	81.1	101.5	77.0	-24.1%
Austral	Aysén	9 : PUERTO AYSEN AD.	2151.4	2160.8	2151.4	-0.4%	1603.0	1697.2	1183.0	-30.3%	367.5	356.6	376.9	5.7%
		10 : TENIENTE VIDAL COYHAIQUE AD.	832.2	816.6	837.9	2.6%	682.9	659.1	696.6	5.7%	106.4	111.4	111.4	0.0%
		11 : BALMACEDA AD.	439.2	435.8	445.5	2.2%	367.9	367.9	394.0	7.1%	51.5	52.9	51.5	-2.6%

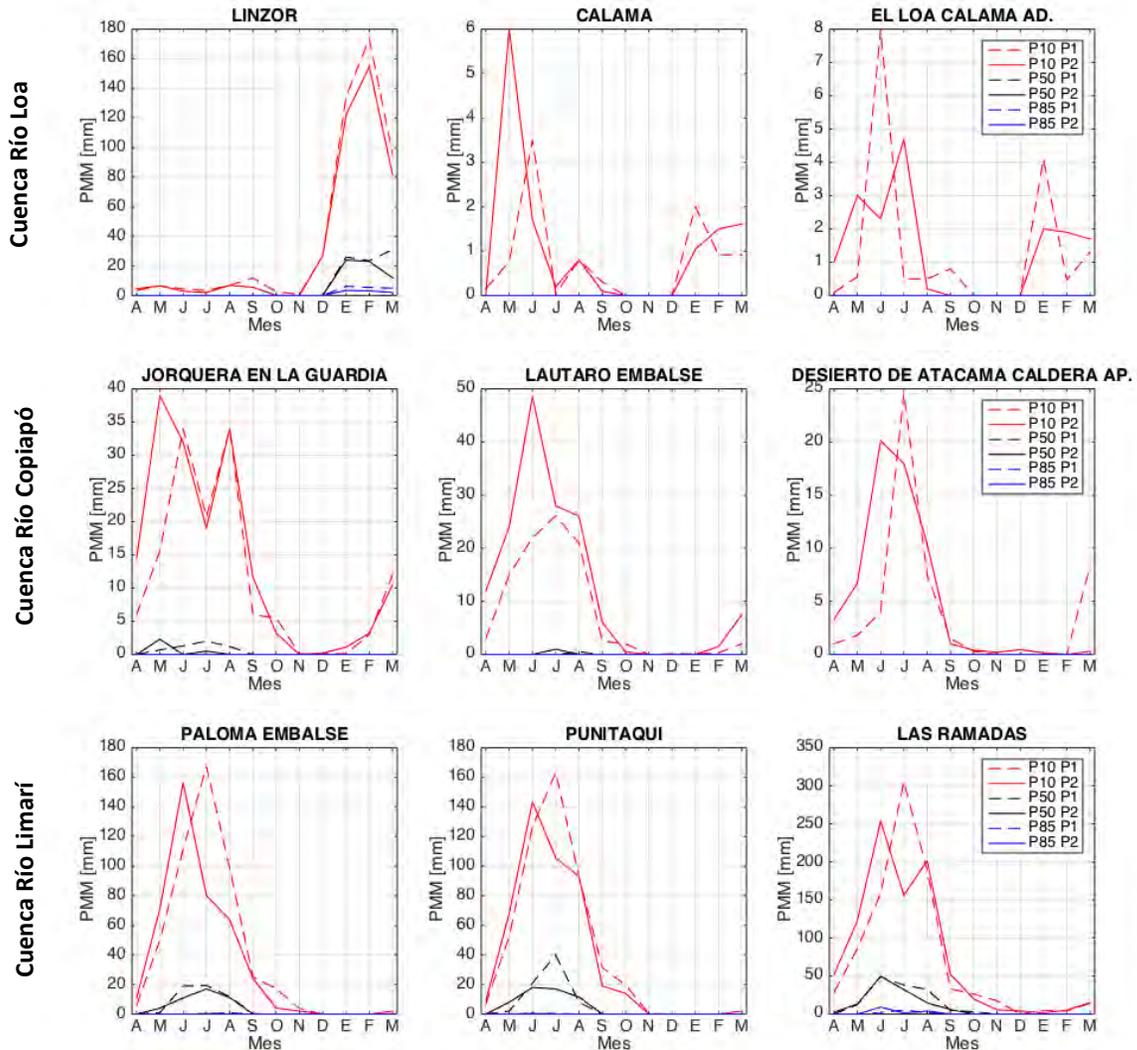
Notas:

(1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.

(2): Colores en verde indican variaciones porcentuales máximas positivas. Color blanco a celeste indican variaciones porcentuales positivas. Colores rojos indican variaciones porcentuales negativas.

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, en las Figuras 6.2-31 a 6.2-34, se presentan los resultados del análisis de probabilidades de excedencia mensual (curvas de variación estacional). Se presentan las CVE de cada uno de los periodos analizados (P1 y P2), agrupando los resultados por macrozona analizada.



Notas:

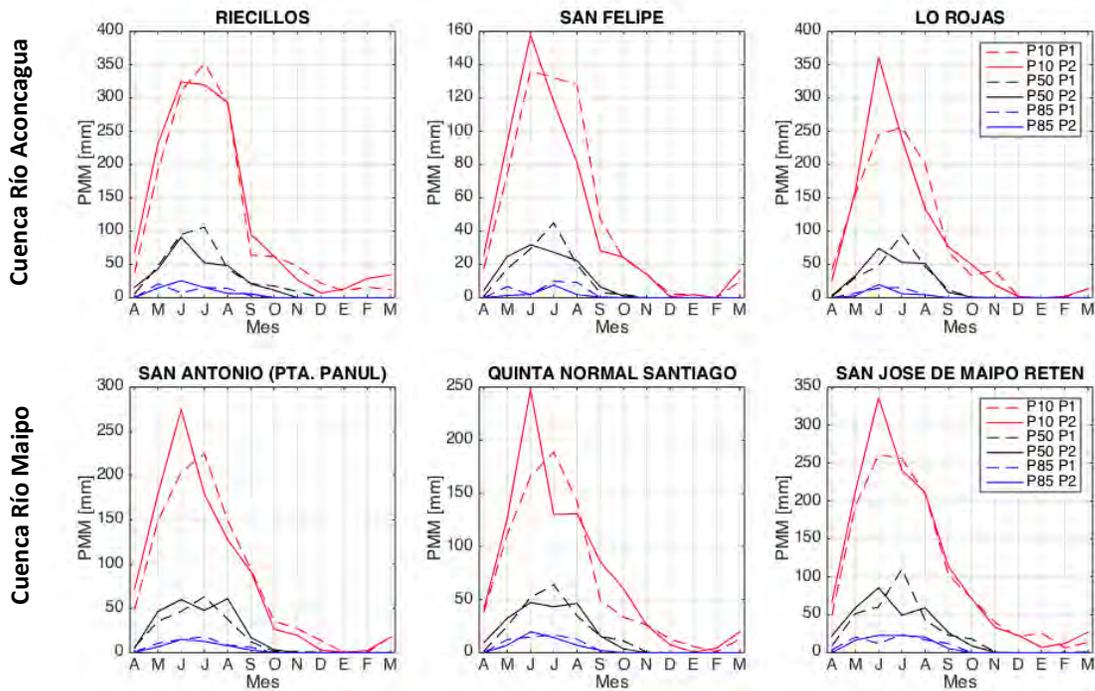
- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
- (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-31 Curvas de variación estacional de precipitación media mensual (PMM) para las estaciones seleccionadas en la Macrozona Norte.

Para la Macrozona Norte se pueden apreciar diferencias en el régimen estacional de precipitaciones. Para la cuenca del río Loa, debido a la baja magnitud de las precipitaciones observadas en las estaciones Calama y El Loa, es difícil interpretar los cambios observados. Para la estación Linzor no se observan cambios significativos en las

CVE. Para la cuenca del río Copiapó se aprecia un leve aumento de las precipitaciones para las estaciones Jorquera en la Guardia y Lautaro Embalse, mientras que para la estación Desierto de Atacama se aprecia un posible descenso en las precipitaciones de invierno y un aumento de las precipitaciones primaverales. Para las estaciones ubicadas dentro de la cuenca del río Limarí se aprecia un leve descenso de las precipitaciones durante el invierno para la probabilidad de excedencia P10, mientras que el resto de los índices se mantiene relativamente estable.



Notas:

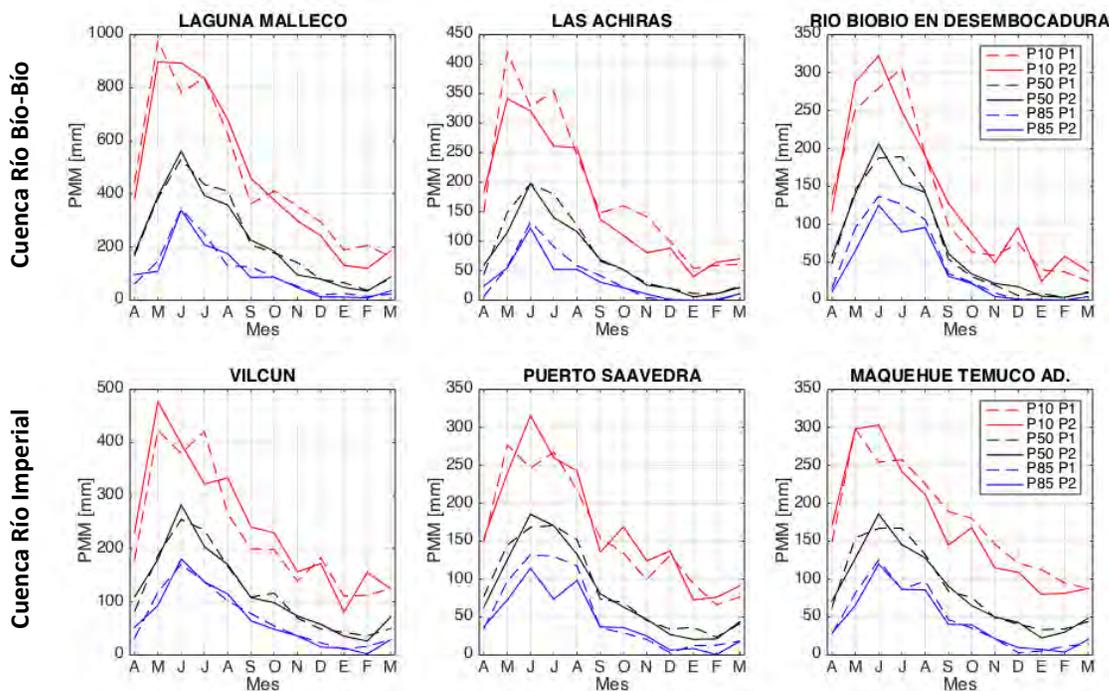
- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
- (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-32 Curvas de variación estacional de precipitación media mensual (PMM) para las estaciones seleccionadas en la Macrozona Centro.

Para las cuencas de la macrozona centro se observa en general un aumento de las precipitaciones asociadas a P10 para todas las estaciones al inicio del invierno (meses de mayo-junio), y un leve descenso de las precipitaciones P50 para el mes de julio. No se observan cambios significativos en las precipitaciones P85. La cuenca del río Maipo es la que presenta un mayor aumento en la magnitud asociada a P10, y se concentran en las estaciones de costa (San Antonio) y Valle (Quinta Normal), aunque también se aprecian cambios en la estación de cordillera. En los tres casos se observa un adelantamiento del mes de máxima lluvia. Esta situación también se replica para las mismas estaciones de la

cuenca del Aconcagua (Lo Rojas y San Felipe), dado que la estación Riecillos no parece presentar un cambio estacional relevante.



Nota:

(1): La fila superior muestra las estaciones dentro de la cuenca del río Bío-Bío, la fila inferior muestra las estaciones dentro de la cuenca del río Imperial.

(2): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.

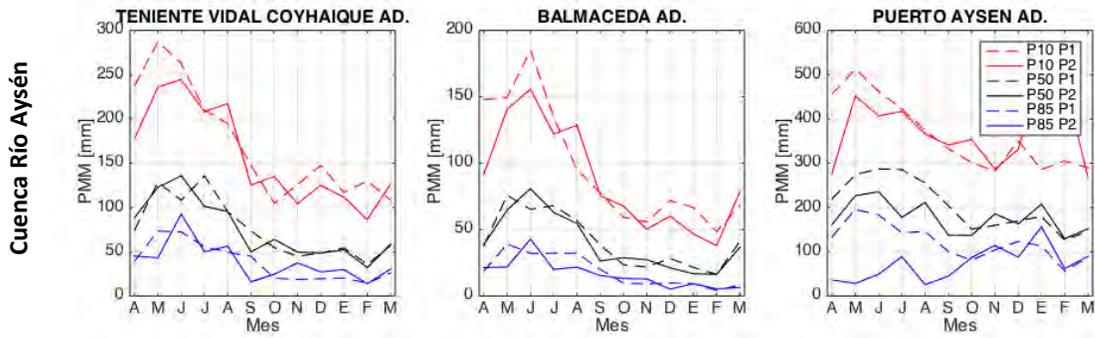
(3): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-33 Curvas de variación estacional de precipitación media mensual (PMM) para las estaciones seleccionadas en la Macrozona sur.

Para la cuenca del río Bío-Bío se observa un leve descenso en las precipitaciones P50 y P85 durante el invierno. Se observan también descensos en las precipitaciones P10 para la estación Las Achiras, mientras que las estaciones Laguna Malleco y Río Bío-Bío en Desembocadura en general se mantienen relativamente estables, excepto por un leve descenso en las precipitaciones P10 para el periodo de primavera-verano (octubre a marzo).

En el caso de la cuenca del río Imperial, la estación Vilcun sólo presenta descensos asociados a P10. Tanto la estación Puerto Saavedra como Manquehue Temuco no presentan cambios estacionales, y los descensos (aunque leves) se pueden concentrar en la probabilidad del 10%.



Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
- (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.

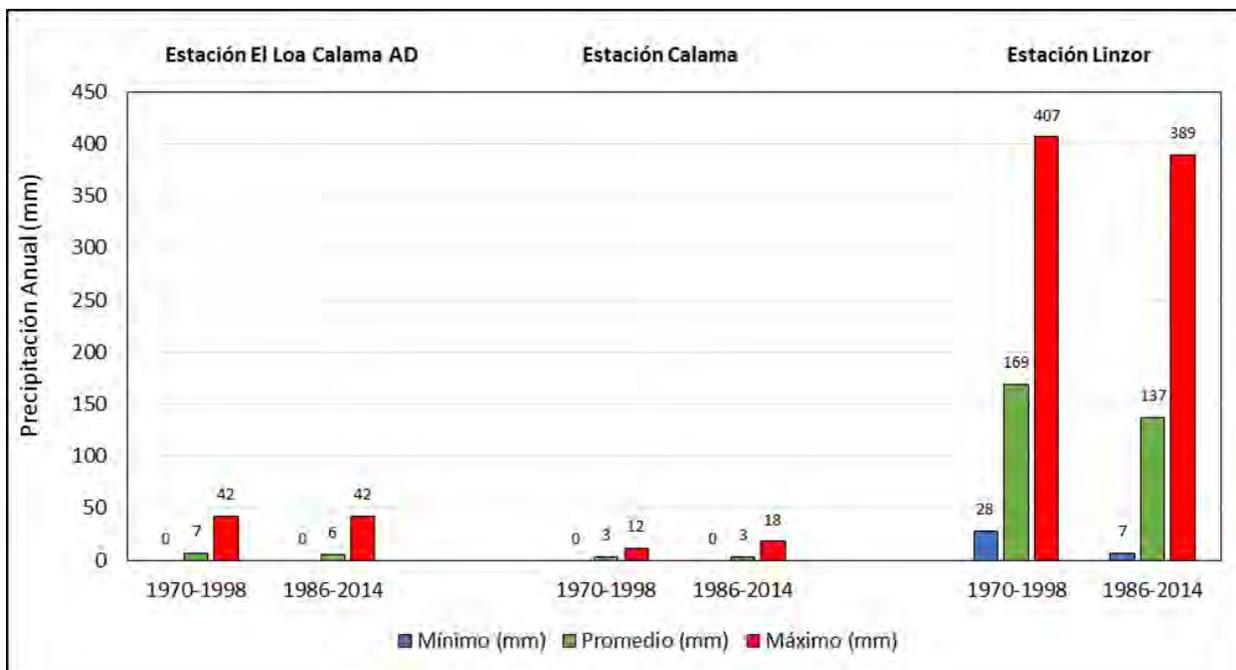
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-34 Curvas de variación estacional de precipitación media mensual (PMM) para las estaciones seleccionadas en la Macrozona Austral.

Para la macrozona austral no se observan cambios significativos en la precipitación, excepto para la estación Puerto Aysén, donde se observan reducciones de la precipitación en todas las probabilidades de excedencia durante el período de invierno.

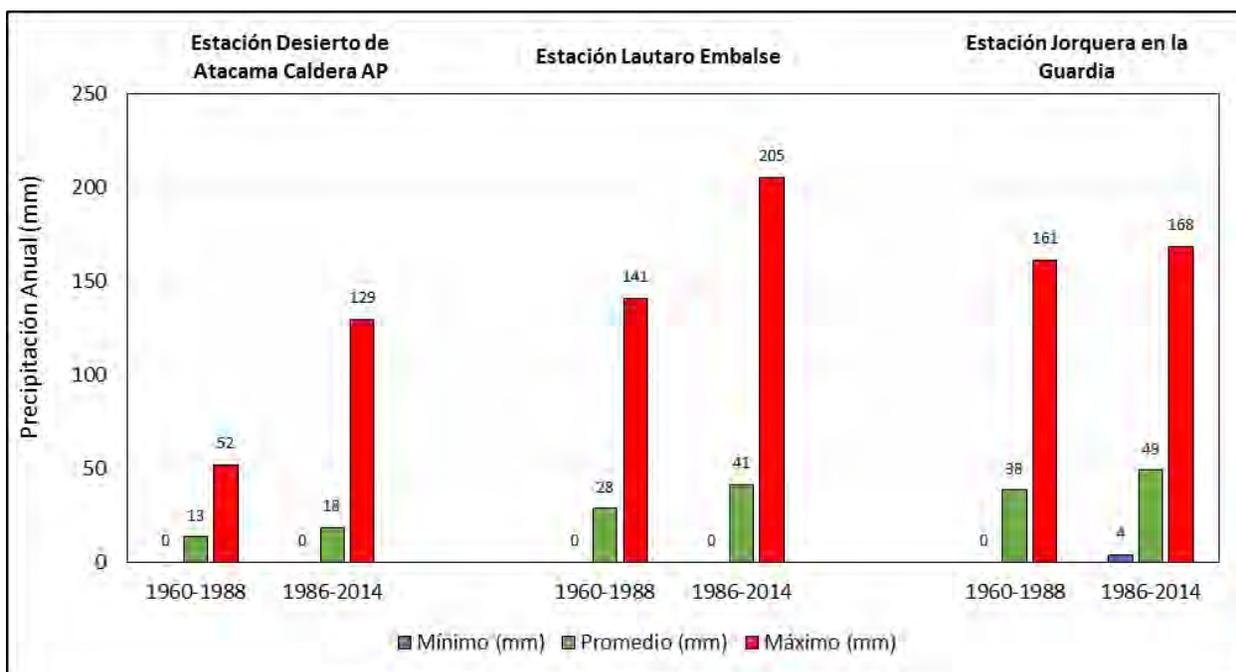
6.2.2.4 Variabilidad en Régimen de Precipitaciones

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. Los resultados se observan en las Figuras 6.2-35 a 6.2-42.



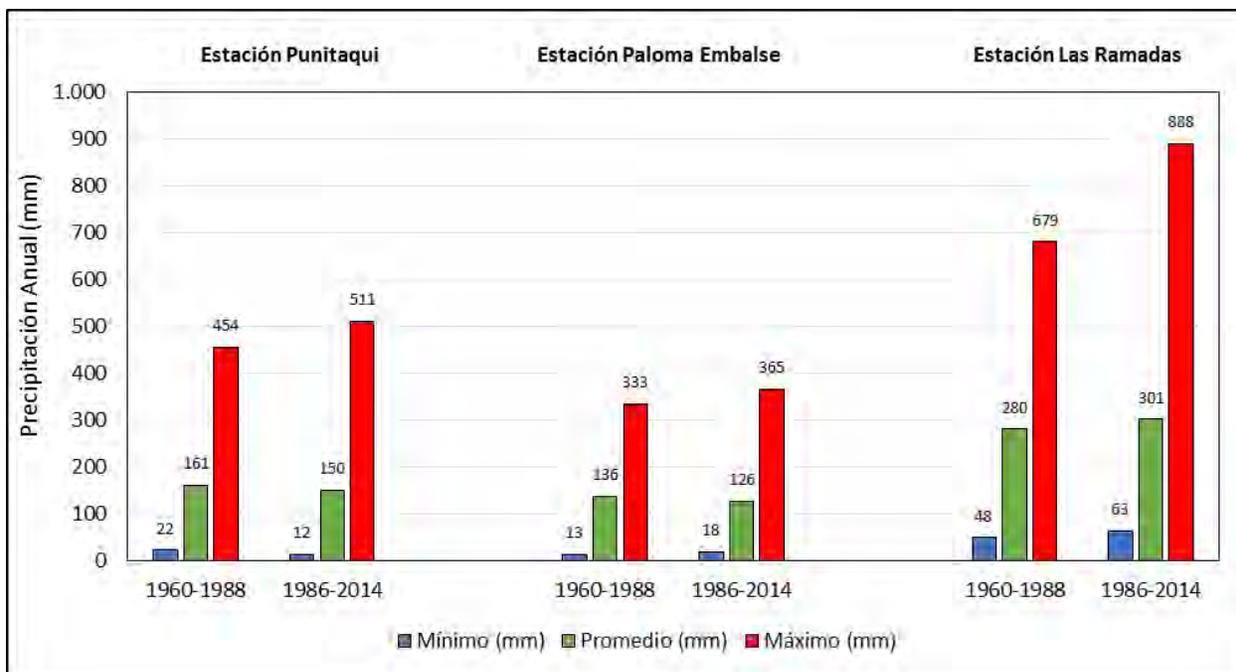
Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-35 Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Loa.



Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.
Fuente: Elaboración Propia.

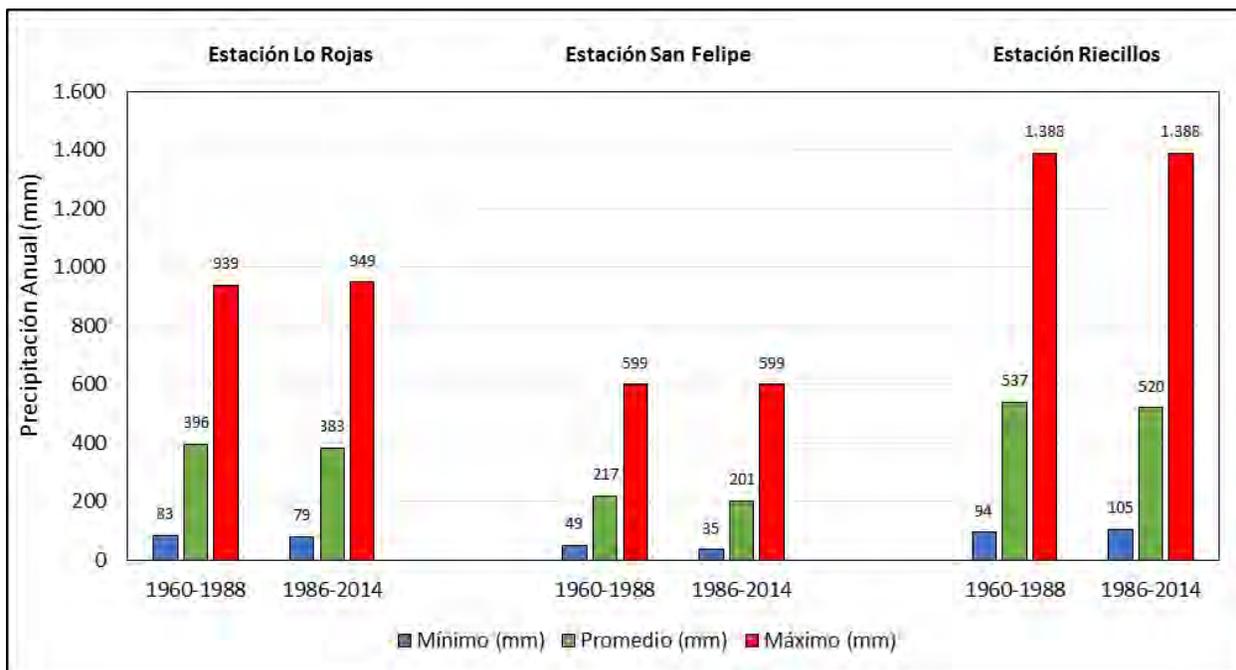
Figura 6.2-36 Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Copiapó.



Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.

Fuente: Elaboración Propia.

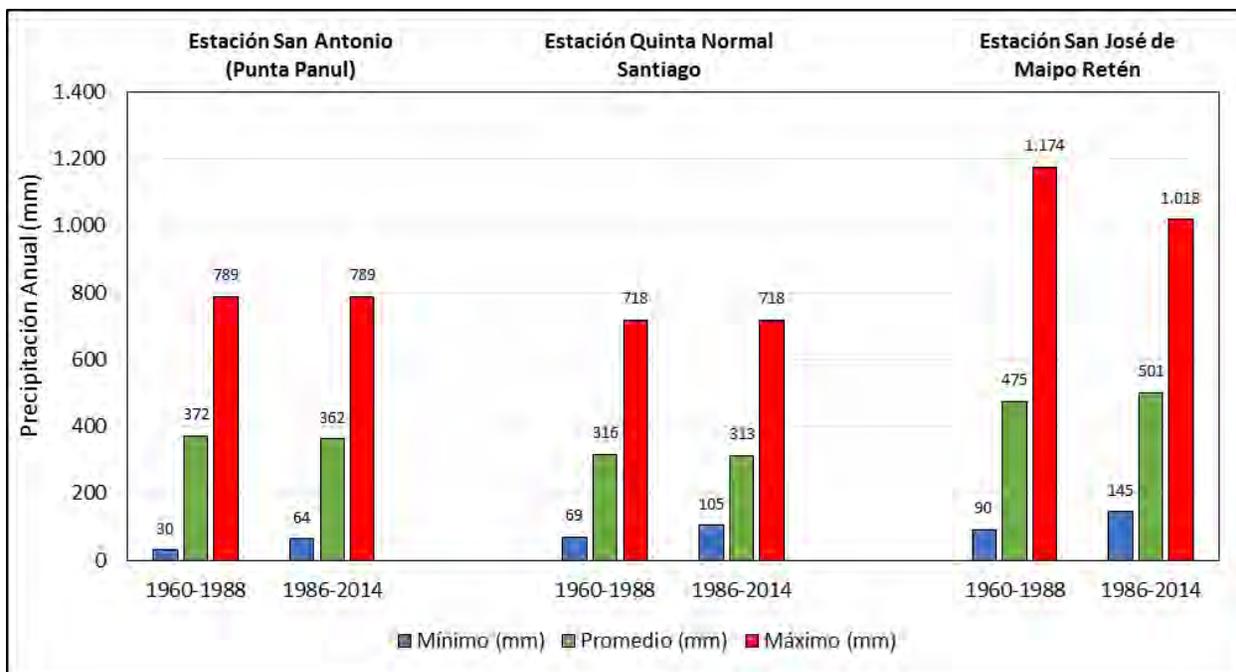
Figura 6.2-37 Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Limarí.



Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.

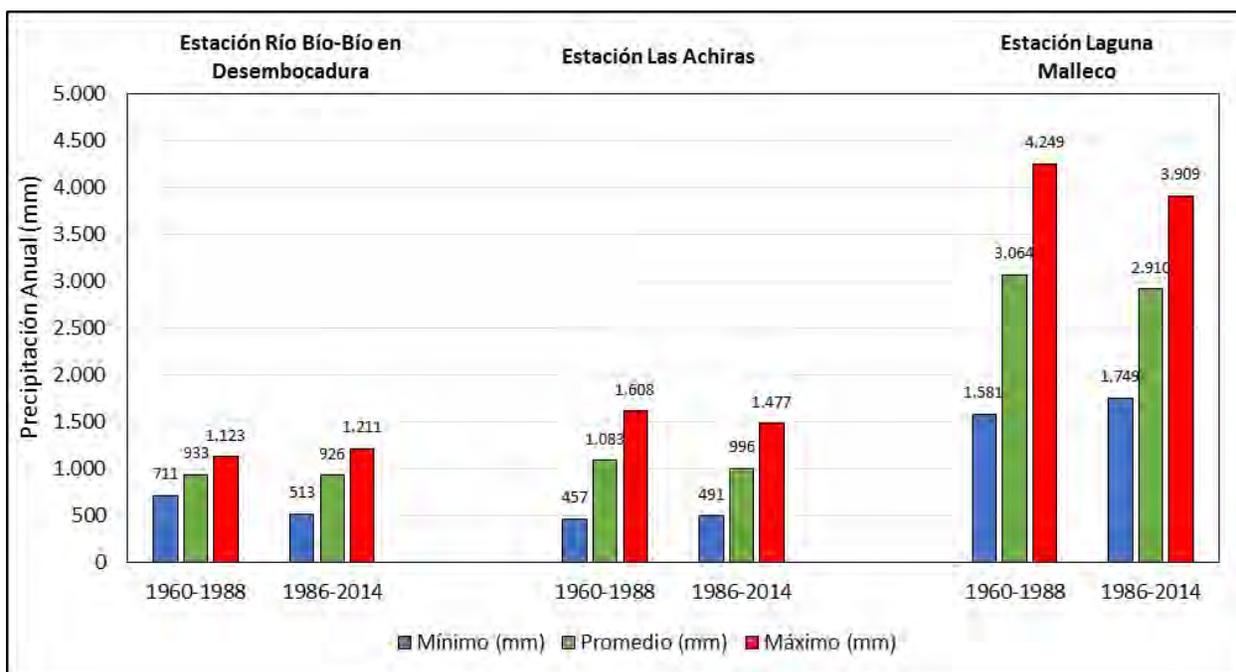
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-38 Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Aconcagua.



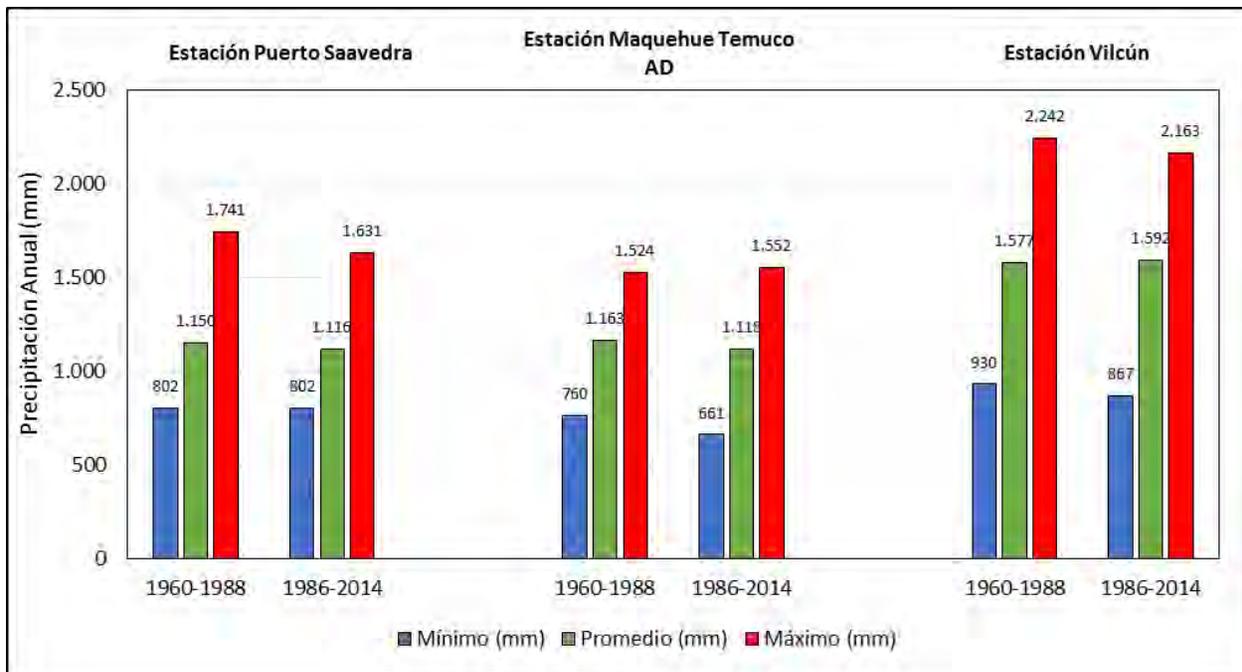
Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-39 Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Maipo.



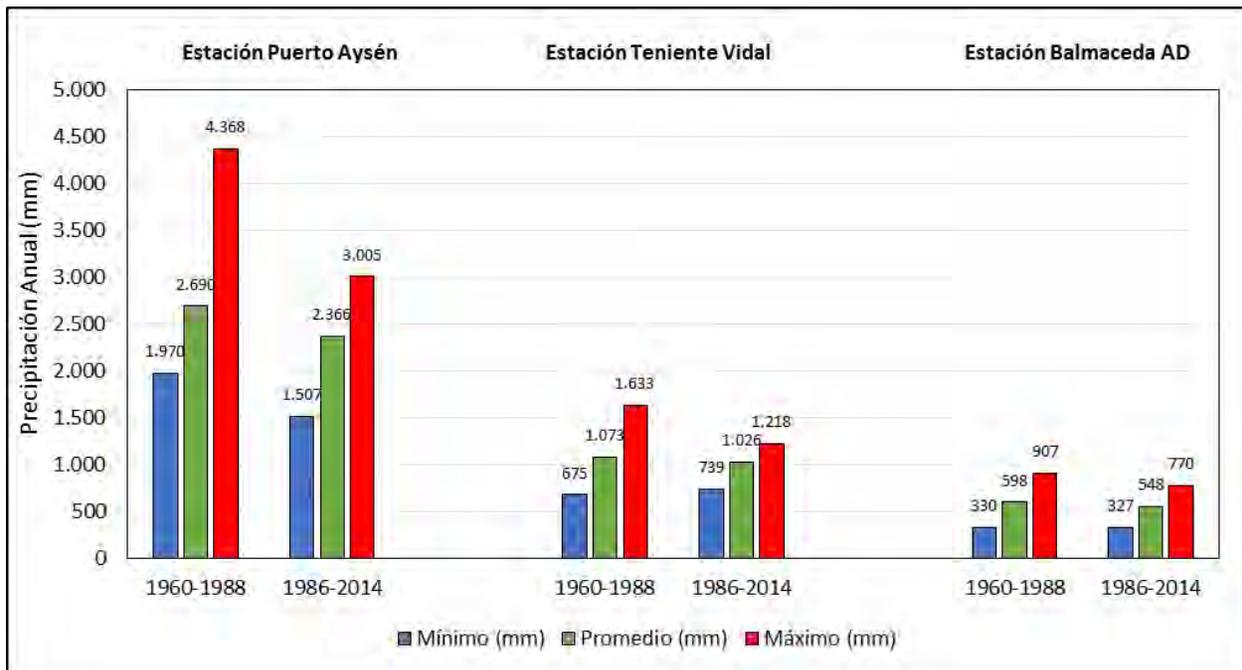
Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-40 Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Bío-Bío.



Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-41 Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Imperial.



Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.2-42 Análisis Estadística Pluviométrica Anual Cuenca Río Aysén.

En general, es posible destacar que todos los resultados presentes son concordantes con los suministrados en el Acápite de variabilidad de precipitaciones, en donde se analizan, para cada una de las estaciones seleccionadas, la variación de los montos de precipitación para las probabilidades de excedencia del 10, 50 y 85%.

La macrozona norte, exceptuando la cuenca del río 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 río Aconcagua disminuye sus valores medios y mínimos en 15 mm, mientras que sus valores máximos se mantienen estables. La significancia de estos resultados ya se encuentra comentada en los resultados de análisis de tendencia y diferencias de media y varianza anteriores.

Por otro lado, la cuenca del río Maipo es 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 río 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 río 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 río Aysén (macrozona austral) también exhibe un comportamiento distinto a lo largo del espacio. La estación 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.

6.3 TEMPERATURA

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

6.3.1 Análisis Espacial y Modelos Topoclimáticos

A continuación, se presentan los resultados de la aplicación de los modelos topoclimáticos para las cuencas que se evaluaron en este estudio. Cada una de las figuras presenta el resultado final de la aplicación del modelo. Los cuadros de resumen presentan los detalles de los modelos ajustados (se presenta el valor R^2 y además el error cuadrático medio) para cada una de las cuencas, además de las observaciones respecto a cada una de las aplicaciones. Se consideraron solamente estaciones dentro de la cuenca para validar los modelos.

Cuadro 6.3-1 Resumen de la aplicación de los modelos topoclimáticos en cada una de las cuencas de estudio para la variable temperatura

Cuenca	Ajuste Anual (R^2)	Ajuste Invierno (R^2)	Ajuste Verano (R^2)	ECM Anual ($^{\circ}C$)	ECM Invierno ($^{\circ}C$)	ECM Verano ($^{\circ}C$)	Observaciones
Loa	0,92	0,94	0,91	0,93	0,75	1,00	Los resultados de la modelación sugieren que las estaciones de temperatura de la cuenca en general muestran una respuesta consistente a cambios en la latitud, longitud y elevación.
Copiapó	-	-	-	-	-	-	No se pudieron calcular los estadísticos de ajuste debido al bajo número de estaciones utilizadas para derivar el modelo topoclimático.

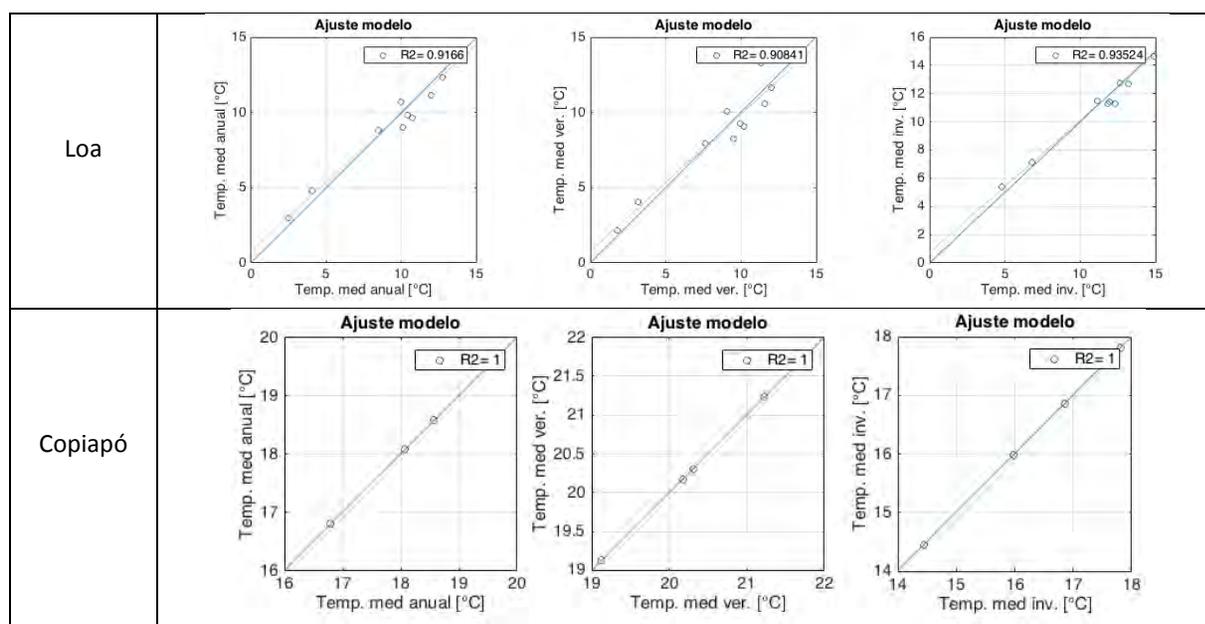
Cuenca	Ajuste Anual (R ²)	Ajuste Invierno (R ²)	Ajuste Verano (R ²)	ECM Anual (°C)	ECM Invierno (°C)	ECM Verano (°C)	Observaciones
Limarí	0,22	0,24	0,29	0,35	0,29	0,43	No se obtuvo un buen ajuste a las variables latitud, longitud y elevación. Este resultado sugiere la posibilidad de que las estaciones utilizadas respondan a microclimas dentro del área. Estos microclimas podrían dar lugar a variabilidad natural de las temperaturas de una mayor magnitud que las inducidas por cambios en la elevación, latitud y longitud. El modelo también podría ser deficiente debido a que el rango de elevaciones de las estaciones utilizadas (320 msnm a 1.380 msnm) no haya sido suficiente para capturar las variaciones climatológicas en temperatura inducidas por la elevación.
Aconcagua	-	-	-	-	-	-	No se pudieron calcular los estadísticos de ajuste debido al bajo número de estaciones utilizadas para derivar el modelo topoclimático
Maipo	0,92	0,90	0,92	0,57	0,65	0,55	Los resultados de la modelación sugieren que las estaciones de temperatura de la cuenca en general muestran una respuesta consistente a cambios en la latitud, longitud y elevación.
Bío-Bío	0,99	0,99	0,95	0,25	0,15	0,49	Los resultados de la modelación sugieren que las estaciones de temperatura de la cuenca en general muestran una respuesta consistente a cambios en la latitud, longitud y elevación.
Imperial	-	-	-	-	-	-	No se pudieron calcular los estadísticos de ajuste debido al bajo número de estaciones utilizadas para derivar el modelo topoclimático.

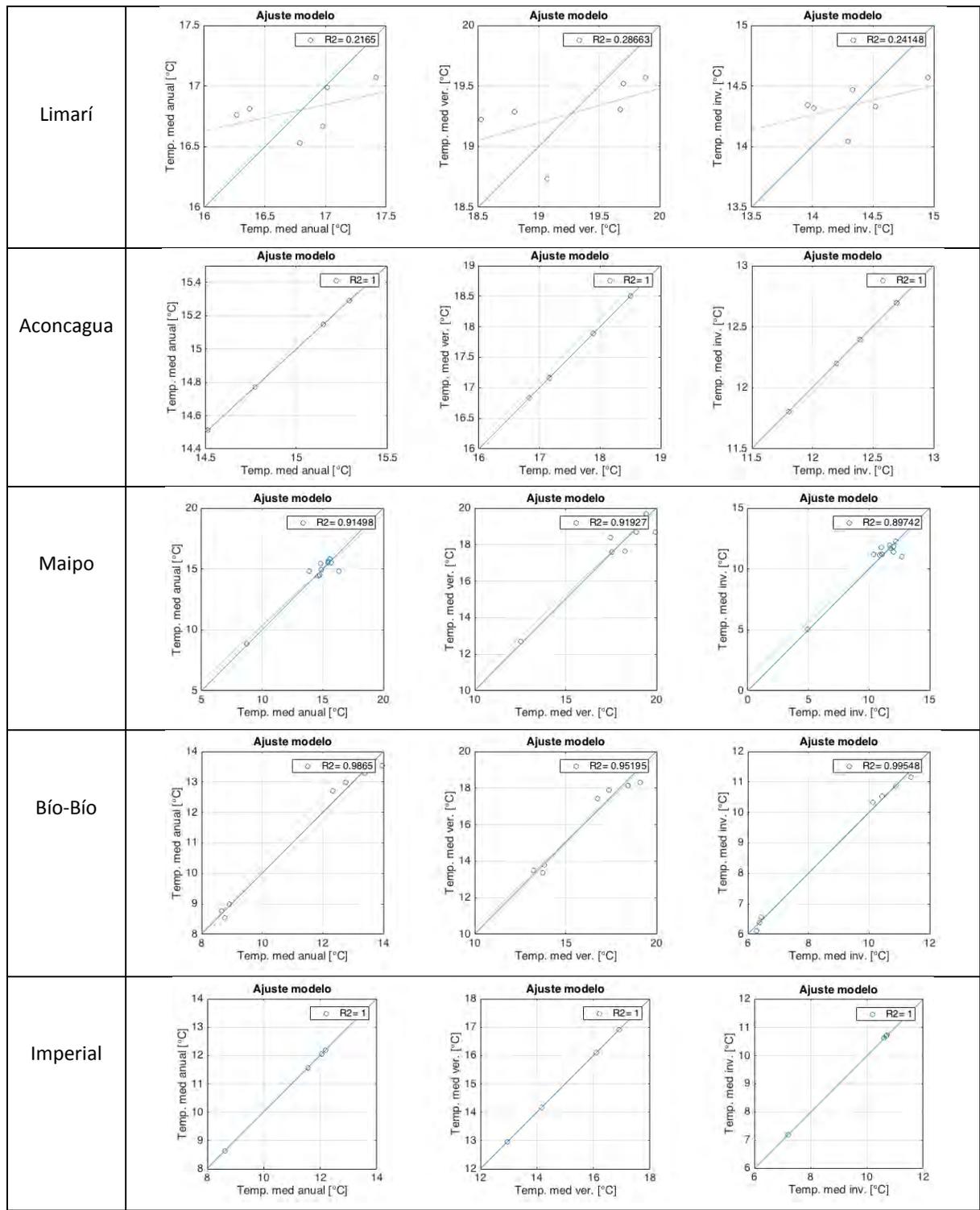
Cuenca	Ajuste Anual (R ²)	Ajuste Invierno (R ²)	Ajuste Verano (R ²)	ECM Anual (°C)	ECM Invierno (°C)	ECM Verano (°C)	Observaciones
Aysén	0,90	0,92	0,77	0,35	0,33	0,47	Los resultados de la modelación sugieren que las estaciones de temperatura de la cuenca en general muestran una respuesta relativamente consistente a cambios en la latitud, longitud y elevación. Los ajustes observados para verano no fueron igual de altos que los observados para el periodo anual y de invierno, sin embargo, el porcentaje de variabilidad explicada por las tres variables analizadas es alto (>77%).

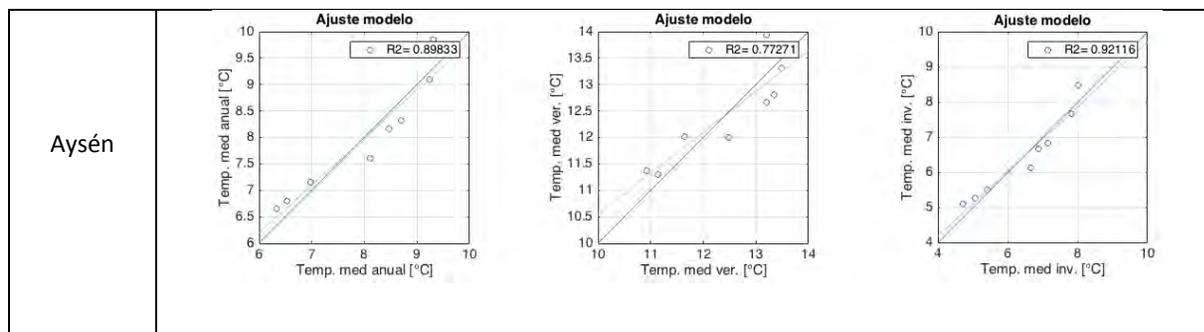
Nota: ECM = Error Cuadrático Medio.

Fuente: Elaboración Propia.

Los gráficos de ajuste de los valores observados para temperaturas medias anuales, de verano y de invierno se muestran a continuación en Figura 6.3-1. En este caso las cuencas de los ríos Copiapó, Aconcagua, e Imperial muestran ajustes (R²) de 1, lo que no debe interpretarse literalmente. Para estas cuencas el bajo número de observaciones o estaciones no es suficiente como para poder ajustar un modelo topoclimático robusto. La situación es equivalente a intentar ajustar una recta a dos observaciones: siempre se obtendrá un ajuste perfecto.







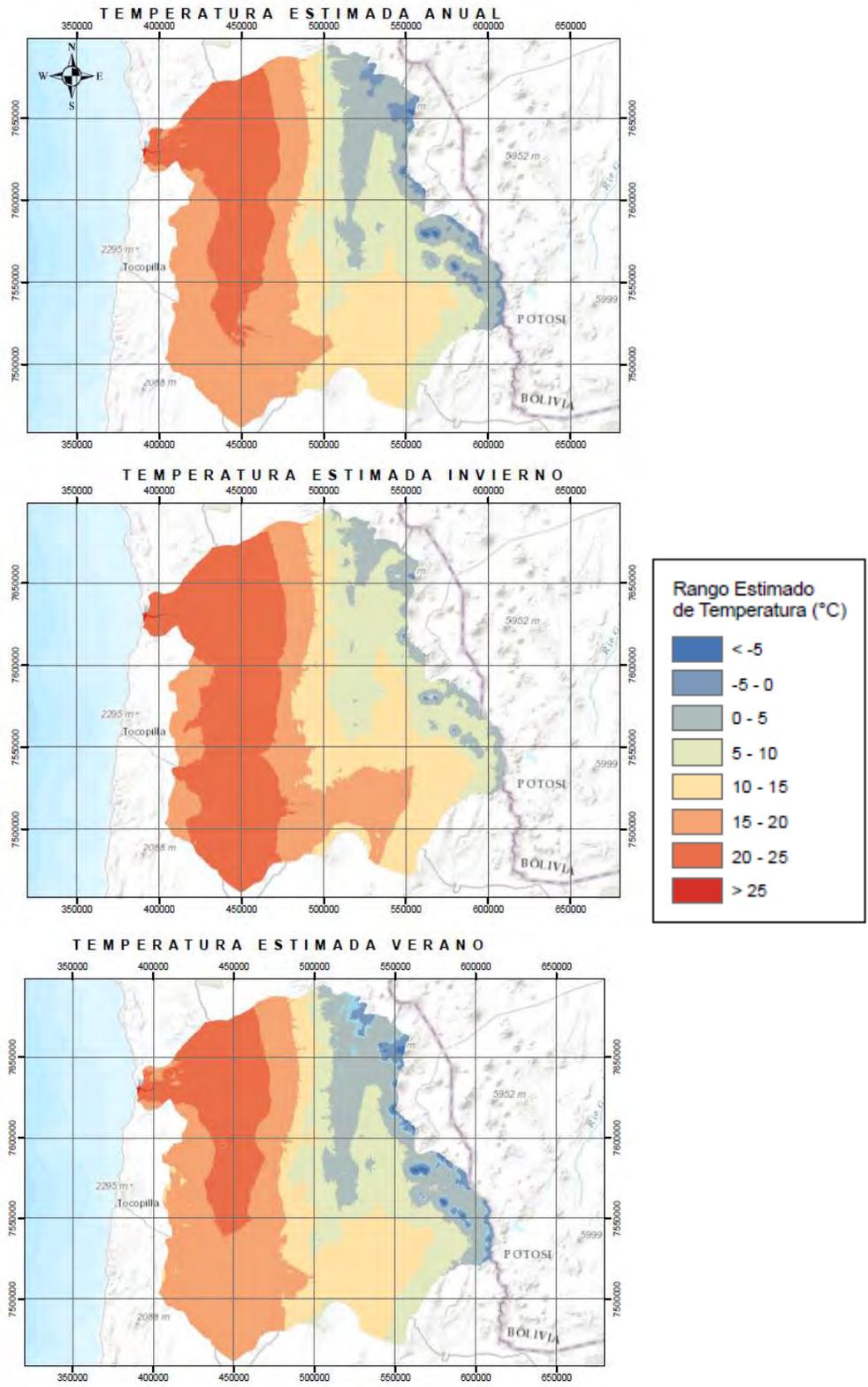
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-1 Ajuste de los modelos topoclimáticos para temperatura.

Se presentan a continuación, por medio de las Figuras 6.3-2 a 6.3-9, los resultados para las estimaciones de temperaturas medias en base a los modelos ajustados para cada cuenca. Tal como se mencionó durante la validación de los modelos topoclimáticos, para las temperaturas fue más difícil obtener modelos adecuados en particular para las cuencas del río Copiapó, Limarí e Imperial.

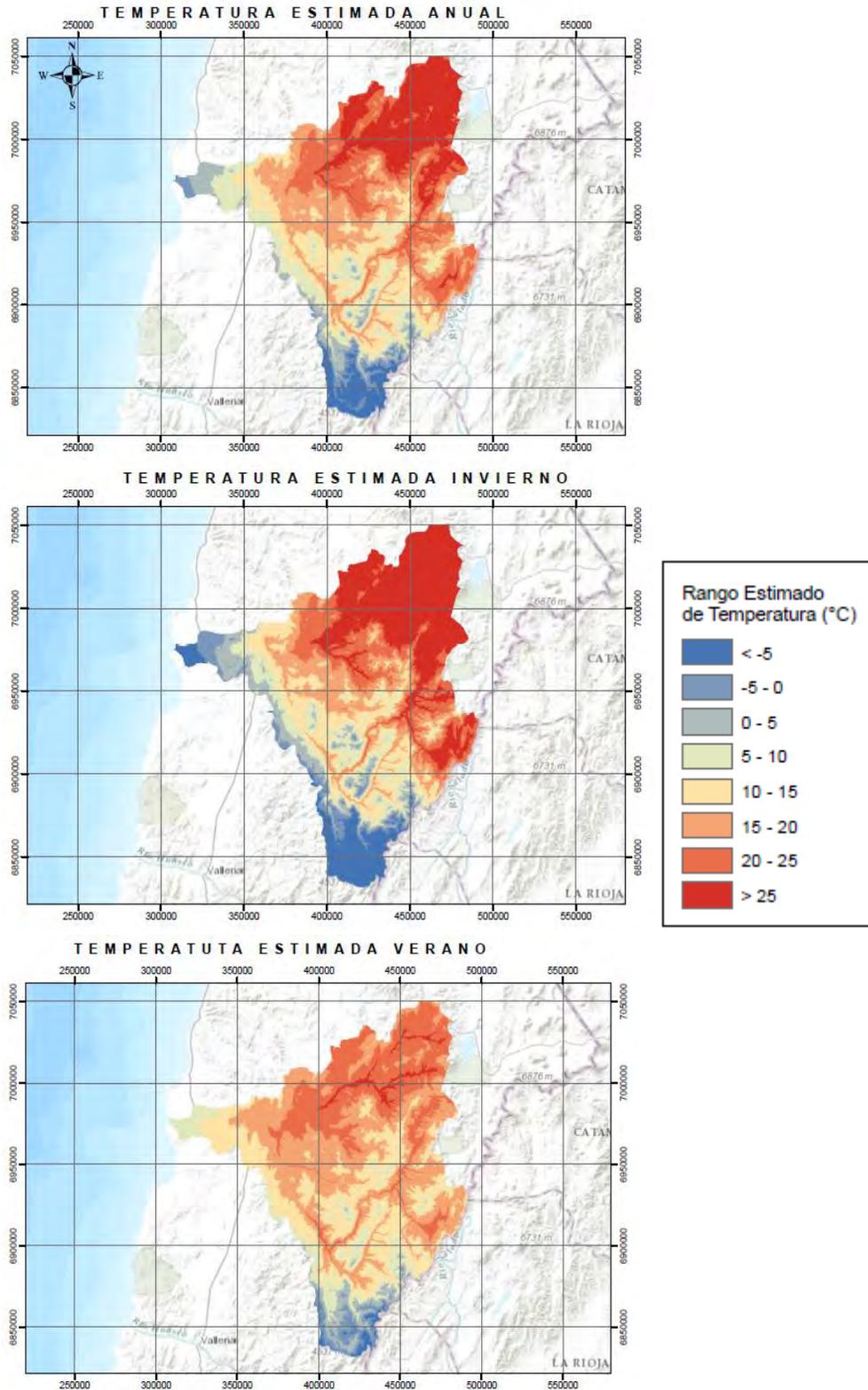
En el caso de la cuenca del río Copiapó, el modelo topoclimático dio como resultado temperaturas más cálidas en elevaciones más altas, lo que contradice totalmente lo que ocurre en realidad (y que se muestra en las demás cuencas). En el caso de la cuenca del río Copiapó, es posible que el resultado se deba a la baja variabilidad de elevaciones entre las estaciones utilizadas para ajustar el modelo de regresión múltiple (estaciones entre 291 y 1.550 msnm) además del hecho de que la segunda estación de mayor elevación presenta las temperaturas más altas observadas. Dado que el modelo topoclimático se limita a ajustar una relación entre los datos observados (sin asumir de antemano relaciones físicas inherentes como por ejemplo un descenso en la temperatura con la altura) los resultados de esta implementación deben ser revisados para detectar posibles inconsistencias con el comportamiento esperado en la variable de interés.

Los resultados de estas cuencas se presentan de todas maneras para ilustrar algunas de las debilidades de los modelos topoclimáticos.



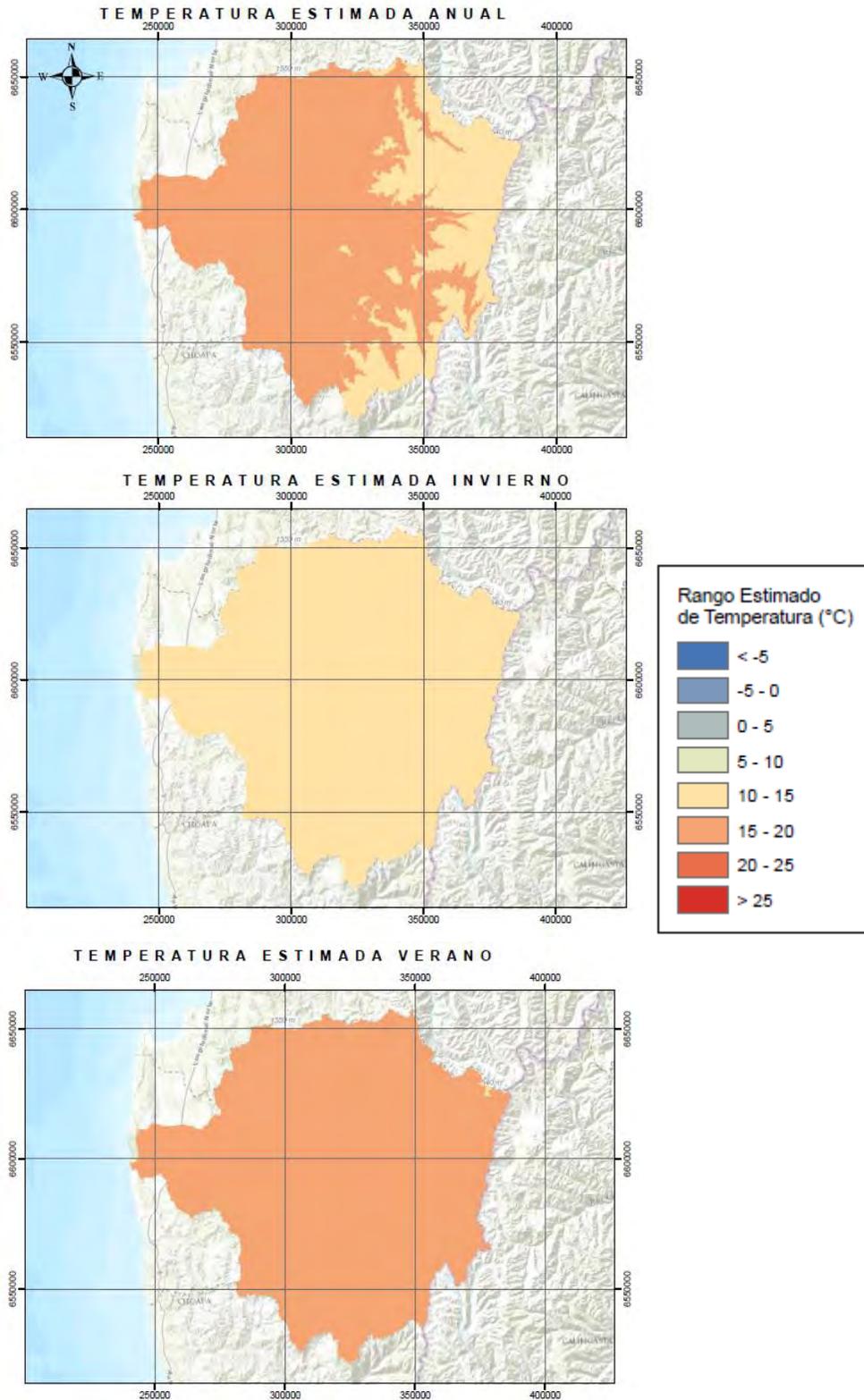
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-2 Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Loa.



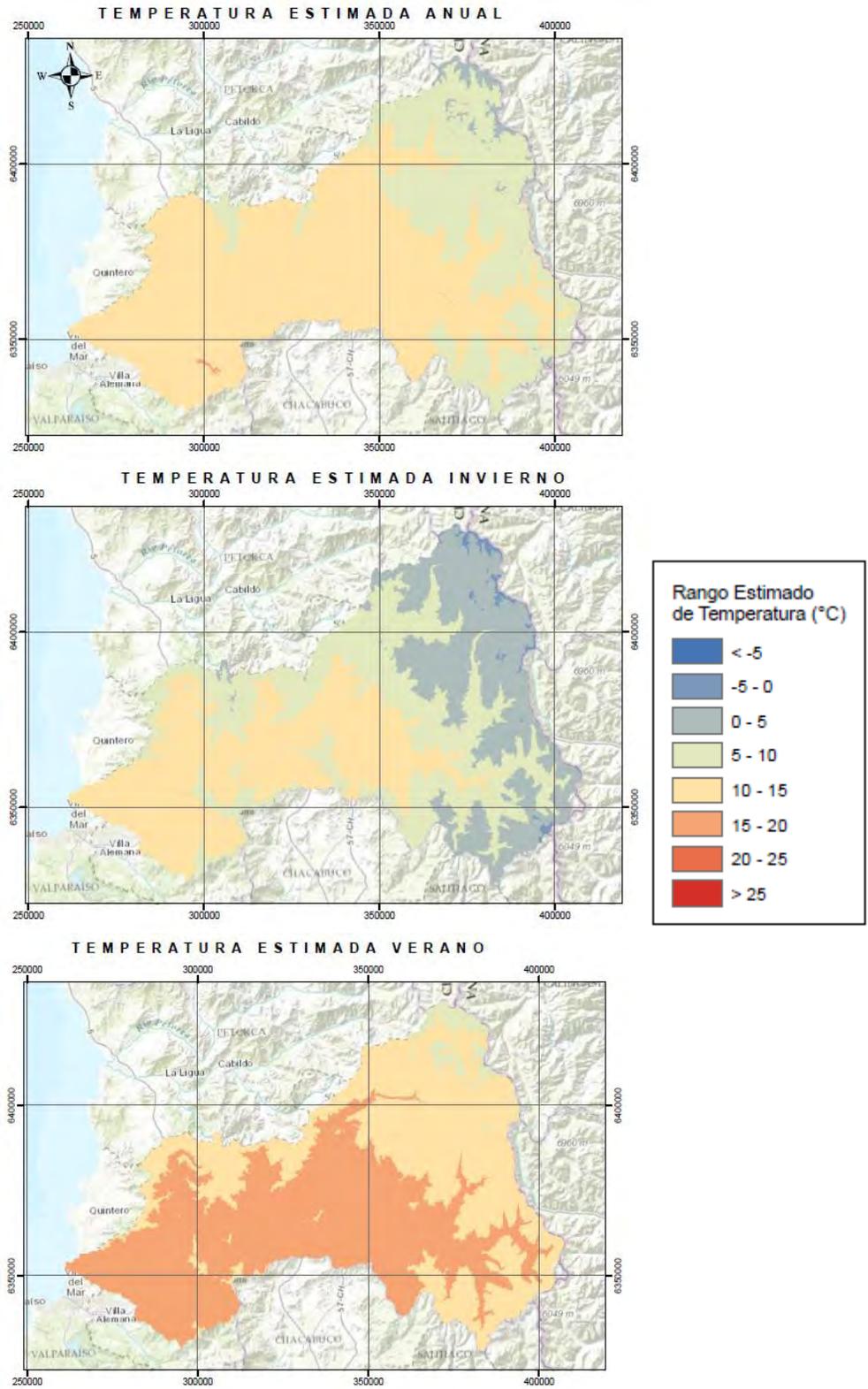
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-3 Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Copiapó



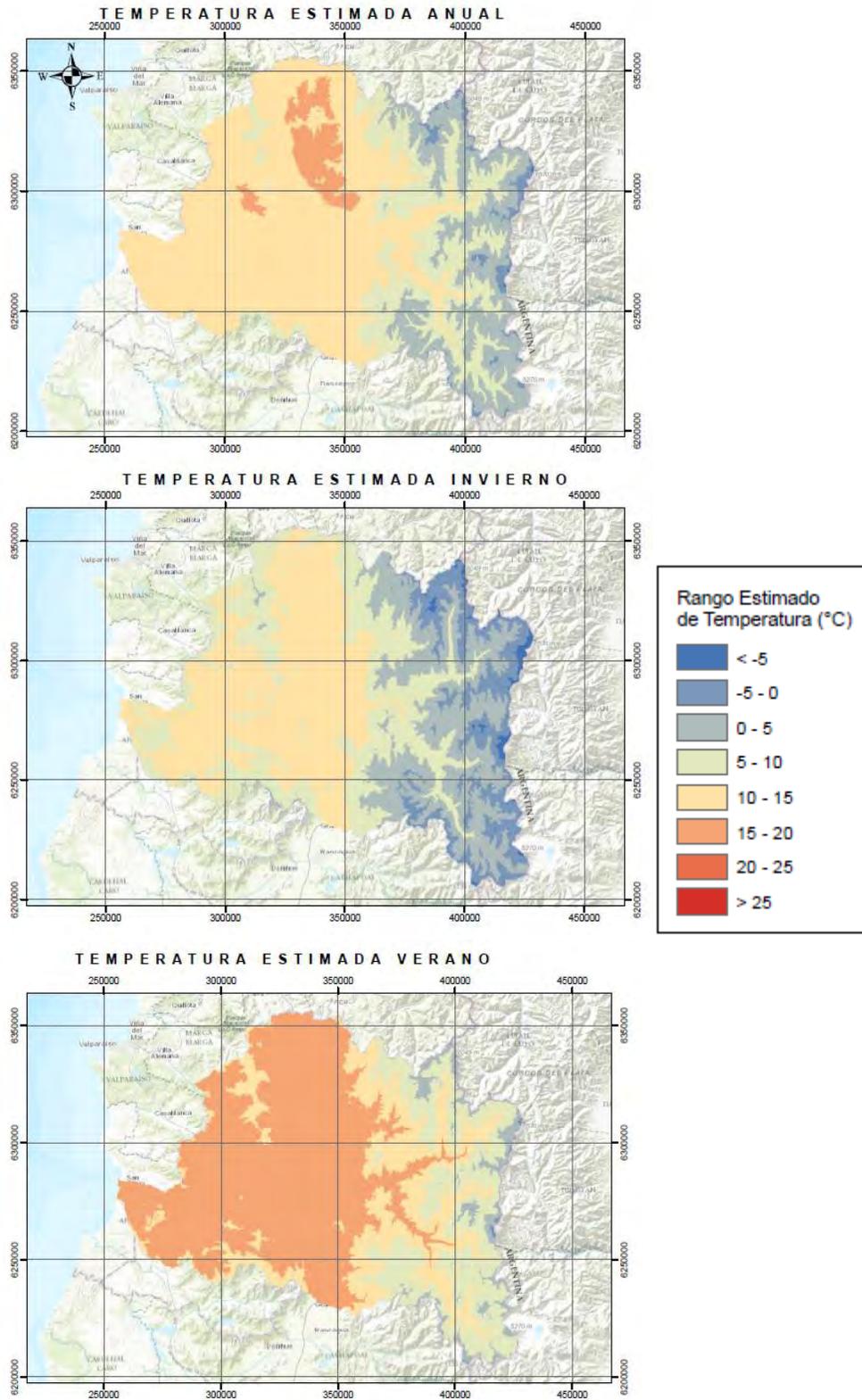
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-4 Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Limarí



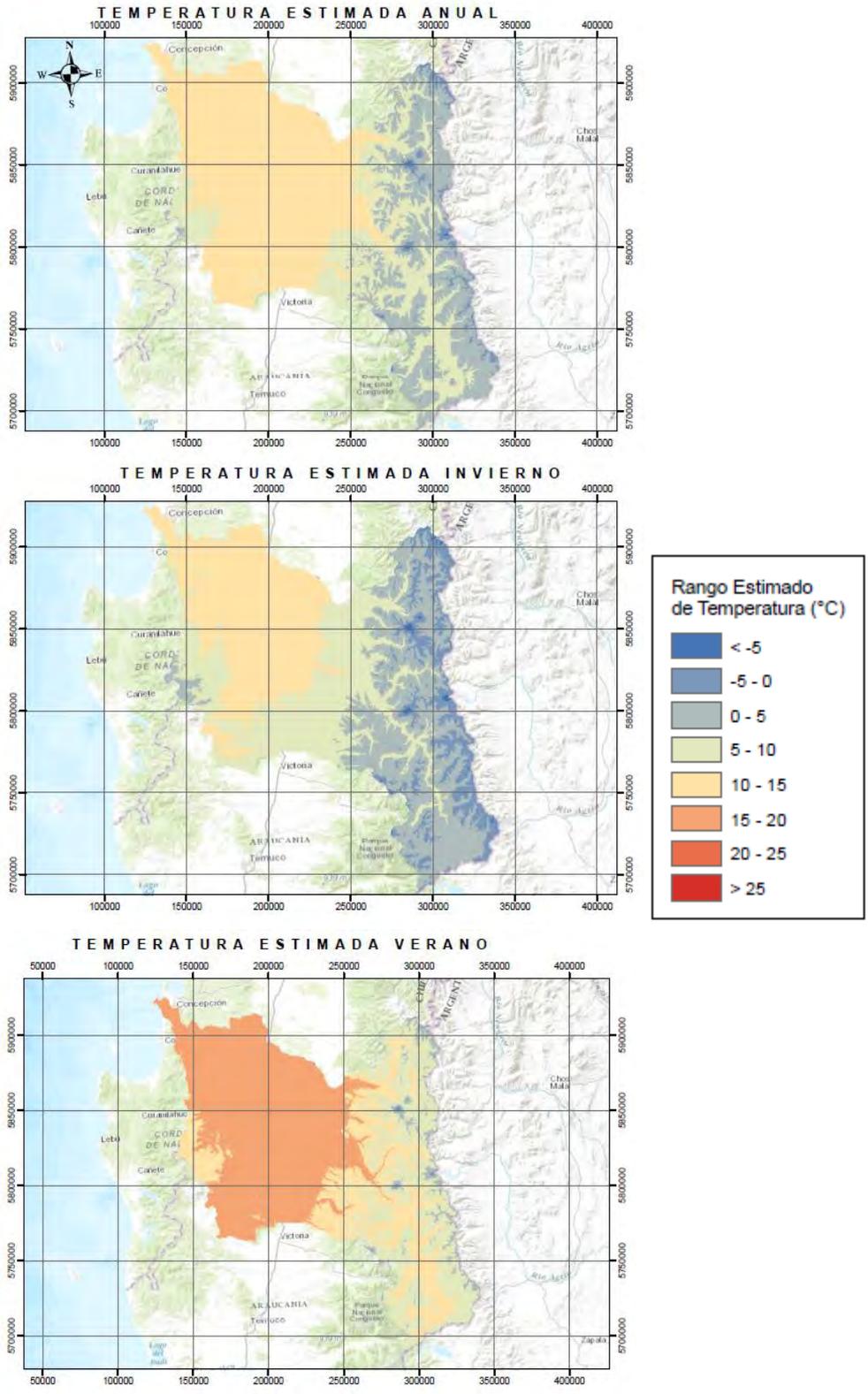
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-5 Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Aconcagua



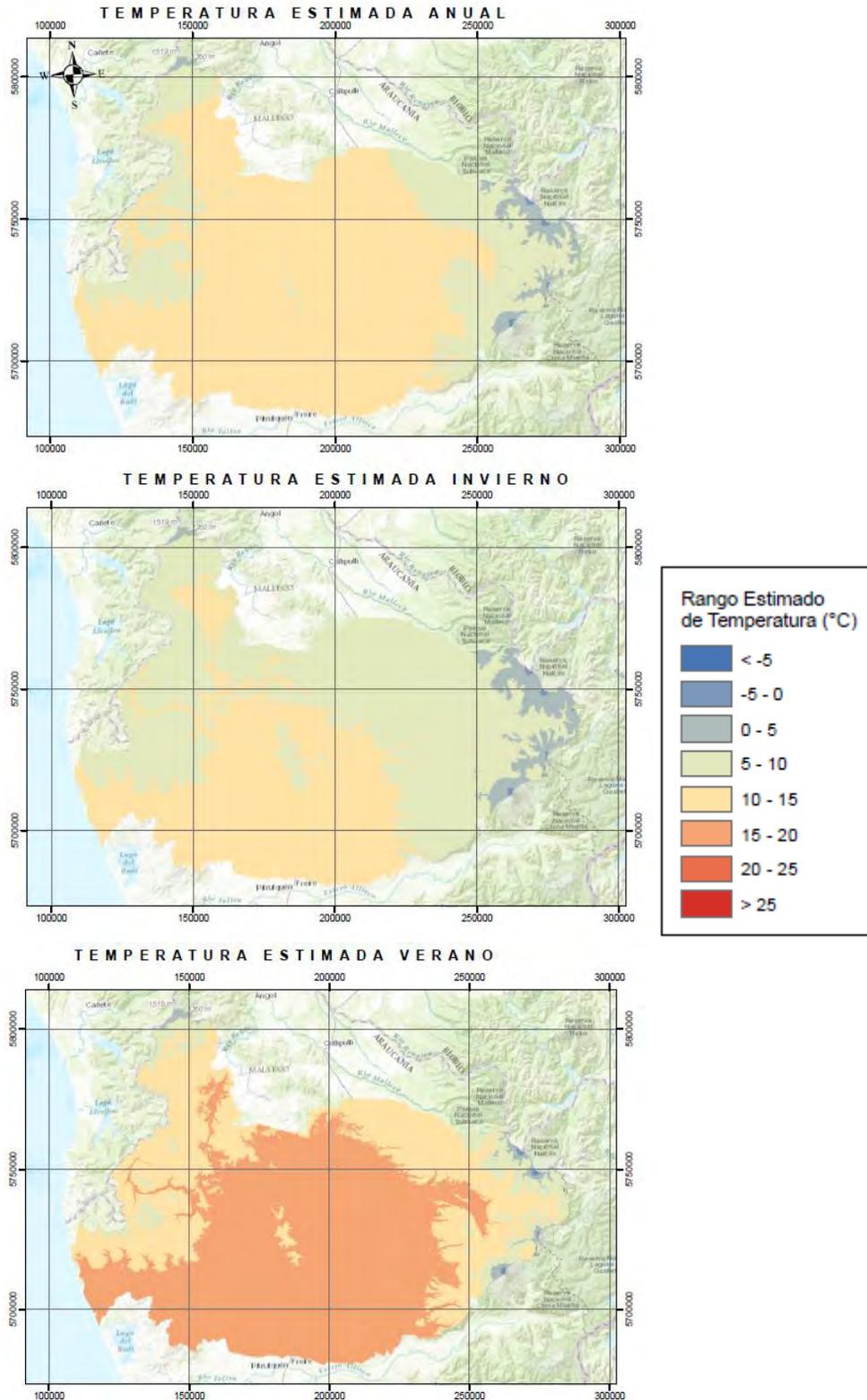
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-6 Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Maipo



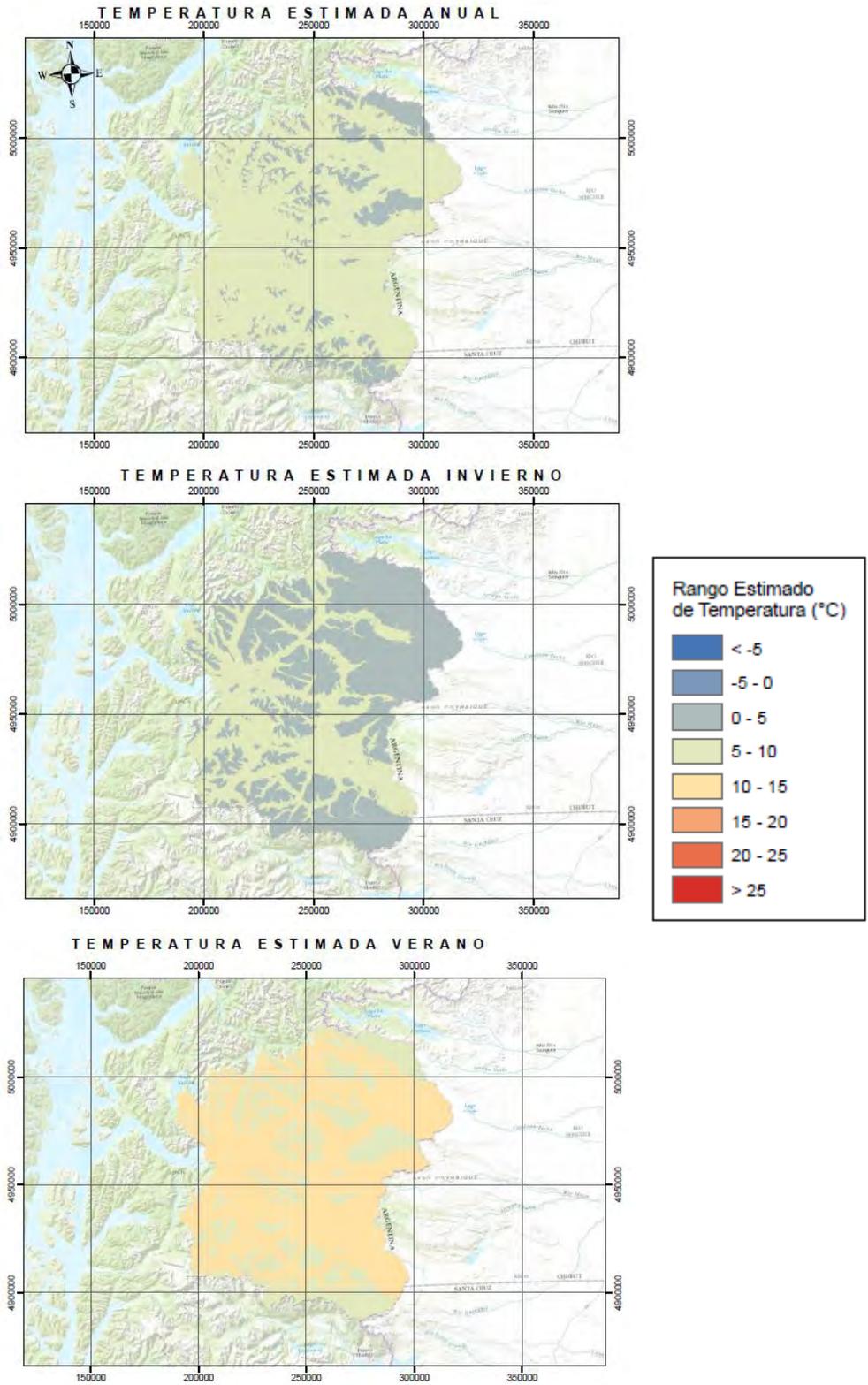
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-7 Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Bío-Bío



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-8 Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Imperial



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-9 Temperaturas medias estimadas del modelo topoclimático para cuenca del Río Aysén

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.

6.3.2 Análisis Temporal de la Temperatura

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

6.3.2.1 Análisis Espectral de la Temperatura

En los Cuadros 6.2-2 a 6.2-9 se presentaron los periodos detectados para cada una de las cuencas analizadas para las distintas agregaciones temporales evaluadas, tanto para las variables precipitación como temperatura.

Macrozona Norte

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.

Es importante destacar que el método MEM ha detectado frecuencias adicionales en la mayoría de las agregaciones temporales. En el caso de la temperatura se presenta un ciclo de 11 años para la estación Parshall N2, el cual se diferencia en el rango indicado por el método del MTM, ratificando la importancia de validar los valores obtenidos por ambos métodos.

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).

Para la agregación anual de temperatura, ambas estaciones confirman ciclos estables de 3 y 5 años, pero informan de un ciclo de 10 años.

Para la agregación de invierno, los ciclos asociados a la estación Copiapó DMC presentan rangos entre 3 a 8 años, mayores al rango exhibido por la estación Lautaro que no superan los 5 años.

En el caso de la agregación de verano, las estaciones presentan un ciclo estable de 4 años, pero el método MEM detecta un ciclo de 20 años para la estación Lautaro, ciclo que cae en el mismo problema que el detectado para la precipitación.

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.

Macrozona Centro

En la cuenca del río Aconcagua, para la agregación anual de temperatura, la estación Vilcuya (cordillera) presenta el mismo ciclo bianual de la estación 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 la estación 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 la estación 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 la estación Pudahuel exhibe un ciclo de 7 años.

Macrozona Sur

Para la agregación anual de temperatura, las estaciones Quilaco (depresión intermedia) y Lonquimay (cordillera) 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.

Macrozona Austral

Para la agregación anual de temperatura en la zona alta, se detectaron ciclos de 4 años, aunque MEM reconoce también un ciclo mayor de casi 17 años, el cual debe tomarse con cautela debido a la real representatividad que podría tener este en la serie. Tanto la estación Tte. Vidal como la estación Puerto Aysén presentan ciclos de 5 y 4 años respectivamente, sin embargo, MEM atribuye un ciclo adicional 6 años para la primera y de 20 años para la zona baja. Este último es muy difícil de validar.

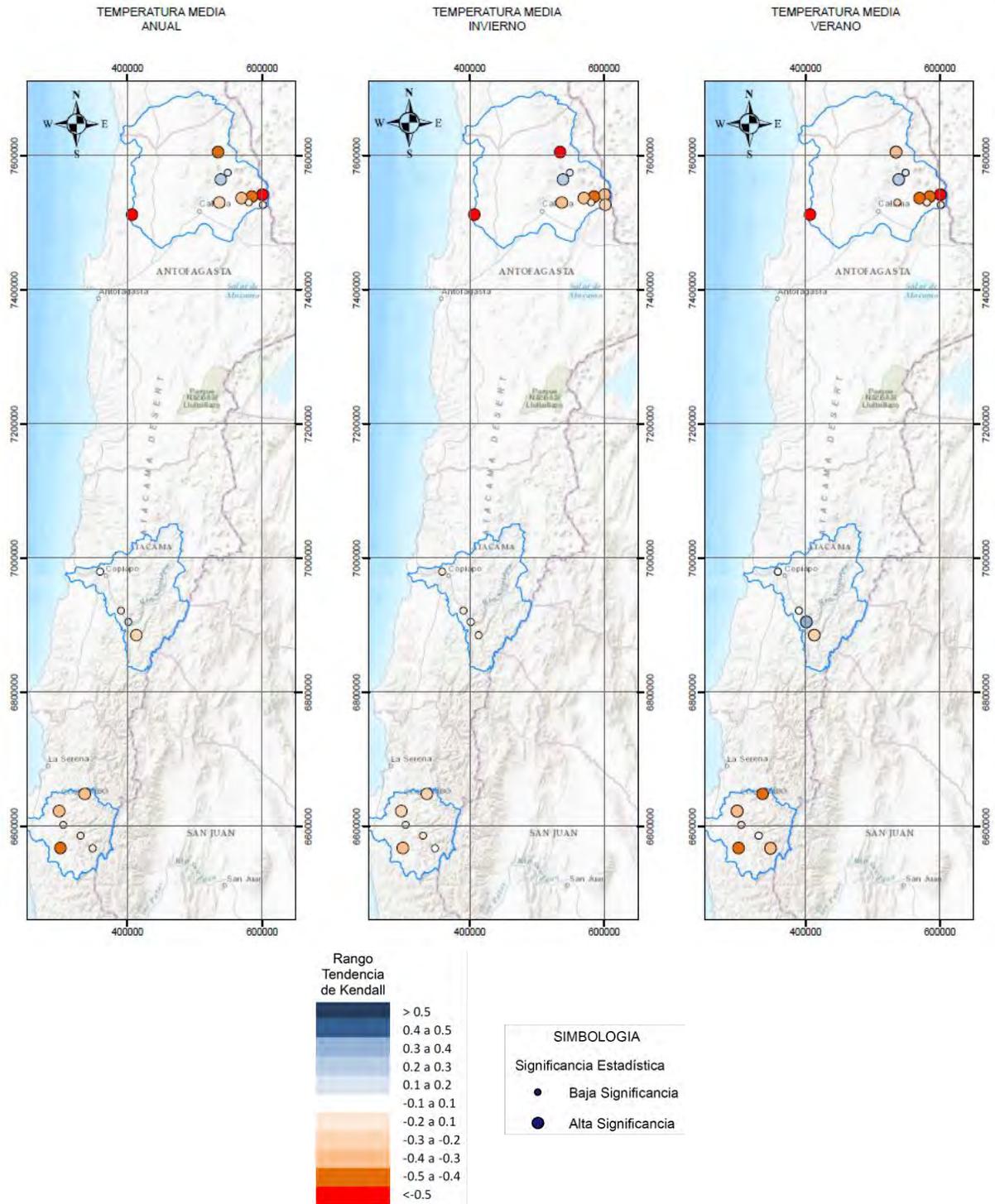
La agregación de invierno, la temperatura es donde se tienen mayores diferencias respecto de los métodos. Mientras MTM informa de ciclos de 10 años para la zona baja (corroborado por MEM), para la zona media y alta MTM sólo informa de un ciclo 4 y 2 años respectivamente, pero MEM detecta un ciclo de 10 y otro de 14 años. Este último se encuentra en el límite de la frecuencia detectable propia del método y debe ser tomado con cautela. La Etapa II del estudio, la cual provee de la relación entre las variables y los índices climáticos externos como ENSO 3,4 (El Niño Oscilación del Sur), PDO (Oscilación Decadal del Pacífico) y AAO (Oscilación Antártica) permitirá validar estas conexiones y discernir sobre los ciclos representativos finales.

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 detectados con MTM, sumado a ciclos de 6 y 14 años sumados con MEM, los cuáles requieren de mayor análisis con índices o forzantes externas.

El Anexo F presenta los resultados gráficos asociados a la aplicación de la metodología de este capítulo.

6.3.2.2 Análisis de Cambios en Series de Tiempo de la Temperatura

A continuación, en las Figuras 6.3-10 a 6.3-13, se presentan los resultados del test de Mann-Kendall para las temperaturas medias anuales, de verano e invierno. En cada una de estas láminas los círculos de diámetro pequeño representan diferencias estadísticamente no significativas, mientras que los círculos de diámetro mediano representan los resultados estadísticamente significativos. El nivel de significancia utilizado corresponde a un p-valor de 0,05 (95%).



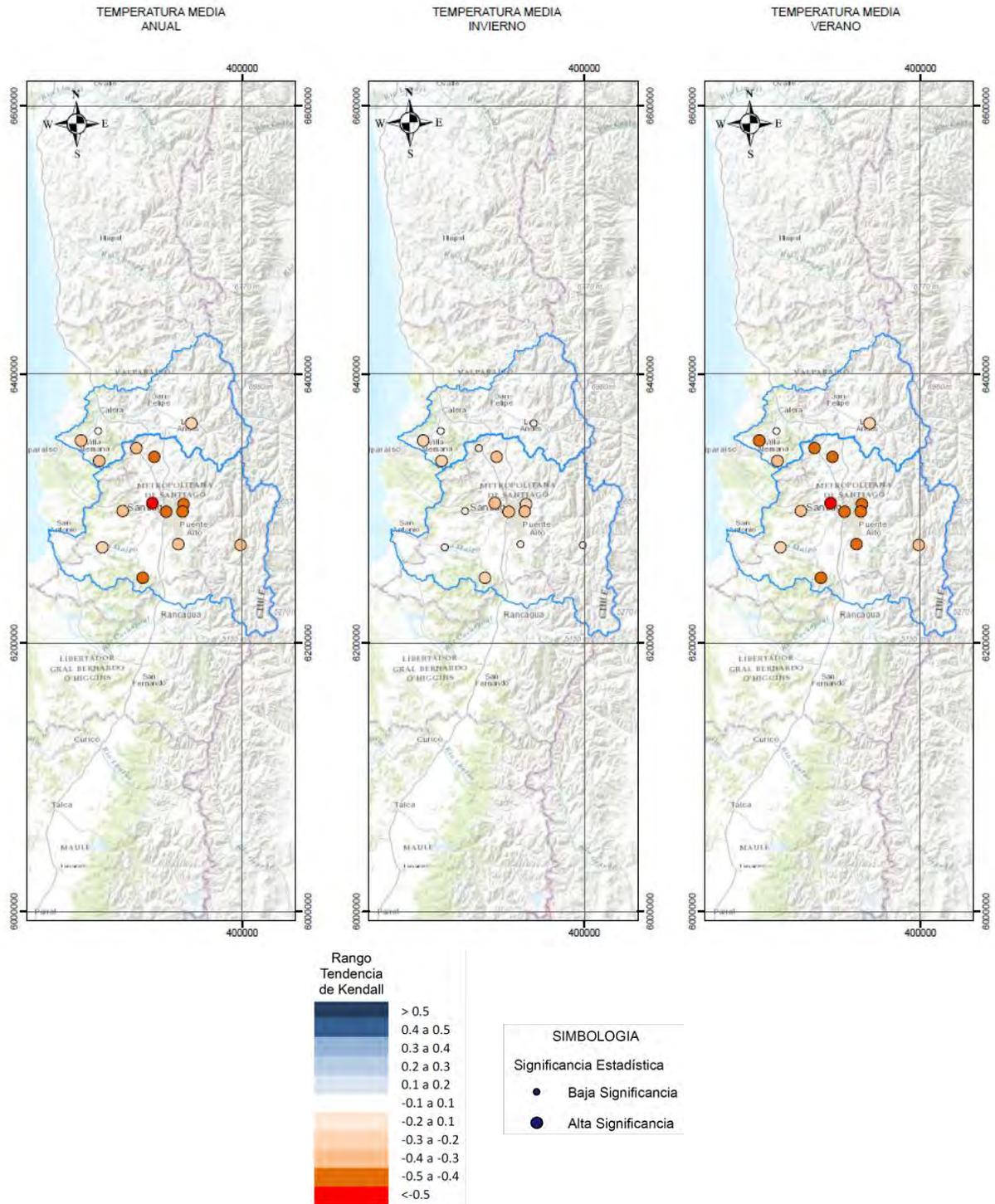
Notas:

(1): Un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica: valores consecutivos son siempre mayores/menores que el valor anterior. Un valor de 0 denota una tendencia “plana”, con igual cantidad de registros que se incrementan y decrecen respecto al valor anterior.

(2): Análisis aplicado sobre el registro total, correspondiente al periodo 1960 – 2014.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-10 Resultado de test de Mann-Kendall para temperatura, macrozona Norte.



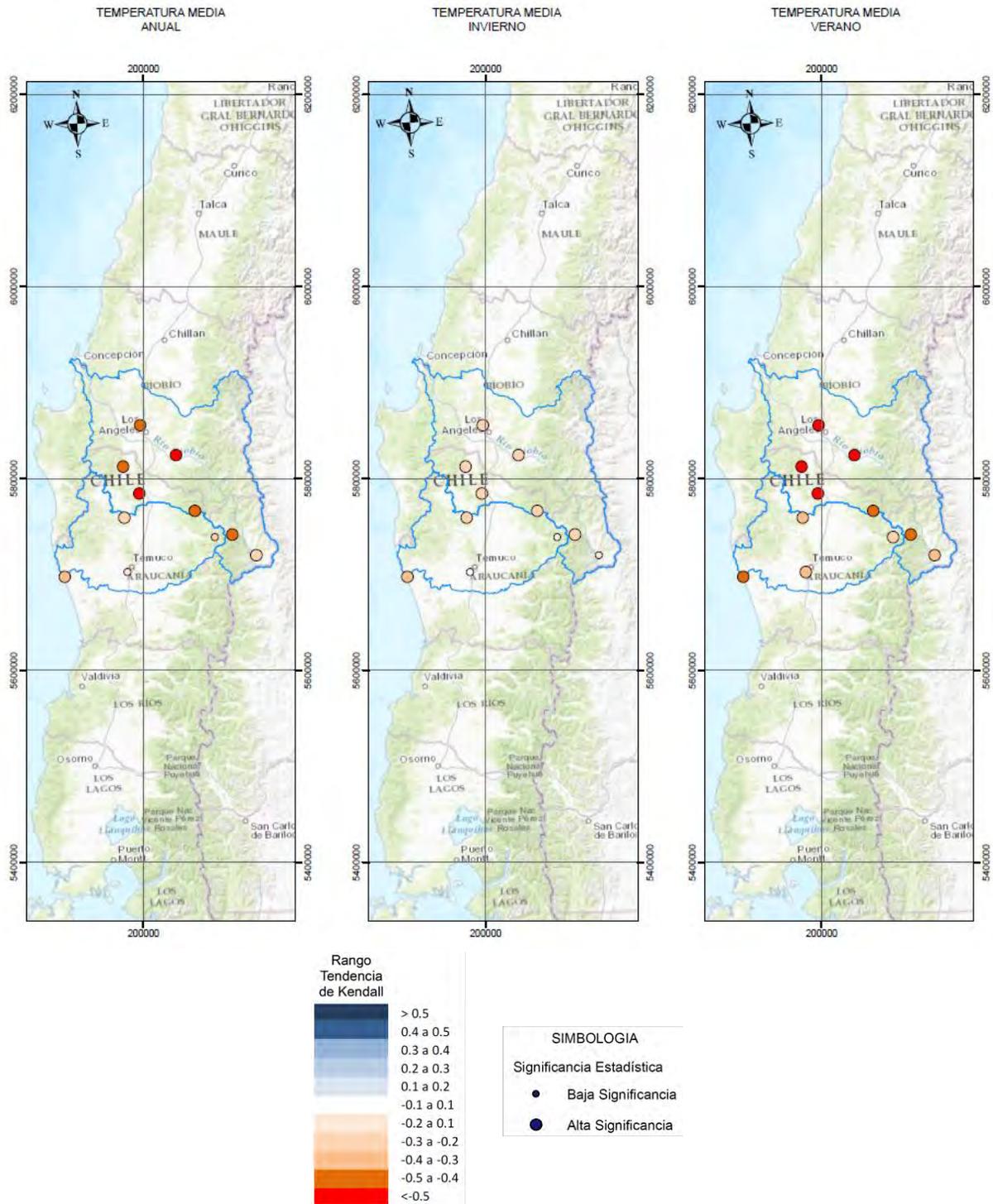
Notas:

(1): Un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica: valores consecutivos son siempre mayores/menores que el valor anterior. Un valor de 0 denota una tendencia "plana", con igual cantidad de registros que se incrementan y decrecen respecto al valor anterior.

(2): Análisis aplicado sobre el registro total, correspondiente al periodo 1960 – 2014.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-11 Resultado de test de Mann-Kendall para temperatura, macrozona Centro.



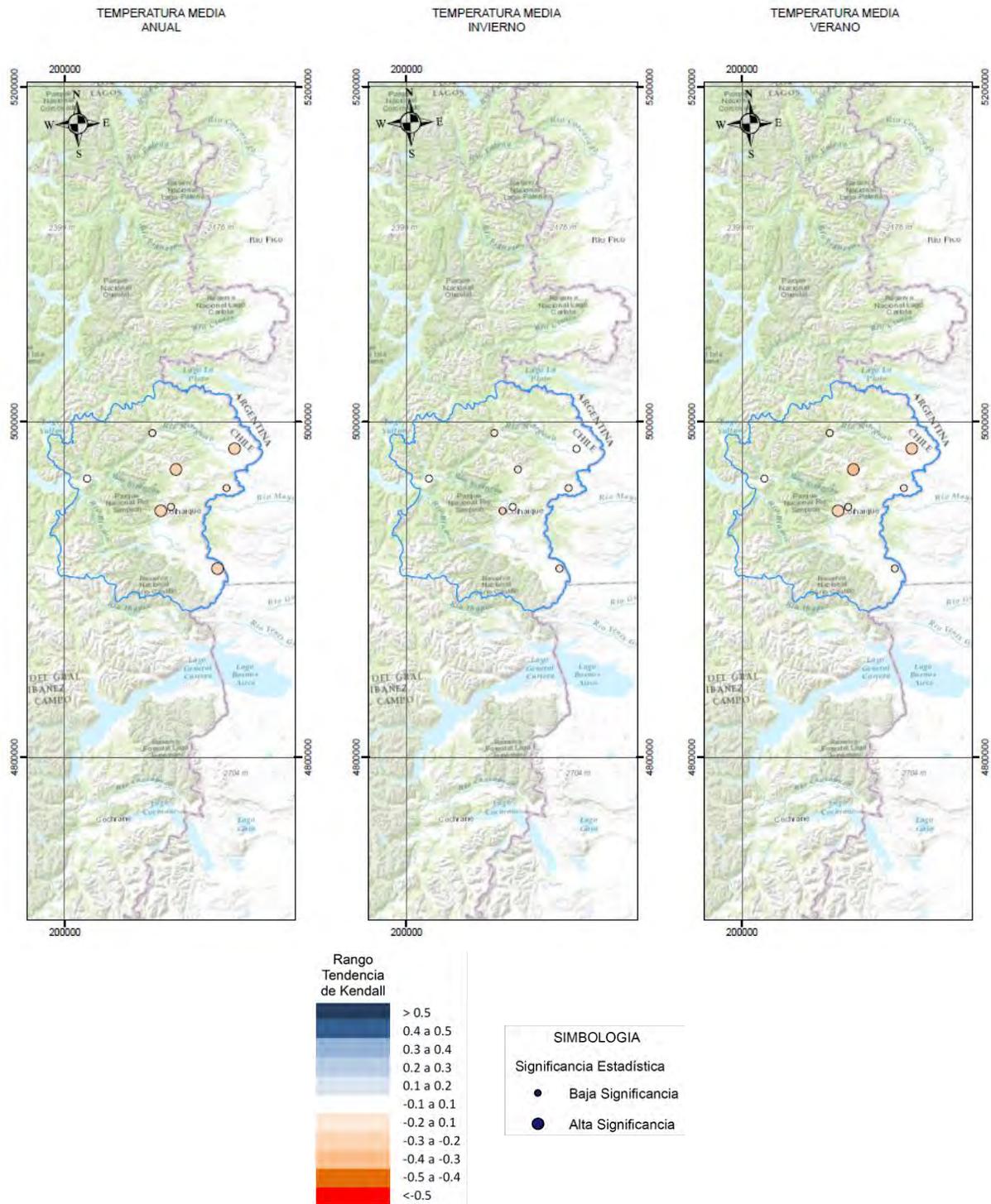
Notas:

(1): Un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monótona: valores consecutivos son siempre mayores/menores que el valor anterior. Un valor de 0 denota una tendencia “plana”, con igual cantidad de registros que se incrementan y decrecen respecto al valor anterior.

(2): Análisis aplicado sobre el registro total, correspondiente al periodo 1960 – 2014.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-12 Resultado de test de Mann-Kendall para temperatura, macrozona Sur.



Notas:

- (1): Un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monótona: valores consecutivos son siempre mayores/menores que el valor anterior. Un valor de 0 denota una tendencia "plana", con igual cantidad de registros que se incrementan y decrecen respecto al valor anterior.
- (2): Análisis aplicado sobre el registro total, correspondiente al periodo 1960 – 2014.

Fuente: Elaboración Propia.

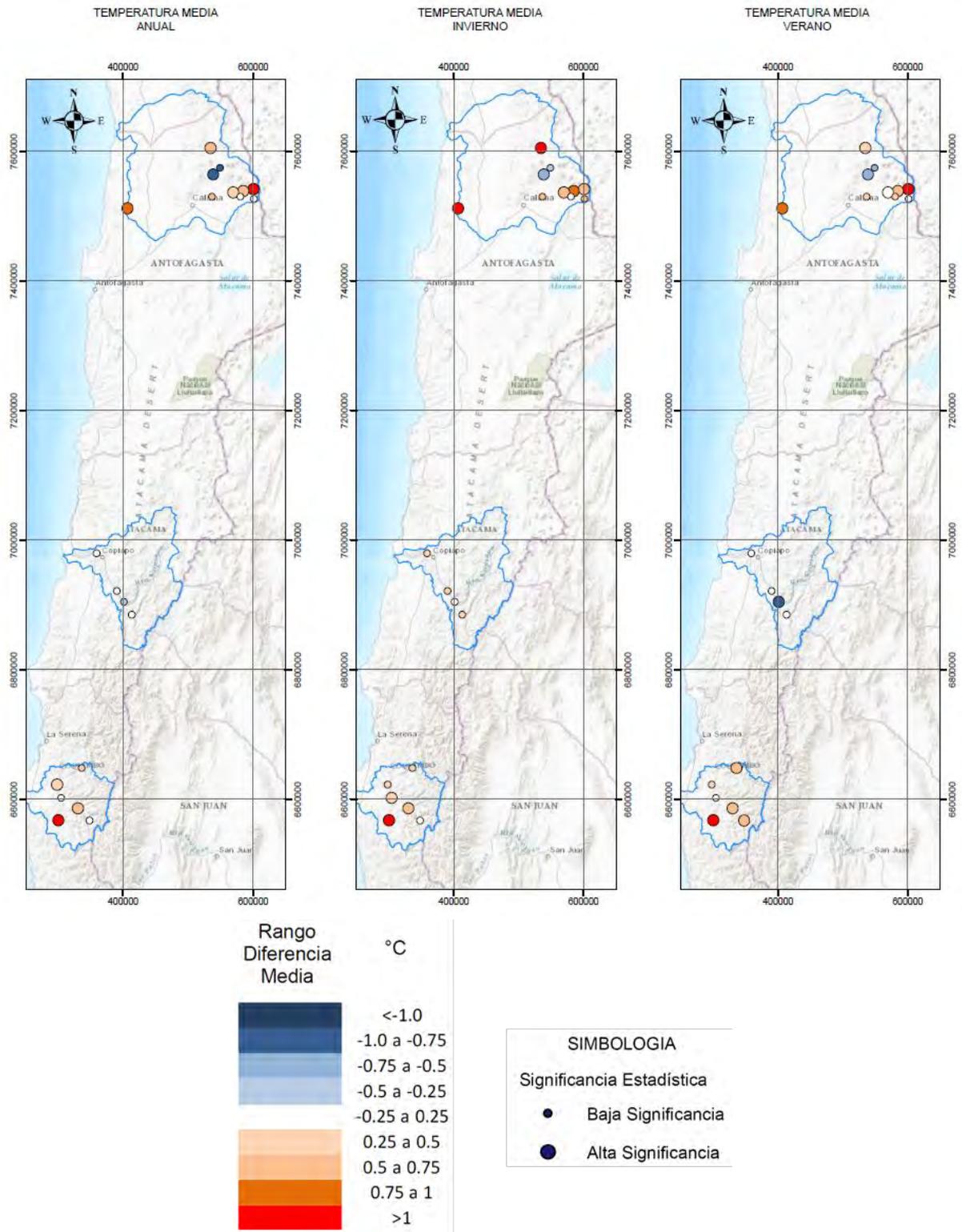
Figura 6.3-13 Resultado de test de Mann-Kendall para temperatura, macrozona Austral.

Los resultados del test de Mann-Kendall 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 las cuencas del río Loa y 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 río 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.

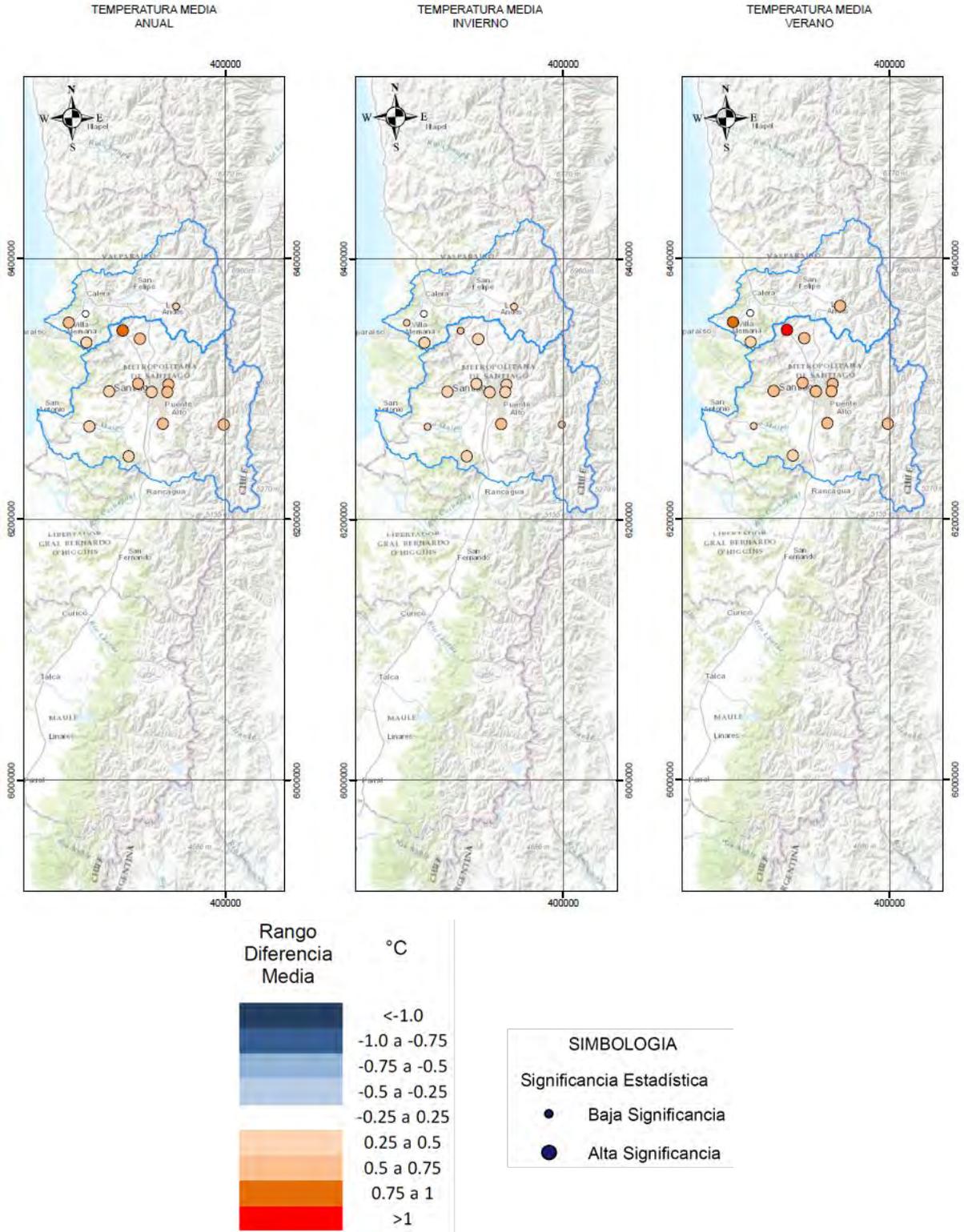
Los resultados acá obtenidos son consistentes con lo que otros autores han proyectado en términos de cómo el cambio climático afectará las distintas regiones del país. Para la zona Centro, Cortés et al. (2012) proyectó un aumento de las temperaturas para la región Metropolitana para los años 2030-2070. Falvey y Garreaud (2009) evaluaron tendencias en temperatura entre las latitudes 17° y 37°S, presentándose tendencias positivas para la mayoría de las estaciones presentes en los valles y zonas cordilleranas. Los resultados son además consistentes con las simulaciones para temperaturas resultantes del Coupled Model Intercomparison Project-3 (CMIP3; Falvey y Garreaud, 2003).

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. Dada la presencia de tendencias al alza en la mayoría de las cuencas analizadas, es esperable que los resultados de este test muestren cambios significativos (positivos) en las medias de temperaturas. En cada una de estas láminas, Figuras 6.3-14 a 6.3-17, los círculos de diámetro pequeño representan diferencias estadísticamente no significativas, mientras que los círculos de diámetro mediano representan los resultados estadísticamente significativos. El nivel de significancia utilizado corresponde a un p-valor de 0,05 (95%). Los valores utilizados en la generación de las figuras presentadas se incluyen en el Anexo G.



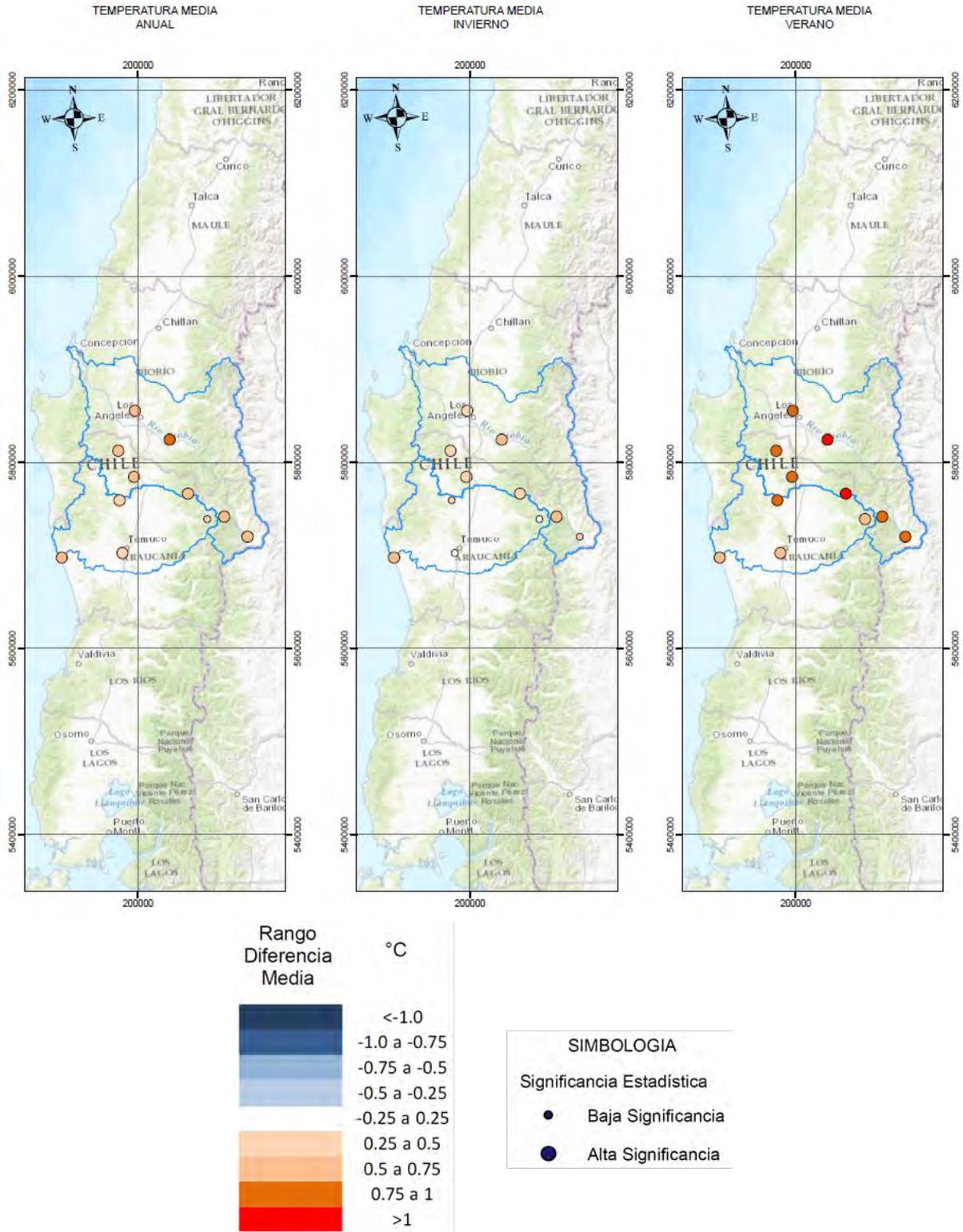
Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.
 Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-14 Resultado de test de cambios en la media de temperatura, macrozona Norte.



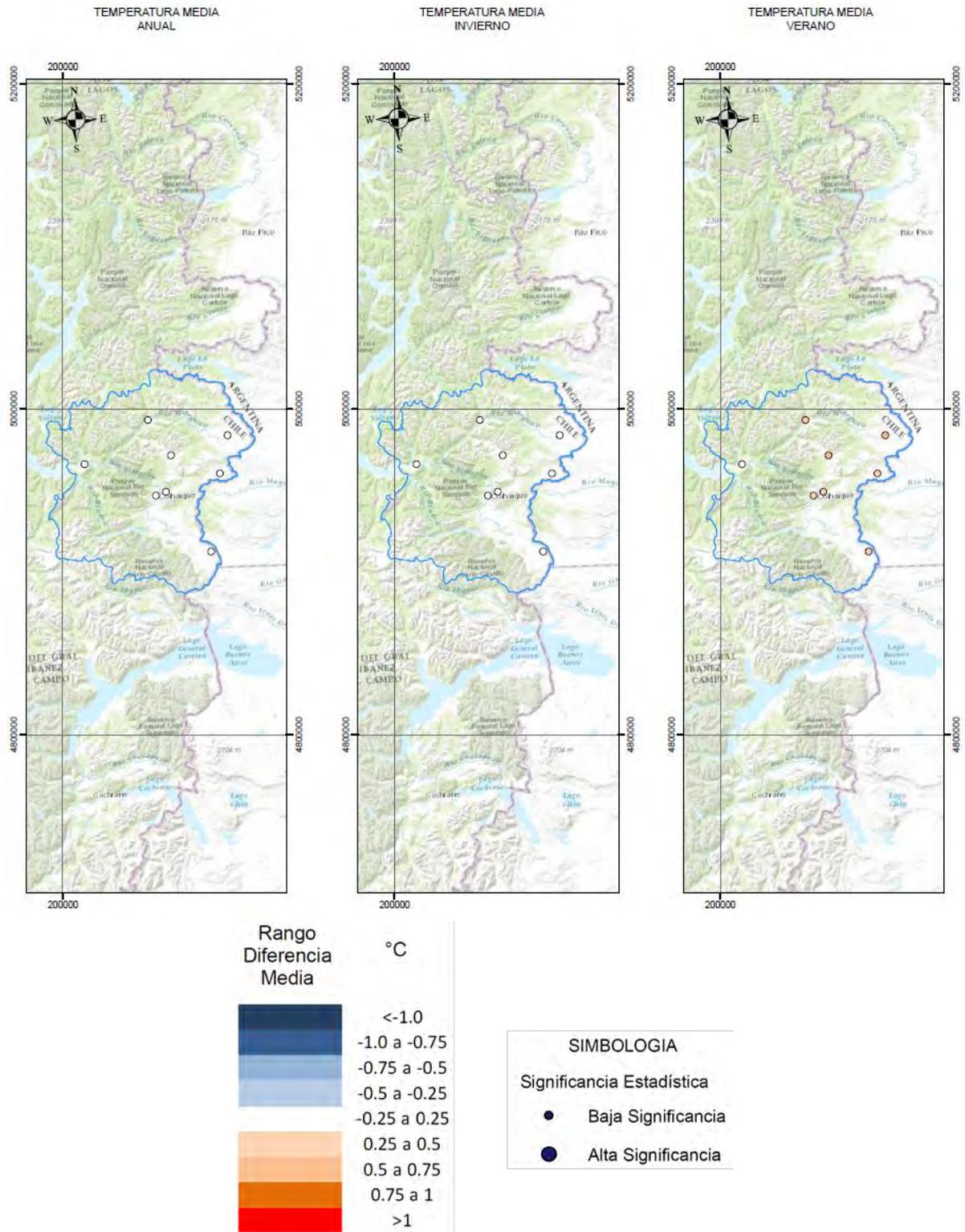
Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-15 Resultado de test de cambios en la media de temperatura, macrozona Centro.



Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.
 Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-16 Resultado de test de cambios en la media de temperatura, macrozona Sur.



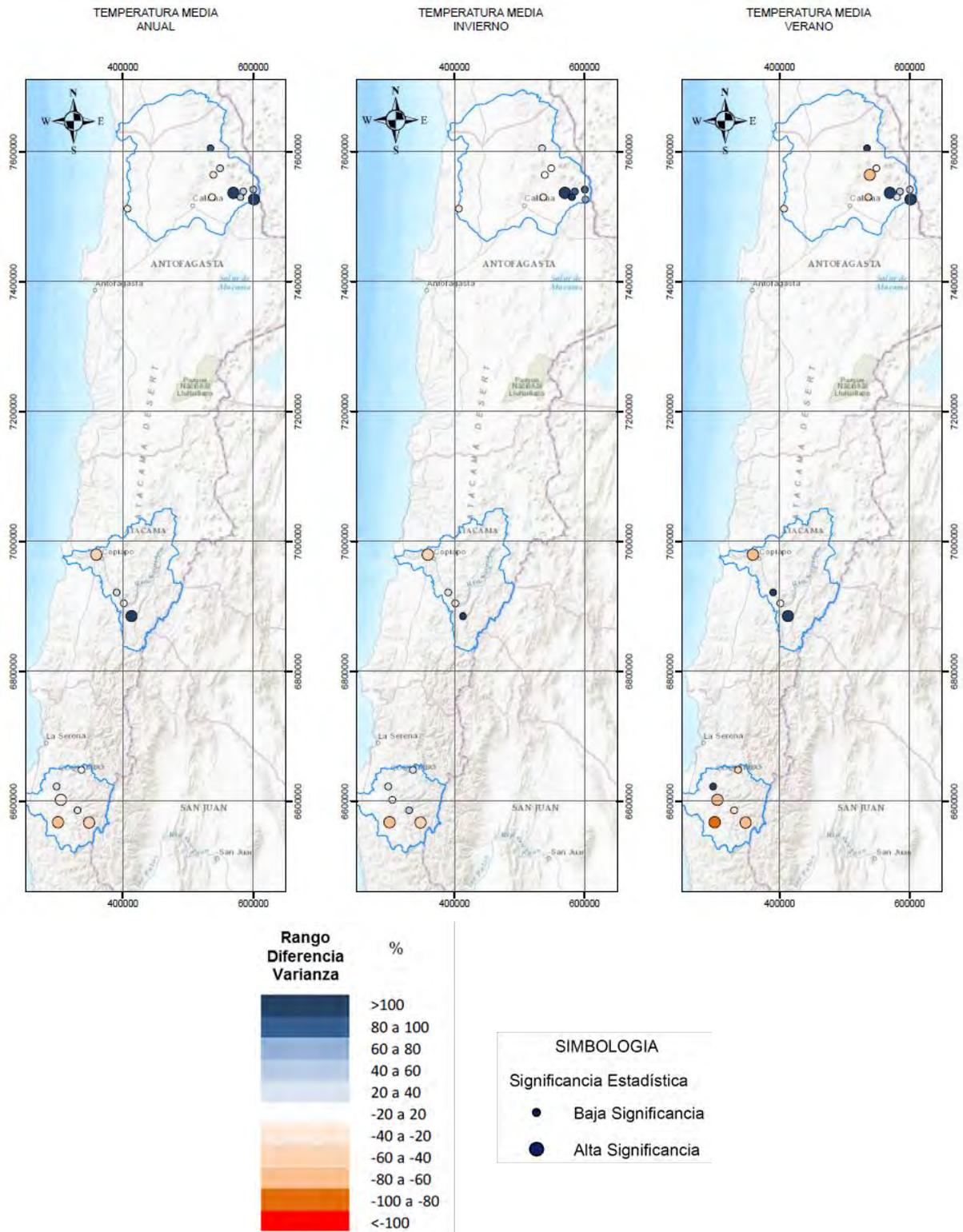
Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-17 Resultado de test de cambios en la media de temperatura, macrozona Austral.

Los resultados del test de diferencia de medias de temperatura muestran una situación consistente con los resultados del test de Mann-Kendall. 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 de las cuencas del río Copiapó muestran cambios leves que no son consistentes con los observados dentro de las otras cuencas.

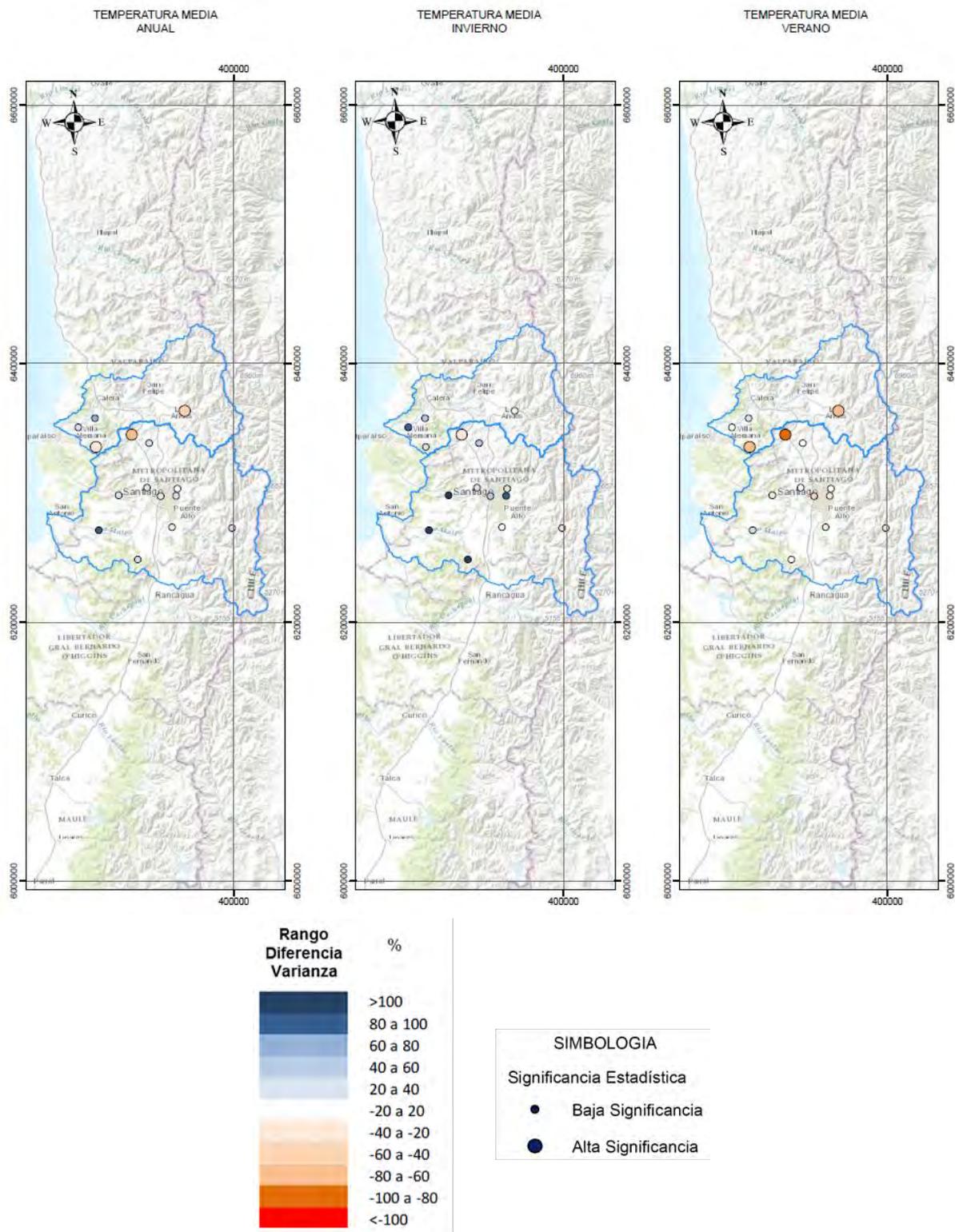
Para la macrozona Centro se observan alzas de temperaturas medias anuales, de invierno y de verano del orden de 0,5°C hasta más de 1°C. Esto se replica en la macrozona Sur. Esta última macrozona presenta las alzas más altas de temperaturas medias de verano, con alzas en promedio del orden de 0,75°C para todas las estaciones analizadas. Para la macrozona Austral no se observan cambios significativos en las temperaturas.

A continuación, en las Figuras 6.3-18 a 6.3-21, se presentan los resultados del test de diferencias de varianza para temperaturas medias anuales, de invierno y de verano. En cada una de estas láminas los círculos de diámetro pequeño representan diferencias estadísticamente no significativas, mientras que los círculos de diámetro mediano representan los resultados estadísticamente significativos. El nivel de significancia utilizado corresponde a un p-valor de 0,05 (95%). Los valores utilizados en la generación de las figuras presentadas se incluyen en el Anexo G.



Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.
Fuente: Elaboración Propia.

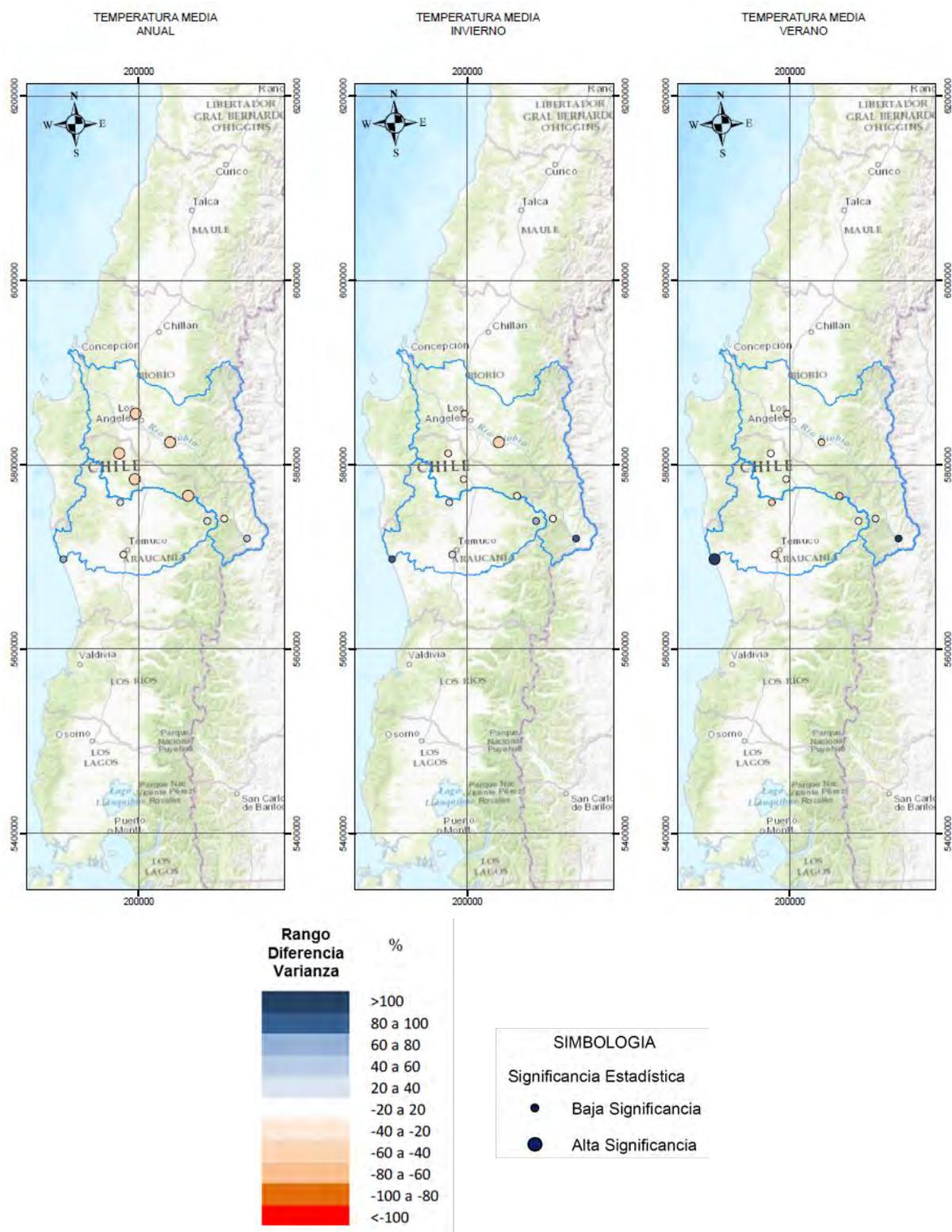
Figura 6.3-18 Resultado de test de cambios en la varianza de temperatura, macrozona Norte.



Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.

Fuente: Elaboración Propia.

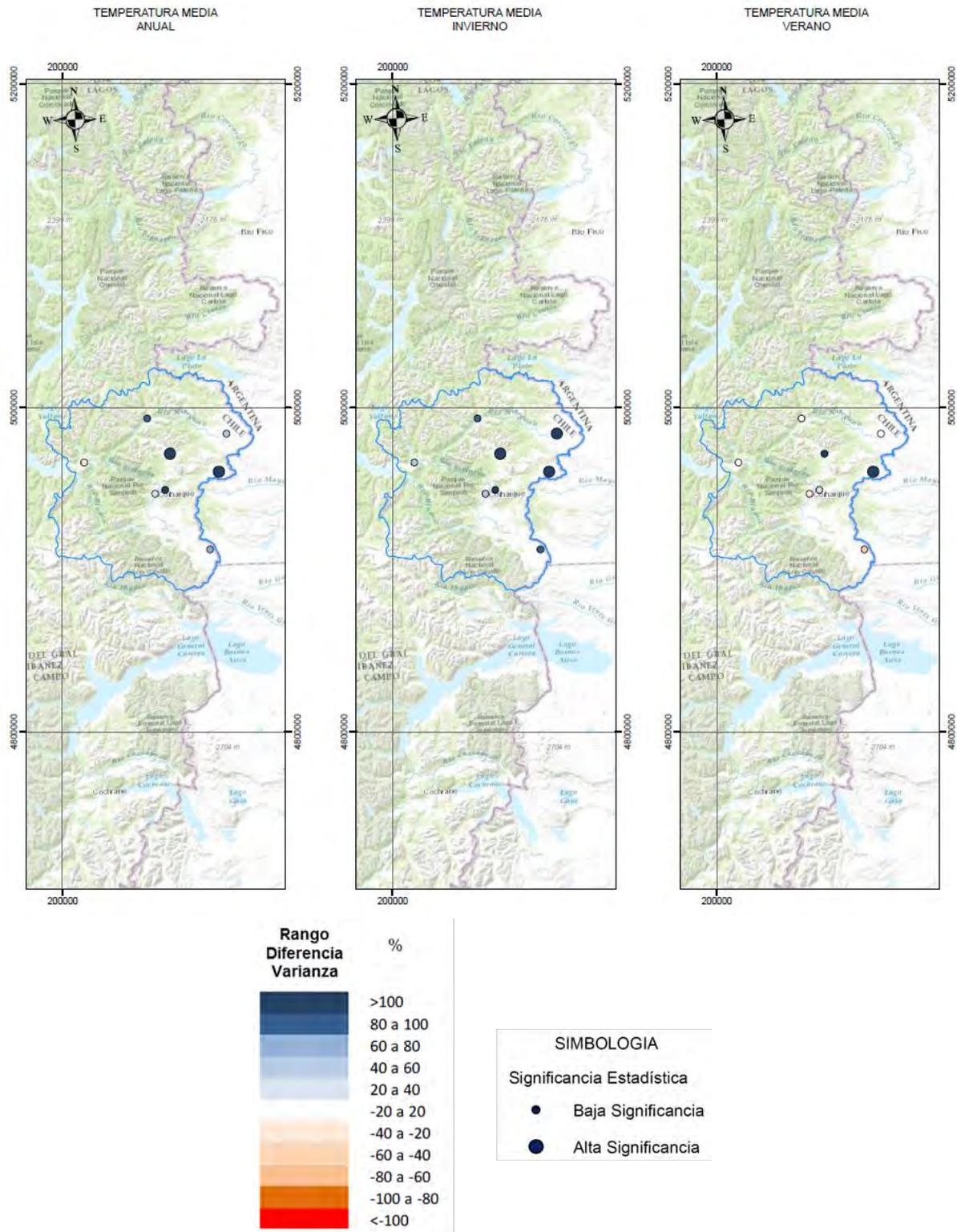
Figura 6.3-19 Resultado de test de cambios en la varianza de temperatura, macrozona Centro.



Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-20 Resultado de test de cambios en la varianza de temperatura, macrozona Sur.



Nota: Análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1986 y 1987 – 2014 para los valores medios de los registros de la variable.

Fuente: Elaboración Propia.

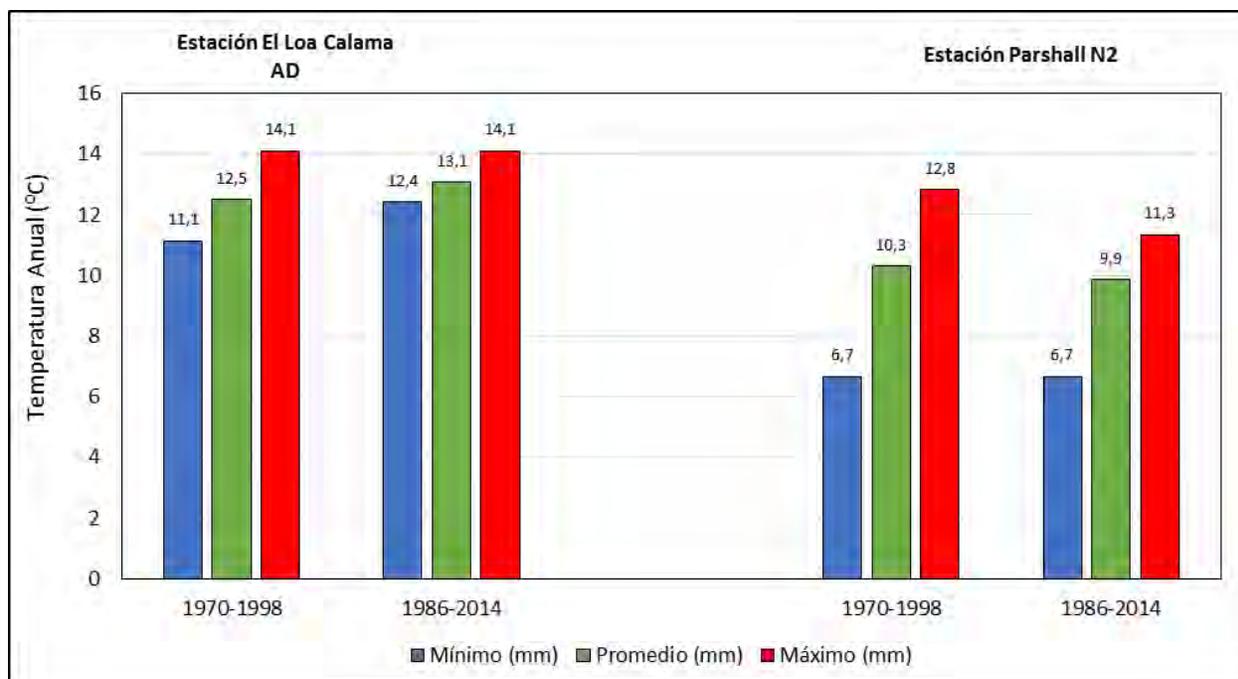
Figura 6.3-21 Resultado de test de cambios en la varianza de temperatura, macrozona Austral.

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 río 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.

6.3.2.3 Variabilidad en Régimen de Temperatura

La estadística de temperatura se analizó en dos periodos de 29 años para cada estación, periodo mínimo sobre el cual se estima que los resultados poseen validez estadística, comprendiendo los años 1970 – 1998 y 1986 – 2014. Los resultados se observan en las Figuras 6.3-22 a 6.3-29.

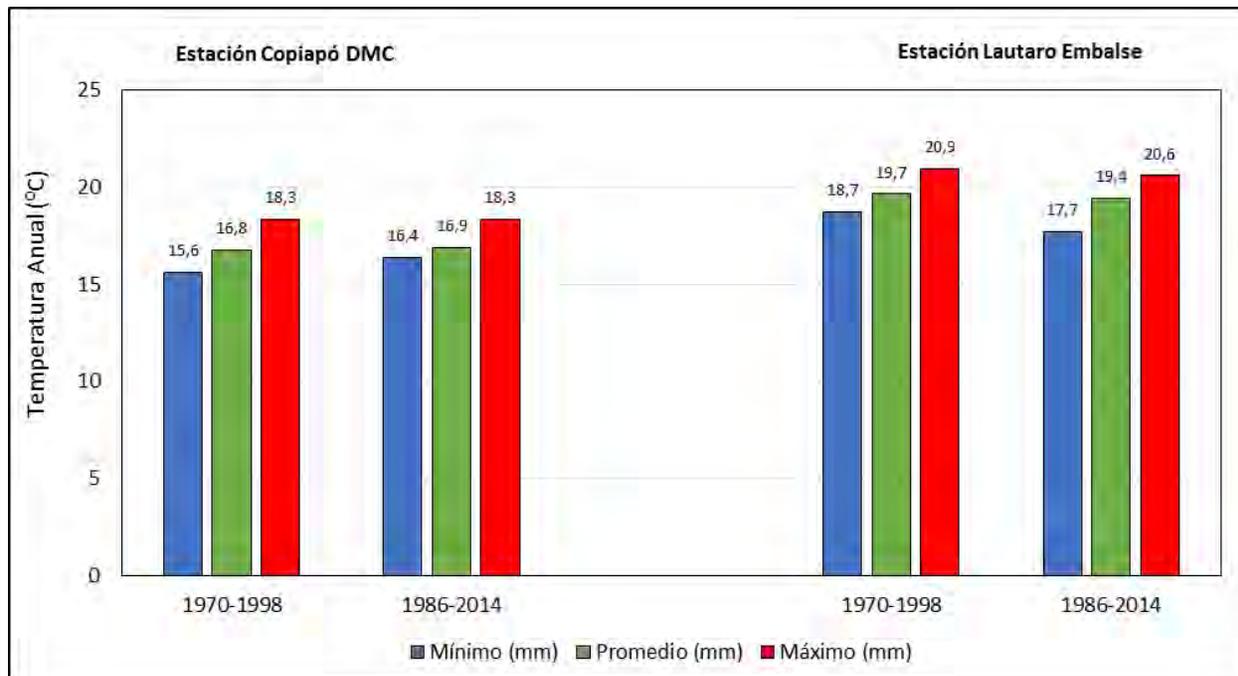


Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-22 Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Loa.

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.



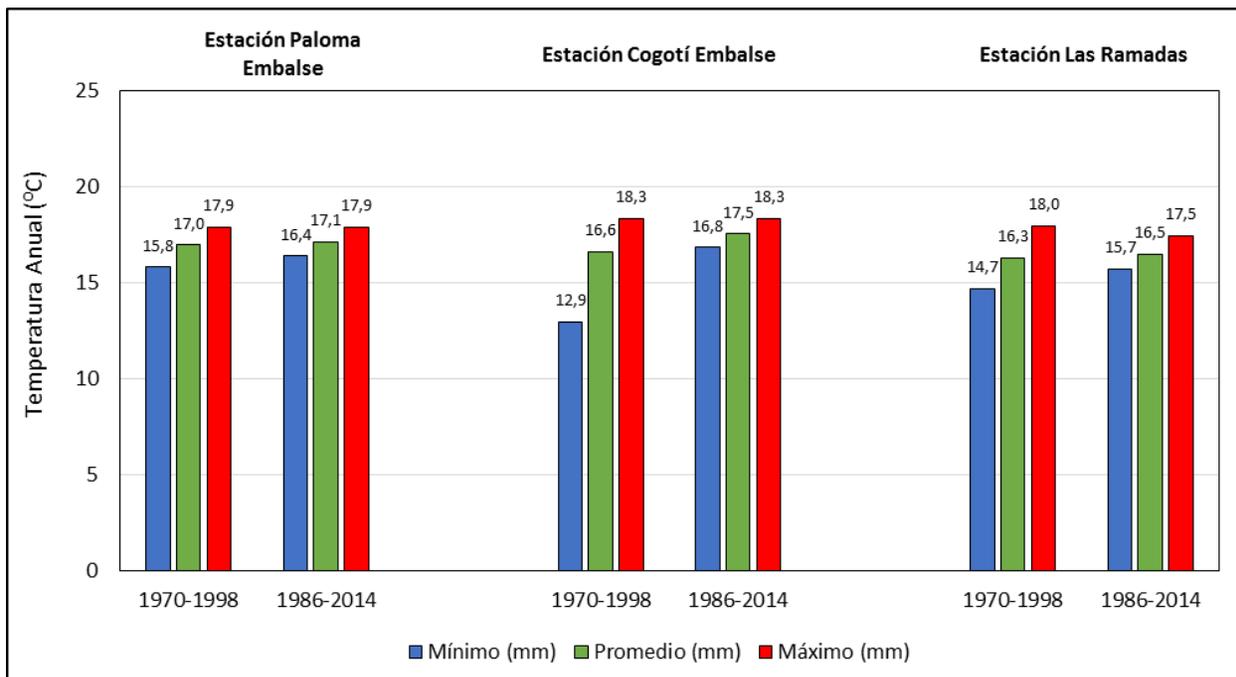
Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-23 Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Copiapó.

La cuenca del río 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°C).

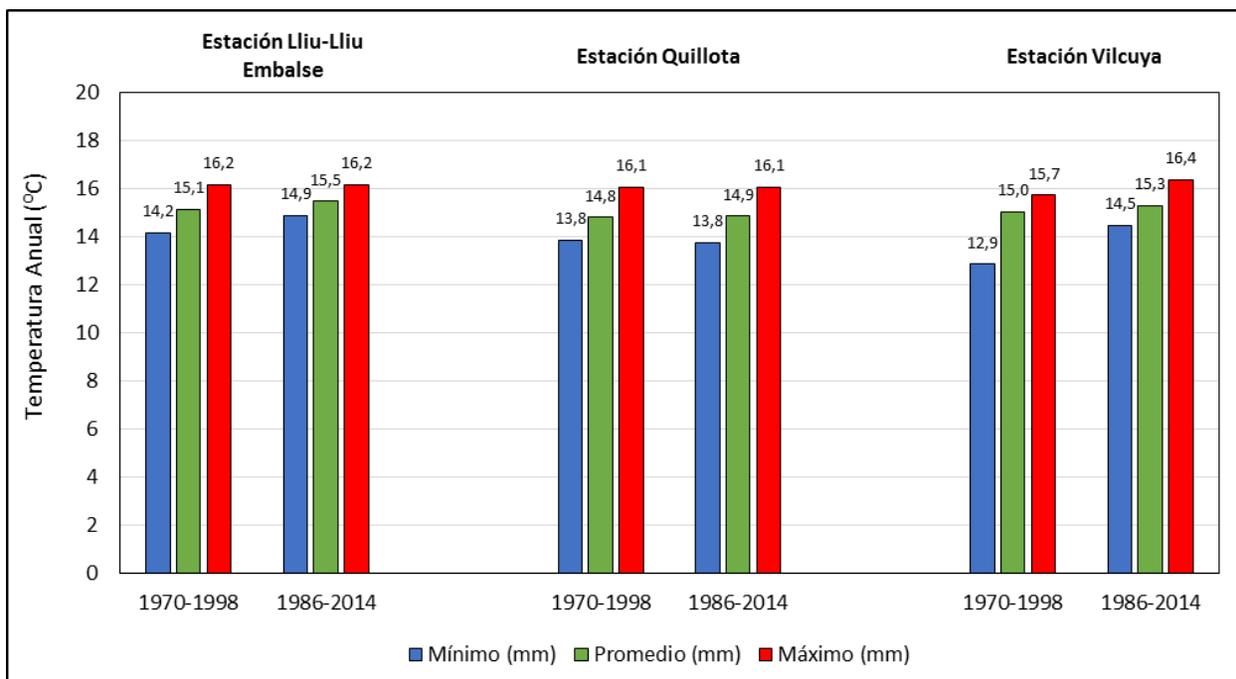
En el caso de la cuenca del río Limarí, los cambios se aprecian más estables y orientados al alza general de las temperaturas. Los mayores aumentos se observan en la estación Cogotí embalse (valle), particularmente en sus valores mínimos y medios (3,8 y 1°C). Para las otras dos estaciones los aumentos 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°C.



Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-24 Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Limarí.

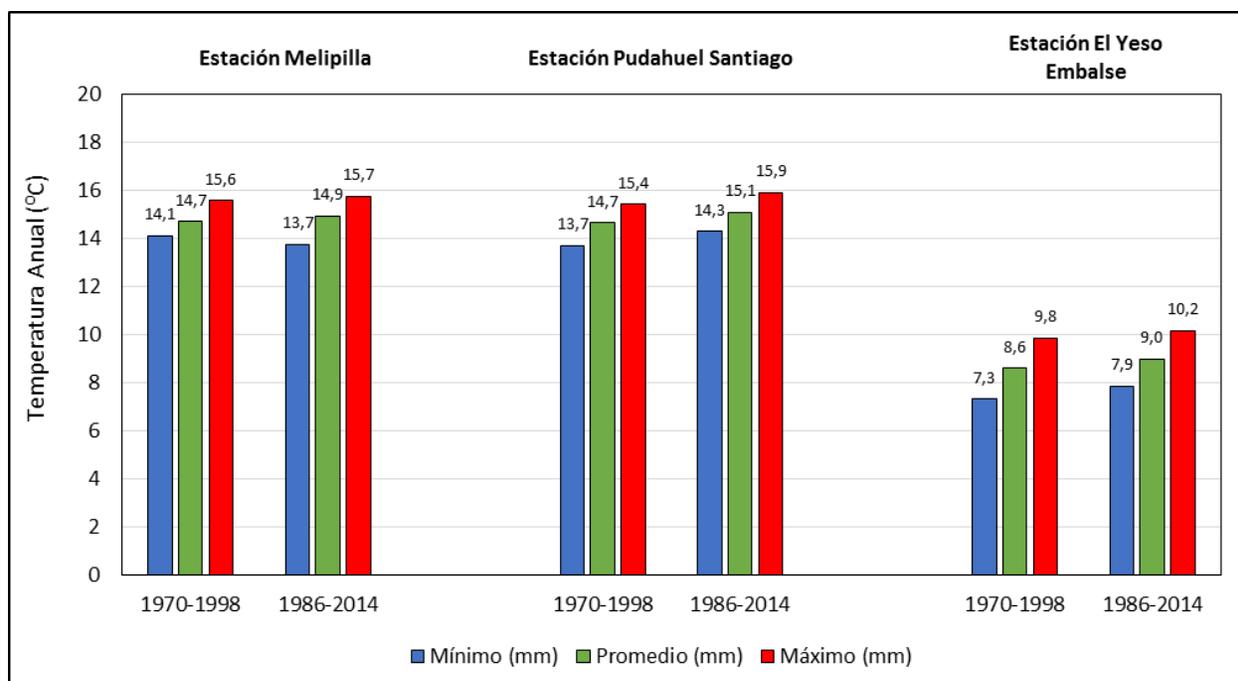


Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-25 Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Aconcagua.

Para la macrozona centro, se tiene un comportamiento similar. La cuenca del río 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.



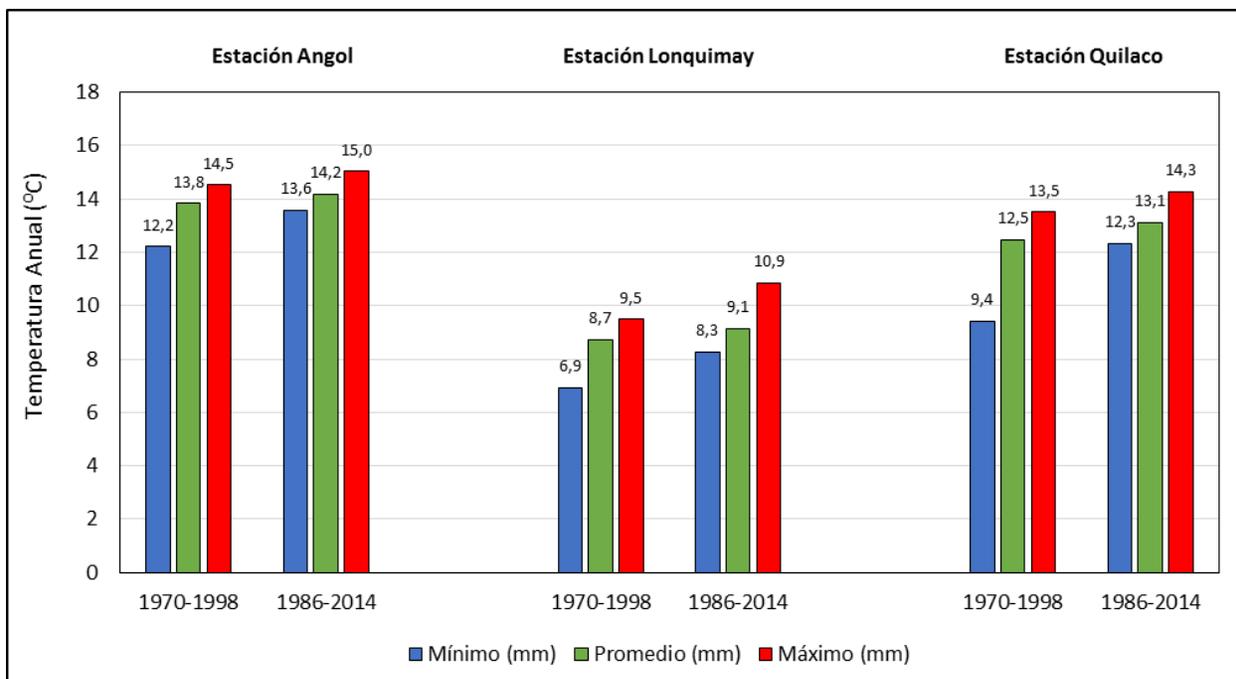
Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-26 Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Maipo.

La cuenca del río 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.

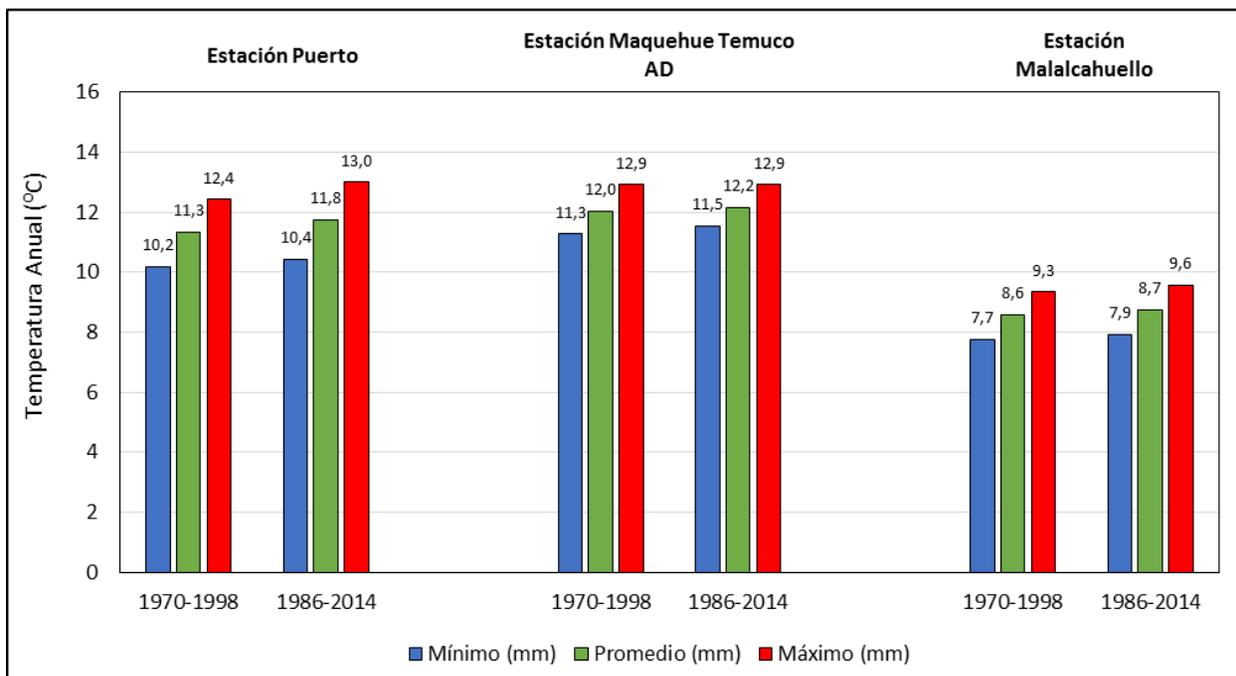
Pasando a la macrozona sur, la cuenca del río Bío-Bío presenta un alza generalizada de los valores mínimos, medios y máximos de temperatura para las tres estaciones seleccionadas. Las mayores alzas se concentran en las estaciones Lonquimay y Quilaco (entre 0,4 y 1,4°C), mientras que la estación Angol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



Nota: Las estaciones se encuentran ordenadas de costa a cordillera en sentido de izquierda a derecha.

Fuente: Elaboración Propia.

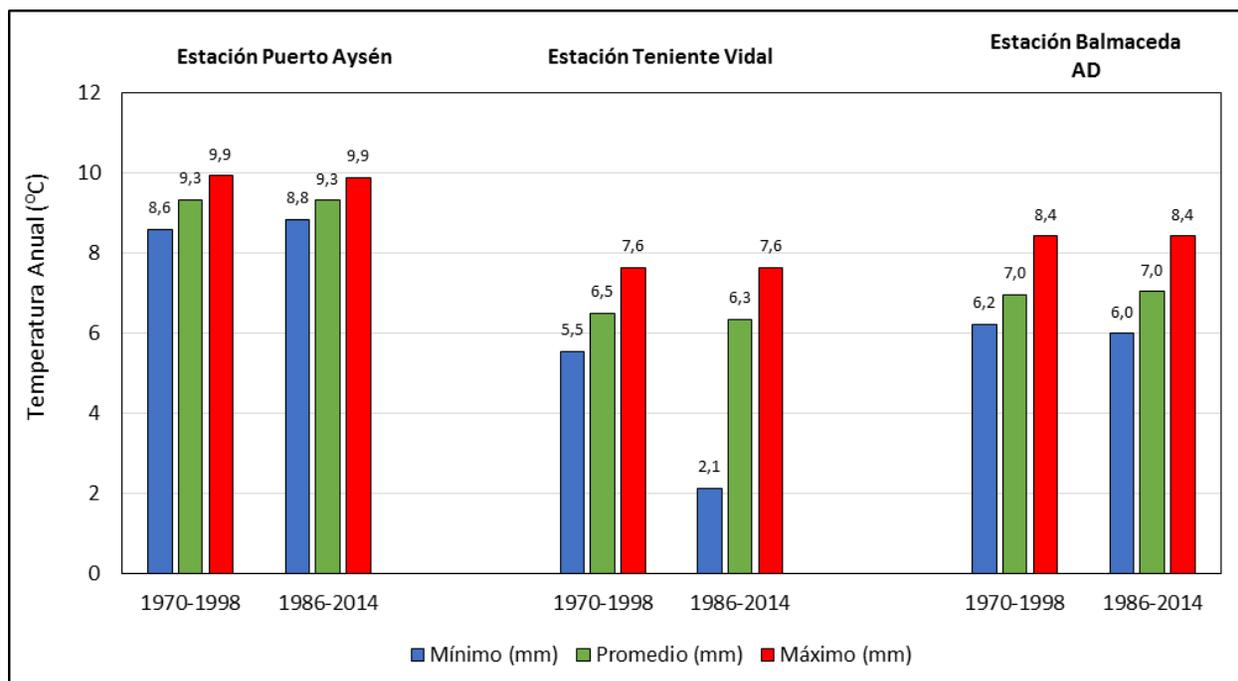
Figura 6.3-27 Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Bío-Bío.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-28 Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Imperial.

Para la cuenca del río Imperial, se observa un comportamiento similar al observado en la cuenca del río 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.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.3-29 Análisis Estadística De Temperatura Anual Cuenca Río Aysén.

Para la macrozona austral, representada por la cuenca de río Aysén, se observa 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.

Finalmente, un resumen de las variaciones de temperatura se presenta en el Cuadro 6.3-2. Este cuadro permite comparar la variación en “°C “ de las temperaturas mínimas, máximas y promedio ya descritas anteriormente.

Cuadro 6.3-2: Resumen de Resultados de variación de temperatura para las estaciones analizadas.

Macrozona	Cuenca	Estación	Anual			P1			P2			Diferencia (°C)		
			Max (°C)	Min (°C)	Prom (°C)	Max (°C)	Min (°C)	Prom (°C)	Max (°C)	Min (°C)	Prom (°C)	Max (°C)	Min (°C)	Prom (°C)
Norte	Loa	El Loa Calama AD	14,1	11,1	12,7	14,1	11,1	12,5	14,1	12,4	13,1	0,0	1,3	0,6
		Parshall N2	12,8	6,7	10,1	12,8	6,7	10,3	11,3	6,7	9,9	-1,5	0,0	-0,4
		Linzor	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Copiapó	Copiapó DMC	18,3	15,6	16,8	18,3	15,6	16,8	18,3	16,4	16,9	0,0	0,8	0,1
		Lautaro Embalse	20,9	17,7	19,5	20,9	18,7	19,7	20,6	17,7	19,4	-0,3	-1,0	-0,2
		Jorquera en la Guardia	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	Limarí	Paloma Embalse	17,9	15,8	17,0	17,9	15,8	17,0	17,9	16,4	17,1	0,0	0,6	0,2
		Cogotí Embalse	18,3	12,9	17,0	18,3	12,9	16,6	18,3	16,8	17,5	0,0	3,9	0,9
		Las Ramadas	18,0	14,7	16,4	18,0	14,7	16,3	17,5	15,7	16,5	-0,5	1,0	0,2
Centro	Aconcagua	Lliu-Lliu Embalse	16,2	14,2	15,3	16,2	14,2	15,1	16,2	14,9	15,5	0,0	0,7	0,3
		Quillota	16,1	13,8	14,8	16,1	13,8	14,8	16,1	13,8	14,9	0,0	-0,1	0,1
		Vilcuya	16,4	12,9	15,1	15,7	12,9	15,0	16,4	14,5	15,3	0,6	1,6	0,3
	Maipo	Melipilla	15,7	13,7	14,8	15,6	14,1	14,7	15,7	13,7	14,9	0,2	-0,4	0,2
		Pudahuel Santiago	15,9	13,7	14,9	15,4	13,7	14,7	15,9	14,3	15,1	0,5	0,6	0,4
		El Yeso Embalse	10,2	7,3	8,7	9,8	7,3	8,6	10,2	7,9	9,0	0,3	0,6	0,4
Sur	Bío-Bío	Angol	15,0	12,2	14,0	14,5	12,2	13,8	15,0	13,6	14,2	0,5	1,4	0,3
		Lonquimay	10,9	6,9	8,9	9,5	6,9	8,7	10,9	8,3	9,1	1,4	1,4	0,4
		Quilaco	14,3	9,4	12,7	13,5	9,4	12,5	14,3	12,3	13,1	0,8	2,9	0,7
	Imperial	Puerto Saavedra	13,0	10,2	11,6	12,4	10,2	11,3	13,0	10,4	11,8	0,6	0,2	0,4
		Maquehue Temuco AD	12,9	11,3	12,1	12,9	11,3	12,0	12,9	11,5	12,2	0,0	0,3	0,1
		Malalcahuello	9,6	7,7	8,6	9,3	7,7	8,6	9,6	7,9	8,7	0,2	0,2	0,2
Austral	Aysén	Puerto Aysén	9,9	8,6	9,3	9,9	8,6	9,3	9,9	8,8	9,3	-0,1	0,2	0,0
		Teniente Vidal	7,6	2,1	6,3	7,6	5,5	6,5	7,6	2,1	6,3	0,0	-3,4	-0,2
		Balmaceda AD	8,4	6,0	7,0	8,4	6,2	7,0	8,4	6,0	7,0	0,0	-0,2	0,1

Nota: Valores en negrita no presentan variación, en color rojo con tendencia negativa (reducción) y azul positiva (incremento)

Fuente: Elaboración Propia.

6.4 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.

De todas las estadísticas revisadas, la única cuenca que no presenta una estadística en régimen natural calculada y/o disponible es la cuenca del río Loa. Las otras cuencas tienen al menos una estadística que puede considerarse en régimen natural y que además tienen una longitud de registro mayor a 30 años para la detección de algún periodo significativo.

De las estadísticas procesadas, el Cuadro 6.4-1 presenta las series consideradas para efectos de este análisis, junto a su periodo de análisis y la fuente o estudio base de obtención.

Cuadro 6.4-1 Series de tiempo fluviométricas analizadas en el estudio.

Macrozona	Cuenca	Nombre Estación	Periodo Analizado	Fuente
Norte	Loa	Río Loa en Lequena	1969/70-2014/15	Centro del Clima y la Resiliencia (CR2)
	Copiapó	Río Jorquera en Vertedero	1972/73-2006/07	Análisis integrado gestión en cuenca río Copiapó (Dictuc, 2010)
	Limarí	Río Hurtado en Angostura	1960/61-2003/04	Eficiencia Uso del Agua Región de Coquimbo (CAZALAC, 2006)
Centro	Aconcagua	Río Aconcagua en Chacabuquito	1958/59-2013/14	Modelación y Evaluación Agroeconómica del Valle del Aconcagua (Jorquera, 2014)
	Maipo	Río Maipo en San Alfonso	1950/51-2013/14	Plan Director Región Metropolitana (ARRAU, 2015)
Sur	Bío-Bío	Río Bío-Bío en Rucalhue	1960/61-2007/08	Centro del Clima y la Resiliencia (CR2) e Informe Anteproyecto Central Ralco (INGENDESA, 1993)
	Imperial	Río Traiguén en Victoria	1960/61-2014/15	Centro del Clima y la Resiliencia (CR2)
Austral	Aysén	Huemules frente río Galera	1980/81-2015/15	Centro del Clima y la Resiliencia (CR2)

Fuente: Elaboración Propia.

En esta oportunidad, dada la similitud de los periodos detectados con MTM y con MEM, se procedió a calcular los periodos dominantes sólo con MTM. Cabe destacar que las series fluviométricas, dado que el análisis de estacionariedad ya ha informado de la presencia de tendencias para las diversas agregaciones temporales, fueron correctamente estandarizadas y

se removió su tendencia antes de entrar al procesamiento estadístico. El Cuadro 6.4-2 presenta los periodos detectados al 99% de confianza.

Como se puede observar, para la cuenca del río Loa, los periodos significativos corresponden 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 la estación Jorquera en la Guardia como para Lautaro Embalse. El ciclo de 4,8 años es exclusivo de la serie de caudales.

Cuadro 6.4-2 Frecuencias y periodos dominantes de las series fluviométricas analizadas.

Cuenca	Estación	Periodo	Código	Valores Propios		Frecuencias				Años / Ciclo				
LOA	Río Loa en Lequena	Anual	LO_Q_1_A	(1,2)	-	0.11	-	-	-	-	9.2	-	-	-
LOA	Río Loa en Lequena	Invierno	LO_Q_1_I	(6,7)	-	0.32	-	-	-	-	3.2	-	-	-
LOA	Río Loa en Lequena	Verano	LO_Q_1_V	(3,4)	-	0.17	0.32	-	-	-	6.0	3.1	-	-
COPIAPÓ	Pulido en Vertedero	Anual	CO_Q_4_A	(3,4)	-	0.21	-	-	-	-	4.8	-	-	-
COPIAPÓ	Pulido en Vertedero	Invierno	CO_Q_4_I	(3,4)	-	0.24	-	-	-	-	4.1	-	-	-
COPIAPÓ	Pulido en Vertedero	Verano	CO_Q_4_V	(7,8)	-	0.28	-	-	-	-	3.5	-	-	-
LIMARI	Hurtado en Angostura	Anual	LI_Q_6_A	(3,4)	(5,6)	0.35	0.23	-	-	-	2.8	4.4	-	-
LIMARI	Hurtado en Angostura	Invierno	LI_Q_6_I	(6,7)	(10,11)	0.26	0.14	0.24	-	-	3.9	7.3	4.1	-
LIMARI	Hurtado en Angostura	Verano	LI_Q_6_V	(3,4)	-	0.22	0.31	-	-	-	4.5	3.2	-	-
ACONCAGUA	Aconcagua en Chacabuquito	Anual	AC_Q_17_A	(7,8)	(9,10)	0.35	0.35	0.45	-	-	2.8	2.9	2.2	-
ACONCAGUA	Aconcagua en Chacabuquito	Invierno	AC_Q_17_I	(3,4)	(6,7)	0.13	0.21	0.41	-	-	7.4	4.7	2.4	-
ACONCAGUA	Aconcagua en Chacabuquito	Verano	AC_Q_17_V	(7,8)	(9,10)	0.36	0.45	-	-	-	2.8	2.2	-	-
MAIPO	Maipo en San Alfonso	Anual	MA_Q_20_A	(10,11)	-	0.37	0.45	-	-	-	2.7	2.2	-	-
MAIPO	Maipo en San Alfonso	Invierno	MA_Q_20_I	(2,3)	-	0.08	0.15	-	-	-	12.0	6.8	-	-
MAIPO	Maipo en San Alfonso	Verano	MA_Q_20_V	(5,6)	-	0.16	0.23	-	-	-	6.1	4.4	-	-
BIO BIO	Bio-Bio en Rucalhue	Anual	BI_Q_21_A	(9,10)	(11,12)	0.29	0.38	0.34	0.42	-	3.5	2.6	3.0	2.4
BIO BIO	Bio-Bio en Rucalhue	Invierno	BI_Q_21_I	(5,6)	-	0.22	0.36	-	-	-	4.5	2.8	-	-
BIO BIO	Bio-Bio en Rucalhue	Verano	BI_Q_21_V	(4,5)	-	0.43	-	-	-	-	2.3	-	-	-
IMPERIAL	Traiguén en Victoria	Anual	IM_Q_22_A	(11,12)	(13,14)	0.16	0.23	0.27	-	-	6.4	4.4	3.7	-
IMPERIAL	Traiguén en Victoria	Invierno	IM_Q_22_I	(1,2)	(3,4)	0.42	0.11	0.35	-	-	2.4	9.2	2.8	-
IMPERIAL	Traiguén en Victoria	Verano	IM_Q_22_V	(2,3)	-	0.10	0.48	-	-	-	9.9	2.1	-	-
AYSÉN	Huemules frente río Galera	Anual	AY_P_10_A	(1,2)	-	0.21	-	-	-	-	4.8	-	-	-
AYSÉN	Huemules frente río Galera	Invierno	AY_P_10_I	(1,2)	-	0.21	-	-	-	-	4.8	-	-	-
AYSÉN	Huemules frente río Galera	Verano	AY_P_10_V	(5,6)	-	0.20	-	-	-	-	5.0	-	-	-

Fuente: Elaboración Propia.

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 la cuenca del río 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 las de precipitación y temperatura.

Para la cuenca del río Imperial los ciclos detectados son mayores en magnitud que los ciclos detectados en la cuenca del río 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.

6.4.1 Variabilidad en Régimen de Caudales

Siguiendo el mismo análisis que en el caso de las precipitaciones, se procedió a calcular las probabilidades de excedencia del 10, 50 y 85% (P10, P50 y P85), considerando dos ventanas de tiempo. Este cálculo se realizó para las series fluviométricas en régimen natural que fue factible de completar, las cuáles también han sido utilizadas para el análisis de los periodos dominantes del acápite 6.4. Esta estimación se realizó para las tres agregaciones temporales: anual y los valores estacionales de invierno y verano. Además, se estimaron los valores mensuales de manera de poder contar con valores de referencia para las Curvas de Variación Estacional (CVE) de cada una de las estaciones. El Cuadro 6.4-3 presenta el resumen de las ventanas de tiempo consideradas en el análisis.

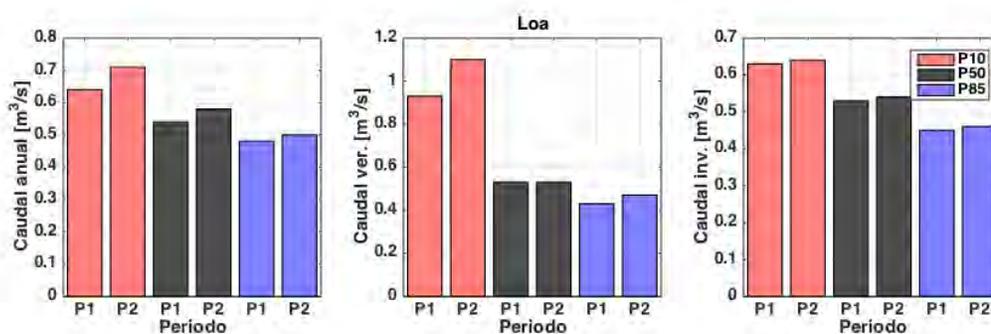
Cuadro 6.4-3 Resumen de periodos considerados en el análisis de variabilidad de caudales.

Macrozona	Cuenca	Nombre Estación	Periodo 1	Periodo 2	Long. Reg
Norte	Loa	Río Loa en Lequena	1969/70 - 1998/99	1985/86 - 2014/15	46
	Copiapó	Río Jorquera en Vertedero	1972/73 - 2001/02	1977/78 - 2006/07	35
	Limarí	Río Hurtado en Angostura	1960/61 - 1989/90	1984/85 - 2014/15	55
Centro	Aconcagua	Río Aconcagua en Chacabuquito	1960/61 - 1989/90	1984/85 - 2013/14	56
	Maipo	Río Maipo en San Alfonso	1960/61 - 1989/90	1984/85 - 2013/14	64
Sur	Bío-Bío	Río Bío-Bío en Rucalhue	1960/61 - 1989/90	1978/79 - 2007/08	48
	Imperial	Río Traiguén en Victoria	1960/61 - 1989/90	1985/86 - 2014/15	55
Austral	Aysén	Huemules frente río Galera	1980/81 - 2009/10	1985/86 - 2014/15	35

Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede apreciar, las estaciones consideradas son heterogéneas en su longitud de registro. En general, entre cada sub-periodo existe un traslape de 6 años. Casos particulares son las cuencas de los ríos Copiapó y Aysén, cuya longitud de registro no supera los 35 años, por lo que los cambios que se presentan en sus indicadores son marginales y no se corresponden a un cambio global.

La Figura 6.4-1 muestra los cambios estimados para la cuenca del río Loa. En este caso el 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.



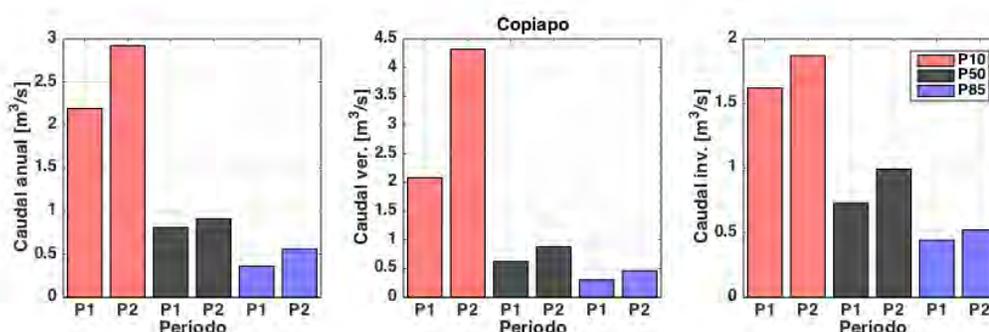
Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
- (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
- (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.4-1 Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Loa.

La Figura 6.4-2 presenta los cambios para la cuenca del río Copiapó. En este caso, el cambio observado es bastante más pronunciado que en la cuenca del río 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. Este comportamiento es perfectamente concordante con lo informado por la estación de precipitación Jorquera en la Guardia.



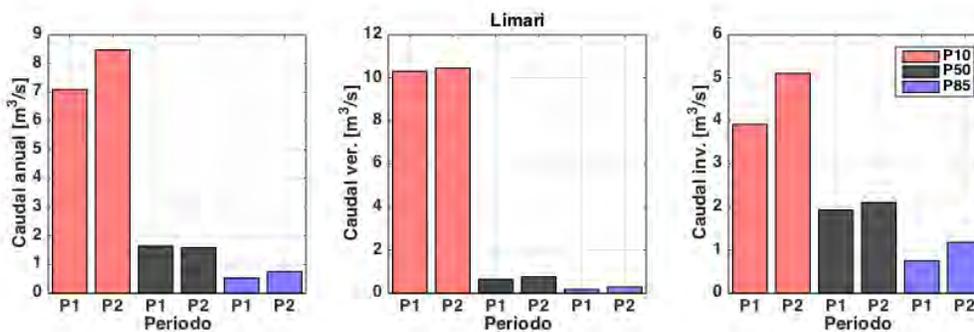
Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
- (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
- (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.4-2 Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Copiapó.

En el caso de la cuenca del río Limarí se observa un comportamiento bastante similar a la cuenca del río Copiapó. La Figura 6.4-3 muestra 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. Parte de este comportamiento es explicado por la estación Las Ramadas, específicamente en las agregaciones anuales y de invierno.



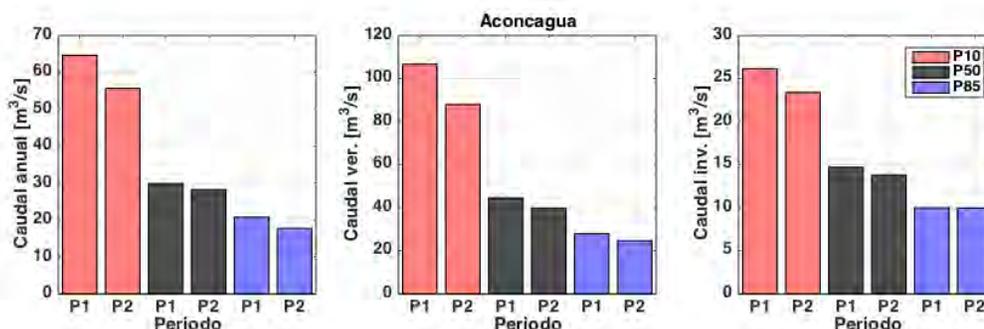
Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
- (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
- (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.4-3 Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Limarí.

Ya en la macrozona centro, se observan comportamientos diferentes, principalmente debido al régimen hidrológico propio de esta zona geográfica. La Figura 6.4-4 muestra una disminución consistente para P10, P50 y P85 en la cuenca del río 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 (cuando se produce el deshielo). Este comportamiento es también concordante con lo observado en la estación Riecillos, representativa del comportamiento en altura.



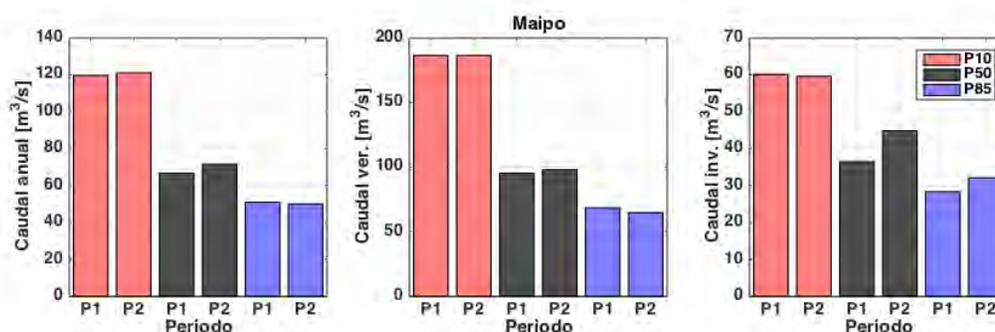
Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
- (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
- (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.4-4 Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Aconcagua.

Para la cuenca del río Maipo, se observa otro comportamiento. La Figura 6.4-5 da a conocer que 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. Este comportamiento es concordante con lo observado en las precipitaciones, específicamente en la estación San José de Maipo.



Notas:

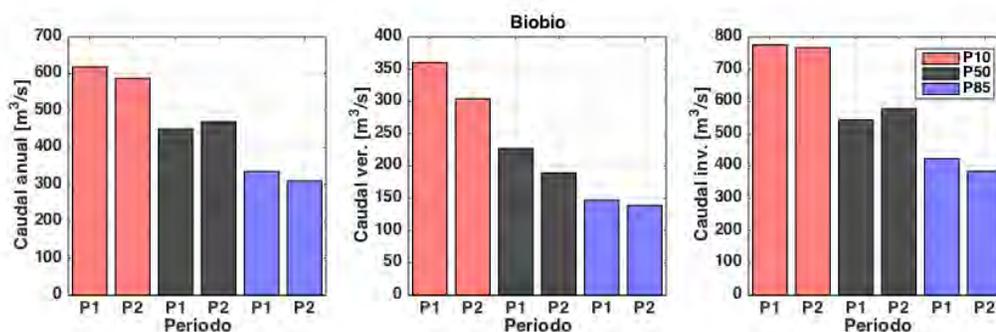
- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
- (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
- (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.4-5 Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Maipo.

En la macrozona sur, la escorrentía posee una mayor frecuencia de regímenes pluvio-nivales que nivo-pluviales, a diferencia de la macrozona centro, principalmente por la influencia de la Cordillera.

La Figura 6.4-6 muestra los resultados 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. Es importante igualmente destacar que la disponibilidad del recurso en verano tiene disminuciones significativas para todas las agregaciones temporales consideradas.



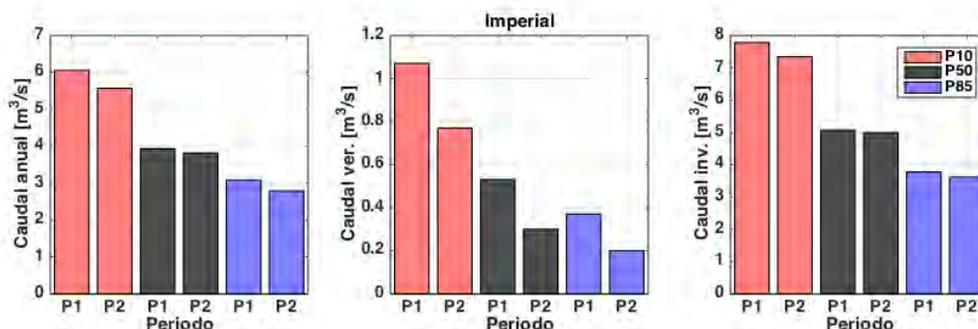
Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
- (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
- (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.4-6 Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Bío-Bío.

En el caso de la cuenca del río Imperial (Figura 6.4-7), 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 medida y más concentrada en el cambio asociado a P10. Este comportamiento se observa en la estación 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.



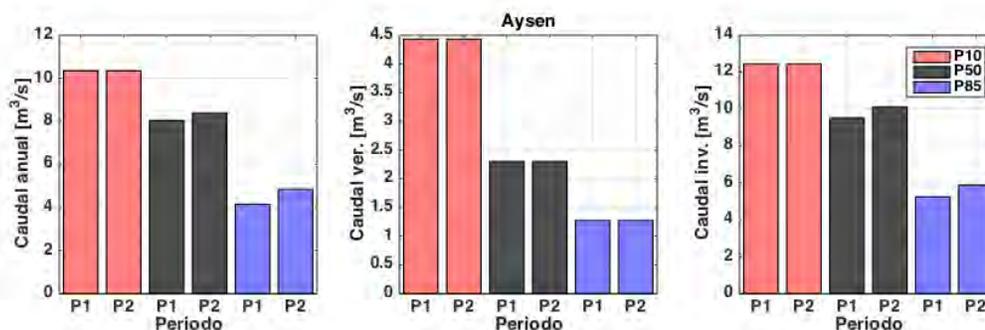
Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
- (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
- (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.4-7 Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Imperial.

Para la macrozona austral, la cuenca analizada corresponde a la del río Aysén. La Figura 6.4-8, resume el análisis efectuado, aun cuando sólo existen 35 años para ello. Tal como se observa, 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, pero no se corresponde totalmente.



Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
- (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.
- (3): Los gráficos son presentados de izquierda a derecha en las agregaciones anual, verano e invierno.

Fuente: Elaboración Propia.

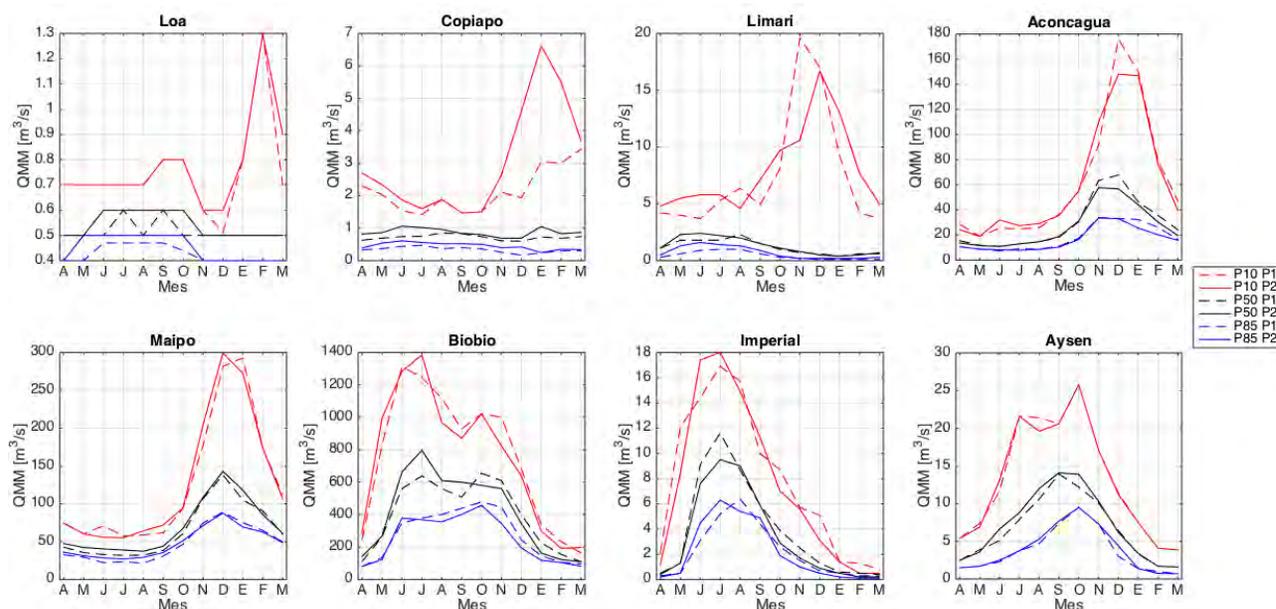
Figura 6.4-8 Cambios en las probabilidades de excedencia en caudal en los distintos periodos analizados para la Cuenca del Río Aysén.

Finalmente, la Figura 6.4-9 presenta los cambios en las curvas de variación estacional para ambos periodos analizados (P1 y P2). En la figura se pueden apreciar diversos cambios que se han analizado en las figuras anteriores.

Para la macrozona norte, la cuenca del río Loa tiene una representación más compleja, debido a que los caudales medidos son mucho más constantes y no tienen una variabilidad tan marcada como los regímenes pluviales de las otras macrozonas. En este caso es preferible quedarse con los comentarios ya efectuados en términos de montos, pues es difícil hacer una apreciación relacionada a la estacionalidad.

La cuenca del río Copiapó, que sólo tiene 35 años de registro, presenta importantes cambios concentrados en P10. Se aprecia, para los pocos años agregados entre una ventana y otra, un aumento apreciable del caudal entre los meses de noviembre y marzo, ligado posiblemente a los eventos extremos considerados en el segundo periodo (P2). Para P50 y P85 sólo se aprecia un leve aumento, que se entiende es consistente con los 35 años de registro.

Para la cuenca del río Limarí, los cambios también están concentrados en P10. En este caso se observa como el caudal máximo se retrasa de noviembre a diciembre, además de presentar una menor magnitud. La recesión (enero a marzo) es mayor en el segundo periodo. Para P50 y P85 se observan leves aumentos.



Notas:

- (1): P1 y P2 corresponden a los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 respectivamente.
- (2): P10, P50 y P85 corresponden a las probabilidades de excedencia de 10%, 50% y 85%.

Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.4-9 Curvas de variación estacional de caudal (QMM) para todas las cuencas analizadas.

Para la macrozona centro, los resultados no son tan categóricos. Para la cuenca del río Aconcagua se aprecian reducciones de caudal para P10, P50 y P85, sin existir un cambio estacional (adelantos ni retrocesos en el caudal peak), pero si una reducción del caudal máximo. Probablemente este cambio se vea más acentuado en una probabilidad más extrema (5%).

En el caso de la cuenca del río Maipo, si bien hay leves reducciones para P50 y P85, el cambio más relevante se da en el mes de ocurrencia del caudal peak, pasando de enero a diciembre, aunque este cambio puede no ser robusto, debido a la gran similitud que se observa en el resto de los meses.

La macrozona sur es la que presenta mayores diferencias entre ambos periodos analizados. La cuenca del río Bío-Bío presenta comportamientos diferentes para cada probabilidad analizada. En general el peak de invierno se alcanza en el mes de julio y no junio (P10), sin

embargo, para P50 este cambio no se aprecia, lo que significa que hay una respuesta distinta sólo asociada a los eventos extremos. Asimismo, para el resto de los meses, P10 suele presentar leves disminuciones para el resto de los meses. Si ahora se analiza P50, se observa que durante los meses abril a septiembre, existe una escorrentía mayor que la apreciada en P1, es decir, en el periodo de acumulación. Este cambio se revierte desde los meses de octubre a marzo, donde la escorrentía es menor que en P1, por lo tanto, el régimen pluvial es más marcado, y a la vez, el régimen nival pierde fuerza. P85 es en general más consistente y se aprecian leves disminuciones en todos los meses salvo en junio.

En Imperial el comportamiento es similar, los caudales peak observados en julio son mayores (en P2), en magnitud para P10, P50 y P85. Sólo para P85 se observa un adelanto del caudal peak de agosto a julio. Adicionalmente, las probabilidades P50 y P85 presentan recesiones menores en P2 que en P1, lo que comunica de una menor escorrentía en los meses de deshielo (octubre a marzo).

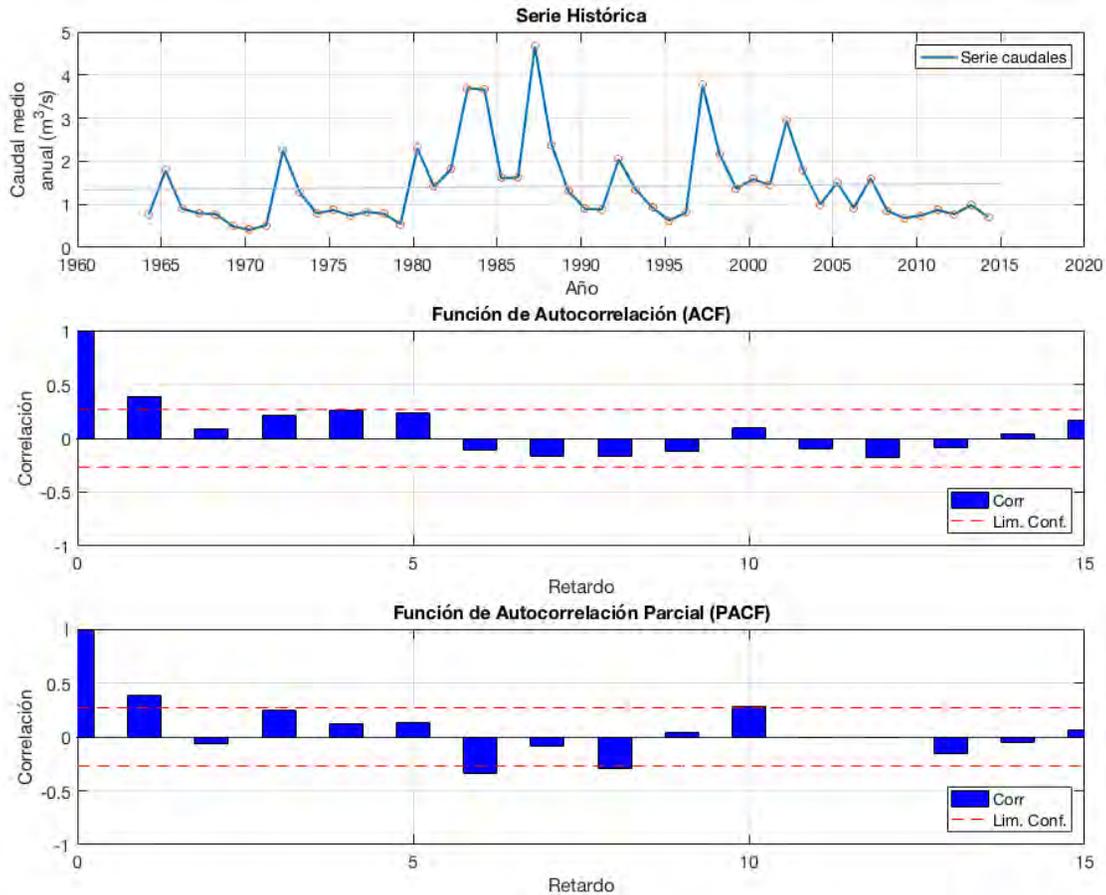
Finalmente, la cuenca de río Aysén no presenta cambios significativos para P10 y P85, sino que leves aumentos para P50. Sin embargo, se debe tener en cuenta el corto periodo de registro utilizado en esta estación (35 años), por lo que los cambios expuestos pueden no ser concluyentes.

6.4.2 Estacionareidad de Series Fluviométricas

De acuerdo a la metodología presentada en el acápite 5.3.3, se obtuvieron los resultados del análisis de ACF, PACF, y test de tendencia, tras lo cual se definió una estación como estacionaria si cumplía con los siguientes criterios:

- a) Tres o menos desfases mostraron ACF o PACF estadísticamente significativa
- b) No se presentaban tendencias estadísticamente significativas.

Un ejemplo de los resultados de los test de estacionareidad se presenta en la Figura 6.4-10 para la estación Pulido en Vertedero (cuenca río Copiapó).



Nota: El panel superior muestra los valores de la serie histórica (valores anuales). El panel del medio muestra los resultados de los test de ACF, y el panel inferior muestra los resultados de los test de PACF. La línea roja punteada identifica el nivel de significancia estadística del test para cada retardo. Los valores que exceden la línea roja (ya sea en términos de correlación positiva o negativa) denotan un test de significancia alta. Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.4-10 Ejemplo de resultados de test ACF y PACF para la estación Pulido en Vertedero (cuena río Copiapó).

Los resultados de los test ACF y PACF para cada una de las series de tiempo analizadas se resumen en el Cuadro 6.4-4, mientras que las Figuras asociadas a cada una de las ACF y PACF evaluadas se presentan en el Anexo I.

Cuadro 6.4-4 Resumen de Resultados de Análisis de Estacionalidad

Macrozona	Cuenca	Nombre Estación	Código BNA	Estac. Anual	Estac. Verano	Estac. Invierno	
Norte	Loa	Río Loa en Lequena	02101002-2	Sí	Sí	Sí	
	Copiapó	Jorquera en Vertedero	03404001-K	Sí	Sí	Sí	
		Manflas en Vertedero	03421001-2	No	No	Sí	
		Pulido en Vertedero	03414001-4	Sí	Sí	Sí	
		Copiapó en Pastillo	03430003-8	Sí	Sí	Sí	
	Limarí	Hurtado en Angostura	04503001-6	Sí	Sí	Sí	
		Hurtado en San Agustín	04501001-5	Sí	Sí	Sí	
		Molles en Ojos de Agua	04520001-9	Sí	Sí	Sí	
		Mostazal en Cuestecita	04514001-6	Sí	Sí	Sí	
		Grande en las Ramadas	04511002-8	Sí	Sí	Sí	
		Tascadero en Desembocadura	04512001-5	Sí	Sí	No	
		Cogotí en Fragueta	04530001-3	Sí	Sí	Sí	
	Centro	Aconcagua	Combarbalá en Ramadillas	04532001-4	No	Sí	No
Juncal en Juncal			05401003-6	No	No	Sí	
Putando en Resguardo los Patos			05414001-0	Sí	Sí	Sí	
Pocuro en el Sifón			05411001-4	Sí	Sí	Sí	
Maipo		Aconcagua en Chacabuquito	05410002-7	Sí	Sí	Sí	
		Arrayan en la Montosa	05722001-5	Sí	Sí	No	
		Mapocho en los Almendros	05722002-3	No	No	Sí	
Sur	Imperial	Maipo en San Alfonso	05704002-5	Sí	Sí	Sí	
		Bío-Bío	Bío-Bío en Rucalhue	08317001-8	Sí	No	Sí
		Traiguén en Victoria	09104001-8	Sí	Sí	Sí	
		Purén en Tranamán	09101001-1	Sí	Sí	Sí	
		Lumaco en Lumaco	09102001-7	Sí	Sí	Sí	
		Cautín en Rari Ruca	09123001-1	Sí	No	Sí	
		Quepe en Vilcún	09131001-5	Sí	Sí	Sí	
Austral	Aysén	Quepe en Quepe	09135001-7	Sí	Sí	Sí	
		Coyhaique en Tejas Verdes	11316001-2	No	No	No	
		Huemules frente río Galera	11310001-K	Sí	Sí	Sí	

Fuente: Elaboración Propia.

En general, se observa que existe al menos una serie estacionaria por cada cuenca analizada. Sin embargo, las mayores dificultades se presentan para la cuenca de los ríos Loa y Aysén, debido a que presentan muchos vacíos de información, los cuales no pueden ser rellenados con otras estaciones en régimen natural que se conozcan.

Adicionalmente, se han efectuado análisis de tendencias de caudal, mediante el cálculo del estadístico de Kendall, de manera de conocer la señal general de la oferta hídrica. Los resultados pueden observarse en el Cuadro 6.4-5.

Cuadro 6.4-5 Resultados del análisis de tendencia sobre las series de caudal escogidas.

Macrozona	Cuenca	Nombre Estación	Código BNA	Tendencia Anual	Tendencia Invierno	Tendencia Verano
Norte	Loa	Rio Loa en Lequena	02101002-2	No	No	No
	Copiapó	Jorquera en Vertedero	03404001-K	No	No	No
		Manflas en Vertedero	03421001-2	Si	Si	No
		Pulido en Vertedero	03414001-4	No	No	No
		Copiapó en Pastillo	03430003-8	No	No	No
	Limarí	Hurtado en Angostura	04503001-6	No	No	No
		Hurtado en San Agustín	04501001-5	No	No	No
		Molles en Ojos de Agua	04520001-9	No	No	No
		Mostazal en Cuestecita	04514001-6	No	No	No
		Grande en las Ramadas	04511002-8	No	No	No
		Tascadero en Desembocadura	04512001-5	No	No	No
		Cogotí en Fragueta	04530001-3	No	No	No
	Combarbalá en Ramadillas	04532001-4	Si	No	Si	
Centro	Aconcagua	Juncal en Juncal	05401003-6	Si	Si	No
		Putando en Resguardo los Patos	05414001-0	No	No	No
		Pocuro en el Sifón	05411001-4	No	No	No
		Aconcagua en Chacabuquito	05410002-7	No	No	No
	Maipo	Arrayan en la Montosa	05722001-5	No	No	No
		Mapocho en los Almendros	05722002-3	Si	Si	No
		Maipo en San Alfonso	05704002-5	No	No	No
Sur	Bío-Bío	Bío-Bío en Rucalhue	08317001-8	No	Si	No
	Imperial	Traiguén en Victoria	09104001-8	No	No	No
		Purén en Tranamán	09101001-1	No	No	No
		Lumaco en Lumaco	09102001-7	No	No	No
		Cautín en Rari Ruca	09123001-1	No	Si	No
		Quepe en Vilcún	09131001-5	No	No	No
		Quepe en Quepe	09135001-7	No	No	No
Austral	Aysén	Coyhaique en Tejas Verdes	11316001-2	Si	Si	Si
		Huemules frente río Galera	11310001-K	No	No	No

Fuente: Elaboración Propia.

Como se puede apreciar 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 la cuenca del río Copiapó y Combarbalá en Ramaditas (Anual y Verano) en la cuenca del río 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, la estación Mapocho en los Almendros, de régimen mixto nivo-pluvial, 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. En la cuenca del río Bío-Bío, la estación Rucalhue es la que presenta una tendencia significativa hacia la baja en la agregación de invierno, la que también comparte la estación Cautín en Rari-Ruca en la cuenca del río 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.

Por lo tanto, del total de estaciones analizadas, los efectos de una tendencia a la baja en la oferta hídrica, es una señal que comienza a manifestarse de manera paulatina y solo en algunas cuencas, que debido a su régimen hidrológico han resultado más sensibles.

Para los propósitos de este trabajo, se ha escogido una estación de caudal representativa de cada cuenca, que pueda cumplir tanto los criterios estacionales como de no tendencia. Estas series son las que alimentan el proceso de análisis temporal de series fluviométricas, series que por lo demás deben pasar por un proceso de estandarización para remover cualquier ruido referente a comparación de magnitudes y de remoción de tendencia, aunque esta no sea significativa.

6.5 EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

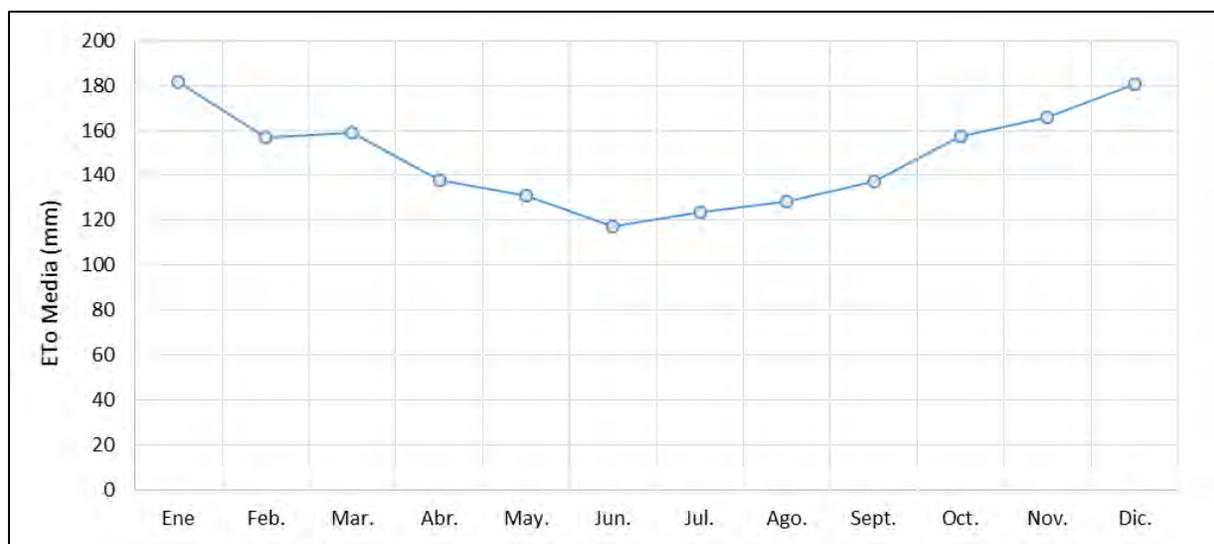
En los Cuadros 6.5-1 a 6.5-8 junto a las Figuras 6.5-1 a 6.5-16, se presenta un resumen de la información estadística correspondiente a la distribución espacial mensual y anual para cada cuenca, ordenadas de norte a sur. Los valores presentados corresponden a valores medios en cada cuenca obtenidos desde el estudio de CNR (2015).

A su vez, y a partir de la información GIS proporcionada en el estudio CNR (2015), se seleccionó la información de ETo mensual asociada espacialmente a cada cuenca analizada y se presenta la distribución a nivel nacional de la variable en la Figura B-28 perteneciente al Anexo B.

Cuadro 6.5-1 Estadísticos ETo Cuenca Río Loa (mm)

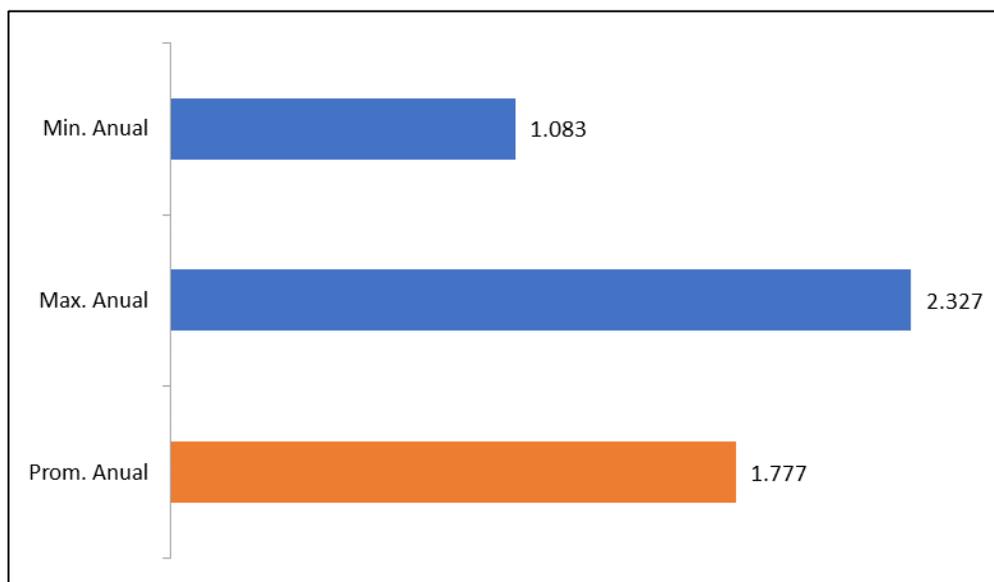
Parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Promedio	182	157	159	138	131	117	124	128	137	157	166	181	1.777
Mínimo	109	95	99	85	78	69	69	72	78	91	99	109	1.083
Máximo	227	196	206	187	175	160	171	177	184	204	214	227	2.327

Fuente: Elaboración Propia en base a CNR (2015).



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-1 Variación Mensual ETo Cuenca Loa



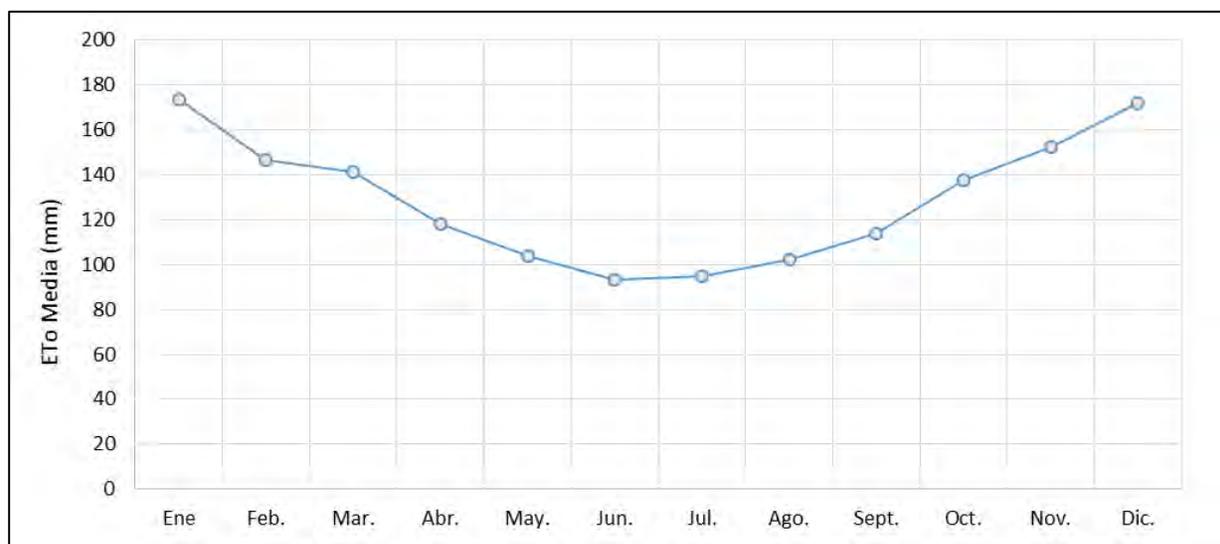
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-2 Estadísticos ETo Cuenca Loa Escala Anual

Cuadro 6.5-2 Estadísticos ETo Cuenca Río Copiapó (mm)

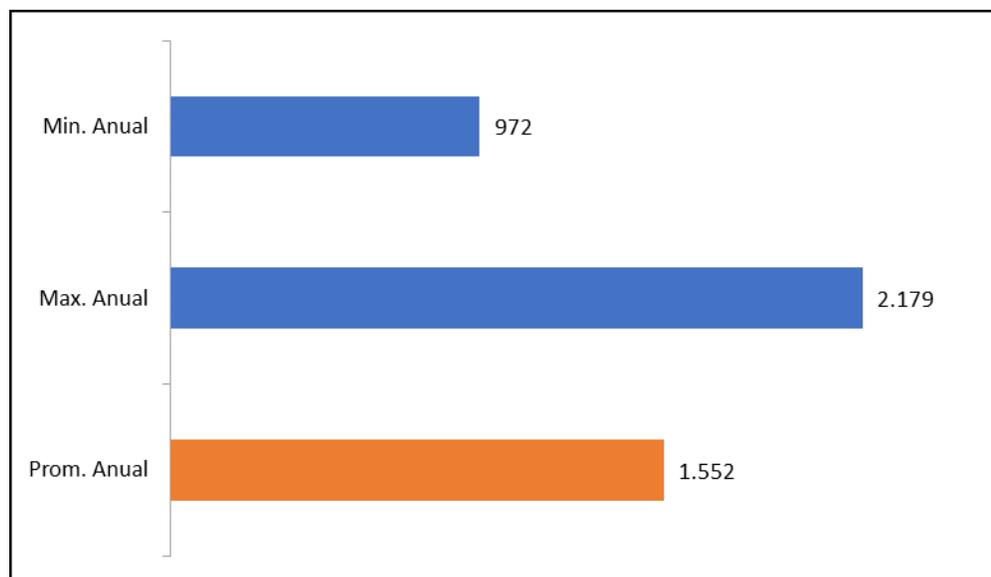
Parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Promedio	174	147	142	118	104	93	95	102	114	138	153	172	1.552
Mínimo	112	92	90	72	64	57	56	59	69	84	94	106	972
Máximo	241	204	200	172	154	138	146	157	169	194	216	239	2.179

Fuente: Elaboración Propia en base a CNR (2015)



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-3 Variación Mensual ETo Cuenca Copiapó



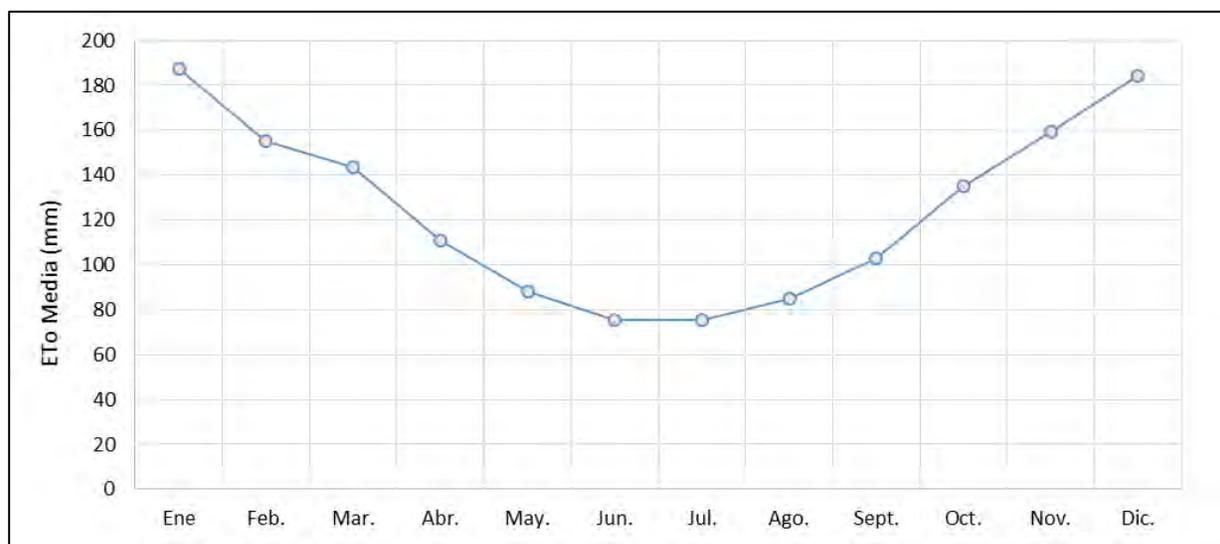
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-4 Estadísticos ETo Cuenca Copiapó Escala Anual

Cuadro 6.5-3 Estadísticos ETo Cuenca Río Limarí (mm)

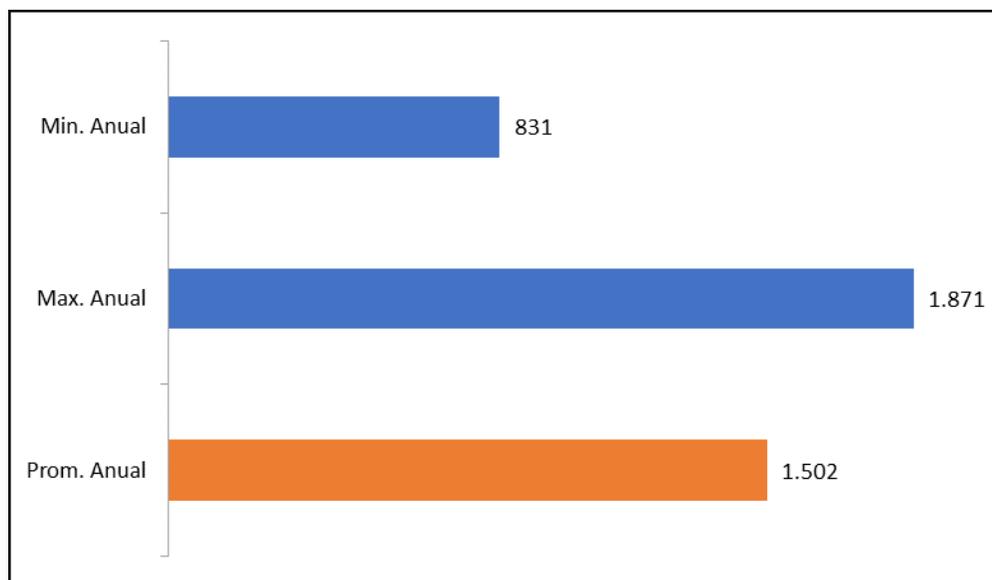
Parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Promedio	187	155	144	111	88	75	76	85	103	135	159	184	1.502
Mínimo	98	80	78	63	55	48	50	53	58	72	83	92	831
Máximo	232	191	179	141	115	103	102	114	132	169	198	227	1.871

Fuente: Elaboración Propia en base a CNR (2015)



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-5 Variación Mensual ETo Cuenca Limarí



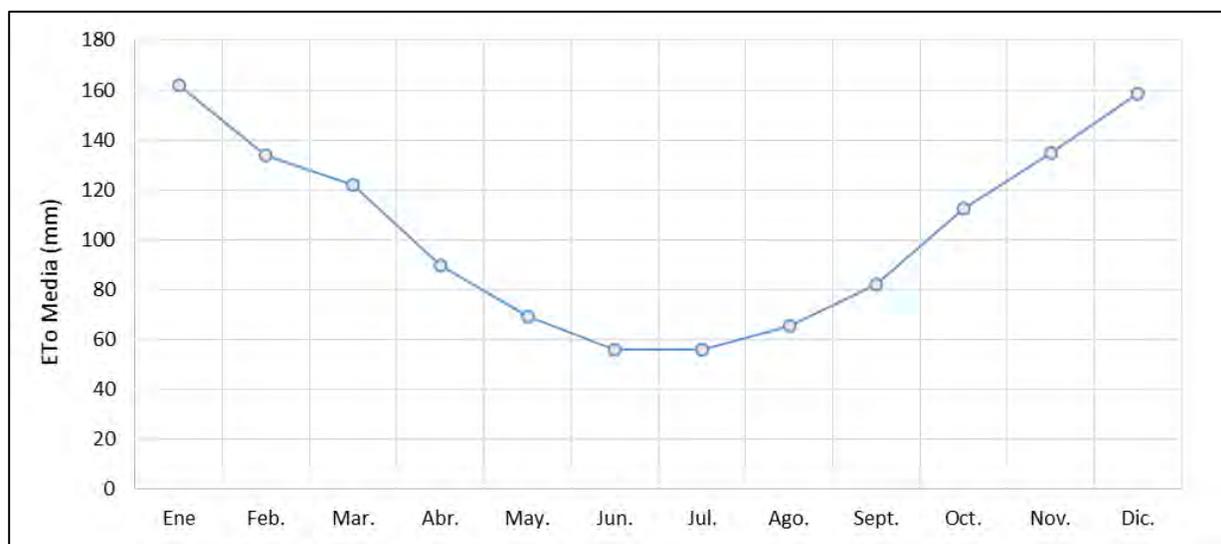
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-6 Estadísticos ETo Cuenca Limarí Escala Anual

Cuadro 6.5-4 Estadísticos ETo Cuenca Río Aconcagua (mm)

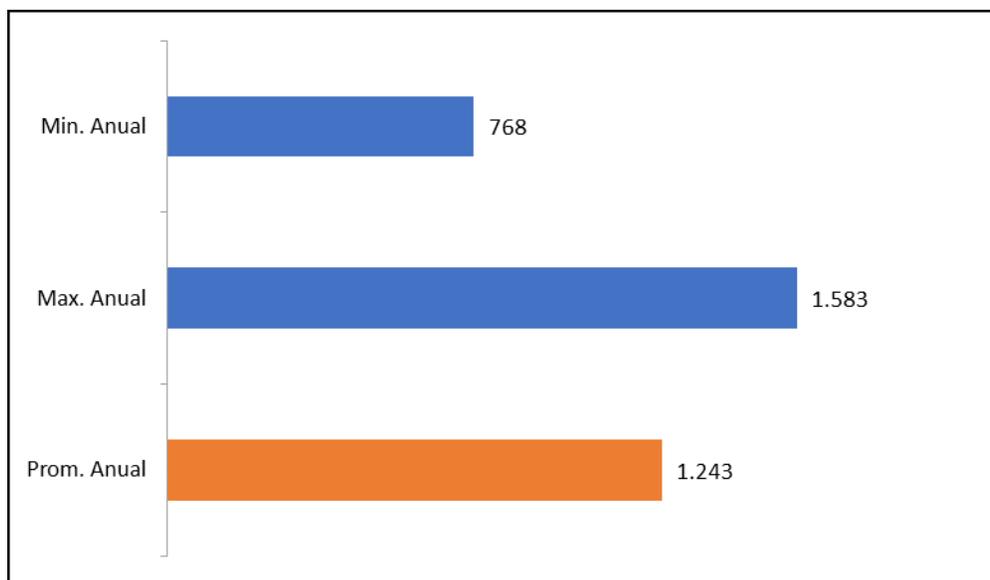
Parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Promedio	162	134	122	90	69	56	56	65	82	112	135	158	1.243
Mínimo	98	80	74	54	44	37	37	40	48	65	80	95	768
Máximo	205	169	154	116	95	88	89	97	109	144	169	198	1.583

Fuente: Elaboración Propia en base a CNR (2015)



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-7 Variación Mensual ETo Cuenca Aconcagua



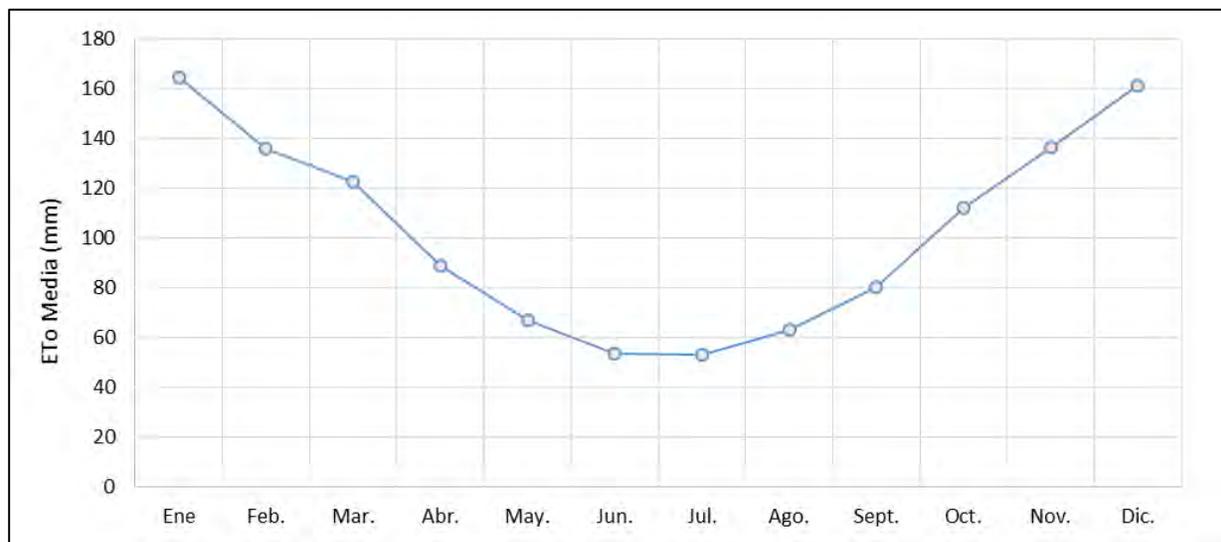
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-8 Estadísticos ETo Cuenca Aconcagua Escala Anual

Cuadro 6.5-5 Estadísticos ETo Cuenca Río Maipo (mm)

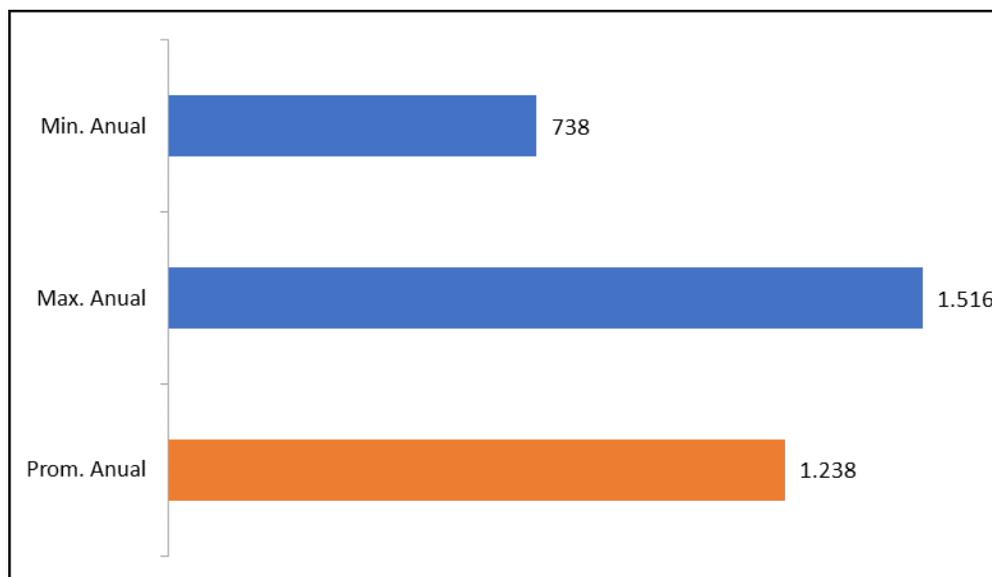
Parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Promedio	165	136	122	89	67	53	53	63	80	112	136	161	1.238
Mínimo	92	77	71	54	40	34	34	37	45	62	75	88	738
Máximo	204	168	152	112	88	80	81	88	99	136	165	198	1.516

Fuente: Elaboración Propia en base a CNR (2015)



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-9 Variación Mensual ETo Cuenca Maipo



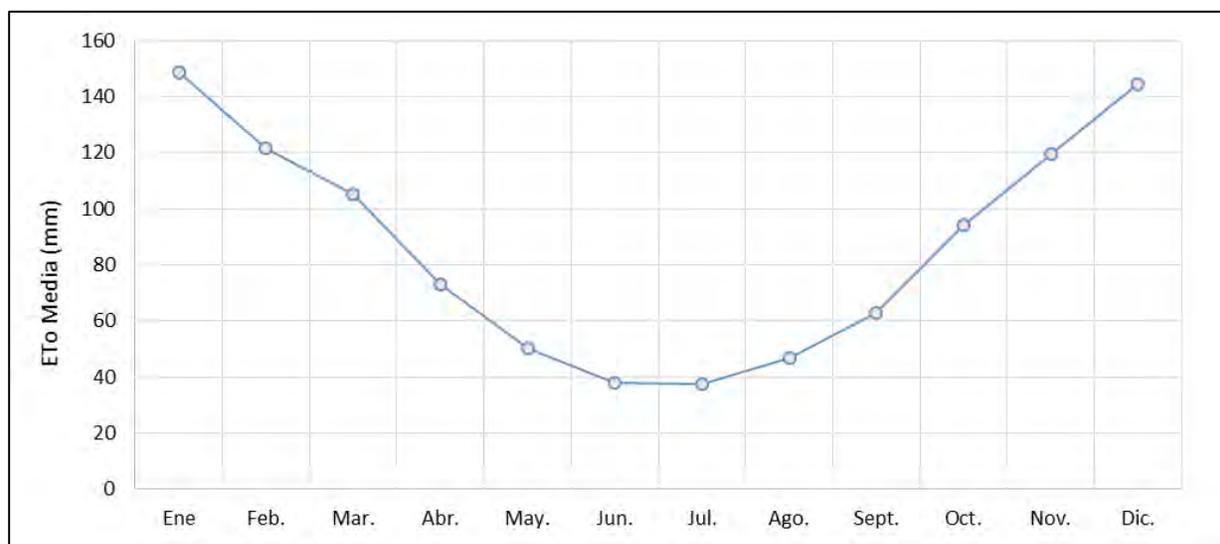
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-10 Estadísticos ETo Cuenca Maipo Escala Anual

Cuadro 6.5-6 Estadísticos ETo Cuenca Río Bío-Bío (mm)

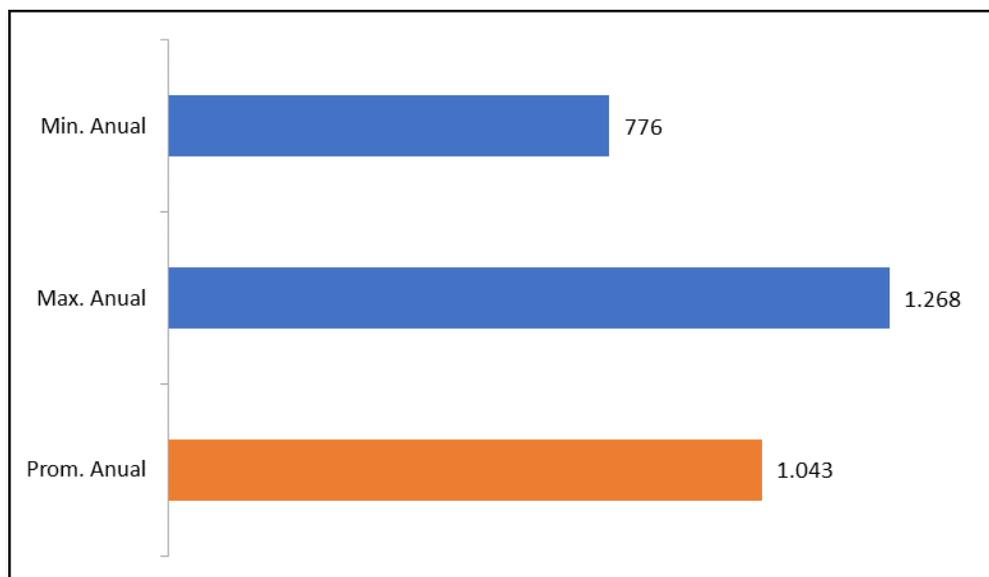
Parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Promedio	149	121	105	73	50	38	38	47	63	94	120	144	1.043
Mínimo	101	86	77	54	34	24	22	31	45	66	82	98	776
Máximo	186	148	127	91	71	59	58	68	77	113	144	177	1.268

Fuente: Elaboración Propia en base a CNR (2015)



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-11 Variación Mensual ETo Cuenca Bío-Bío



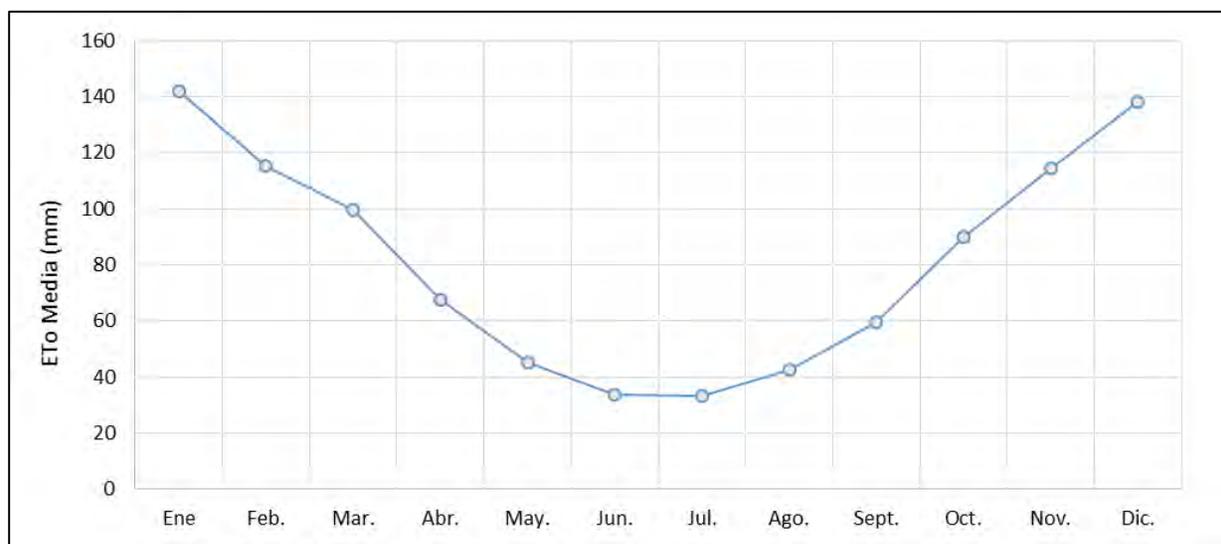
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-12 Estadísticos ETo Cuenca Bío-Bío Escala Anual

Cuadro 6.5-7 Estadísticos ETo Cuenca Río Imperial (mm)

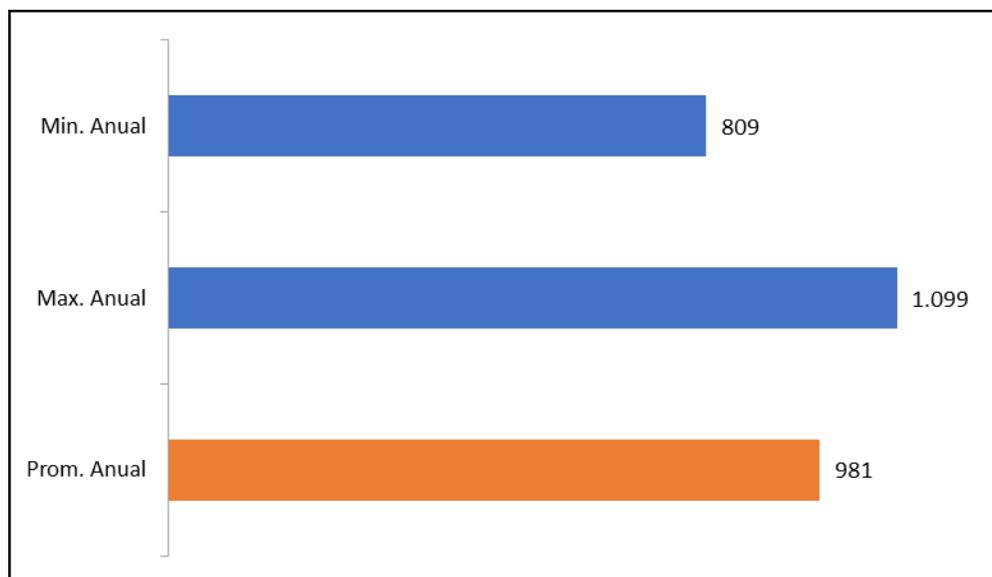
Parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Promedio	142	115	100	68	45	34	33	43	60	90	115	138	981
Mínimo	106	88	80	60	40	30	28	37	51	71	87	104	809
Máximo	161	131	112	84	60	51	52	59	69	99	129	155	1.099

Fuente: Elaboración Propia en base a CNR (2015)



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-13 Variación Mensual ETo Cuenca Imperial



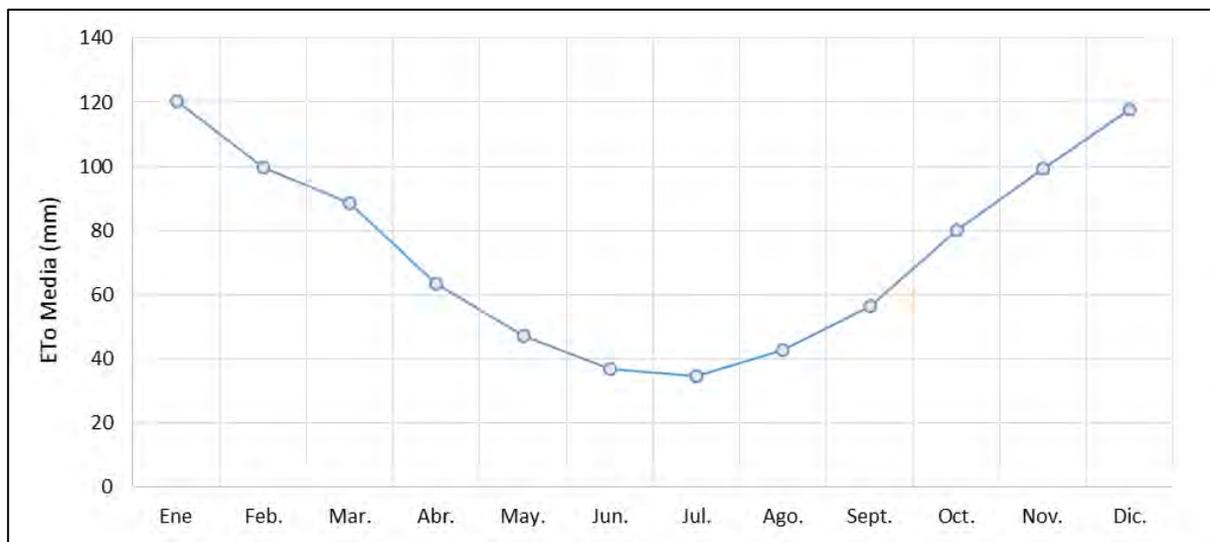
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-14 Estadísticos ETo Cuenca Imperial Escala Anual

Cuadro 6.5-8 Estadísticos ETo Cuenca Río Aysén (mm)

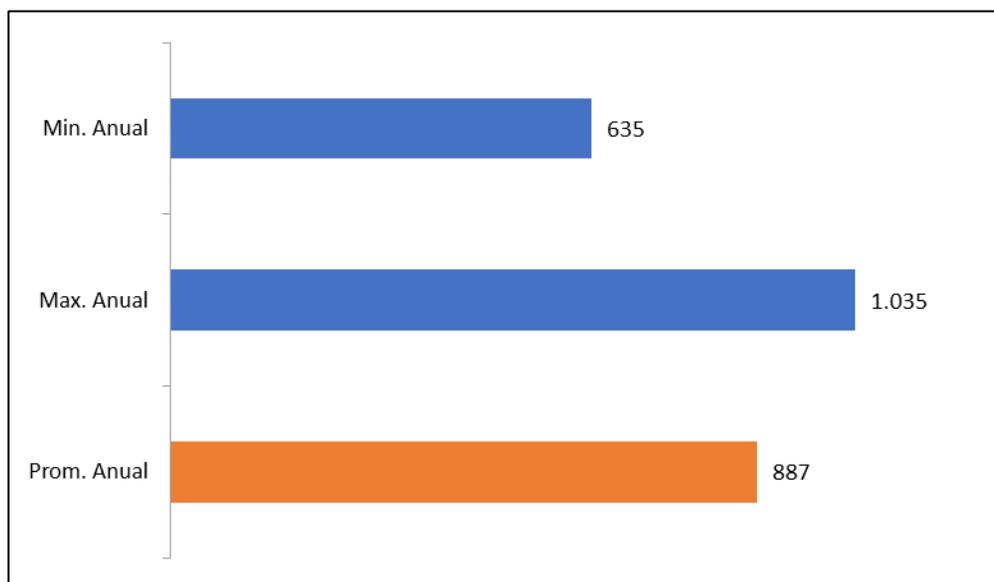
Parámetro	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
Promedio	121	100	89	63	47	37	35	43	56	80	99	118	887
Mínimo	80	68	63	47	37	30	29	34	42	56	68	80	635
Máximo	152	120	105	72	52	40	37	47	63	93	120	146	1.035

Fuente: Elaboración Propia en base a CNR (2015)



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-15 Variación Mensual ETo Cuenca Aysén



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.5-16 Estadísticos ETo Cuenca Aysén Escala Anual

A partir de los Cuadros y Figuras expuestas, 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.

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 río Loa, hasta los 700 mm/año en la parte baja de la cuenca del río 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 del río Aysén), y luego disminuye hacia la costa por el aumento de la nubosidad y humedad relativa por la cercanía con el mar.

6.6 NIEVE

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

6.6.1 Series de tiempo y climatología de Equivalente en Agua

La climatología de una variable hidrometeorológica es la caracterización del comportamiento esperado de la variable en un lapso de tiempo dado. Por lo tanto, mediante la climatología es posible evaluar de forma aproximada la disponibilidad de agua en la zona, empleando indicadores extraídos de las series de tiempo de las variables modeladas, tales como promedios anuales históricos, promedios estacionales históricos, mínimos y máximos históricos, tendencias, entre otros estadísticos. Mediante el uso de imágenes o series de datos distribuidos espacialmente, es posible representar estos estadísticos no solo para un punto, sino que para toda la cuenca.

Por ejemplo, la climatología de equivalente en agua máximo observado en una estación puede tener un valor de 100 (cm), valor que indica que en promedio se midieron 100 (cm) de equivalente en agua máximo anual en un periodo definido (por ejemplo, 50 años).

A continuación, en la Figura 6.6.1, se presentan los resultados de la estimación del equivalente en agua. A su vez, en las Figuras 6.6-2 a 6.6-7, se muestran los valores climatológicos del EA para cada una de las cuencas analizadas, además de su distribución espacial para cada mes. El respaldo digital de las figuras se integra al Anexo J.

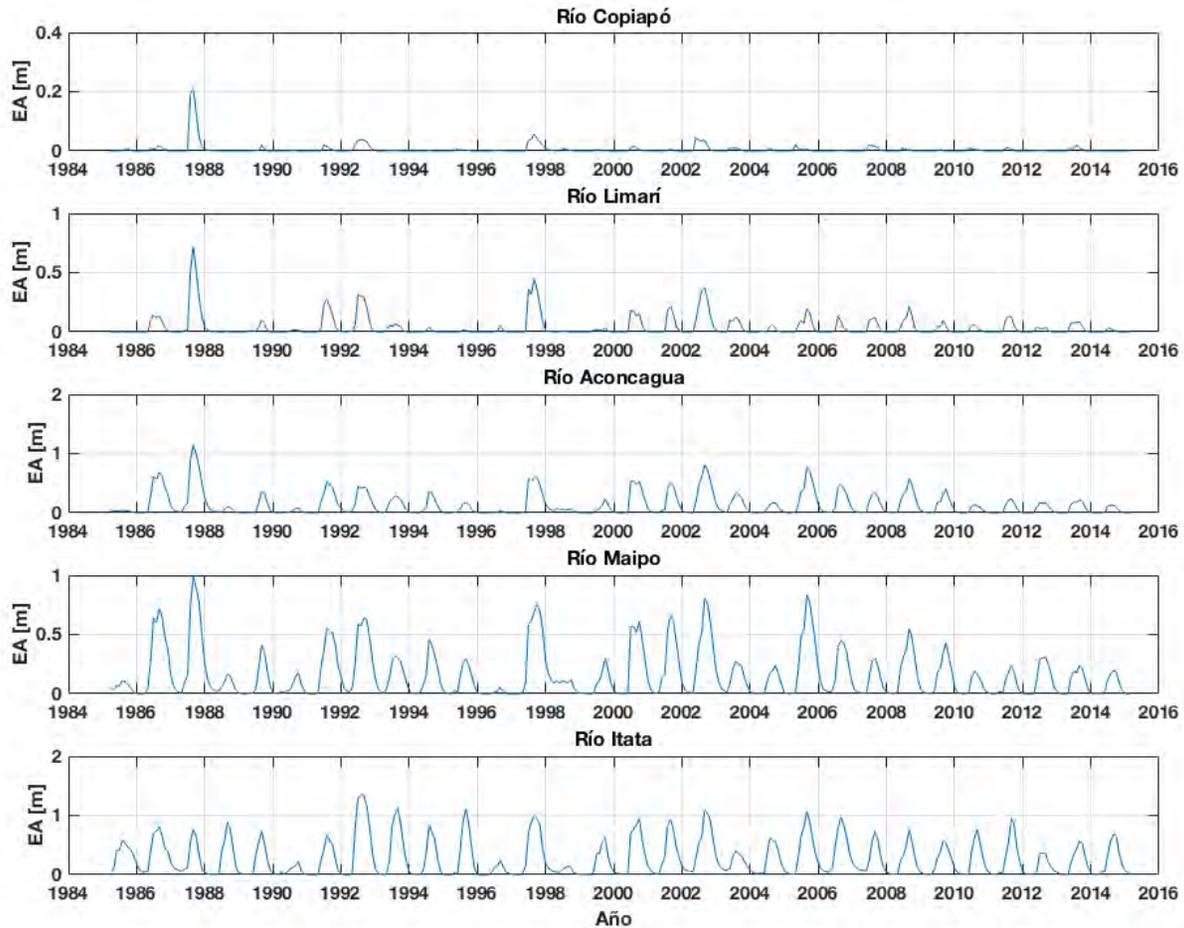


Figura 6.6-1 Serie de tiempo del Equivalente en Agua (EA) diario medio sobre las distintas cuencas analizadas en este estudio.

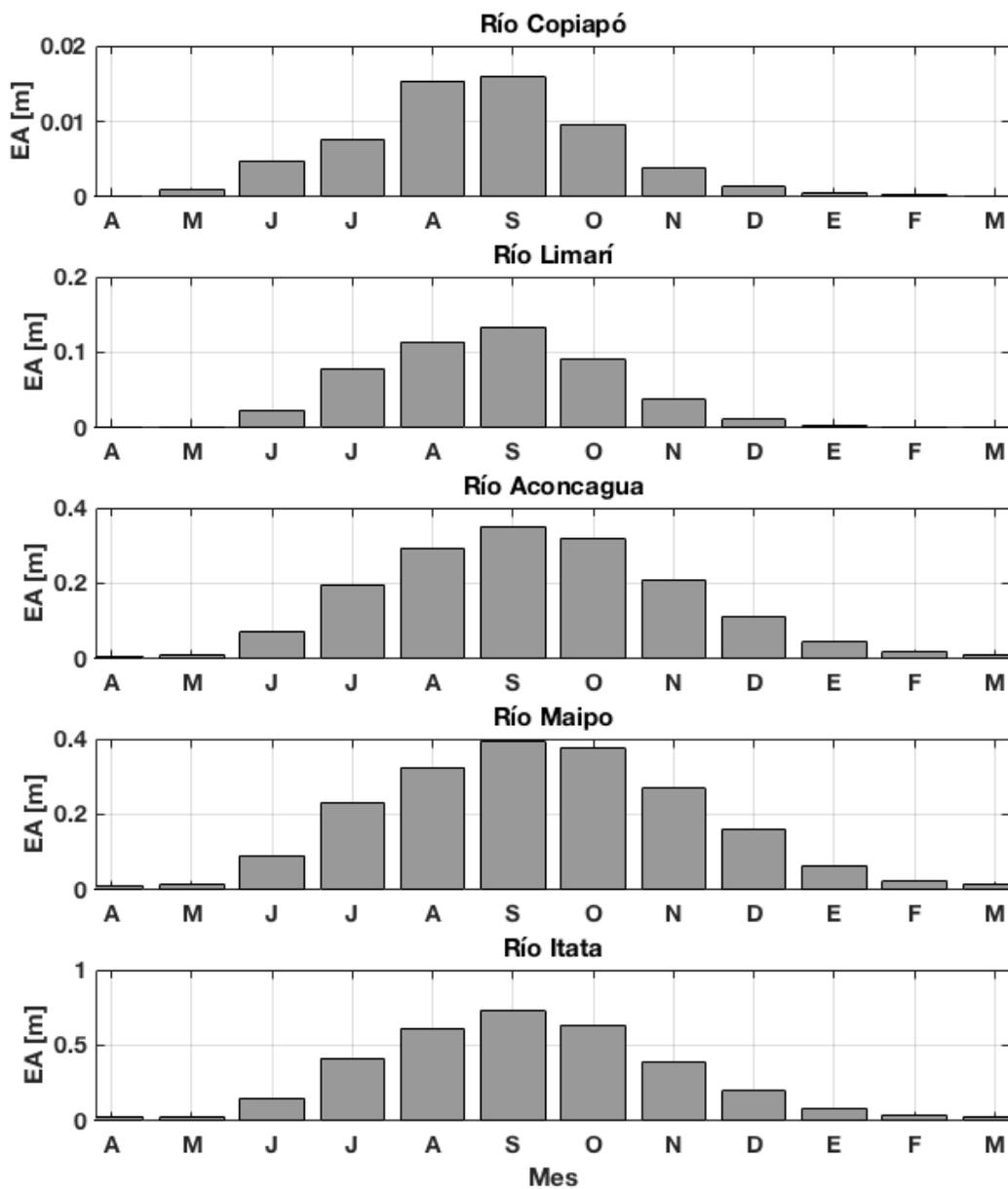
Para la cuenca del río Copiapó se observan en general equivalentes en agua bajos, exceptuando el año 1987-88 donde se aprecia un año extremadamente húmedo en comparación al resto. El año más seco de la serie corresponde al año 1998-99, un año correspondiente a un episodio de La Niña. Los valores de equivalente en agua medios para la cuenca están en el orden de 0 a 0,05 (m). El valor medio diario se calcula como el promedio diario de todos pixeles de la grilla modelada, para cada día del año.

Para la cuenca del río Limarí se observa una alta variabilidad interanual para el periodo 1985-2002, y una baja en la variabilidad para el periodo 2002-2014. El año más húmedo de la serie corresponde al año 1987-88, seguido por el año 1997-98. Ambos años corresponden a episodios de El Niño. El año más seco corresponde al año 1998-99. Los valores de equivalente en agua medios para la cuenca están en el rango de 0,1 a 0,5 (m).

Para la cuenca del río Aconcagua se observa una menor variabilidad interanual en comparación a las cuencas de la macrozona Norte. Esta reducción en la variabilidad interanual es también aparente en la cuenca del río Maipo. Los valores máximos y mínimos sobre estas dos cuencas corresponden a los mismos años de la macrozona Norte (1987-88 para el máximo y 1998-99 para el mínimo), aunque se observa que los años 1986-87 y 2005-06 pasan a tener valores significativos dentro de la serie de tiempo analizada. Para ambas cuencas los valores medios de equivalente en agua máximo están en el orden de 0,2 a 1 (m).

Para la cuenca del río Itata se observa una reducida variabilidad interanual, con la mayoría de los años presentando valores de EA del orden de 0,5 a 1(m), exceptuando los años 1990-91, 1996-97 y 1998-99 donde se observan reducciones significativas del EA observado. A diferencia de las otras cuencas, el valor máximo observado se registra en el año 1992-93 y el año 1987-88 no representa un año particularmente húmedo dentro de la serie de tiempo.

La metodología y resultados presentados aquí han sido validados en el trabajo de Cortés et al. (2016), donde se compararon las estimaciones de equivalente en agua con más de 2.000 puntos de medición a lo largo de la cordillera de los Andes, entre las cuencas del río Limarí y Cachapoal. Los resultados indican un sesgo nulo en las estimaciones de equivalente en agua, con un error medio de 1 cm y un error cuadrático medio de 0,129 m. Se observó una correlación entre los valores medidos y los estimados de 0,87.



Nota: El valor graficado corresponde al valor promedio de EA para el primero de cada mes, entre los años 1984 y 2014.

Figura 6.6-2 Climatología de EA para cada una de las cuencas analizadas.

En términos de la variación estacional del EA, es importante recalcar que está ligada directamente al régimen de precipitaciones de la cuenca. 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.

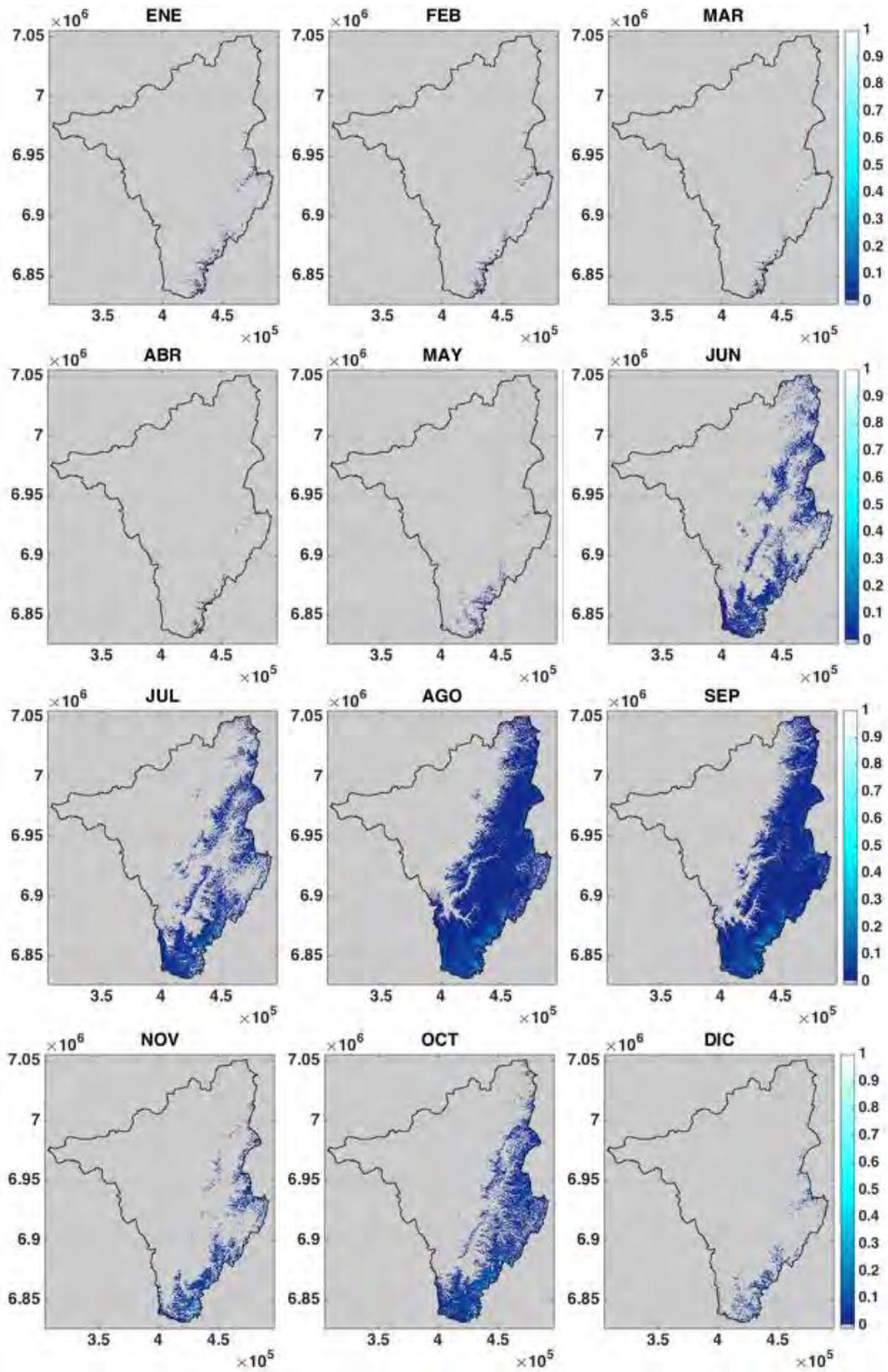


Figura 6.6-3 Equivalente en Agua de Nieve mensual (m) para la cuenca del Río Copiapó.

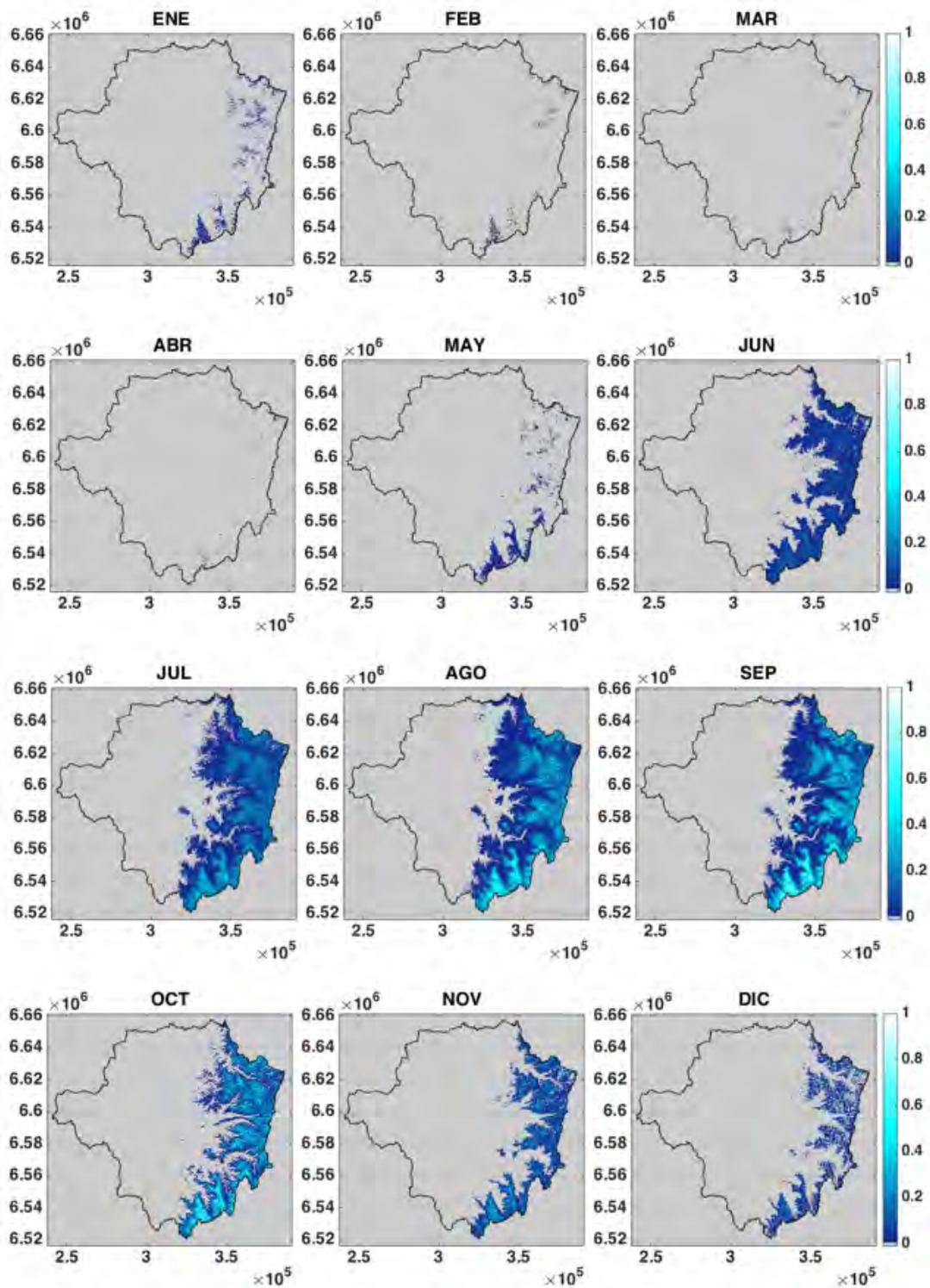


Figura 6.6-4 Equivalente en Agua de Nieve mensual (m) para la cuenca del Río Limarí

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.

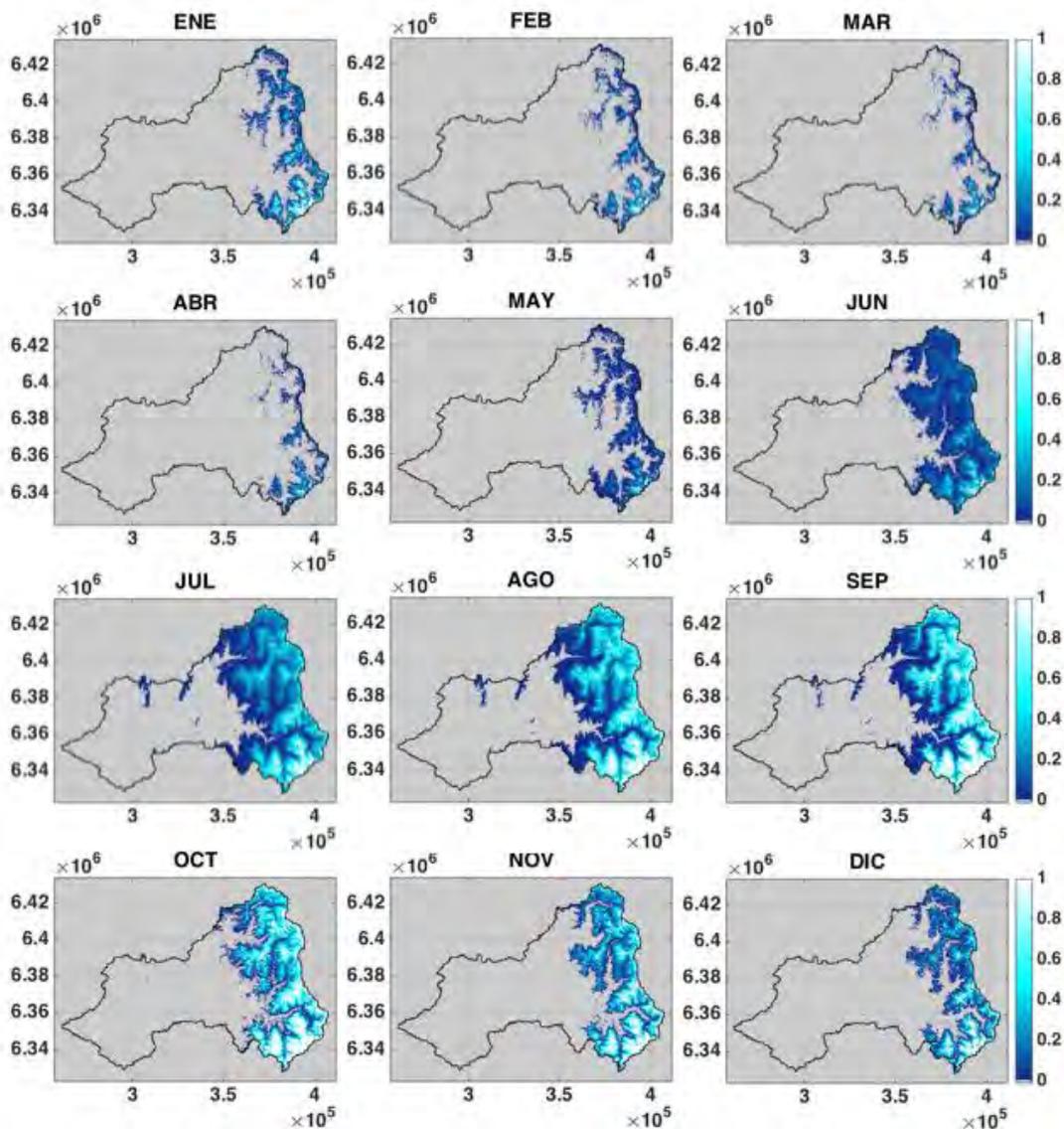


Figura 6.6-5 Equivalente en Agua de Nieve mensual (m) para la cuenca el Río Aconcagua

La cuenca del río Aconcagua presenta acumulaciones importantes de nieve entre los meses de junio a noviembre. A diferencia de las cuencas del norte, 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.

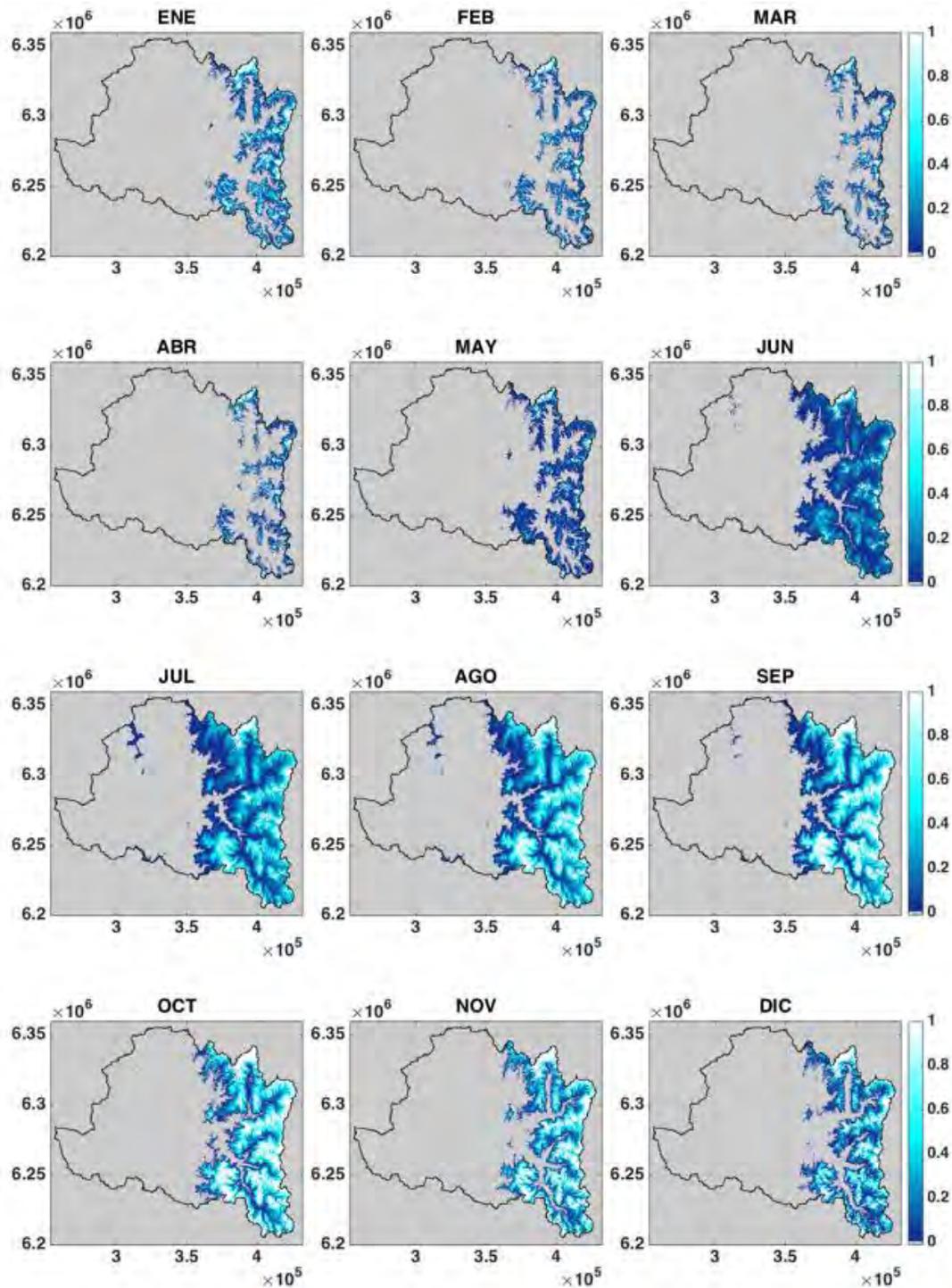
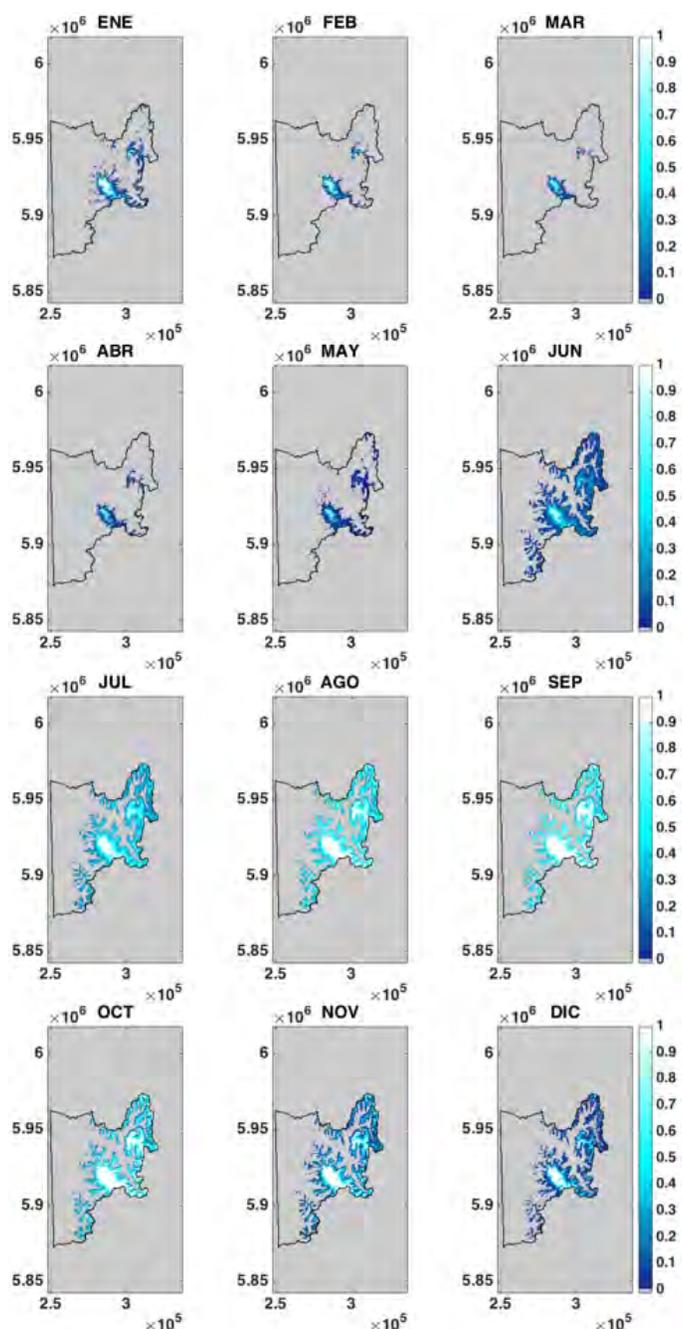


Figura 6.6-6 Equivalente en Agua de Nieve mensual (m) para la cuenca del Río Maipo

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.



Nota: Se muestra solo la parte alta de la cuenca.

Figura 6.6-7 Equivalente en Agua de Nieve mensual (m) para la cuenca del río Itata.

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.

6.6.1 Análisis de Sequías y Análisis de Tendencias

Como análisis complementario a los presentados anteriormente, se procedió a analizar las consecuencias de la sequía ocurrida durante los últimos años en la zona centro norte del país mediante una comparación de los equivalentes en agua estimados en el 1º de septiembre para el año 1997-98 y el año 2012-13. El año 1997-98 ha sido ampliamente validado como un año lluvioso para la mayoría de las hidrologías, por lo que es de esperarse que los efectos de la acumulación sean muy apreciables.

Además, se analizaron las tendencias en el equivalente en agua para los periodos 1985-2014 utilizando el test de Mann-Kendall de manera de identificar posibles cambios en el régimen de acumulación nival de las distintas cuencas.

En las Figuras 6.6-8 a 6.6-10, se presenta la comparación de un año húmedo (1997-98) y un año seco (2012-13) para cada una de las macrozonas de interés.

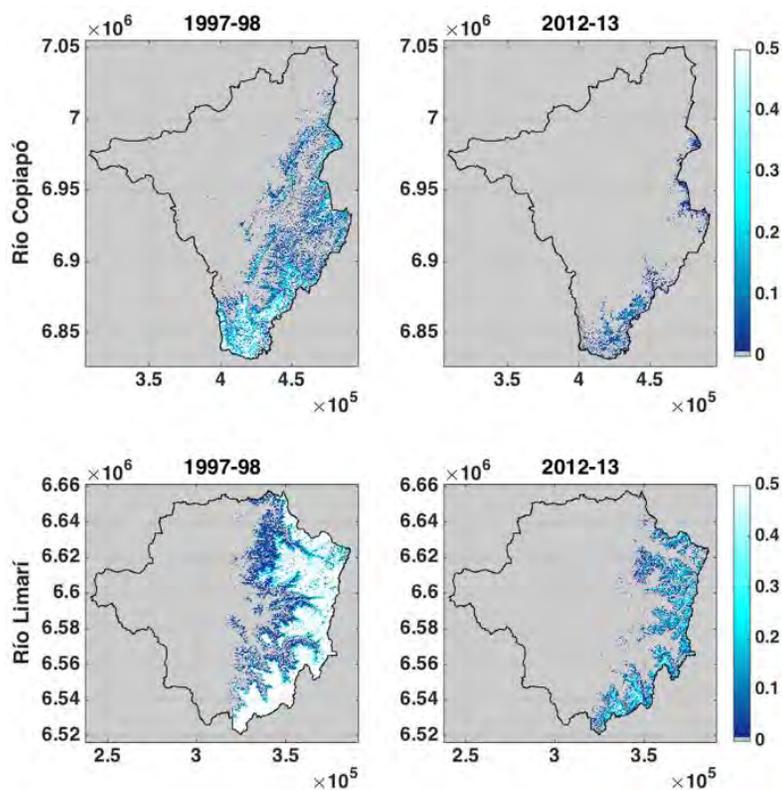


Figura 6.6-8 Comparación del Equivalente en Agua de Nieve (m) al 1º de septiembre de un año húmedo (1997-98) con un año seco (2012-13), cuencas macrozona Norte.

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.

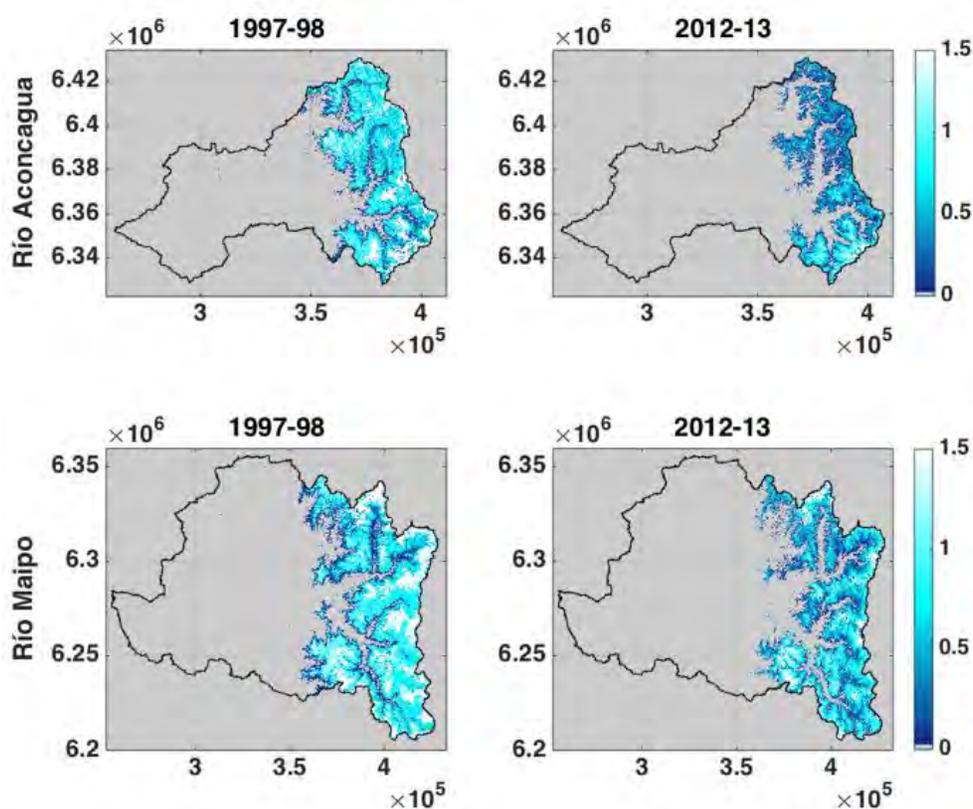


Figura 6.6-9 Comparación del Equivalente en Agua de Nieve (m) al 1º de septiembre de un año húmedo (1997-98) con un año seco (2012-13), cuencas macrozona Centro.

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.

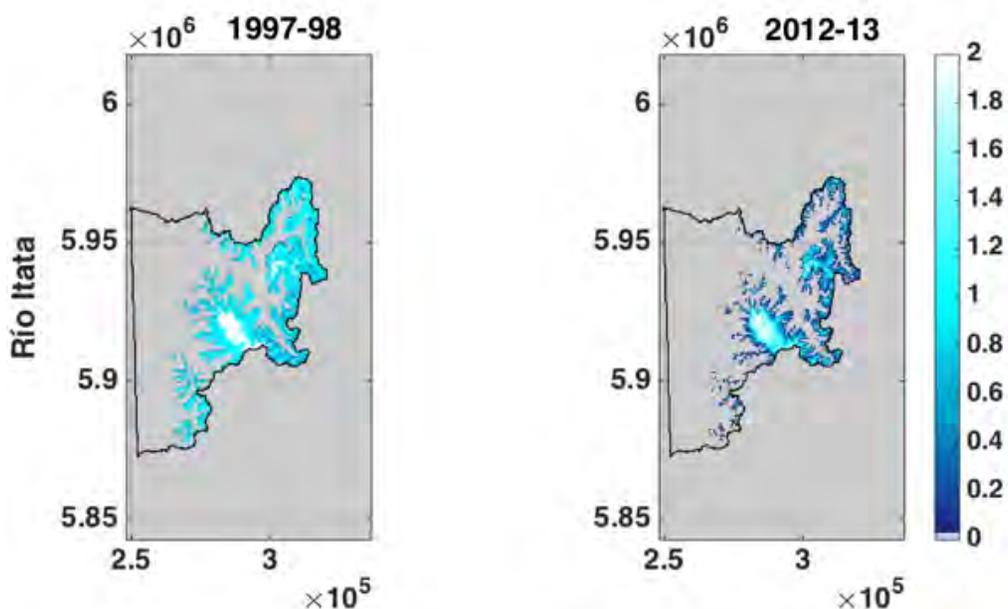


Figura 6.6-10 Comparación del Equivalente en Agua de Nieve (m) al 1º de septiembre de un año húmedo (1997-98) con un año seco (2012-13), cuencas macrozona Sur.

Finalmente, en el Cuadro 6.6-1, se presenta el resultado del análisis de tendencias de Mann-Kendall aplicado a los valores de cada mes para cada una de las cuencas analizadas en el periodo 1985-2014.

Cuadro 6.6-1 Resultados de test de tendencia de Mann-Kendall para las cuencas analizadas.

	Copiapó	Limarí	Aconcagua	Maipo	Itata
Abril	-0,46	-0,26	-0,15	-0,15	-0,03
Mayo	-0,24	-0,28	-0,38	-0,35	-0,04
Junio	0,00	-0,09	-0,13	-0,07	-0,09
Julio	0,07	0,16	0,09	0,05	-0,14
Agosto	0,04	0,03	-0,09	-0,15	-0,18
Septiembre	-0,12	0,02	-0,05	-0,07	-0,06
Octubre	-0,17	-0,03	-0,06	-0,10	-0,06
Noviembre	-0,15	-0,03	-0,06	-0,12	0,00
Diciembre	-0,14	-0,02	-0,08	-0,11	0,03
Enero	-0,19	-0,10	-0,11	-0,15	0,09
Febrero	-0,25	-0,06	-0,10	-0,16	0,05
Marzo	-0,22	-0,13	-0,09	-0,10	0,06

Notas:

(1): Valores estadísticamente significativos se presentan en negrita, en color rojo con tendencia negativa (reducción) y azul positiva (incremento).

(2): Resultados corresponden al análisis del periodo 1960 – 2014.

(3): Para test Mann Kendall, un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica. Un valor de 0 denota una tendencia “plana”.

Fuente: Elaboración Propia.

Los resultados de la evaluación de tendencias muestran consistencia en las tendencias detectadas. Todos los meses en general muestran tendencias negativas, siendo los meses de abril y mayo los que en general muestran significancia estadística. Las tendencias negativas son mayores en magnitud para la cuenca del río Copiapó. La cuenca del río Itata es la que presenta menor cantidad de meses con tendencia negativa.

6.7 RECARGA Y NIVELES DE POZOS

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

6.7.1 Generación de Estadística de Recarga Anual en Cuencas

A partir de la información descrita en los puntos anteriores, 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.

Así, en primer lugar, se calculó la curva número para cada uno de los tres sectores en cada cuenca, considerando la información de precipitación anual (Pp_s) y las ecuaciones 6.7-1 a 6.7-4.

Posteriormente, se calculó la recarga anual en cada sector, mediante la metodología descrita en el acápite 5.3.6. Luego, para obtener la recarga anual, se sumó la recarga de los sectores que componen una cuenca.

Es importante destacar que para el cálculo de la recarga al agua subterránea (Rec), según se indica en la metodología, ésta se compone de una porción pequeña de la retención inicial ($\beta \cdot Ia$) y una porción mayor de la escorrentía directa ($\alpha \cdot E$). El agua retenida como almacenamiento en el suelo (R) se considera que satisface los requerimientos de la evapotranspiración y parte de ella contribuye también a la percolación profunda ($\gamma \cdot R$).

De esta manera, para estimar los coeficientes empíricos mencionados, se adoptó la relación empírica que liga el parámetro α con el coeficiente de escorrentía (CE), según:

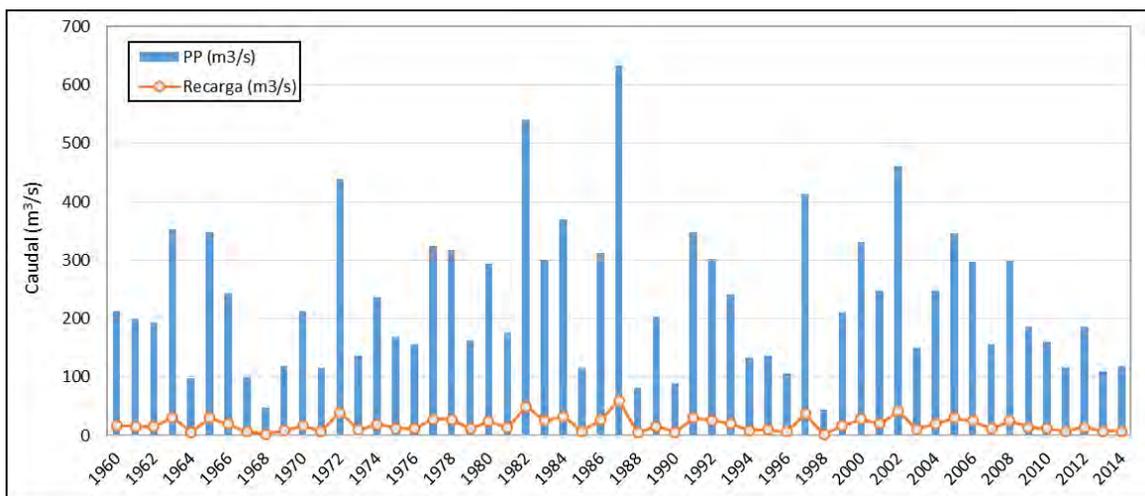
$$\alpha = 1 - C_E \quad \text{Ecuación 6.7-1}$$

De acuerdo a lo indicado por Benítez et al. (1980), el coeficiente de escorrentía (CE) varía de acuerdo a la pendiente media de la cuenca, al tipo de suelo y en función de la cobertura de éste. En su publicación indica una serie de valores que recomienda utilizar para la determinación de la escorrentía directa. Del mismo modo, de acuerdo a la bibliografía consultada, los parámetros β y γ , equivalen a un 50% y un 25%, respectivamente, del valor del parámetro α .

Por otro lado, es importante señalar que a partir de la información presentada en el Cuadro 4.3-2 del acápite 4.3, se cuenta con un valor medio de oferta hídrica subterránea en las cuencas analizadas, en base a la información recopilada en antecedentes públicos.

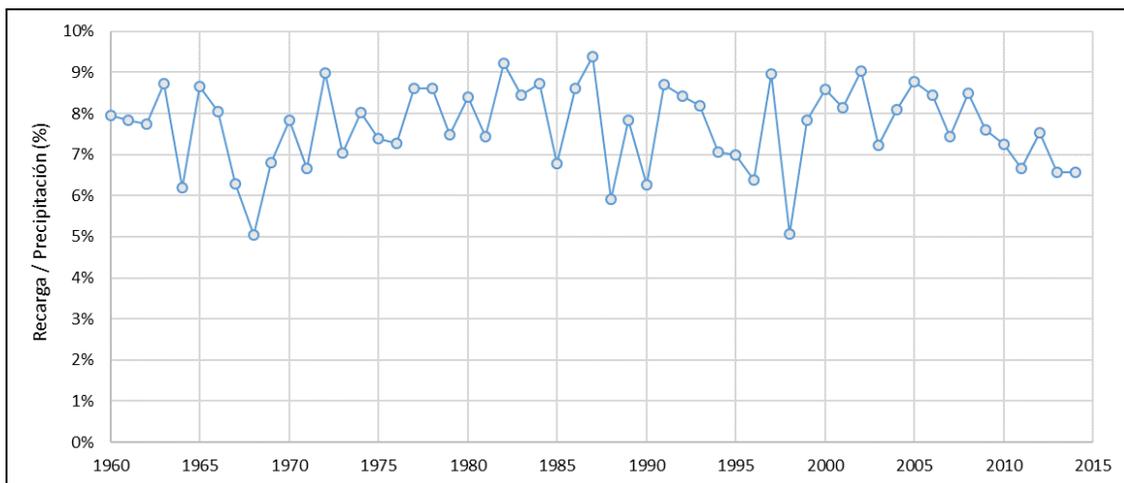
De esta forma, el cálculo de la recarga anual en las cuencas se realizó de manera tal que el promedio anual de los valores calculados fuese similar a los valores recopilados en los estudios revisados. Para esto, se ajustó los valores de los coeficientes empíricos que definen el cálculo de la recarga 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.

Como resultado final se presenta en la Figura 6.7-1 la serie de recarga y precipitación anual, mientras que la Figura 6.7-2 muestra la variación temporal del cociente entre la recarga y precipitación anual para la cuenca del río Aconcagua. Es posible consultar estos resultados para las cuencas restantes en el Anexo K.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-1 Precipitación Anual y Recarga Anual Cuenca Río Aconcagua



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-2 Variación del Cociente Recarga / Precipitación Cuenca Río Aconcagua

6.7.2 Análisis de Frecuencia para Recargas Anuales

Se realizó un análisis de frecuencia para las estadísticas de recargas anuales, calculadas en el acápite anterior, junto al análisis de dos periodos comprendidos por los primeros y últimos 29 años de estadística. Se definió este periodo de tiempo con el objetivo de comprender una serie estadísticamente aceptable para la representación del comportamiento de cada cuenca. Sin embargo, la longitud de las series es de 55 años, e incluso de 45 en el caso de la cuenca del río Loa, por lo tanto, los periodos definidos presentan un acople de años, sin que esto perjudique el objetivo del análisis.

A través de la realización del análisis en dos periodos, se puede observar las posibles diferencias en el comportamiento de las precipitaciones, asociadas a las recargas, que han afectado a cada cuenca en estudio.

De esta manera, se analizaron las siguientes distribuciones de probabilidad: Normal, Gumbel, Pearson III, Log Normal, Log Pearson III, Log Normal III y Gamma. En cada caso se seleccionó la distribución que presentó el mejor resultado en el análisis de bondad de ajuste mediante un test Chi-cuadrado.

Así, se obtuvieron las recargas anuales asociadas a las probabilidades de excedencia de 95%, 85%, 50%, 25%, 20%, 10%, 5%, 4%, 2%, 1% y 0.5%. En los Cuadros 6.7-1 a 6.7-16 se presenta un resumen de los resultados del análisis de frecuencia de las recargas anuales para cada cuenca junto a los estadísticos obtenidos en el cálculo de las series de recarga que podrían apoyar el análisis de posibles cambios de tendencia. Adicionalmente, las Figuras 6.7-3 a 6.7-10 presentan de manera gráfica los resultados del análisis de frecuencia de recarga anual para cada cuenca.

Cuadro 6.7-1 Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Loa (l/s)

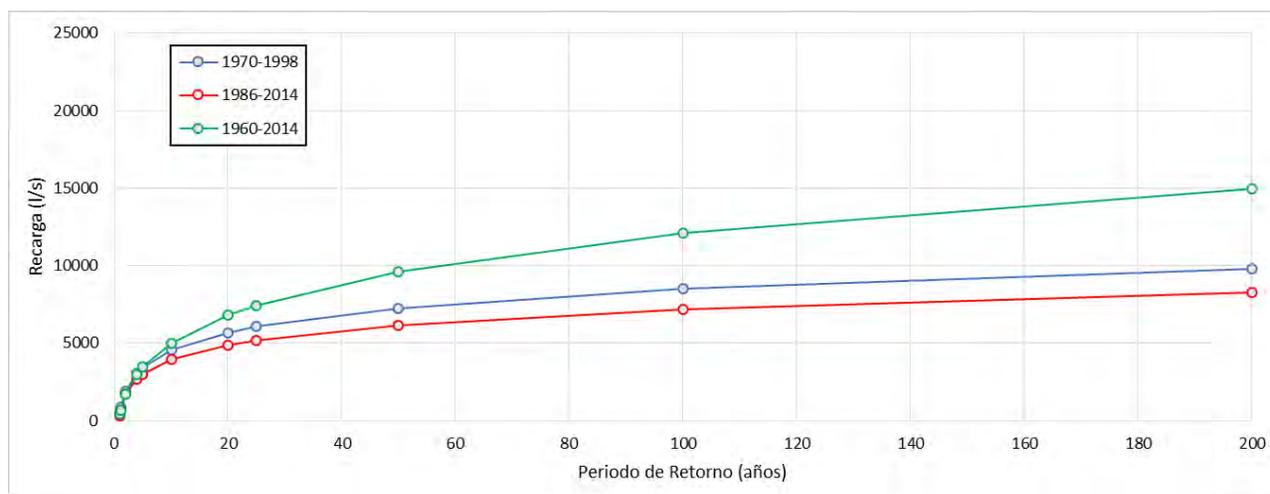
T (años)	1,1	1,2	2	4	5	10	20	25	50	100	200	Distribución
Pexc (%)	95	85	50	25	20	10	5	4	2	1	0,5	
1970 1998	523	863	1.900	3.046	3.407	4.535	5.686	6.063	7.258	8.490	9.760	LogPearson III
1986 2014	312	698	1.700	2.697	3.001	3.936	4.880	5.189	6.171	7.193	8.259	LogNormal III
1960 2014	420	703	1.690	2.991	3.446	5.000	6.800	7.438	9.612	12.107	14.953	LogNormal

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.7-2 Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Loa (m³/s)

Estadístico	1970 - 2014	1960 - 1988	1986 - 2014	Variación
Promedio	2,3	2,7	2,0	-24%
Media Geométrica	1,7	2,1	1,5	-28%
Max	6,5	6,1	6,5	6%
Min	0,2	0,3	0,2	-50%
Desviación Estandar	1,7	1,8	1,5	-18%

Fuente: Elaboración Propia.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-3 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Loa

Cuadro 6.7-3 Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Copiapó (l/s)

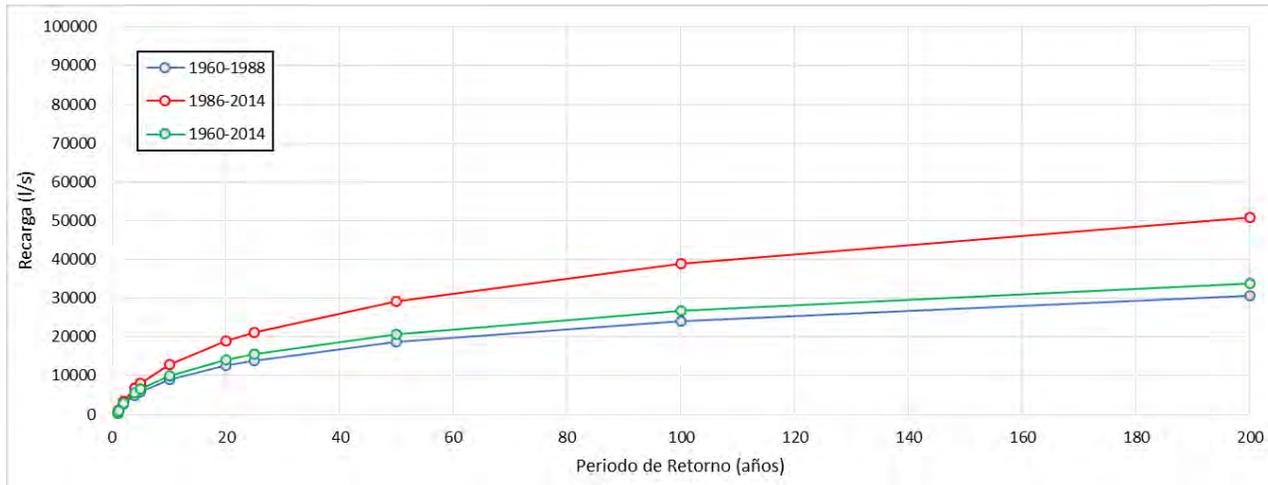
T (años)	1,1	1,2	2	4	5	10	20	25	50	100	200	Distribución
Pexc (%)	95	85	50	25	20	10	5	4	2	1	0,5	
1960 1988	352	881	2.579	4.969	5.837	8.905	12.606	13.947	18.625	24.153	30.634	LogNormal
1986 2014	587	1.117	3.340	6.813	8.129	12.941	18.997	21.246	29.266	39.036	50.812	LogNormal
1960 2014	442	995	2.929	5.636	6.613	10.045	14.157	15.641	20.797	26.859	33.931	LogNormal III

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.7-4 Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Copiapó (m³/s)

Estadístico	1970 - 2014	1960 - 1988	1986 - 2014	Variación
Promedio	4,6	4,1	5,4	32%
Media Geométrica	2,9	2,7	3,3	24%
Max	26,3	18,9	26,3	39%
Min	0,2	0,4	0,2	-40%
Desviación Estandar	5,0	4,4	5,7	31%

Fuente: Elaboración Propia.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-4 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Copiapó

Cuadro 6.7-5 Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Limarí (l/s)

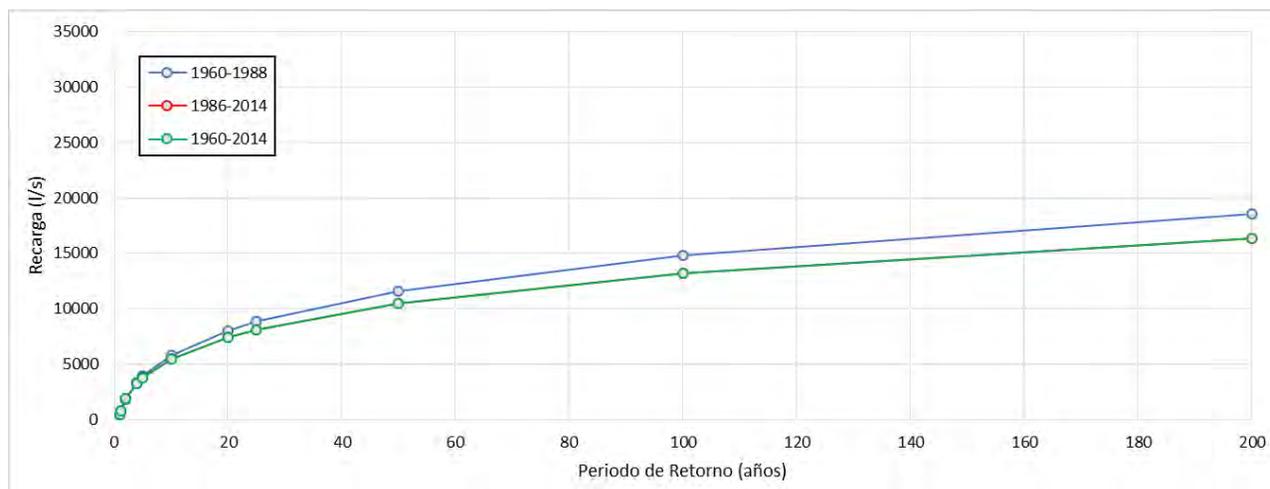
T (años)	1,1	1,2	2	4	5	10	20	25	50	100	200	Distribución
Pexc (%)	95	85	50	25	20	10	5	4	2	1	0,5	
1960 1988	414	717	1.825	3.351	3.896	5.791	8.034	8.838	11.613	14.847	18.590	LogNormal
1986 2014	459	768	1.846	3.268	3.764	5.463	7.429	8.125	10.501	13.226	16.336	LogNormal
1960 2014	455	762	1.837	3.256	3.753	5.451	7.420	8.118	10.499	13.233	16.354	LogNormal

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.7-6 Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Limarí (m³/s)

Estadístico	1970 - 2014	1960 - 1988	1986 - 2014	Variación
Promedio	2,6	2,6	2,6	-2%
Media Geométrica	1,8	1,8	1,8	1%
Max	10,1	7,7	10,1	31%
Min	0,3	0,4	0,3	-4%
Desviación Estandar	2,2	2,2	2,3	6%

Fuente: Elaboración Propia.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-5 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Limarí

Cuadro 6.7-7 Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Aconcagua (l/s)

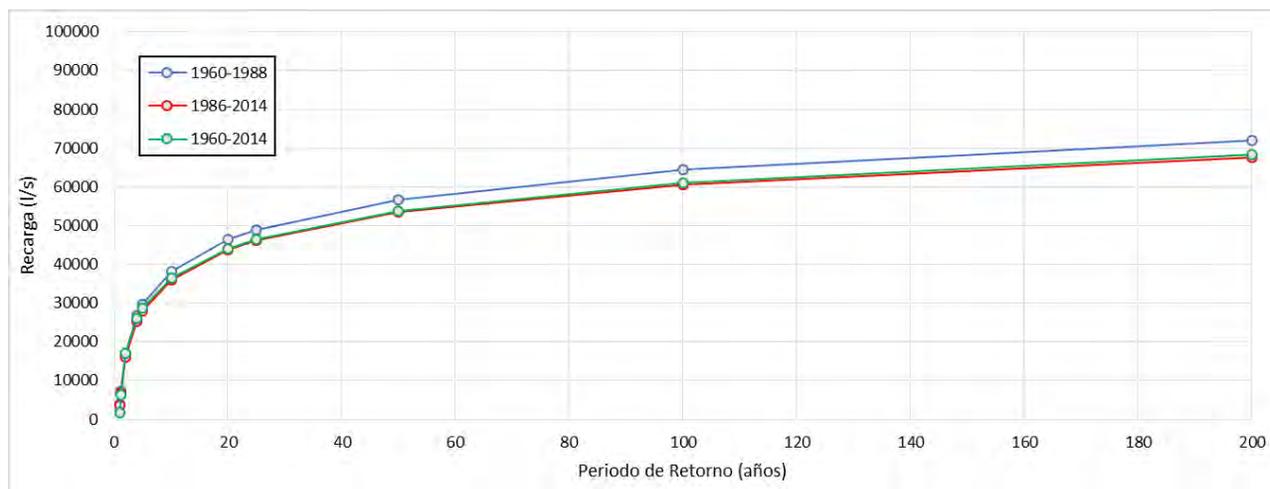
T (años)	1,1	1,2	2	4	5	10	20	25	50	100	200	Distribución
Pexc (%)	95	85	50	25	20	10	5	4	2	1	0,5	
1960 1988	3.878	7.206	17.004	26.807	29.704	38.271	46.408	48.965	56.760	64.381	71.871	Gamma
1986 2014	3.663	6.801	16.036	25.271	28.000	36.068	43.732	46.140	53.480	60.657	67.710	Gamma
1960 2014	1.686	6.448	16.944	26.111	28.759	36.582	44.086	46.466	53.798	61.077	68.329	Gumbel

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.7-8 Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Aconcagua (m³/s)

Estadístico	1970 - 2014	1960 - 1988	1986 - 2014	Variación
Promedio	18,8	20,0	18,9	-6%
Media Geométrica	15,1	15,8	14,9	-5%
Max	59,5	59,5	59,5	0%
Min	2,2	2,4	2,2	-7%
Desviación Estandar	12,2	13,7	12,9	-6%

Fuente: Elaboración Propia.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-6 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Aconcagua

Cuadro 6.7-9 Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Maipo (l/s)

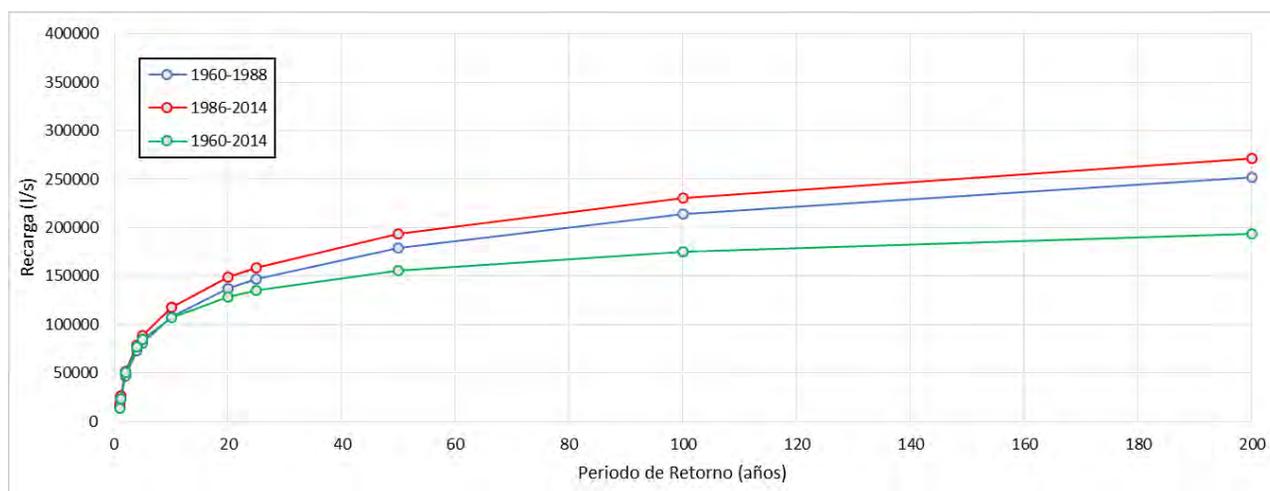
T (años)	1,1	1,2	2	4	5	10	20	25	50	100	200	Distribución
Pexc (%)	95	85	50	25	20	10	5	4	2	1	0,5	
1960-1988	15.980	23.779	46.801	72.714	81.103	108.107	137.065	146.877	179.035	213.933	251.803	LogNormal
1986-2014	17.654	26.174	51.193	79.217	88.267	117.345	148.454	158.980	193.435	230.763	271.204	LogNormal
1960-2014	13.504	23.393	50.758	77.084	84.758	107.261	128.446	135.072	155.202	174.797	193.987	Gamma

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.7-10 Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Maipo (m³/s)

Estadístico	1970 - 2014	1960 - 1988	1986 - 2014	Variación
Promedio	58,2	57,2	62,0	8%
Media Geométrica	48,3	46,8	51,2	9%
Max	159,4	159,4	151,8	-5%
Min	10,0	10,0	12,7	28%
Desviación Estandar	36,6	37,9	38,9	3%

Fuente: Elaboración Propia.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-7 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Maipo

Cuadro 6.7-11 Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Bío-Bío (l/s)

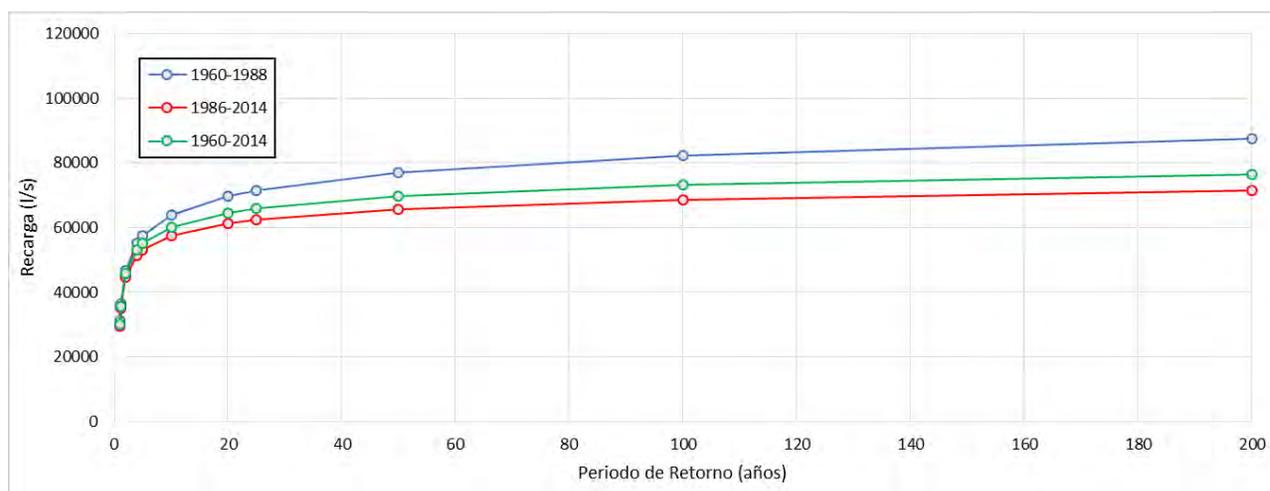
T (años)	1,1	1,2	2	4	5	10	20	25	50	100	200	Distribución
Pexc (%)	95	85	50	25	20	10	5	4	2	1	0,5	
1960-1988	31.352	36.350	46.765	55.097	57.381	63.858	69.754	71.572	77.043	82.322	87.469	LogNormal
1986-2014	29.437	34.967	44.779	51.439	53.123	57.625	61.417	62.535	65.767	68.716	71.450	LogNormal III
1960-2014	29.932	35.540	45.885	53.196	55.083	60.197	64.587	65.895	69.716	73.250	76.567	LogNormal III

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.7-12 Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Bío-Bío (m³/s)

Estadístico	1970 - 2014	1960 - 1988	1986 - 2014	Variación
Promedio	46,4	48,1	45,0	-6%
Media Geométrica	45,2	46,8	43,9	-6%
Max	69,6	69,6	64,7	-7%
Min	25,7	28,3	25,7	-9%
Desviación Estandar	10,5	11,3	9,7	-15%

Fuente: Elaboración Propia.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-8 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Bío-Bío

Cuadro 6.7-13 Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Imperial (l/s)

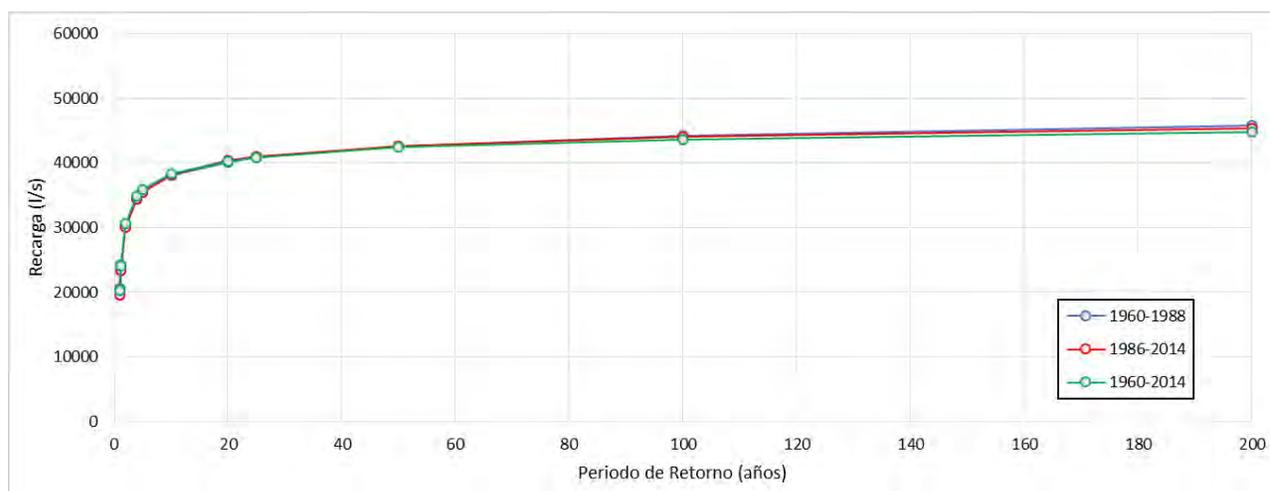
T (años)	1,1	1,2	2	4	5	10	20	25	50	100	200	Distribución
Pexc (%)	95	85	50	25	20	10	5	4	2	1	0,5	
1960-1988	20.565	24.195	30.379	34.403	35.400	38.025	40.193	40.824	42.632	44.259	45.747	Normal
1986-2014	19.512	23.308	30.073	34.457	35.518	38.239	40.385	40.990	42.668	44.100	45.344	LogPearson III
1960-2014	20.347	24.106	30.672	34.830	35.825	38.353	40.322	40.873	42.389	43.671	44.773	LogPearson III

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.7-14 Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Imperial (m³/s)

Estadístico	1970 - 2014	1960 - 1988	1986 - 2014	Variación
Promedio	30,5	30,4	30,0	-1%
Media Geométrica	29,9	29,8	29,3	-2%
Max	43,3	43,3	40,7	-6%
Min	16,2	18,0	16,2	-10%
Desviación Estandar	6,0	6,0	6,3	6%

Fuente: Elaboración Propia.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-9 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Imperial

Cuadro 6.7-15 Análisis de Frecuencia de Recarga Anual Cuenca Río Aysén (l/s)

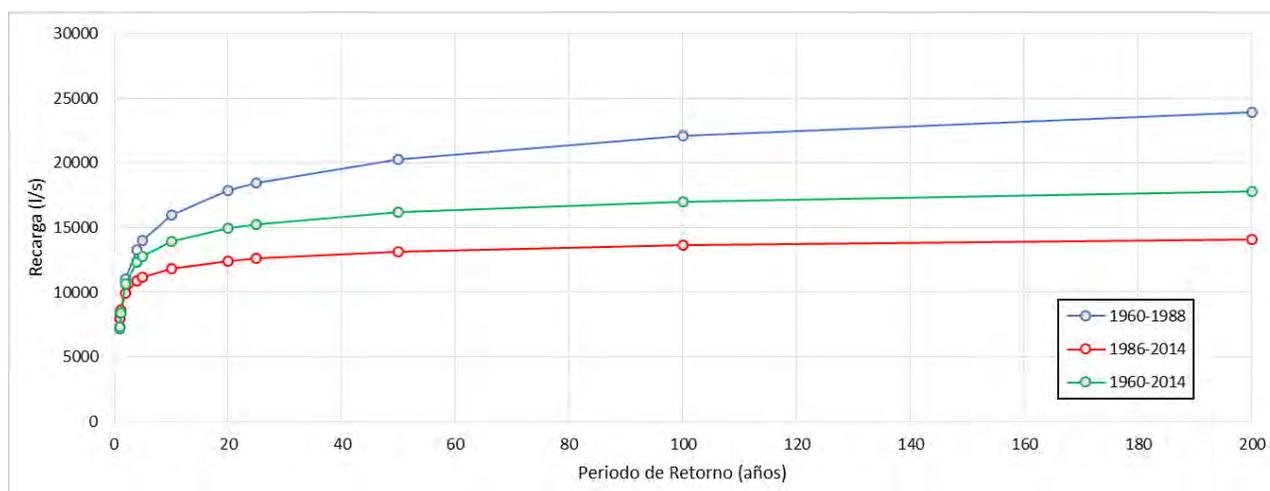
T (años)	1,1	1,2	2	4	5	10	20	25	50	100	200	Distribución
Pexc (%)	95	85	50	25	20	10	5	4	2	1	0,5	
1960-1988	7.153	8.354	11.001	13.312	13.980	15.953	17.845	18.445	20.294	22.129	23.958	Gumbel
1986-2014	7.934	8.620	9.929	10.886	11.137	11.825	12.426	12.607	13.139	13.636	14.108	LogNormal
1960-2014	7.269	8.419	10.653	12.302	12.735	13.922	14.955	15.265	16.176	17.025	17.826	Gamma

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.7-16 Estadísticos Serie Recarga Anual Cuenca Río Aysén (m³/s)

Estadístico	1970 - 2014	1960 - 1988	1986 - 2014	Variación
Promedio	10,8	11,4	10,0	-12%
Media Geométrica	10,6	11,1	9,9	-11%
Max	19,1	19,1	13,1	-31%
Min	7,2	7,6	7,2	-6%
Desviación Estandar	2,3	2,9	1,3	-53%

Fuente: Elaboración Propia.



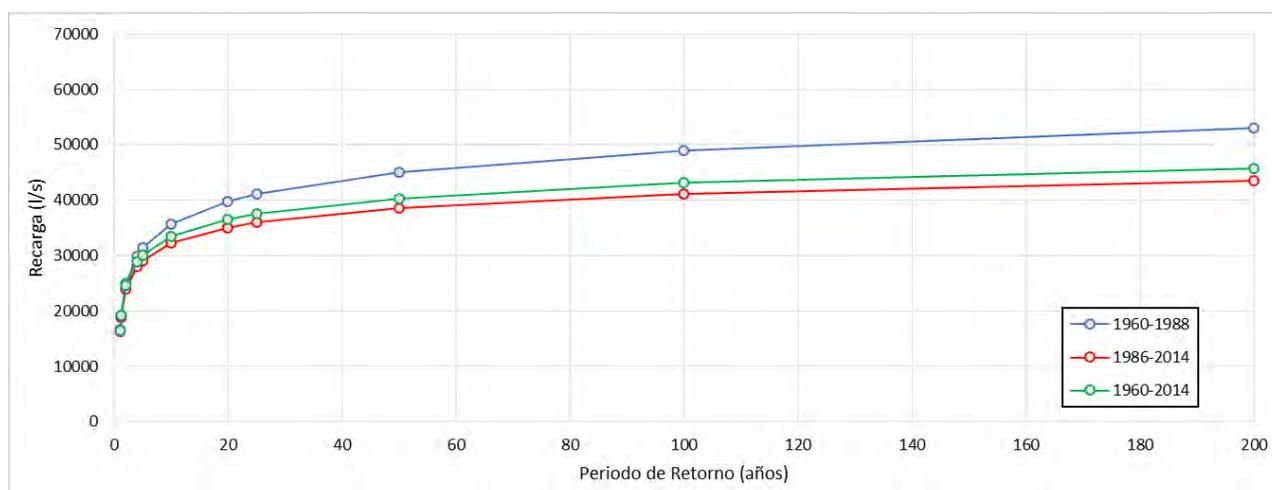
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-10 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Aysén

Se observa 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

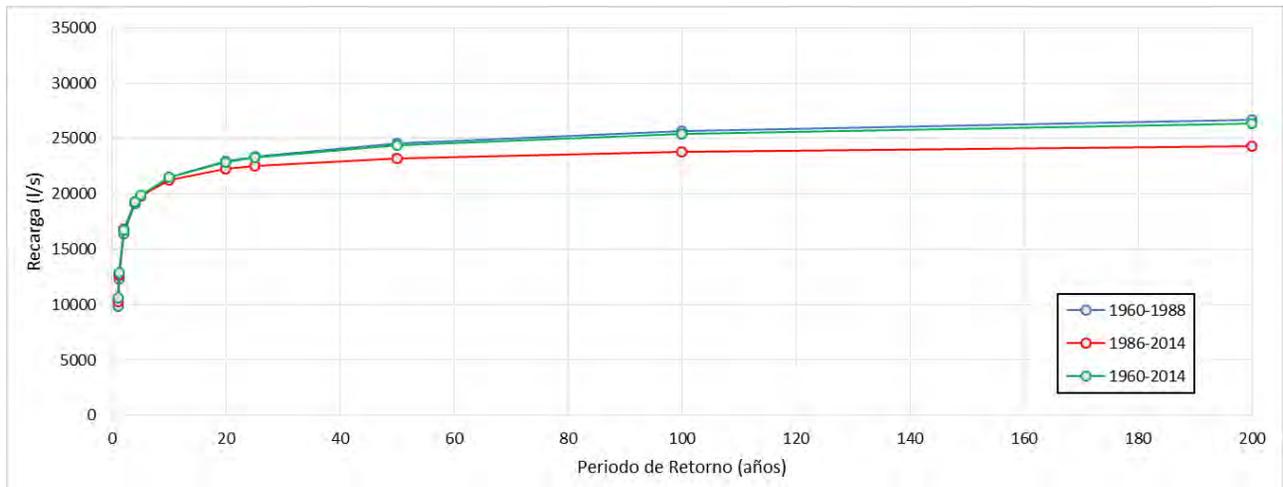
del río Maipo, muestra un aumento de la desviación estándar debido al aumento de los valores máximos y decaimiento de los mínimos. A su vez, el menor caudal de recarga, debido a las menores precipitaciones de este sector, conlleva a variaciones de hasta un 32% en el valor medio, pero que no corresponden 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. Las Figuras 6.7-11 a 6.7-16 presentan los resultados de este nuevo análisis.



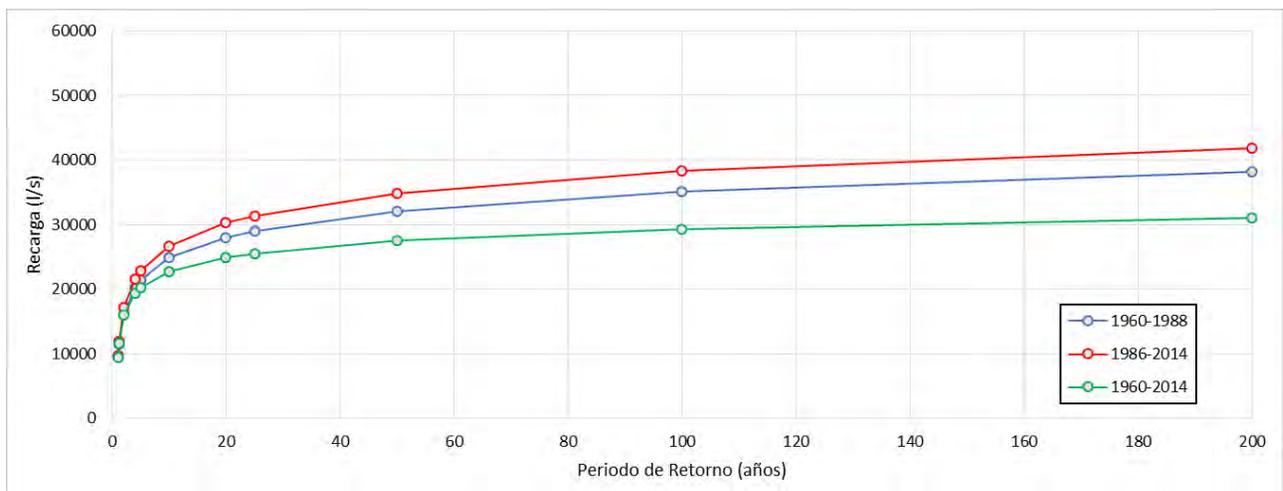
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-11 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Bío-Bío, Zona Cordillerana



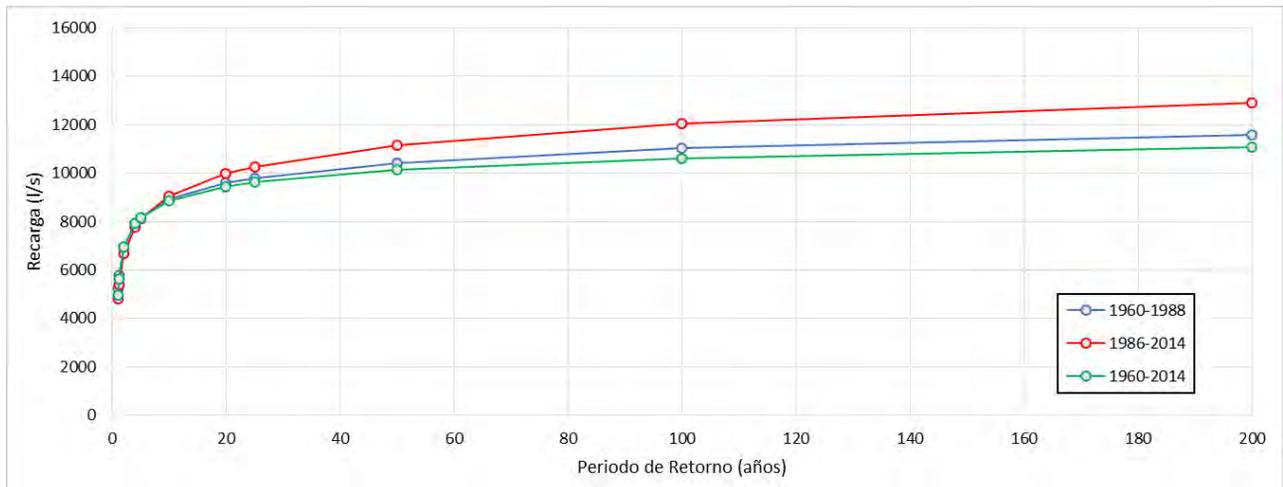
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-12 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Imperial, Zona Cordillerana



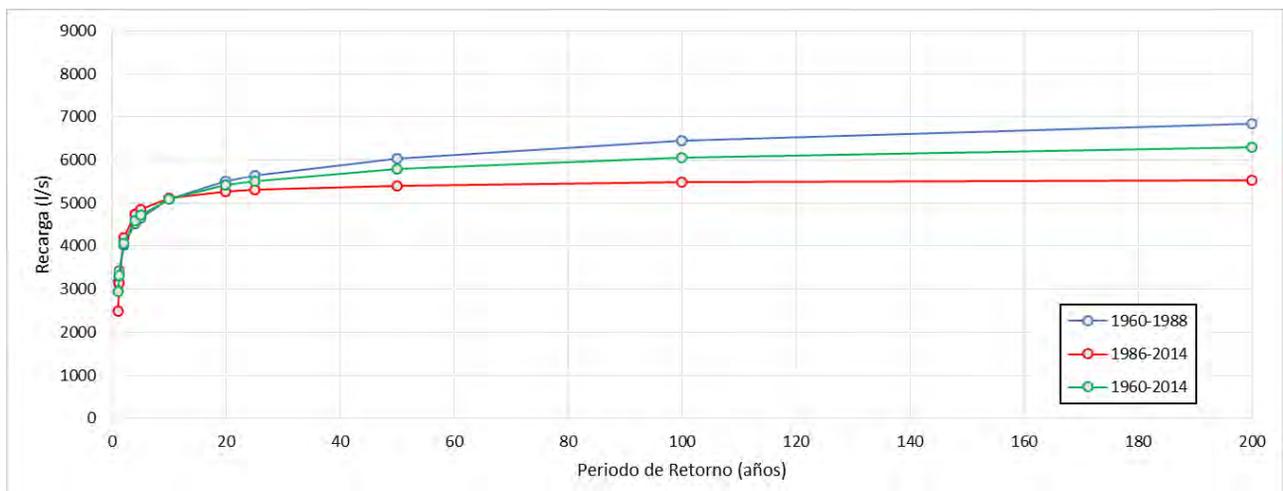
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-13 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Bío-Bío, Depresión Intermedia



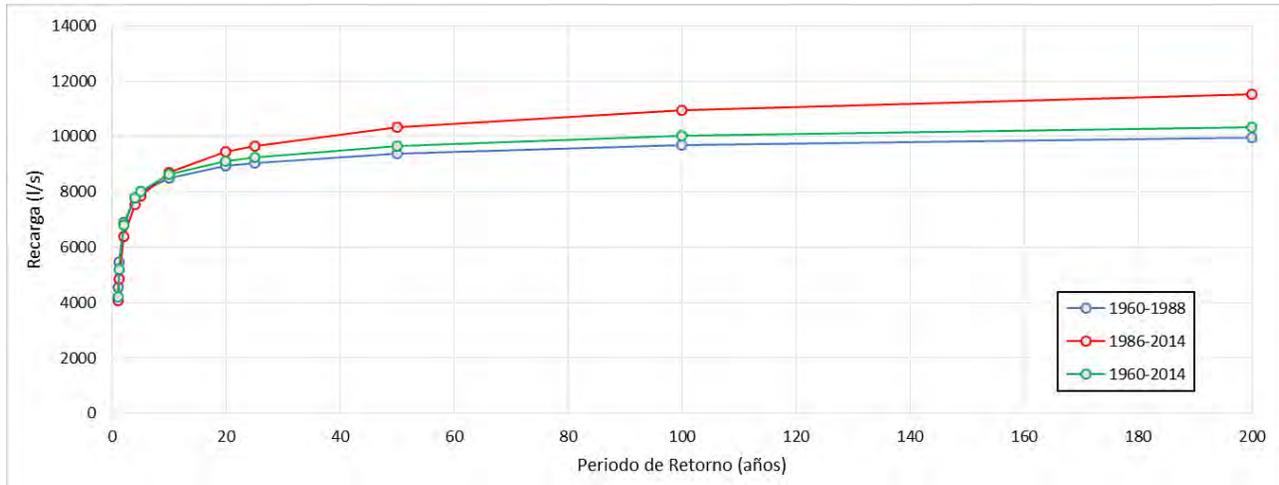
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-14 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Imperial, Depresión Intermedia



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-15 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Bío-Bío, Zona Costera



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.7-16 Análisis de Frecuencia Recarga Cuenca Río Imperial, Zona Costera

Este nuevo análisis muestra 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.

6.7.3 Caracterización de Recarga Mediante Niveles de Pozos

En aquellos casos en que la recarga producto de las crecidas es relevante, y el nivel estático no es muy profundo, es posible utilizar el método de las fluctuaciones de nivel para la estimación de la recarga, planteando un balance de agua en función de las variaciones de niveles en el agua subterránea.

Este efecto de recarga mediante niveles se pudo observar, en cierta manera, en el acápite 6.10, en el cual se observa que, ante un evento de precipitación, y por ende en los caudales de crecida registrados, se observa una relación con el aumento de los niveles freáticos en algunas cuencas.

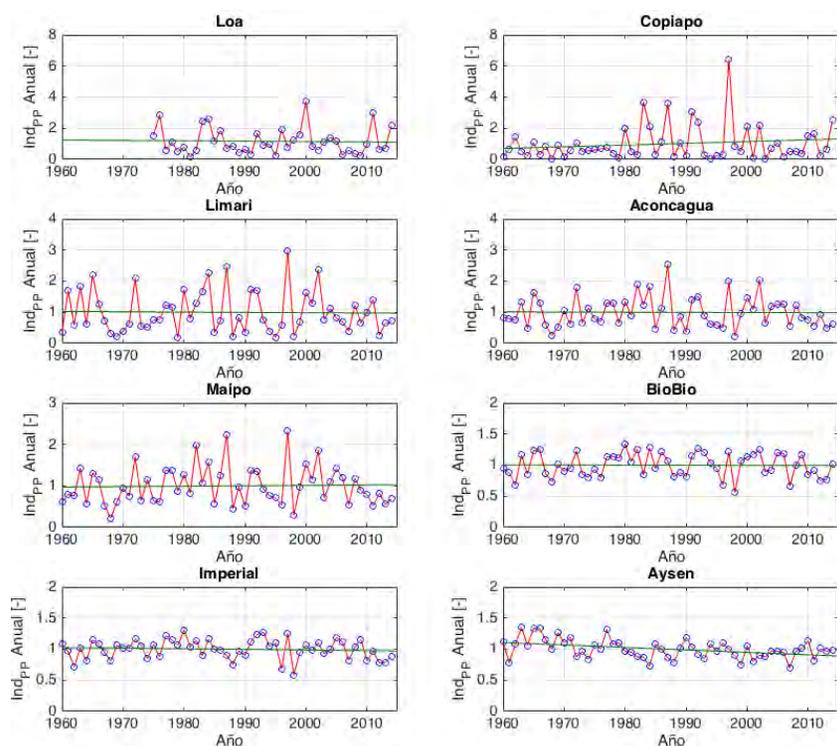
La aplicación de esta metodología usa como variable principal la variación del nivel freático, y se basa en que la elevación del nivel se debe principalmente a la recarga que llega hasta el nivel saturado. Así, supone que el agua que llega al nivel saturado se incorpora instantáneamente al almacenamiento y que variables como el flujo base, evapotranspiración, etc, son nulas durante el periodo de recarga.

Adicionalmente, este método supone que el intervalo de tiempo en que se aplica el balance es mayor o igual al tiempo de retardo o desfase entre el evento de precipitación y el ascenso de los niveles. Este supuesto es de suma relevancia, e implica que su aplicación sea válida para periodos cortos de tiempo, como horas o días.

Sin embargo, a partir de la información recopilada en el BNA, la data de niveles freáticos recopilada indica que no se dispone de registros de niveles freáticos con la frecuencia requerida para la correcta implementación del método, ya que sólo se dispone de 1 o 2 valores mensuales en cada pozo. Conforme a lo anterior, no se realizó una caracterización de recarga mediante los registros de niveles freáticos, debido a que el intervalo de tiempo en el cual se disponen los registros impiden la implementación de esta metodología.

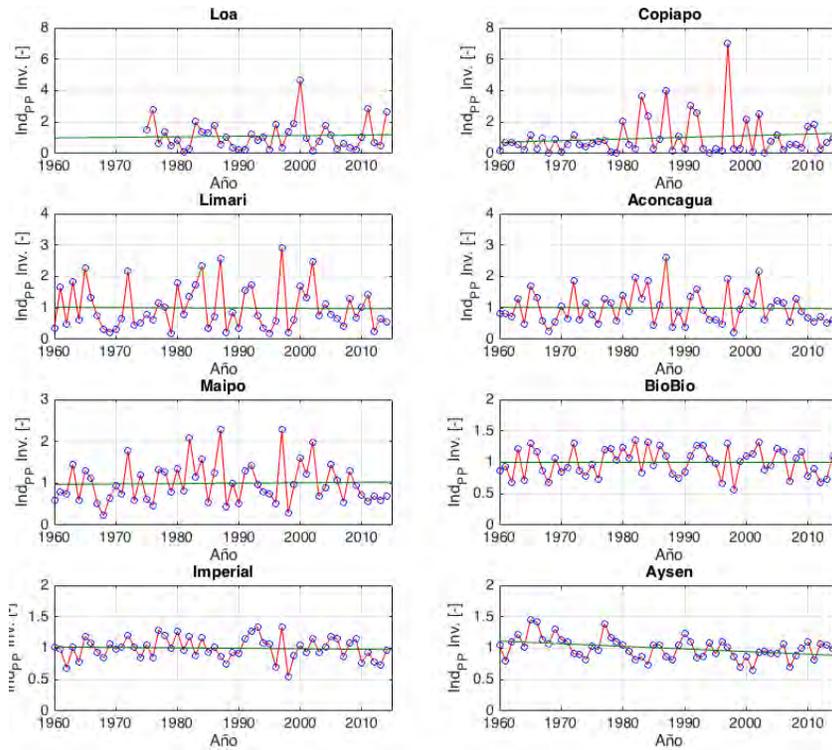
6.8 INDICADOR REGIONAL

Se generaron en total 6 indicadores por cuenca (uno para cada una de las variables de interés). Para cada uno de estos indicadores se procedió a aplicar los test de tendencia, de cambio de medias y cambio de varianza descritos anteriormente. Los resultados de estos test se presentan de forma resumida en este acápite. Para cada una de las figuras se muestran además las líneas de tendencia lineal para cada uno de los indicadores (agregaciones temporales se encuentran definidas en el Cuadro 5.2-5). Es importante recalcar sin embargo que estas líneas de tendencia lineal son meramente ilustrativas y no representan el test de tendencia realizado (Mann-Kendall).



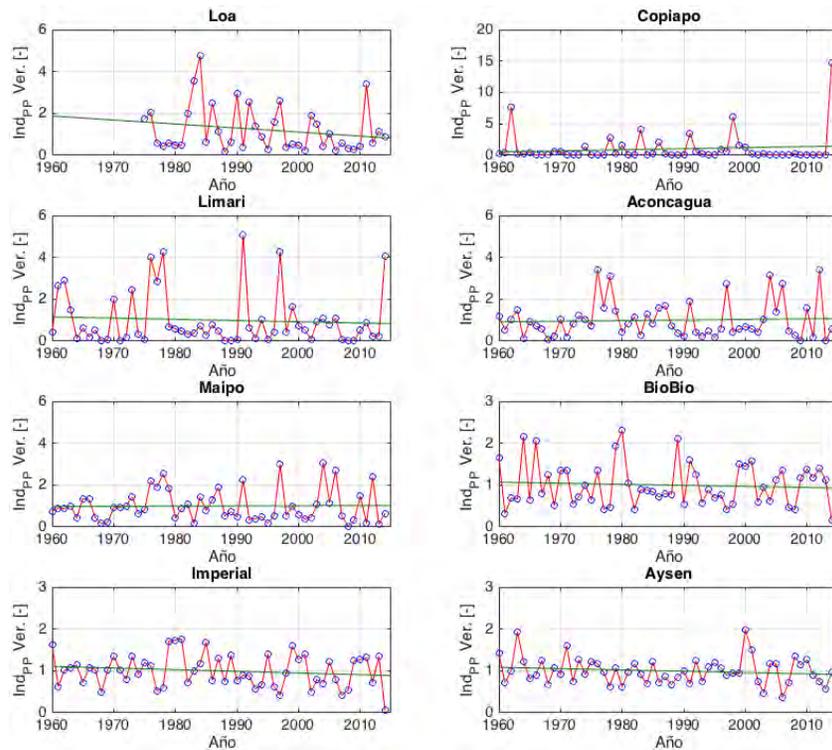
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.8-1 Serie de tiempo de los indicadores precipitación total anual



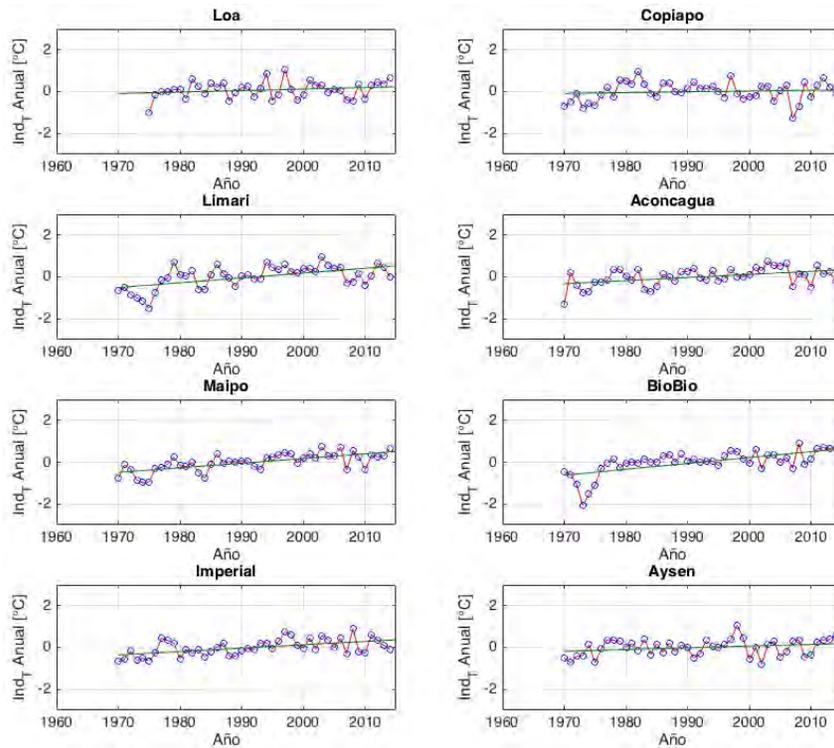
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.8-2 Serie de tiempo de los indicadores precipitación total invierno



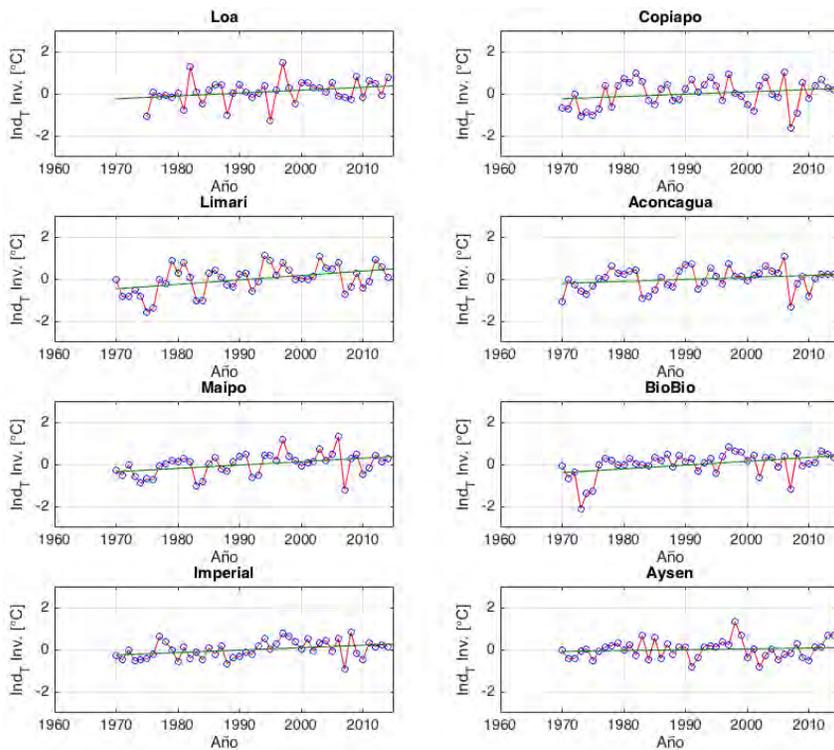
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.8-3 Serie de tiempo de los indicadores precipitación total verano



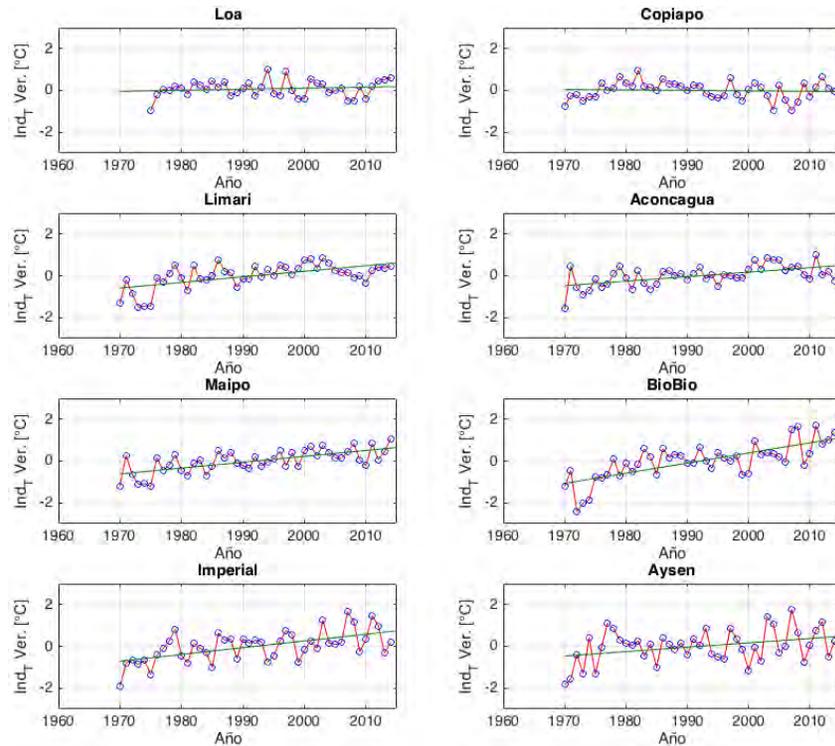
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.8-4 Serie de tiempo de los indicadores temperatura media anual



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.8-5 Serie de tiempo de los indicadores temperatura media invierno



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.8-6 Serie de tiempo de los indicadores temperatura media verano

Los Cuadros 6.8-1 al 6.8-6 resumen los resultados de las tendencias y cambios observados en cada uno de los indicadores por cuenca. Los valores mostrados en negrita corresponden a aquellos en que el test respectivo resultó en un valor estadísticamente significativo (p-valor del test menor a 0,05, o una significancia estadística del 95%).

En los cuadros se muestra la diferencia en las medias de cada uno de los indicadores. Para el caso de la precipitación, la diferencia en las medias corresponde al siguiente valor:

$$\text{Dif}_{\text{medias}} = 100 * \frac{\text{IndP}_{1987-2014} - \text{IndP}_{1960-1986}}{\text{IndP}_{1960-1986}} \quad \text{Ecuación 6.8-1}$$

Donde el denominador representa el promedio del indicador regional de precipitación total anual, de invierno o verano para el periodo comprendido entre los años señalados en el subíndice. De forma similar se presenta la diferencia en varianzas, pero en este caso en vez del promedio del indicador regional se toma la varianza del indicador dentro del periodo respectivo. Una diferencia de medias positiva representa un incremento porcentual del periodo más reciente respecto al periodo anterior, mientras que una diferencia de medias negativa representa una reducción durante el periodo más reciente en comparación al periodo anterior. Para el caso de la varianza, un aumento representa un incremento porcentual en términos de

variabilidad del periodo reciente en comparación al periodo anterior, y una reducción representa un decaimiento en la variabilidad del periodo reciente respecto al anterior.

Para el caso de la temperatura el cálculo es similar, tomando el promedio y varianzas del indicador de temperaturas anuales, de invierno y de verano, sin embargo, en el caso de las medias de temperatura no se dividió por la temperatura media (se presenta directamente la diferencia de temperaturas en grados).

Cuadro 6.8-1 Resultados regionales precipitación total anual

Macrozona	Cuenca	Tendencia Mann-Kendall (*) (Tau de Kendall)	Diferencia en medias (%)	Diferencia en varianza (%)
Norte	Loa	-0,041	-20,3	-17,5
	Copiapó	0,063	50,1	232,9
	Limarí	0,010	0,5	27,6
Centro	Aconcagua	-0,022	-2,1	49,3
	Maipo	0,003	2,8	49
Sur	Bío-Bío	-0,013	-2,9	9,4
	Imperial	-0,061	-4,5	64,8
Austral	Aysén	-0,262	-10,1	-53,5

Notas:

(1): Resultados test Mann Kendall corresponden a periodo 1960 – 2014, mientras que diferencia de medias y varianza a la comparación de los periodos 1960 – 1986 frente a 1987 – 2014.

(2): Los valores mostrados en negrita corresponden a aquellos en que el test respectivo resultó en un valor estadísticamente significativo (p-valor del test menor a 0,05, o una significancia estadística del 95%). Valores presentados en rojo corresponden a tendencias negativas y azul las positivas.

(3): Para test Mann Kendall, un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica. Un valor de 0 denota una tendencia “plana”.

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.8-2 Resultados regionales precipitación total invierno

Macrozona	Cuenca	Tendencia Mann-Kendall (Tau de Kendall)	Diferencia en medias (%)	Diferencia en varianza (%)
Norte	Loa	-0,038	-10,7	63,3
	Copiapó	0,056	53,1	278,3
	Limarí	0,011	1,2	20,6
Centro	Aconcagua	-0,030	-1,6	43,4
	Maipo	0,007	3,7	42
Sur	Bío-Bío	0,010	-2,7	-0,9
	Imperial	-0,046	-3,4	73,8
Austral	Aysén	-0,227	-11,2	-0,016

Notas:

(1): Resultados test Mann Kendall corresponden a periodo 1960 – 2014, mientras que diferencia de medias y varianza a la comparación de los periodos 1960 – 1986 frente a 1987 – 2014.

(2): Los valores mostrados en negrita corresponden a aquellos en que el test respectivo resultó en un valor estadísticamente significativo (p-valor del test menor a 0,05, o una significancia estadística del 95%). Valores presentados en rojo corresponden a tendencias negativas y azul las positivas.

(3): Para test Mann Kendall, un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica. Un valor de 0 denota una tendencia “plana”.

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.8-3 Resultados regionales precipitación total verano

Macrozona	Cuenca	Tendencia Mann-Kendall (Tau de Kendall)	Diferencia en medias (%)	Diferencia en varianza (%)
Norte	Loa	-0,141	-37,4	-58,6
	Copiapó	-0,080	29,7	212,5
	Limarí	-0,015	-16	10,1
Centro	Aconcagua	-0,051	-6,7	57,8
	Maipo	-0,065	-4,9	131,3
Sur	Bío-Bío	-0,020	-4,3	-34,4
	Imperial	-0,095	-15,1	6,3
Austral	Aysén	-0,091	-5,9	13

Notas:

(1): Resultados test Mann Kendall corresponden a periodo 1960 – 2014, mientras que diferencia de medias y varianza a la comparación de los periodos 1960 – 1986 frente a 1987 – 2014.

(2): Los valores mostrados en negrita corresponden a aquellos en que el test respectivo resultó en un valor estadísticamente significativo (p-valor del test menor a 0,05, o una significancia estadística del 95%). Valores presentados en rojo corresponden a tendencias negativas y azul las positivas.

(3): Para test Mann Kendall, un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica. Un valor de 0 denota una tendencia “plana”.

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.8-4 Resultados regionales temperatura media anual

Macrozona	Cuenca	Tendencia Mann-Kendall (Tau de Kendall)	Diferencia en medias (°C)	Diferencia en varianza (%)
Norte	Loa	0,144	0,126	7,7
	Copiapó	0,091	-0,044	35
	Limarí	0,356	0,454	-62,4
Centro	Aconcagua	0,313	0,346	-30,6
	Maipo	0,511	0,495	-35,3
Sur	Bío-Bío	0,477	0,517	-61,7
	Imperial	0,388	0,406	29,9
Austral	Aysén	0,206	0,166	111,5

Notas:

(1): Resultados test Mann Kendall corresponden a periodo 1960 – 2014, mientras que diferencia de medias y varianza a la comparación de los periodos 1960 – 1986 frente a 1987 – 2014.

(2): Los valores mostrados en negrita corresponden a aquellos en que el test respectivo resultó en un valor estadísticamente significativo (p-valor del test menor a 0,05, o una significancia estadística del 95%). Valores presentados en rojo corresponden a tendencias negativas y azul las positivas.

(3): Para test Mann Kendall, un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica. Un valor de 0 denota una tendencia “plana”.

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.8-5 Resultados regionales temperatura media invierno

Macrozona	Cuenca	Tendencia Mann-Kendall (Tau de Kendall)	Diferencia en medias (°C)	Diferencia en varianza (%)
Norte	Loa	0,213	0,371	-30,9
	Copiapó	0,162	0,071	32
	Limarí	0,265	0,399	-49
Centro	Aconcagua	0,202	0,202	11,9
	Maipo	0,321	0,395	51,9
Sur	Bío-Bío	0,305	0,341	-34,2
	Imperial	0,289	0,33	60,6
Austral	Aysén	0,103	0,074	126,7

Notas:

(1): Resultados test Mann Kendall corresponden a periodo 1960 – 2014, mientras que diferencia de medias y varianza a la comparación de los periodos 1960 – 1986 frente a 1987 – 2014.

(2): Los valores mostrados en negrita corresponden a aquellos en que el test respectivo resultó en un valor estadísticamente significativo (p-valor del test menor a 0,05, o una significancia estadística del 95%). Valores presentados en rojo corresponden a tendencias negativas y azul las positivas.

(3): Para test Mann Kendall, un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica. Un valor de 0 denota una tendencia “plana”.

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 6.8-6 Resultados regionales temperatura media verano

Macrozona	Cuenca	Tendencia Mann-Kendall (Tau de Kendall)	Diferencia en medias (°C)	Diferencia en varianza (%)
Norte	Loa	0,082	0,045	22,4
	Copiapó	-0,044	-0,141	56,7
	Limarí	0,398	0,535	-76,7
Centro	Aconcagua	0,374	0,514	-34,2
	Maipo	0,461	0,594	-40,7
Sur	Bío-Bío	0,537	0,87	-15,9
	Imperial	0,376	0,69	9,1
Austral	Aysén	0,154	0,442	21,8

Notas:

(1): Resultados test Mann Kendall corresponden a periodo 1960 – 2014, mientras que diferencia de medias y varianza a la comparación de los periodos 1960 – 1986 frente a 1987 – 2014.

(2): Los valores mostrados en negrita corresponden a aquellos en que el test respectivo resultó en un valor estadísticamente significativo (p-valor del test menor a 0,05, o una significancia estadística del 95%). Valores presentados en rojo corresponden a tendencias negativas y azul las positivas.

(3): Para test Mann Kendall, un valor de -1 o 1 implica que los valores de la serie siguen una tendencia negativa o positiva perfectamente monotónica. Un valor de 0 denota una tendencia “plana”.

Fuente: Elaboración Propia.

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 6.8—7.

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 6.8—7: Resumen de resultados para la tendencia de la precipitación y temperatura para los indicadores regionales calculados para las tres agregaciones temporales definidas.

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.

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.

6.9 CONCLUSIONES

Como se ha podido apreciar, las metodologías se han aplicado a variables específicas debido a la limitante de disponibilidad de información. Es así como los análisis más profundos han sido aplicados a las variables precipitación y temperatura, debido al gran volumen de información disponible, así como también por ser éstas, variables que no son afectadas por la intervención humana, como es el caso del caudal. Este último, si bien posee también una gran cantidad de información histórica, los análisis realizados se limitan a aquellos puntos con información en que es posible reconocer un flujo natural y representativo de las condiciones reinantes en la cuenca.

En el caso del resto de las variables analizadas, su volumen de información existente es menor, lo que limita el tipo de análisis a realizar. De cualquier modo, los resultados obtenidos permiten tener una visión de las características asociadas a cada cuenca en términos promedio para las variables evapotranspiración y recarga subterránea.

CAPÍTULO 7 RELACIÓN CON LAS FORZANTES CLIMÁTICAS EXTERNAS

7.1 INTRODUCCIÓN

Con el fin de detectar posibles influencias climáticas de alcance global y en distintas escalas temporales, el presente capítulo se enfoca en el análisis de las principales forzantes climáticas externas que se observan, 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 presentan los principales resultados obtenidos.

7.2 FORZANTES CLIMÁTICAS EXTERNAS

El Cuadro 7.2-1 y el Cuadro 7.2-2 presentan los coeficientes de correlación (R) y los p-valores (p) obtenidos de la combinación de diferentes forzantes o indicadores climáticos regionales (El Niño Southern Oscillation (ENSO), Pacific Decadal Oscillation (PDO) y Antarctic Oscillation (AAO)) y las series de tiempo normalizadas de precipitaciones y temperaturas que representan a cada cuenca en estudio, definidos como indicadores regionales (Ind_{xx})². Los valores de R en negritas representan aquellas correlaciones que resultan ser estadísticamente significativas, con un 95% de nivel de confianza obtenido mediante la distribución t de Student de dos colas, con n-2 grados de libertad. El análisis de confianza se aplicó sobre el estadístico t obtenido para cada coeficiente de correlación, el cual se obtiene a partir de la ecuación 7.2-1.

$$t = \frac{R \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-R^2}} \quad \text{Ecuación 7.2-1}$$

² El subíndice XX es igual a PP en el caso de la precipitación e igual a T en el caso de la temperatura.

Donde R es el coeficiente de correlación y n es el tamaño de las series correlacionadas.

Como se aprecia en el Cuadro 7.2-1, el Ind_{PP} Anual 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 Loa como Aysén no presentan correlaciones con ninguno de los indicadores climáticos evaluados (ENSO, PDO y AAO).

Respecto a Copiapó, el Ind_{PP} Anual de esta zona muestra 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 del el Ind_{PP} Anual con ENSO, presentan correlaciones positivas con los indicadores anual y de verano de PDO. También es significativa la correlación negativa con el indicador de verano AAO.

Por otra parte, las correlaciones obtenidas a partir del Ind_{PP} Invierno muestran una fuerte consistencia con el Ind_{PP} Anual analizado previamente, lo cual sugiere que el periodo de invierno sería el más relevante desde el punto de vista de las precipitaciones. En efecto, el Ind_{PP} Invierno muestra correlaciones significativas y con el mismo signo (+ o -) en las mismas cuencas e indicadores climáticos que el Ind_{PP} Anual. Loa representa la única excepción, pues muestra una correlación negativa significativa entre ENSO anual y el Ind_{PP} Invierno, lo cual no ocurre con el Ind_{PP} Anual.

Cabe señalar que el invierno en Loa ha sido definido entre los meses de enero y marzo, que es el periodo de mayores precipitaciones durante el año, producto de la influencia del invierno altiplánico. Por su parte, el indicador ENSO anual está asociado a los 12 meses anteriores al invierno en Loa.

Finalmente, el Ind_{PP} 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 el Ind_{PP} Verano 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.

Cuadro 7.2-1 Coeficientes de correlación (R) y p-valores (p) entre las precipitaciones representativas de las cuencas en estudio y distintos índices climáticos.

		ENSO			PDO			AAO		
		Anual	Invierno	Verano	Anual	Invierno	Verano	Anual	Invierno	Verano
ANUAL										
<i>Correlación</i>										
Loa	R	-0,306	-0,216	-0,274	0,030	0,144	0,013	-0,069	-0,035	-0,037
Copiapó	R	0,356	0,457	0,275	0,487	0,436	0,465	-0,250	-0,166	-0,232
Limarí	R	0,463	0,512	0,405	0,253	0,198	0,268	-0,341	-0,218	-0,326
Aconcagua	R	0,521	0,565	0,462	0,336	0,248	0,370	-0,335	-0,132	-0,421
Maipo	R	0,568	0,583	0,523	0,365	0,283	0,390	-0,309	-0,058	-0,467
Bío-Bío	R	0,503	0,495	0,479	0,323	0,261	0,378	-0,371	-0,191	-0,461
Imperial	R	0,415	0,419	0,371	0,256	0,235	0,262	-0,349	-0,264	-0,372
Aysén	R	0,194	0,183	0,206	-0,150	-0,169	-0,075	-0,055	0,021	-0,244
<i>p-valor (95%)</i>										
Loa	p	0,055	0,180	0,087	0,856	0,375	0,938	0,683	0,836	0,829
Copiapó	p	0,008	0,000	0,042	0,000	0,001	0,000	0,142	0,334	0,174
Limarí	p	0,000	0,000	0,002	0,063	0,148	0,048	0,042	0,201	0,052
Aconcagua	p	0,000	0,000	0,000	0,012	0,068	0,005	0,046	0,444	0,011
Maipo	p	0,000	0,000	0,000	0,006	0,036	0,003	0,067	0,739	0,004
Bío-Bío	p	0,000	0,000	0,000	0,016	0,055	0,004	0,026	0,265	0,005
Imperial	p	0,002	0,001	0,005	0,060	0,084	0,053	0,037	0,119	0,025
Aysén	p	0,155	0,182	0,132	0,273	0,216	0,585	0,750	0,901	0,152
INVIERNO										
<i>Correlación</i>										
Loa	R	-0,374	-0,263	-0,320	-0,074	0,081	-0,095	0,040	0,060	0,034
Copiapó	R	0,362	0,465	0,280	0,455	0,426	0,417	-0,284	-0,179	-0,275
Limarí	R	0,452	0,507	0,391	0,247	0,196	0,259	-0,338	-0,220	-0,320
Aconcagua	R	0,506	0,557	0,444	0,327	0,245	0,356	-0,351	-0,169	-0,403
Maipo	R	0,552	0,574	0,504	0,360	0,277	0,385	-0,330	-0,103	-0,448
Bío-Bío	R	0,547	0,548	0,509	0,361	0,297	0,413	-0,353	-0,206	-0,391
Imperial	R	0,490	0,492	0,444	0,280	0,263	0,272	-0,352	-0,294	-0,296
Aysén	R	0,270	0,262	0,269	-0,068	-0,074	-0,040	-0,138	-0,086	-0,201
<i>p-valor (95%)</i>										
Loa	p	0,018	0,102	0,044	0,648	0,620	0,562	0,816	0,722	0,842
Copiapó	p	0,007	0,000	0,038	0,000	0,001	0,002	0,094	0,297	0,105
Limarí	p	0,001	0,000	0,003	0,069	0,152	0,056	0,044	0,198	0,057
Aconcagua	p	0,000	0,000	0,001	0,015	0,071	0,008	0,036	0,323	0,015
Maipo	p	0,000	0,000	0,000	0,007	0,041	0,004	0,049	0,551	0,006
Bío-Bío	p	0,000	0,000	0,000	0,007	0,028	0,002	0,034	0,228	0,018
Imperial	p	0,000	0,000	0,001	0,039	0,052	0,044	0,035	0,082	0,079

		ENSO			PDO			AAO		
		Anual	Invierno	Verano	Anual	Invierno	Verano	Anual	Invierno	Verano
Aysén	p	0,046	0,054	0,047	0,621	0,589	0,771	0,423	0,618	0,239
VERANO										
<i>Correlación</i>										
Loa	R	0,129	0,145	0,112	0,275	0,216	0,292	-0,272	-0,198	-0,171
Copiapó	R	0,030	0,054	0,015	0,215	0,116	0,277	0,115	0,032	0,161
Limarí	R	0,226	0,155	0,252	0,106	0,046	0,148	-0,146	-0,051	-0,192
Aconcagua	R	0,270	0,226	0,277	0,169	0,100	0,210	0,034	0,272	-0,274
Maipo	R	0,321	0,274	0,328	0,169	0,144	0,169	0,036	0,290	-0,293
Bío-Bío	R	-0,192	-0,225	-0,134	-0,154	-0,145	-0,143	-0,110	0,042	-0,330
Imperial	R	-0,357	-0,350	-0,344	-0,119	-0,136	-0,056	0,007	0,125	-0,343
Aysén	R	-0,154	-0,165	-0,115	-0,240	-0,277	-0,106	0,149	0,205	-0,110
<i>p-valor (95%)</i>										
Loa	p	0,428	0,371	0,493	0,086	0,181	0,068	0,103	0,240	0,312
Copiapó	p	0,825	0,695	0,914	0,115	0,399	0,040	0,504	0,853	0,348
Limarí	p	0,098	0,258	0,064	0,440	0,737	0,282	0,395	0,766	0,263
Aconcagua	p	0,047	0,097	0,040	0,217	0,468	0,124	0,844	0,109	0,105
Maipo	p	0,017	0,043	0,015	0,216	0,294	0,218	0,835	0,086	0,083
Bío-Bío	p	0,159	0,098	0,329	0,263	0,291	0,297	0,521	0,807	0,049
Imperial	p	0,007	0,009	0,010	0,387	0,323	0,686	0,970	0,468	0,040
Aysén	p	0,261	0,228	0,402	0,077	0,041	0,441	0,385	0,231	0,525

Notas:

(1): Los periodos varían dependiendo de la cuenca y del índice.

(2): Se analizan los índices climáticos El Niño Southern Oscillation (ENSO), Pacific Decadal Oscillation (PDO) y Antarctic Oscillation (AAO).

En el caso de la temperatura, el Cuadro 7.2-2 muestra correlaciones positivas significativas para todos los indicadores ENSO (anual, invierno y verano) con el Ind_T Anual de Loa, Copiapó y Limarí. Se aprecia que las correlaciones son más importantes en Loa y Copiapó, debilitándose hacia el sur. En efecto, el Ind_T Anual de Aconcagua y Maipo muestra correlaciones positivas significativas con los indicadores ENSO anual y de verano, siendo levemente mayores las correlaciones con ENSO de verano. Hacia el sur, Imperial también muestra una correlación positiva significativa con el indicador ENSO de invierno.

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

Los indicadores PDO anual, invierno y verano muestran correlaciones positivas significativas con el Ind_T Anual de Copiapó, siendo mayor para el PDO de verano. Loa también muestra una

correlación positiva significativa entre el Ind_T Anual y el indicador PDO de invierno. Estas correlaciones se mantienen en el caso del Ind_T Invierno y se extienden hasta Limarí en el caso del Ind_T Verano.

Por su parte, el indicador AAO (anual, invierno y verano) es el único que se correlaciona positivamente con los Ind_T Anual e Invierno de 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 Ind_T Invierno, abarcando Imperial, Bío-Bío y Copiapó. Llama la atención el caso de Copiapó, cuyos tres Ind_T (anual, invierno y verano) muestran correlaciones negativas significativas con el indicador AAO de verano, lo cual requiere análisis adicionales para explicar la influencia tan aislada y al norte de Chile de este forzante climático.

7.3 CONCLUSIONES

Como se ha presentado anteriormente, se ha efectuado un análisis correspondiente a medir la relación entre las diversas forzantes climáticas con los indicadores regionales calculados para cada cuenca. Se han procesado 3 indicadores regionales: ENSO, PDO y AAO, debido a que cada indicador puede influenciar a una macrozona distinta. Son conocidos los efectos que tiene ENSO en las cuencas andinas de la macrozona norte y también, pero en menor medida, en la macrozona central. PDO y AAO, de acuerdo a lo descrito por Rubio y McPhee (2010), poseen una influencia que se le puede asociar a la macrozona sur y austral, y son complementarios a algunos efectos que tiene ENSO en parte de la macrozona sur, por lo que resulta de interés la correlación encontrada para las cuencas de la macrozona central con el AAO de Verano.

Cuadro 7.3-1 Coeficientes de correlación (R) y p-valores (p) entre las temperaturas representativas de las cuencas en estudio y distintos índices climáticos.

		ENSO			PDO			AAO		
		Anual	Invierno	Verano	Anual	Invierno	Verano	Anual	Invierno	Verano
ANUAL										
<i>Correlación</i>										
Loa	R	0,618	0,651	0,708	0,252	0,514	0,269	-0,043	-0,148	-0,102
Copiapó	R	0,681	0,640	0,660	0,497	0,378	0,540	-0,335	-0,020	-0,558
Limarí	R	0,408	0,395	0,389	0,305	0,261	0,303	-0,132	0,051	-0,293
Aconcagua	R	0,418	0,304	0,457	0,035	-0,002	0,065	-0,162	0,008	-0,291
Maipo	R	0,379	0,321	0,388	0,162	0,086	0,210	0,031	0,059	-0,019
Bío-Bío	R	0,242	0,263	0,197	0,224	0,179	0,263	0,417	0,302	0,348
Imperial	R	0,329	0,357	0,239	0,100	0,068	0,161	0,350	0,296	0,283
Aysén	R	0,032	0,070	-0,058	0,218	0,225	0,161	0,586	0,475	0,533
<i>p-valor (95%)</i>										
Loa	p	0,000	0,000	0,000	0,117	0,001	0,094	0,799	0,381	0,548
Copiapó	p	0,000	0,000	0,000	0,001	0,011	0,000	0,046	0,907	0,000
Limarí	p	0,005	0,007	0,008	0,041	0,084	0,043	0,443	0,767	0,083
Aconcagua	p	0,004	0,042	0,002	0,820	0,990	0,671	0,346	0,965	0,085
Maipo	p	0,010	0,031	0,008	0,289	0,573	0,166	0,859	0,733	0,914
Bío-Bío	p	0,110	0,081	0,194	0,140	0,239	0,081	0,011	0,074	0,037
Imperial	p	0,027	0,016	0,114	0,512	0,655	0,289	0,036	0,079	0,094
Aysén	p	0,835	0,648	0,703	0,150	0,137	0,291	0,000	0,003	0,001
INVIERNO										
<i>Correlación</i>										
Loa	R	0,512	0,610	0,651	0,084	0,372	0,135	-0,025	-0,119	-0,095
Copiapó	R	0,674	0,671	0,632	0,476	0,398	0,482	-0,245	-0,021	-0,401
Limarí	R	0,368	0,350	0,354	0,220	0,214	0,194	-0,094	0,040	-0,213
Aconcagua	R	0,538	0,372	0,597	0,115	0,049	0,162	-0,162	0,011	-0,295
Maipo	R	0,479	0,373	0,509	0,104	0,053	0,137	-0,060	0,072	-0,194
Bío-Bío	R	0,368	0,374	0,336	0,235	0,190	0,272	0,399	0,442	0,035
Imperial	R	0,324	0,351	0,238	0,072	0,025	0,177	0,377	0,341	0,241
Aysén	R	-0,123	-0,083	-0,205	0,123	0,131	0,079	0,540	0,475	0,383
<i>p-valor (95%)</i>										
Loa	p	0,001	0,000	0,000	0,607	0,018	0,405	0,884	0,483	0,577
Copiapó	p	0,000	0,000	0,000	0,001	0,007	0,001	0,150	0,905	0,015
Limarí	p	0,013	0,018	0,017	0,146	0,158	0,202	0,584	0,819	0,212
Aconcagua	p	0,000	0,012	0,000	0,452	0,751	0,288	0,347	0,947	0,080
Maipo	p	0,001	0,012	0,000	0,499	0,730	0,370	0,727	0,675	0,258

		ENSO			PDO			AAO		
		Anual	Invierno	Verano	Anual	Invierno	Verano	Anual	Invierno	Verano
Bío-Bío	p	0,013	0,011	0,024	0,121	0,211	0,070	0,016	0,007	0,841
Imperial	p	0,030	0,018	0,115	0,638	0,873	0,244	0,023	0,042	0,157
Aysén	p	0,422	0,589	0,176	0,422	0,391	0,604	0,001	0,003	0,021
VERANO										
<i>Correlación</i>										
Loa	R	0,595	0,595	0,652	0,301	0,520	0,300	-0,046	-0,142	-0,091
Copiapó	R	0,469	0,386	0,487	0,388	0,234	0,479	-0,325	-0,012	-0,552
Limarí	R	0,353	0,347	0,333	0,345	0,257	0,380	-0,106	0,046	-0,241
Aconcagua	R	0,175	0,150	0,178	-0,026	-0,035	-0,013	-0,065	0,000	-0,114
Maipo	R	0,131	0,143	0,116	0,154	0,084	0,198	0,123	0,006	0,206
Bío-Bío	R	-0,014	0,019	-0,058	0,127	0,098	0,154	0,118	-0,102	0,463
Imperial	R	0,184	0,200	0,134	0,146	0,151	0,109	0,081	0,011	0,233
Aysén	R	0,266	0,278	0,218	0,242	0,243	0,197	0,222	0,103	0,428
<i>p-valor (95%)</i>										
Loa	p	0,000	0,000	0,000	0,059	0,001	0,060	0,785	0,403	0,592
Copiapó	p	0,001	0,009	0,001	0,008	0,122	0,001	0,053	0,945	0,000
Limarí	p	0,018	0,019	0,026	0,020	0,088	0,010	0,539	0,788	0,157
Aconcagua	p	0,250	0,327	0,242	0,866	0,819	0,931	0,706	0,999	0,509
Maipo	p	0,390	0,349	0,448	0,314	0,582	0,193	0,474	0,970	0,227
Bío-Bío	p	0,925	0,903	0,703	0,407	0,520	0,313	0,494	0,554	0,004
Imperial	p	0,225	0,187	0,380	0,338	0,323	0,478	0,638	0,948	0,171
Aysén	p	0,078	0,065	0,150	0,109	0,108	0,195	0,193	0,550	0,009

Nota:

(1): Los periodos varían dependiendo de la cuenca y del índice.

(2): Se analizan los índices climáticos El Niño Southern Oscillation (ENSO), Pacific Decadal Oscillation (PDO) y Antarctic Oscillation (AAO).

CAPÍTULO 8 ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE CRECIDAS

8.1 INTRODUCCIÓN

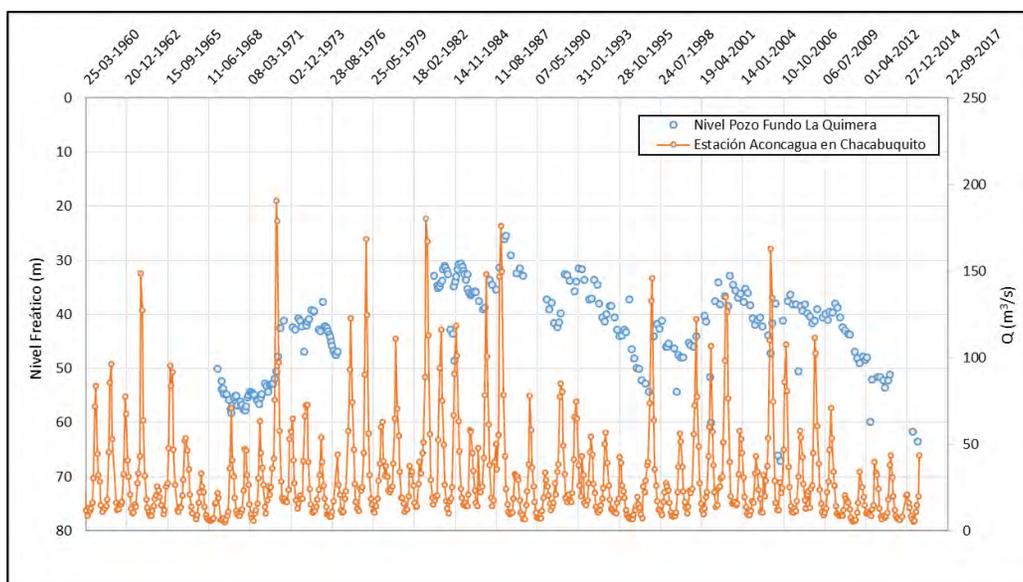
El análisis de crecidas corresponde a la estimación del caudal superficial máximo instantáneo pasante por un punto, por medio de la aplicación de los métodos de precipitación escorrentía DGA-AC, Verni King Modificado y Fórmula Racional. Para ello se seleccionaron estaciones fluviométricas DGA con las cuales comparar los resultados del análisis.

La metodología de selección de estaciones y la aplicación de los métodos de precipitación escorrentía se presenta en los acápite siguientes.

8.2 ANÁLISIS DE CRECIDAS

El análisis hidrológico de crecidas se realizó 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.

La representación gráfica de esta relación, para la totalidad de los pozos, se encuentra en el Anexo L, sin embargo, la Figura 8.2-1 muestra un ejemplo de lo descrito. Por otro lado, el Cuadro 8.2-1 y el Cuadro 8.2-2 muestran los pozos y estaciones fluviométricas seleccionadas respectivamente.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 8.2-1 Variación de Niveles de Pozos Frente a Crecidas

Cuadro 8.2-1 Pozos Análisis Hidrológico de Crecidas

Macrozona	Cuenca	Código BNA	Pozo	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)	Primer Registro	Último Registro
Norte	Copiapó	03414004-9	Quebrada Seca	407.943	6.885.874	1.500	10-11-1986	28-09-2015
		03414005-7	Iglesia Colorada	404.872	6.884.403	1.600	10-11-1986	28-09-2015
		03421005-5	Hacienda Manflas antes de Hacienda	415.810	6.892.056	1.300	10-11-1986	28-09-2015
		03421006-3	Hacienda Manflas	416.389	6.887.444	1.450	10-11-1986	28-09-2015
		03430011-9	Pueblo San Antonio	397.334	6.914.317	1.008	28-05-1971	24-09-2015
		03430012-7	Junta Manflas	416.035	6.898.982	1.100	27-02-1989	28-09-2015
		03431006-8	Planta Elisa de Bordos	382.790	6.933.666	748	09-10-1974	24-11-2009
		03434006-4	Canal Mal Paso	374.629	6.954.883	528	10-11-1970	29-01-2003
		03451006-7	Fundo San Juan	350.754	6.977.669	240	15-11-1966	27-11-1998
	Limarí	04506008-K	Fundo San Félix	296.643	6.620.769	-	23-07-1969	14-08-2013
		04522006-0	Asentamiento Alborada Juntas	321.166	6.602.045	-	28-04-1975	01-02-2006
		04537010-0	La Higuera	313.685	6.594.433	-	20-05-1972	09-09-2015
	Centro	Aconcagua	05410014-0	Misión de María	343.454	6.370.701	699	08-10-1968
05410018-3			Fundo La Quimera	343.307	6.375.104	704	27-12-1968	14-09-2015
05410019-1			Fundo Los Pinos	344.210	6.372.314	721	09-04-1969	14-09-2015
05414007-K			El Asiento	337.885	6.377.081	669	19-03-1968	08-01-2015
05415008-3			Perfil San Felipe	338.227	6.376.901	-	21-11-1983	14-09-2015
Maipo		05715003-3	Colonia de Paine	337.193	6.257.400	387	05-02-1970	24-08-2015
		05731001-4	Fundo Los Talaveras	341.147	6.345.986	696	04-10-1962	09-09-2015
		05731003-0	Fundo Los Tahuretes	340.663	6.343.791	657	15-04-1970	09-09-2015
		05736003-8	Parcela 62 Noviciado	324.832	6.303.403	485	11-01-1984	30-09-2015

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 8.2-2 Estaciones Análisis Hidrológico de Crecidas

Macrozona	Cuenca	Código BNA	Nombre Estación Fluviométrica	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Altitud (m s.n.m.)	Fecha Inicio	Fecha Término
Norte	Copiapó	03453001-7	Río Copiapó en Angostura	318.130	6.976.801	48	01-01-1969	-
		03431001-7	Río Copiapó en la Puerta	388.987	6.923.908	915	01-12-1927	-
		03404001-K	Río Jorquera en Vertedero	405.969	6.897.615	1.250	01-01-1968	-
		03430001-1	Río Copiapó en Lautaro	401.866	6.905.153	1.200	01-01-1969	-
		03434001-3	Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	374.685	6.954.792	431	01-12-1927	29-08-2001
		03421001-2	Río Manflas en Vertedero	402.405	6.885.984	1.550	01-01-1969	-
		03414001-4	Río Pulido en Vertedero	407.562	6.892.888	1.310	01-01-1968	-
Norte	Limarí	04550003-9	Río Limarí en Peñones Bajos	291.794	6.613.746	225	01-12-1941	-
		04537001-1	Río Guatulame en el Tomé	311.543	6.590.792	410	01-04-1964	-
		04522002-8	Río Rapel en Junta	320.649	6.601.205	485	01-01-1968	-
Centro	Aconcagua	05410005-1	Río Aconcagua en San Felipe	337.307	6.374.237	650	01-12-1969	-
		05410002-7	Río Aconcagua en Chacabuquito	358.743	6.364.246	950	01-05-1966	-
		05414001-0	Río Putaendo en Resguardo Los Patos	351.459	6.402.800	1.218	01-05-1966	-
	Maipo	05734001-0	Estero Polpaico en Chicauma	323.302	6.325.069	500	01-06-1968	17-10-2008
		05737002-5	Río Mapocho en Rinconada de Maipú	331.232	6.292.177	440	01-05-1965	-

Fuente: Elaboración Propia.

8.3 MÉTODOS DE ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE CRECIDAS

Ya seleccionadas las estaciones para el análisis de crecidas, se procedió a determinar los parámetros necesarios para la aplicación de los métodos de precipitación escorrentía DGA-AC, Verni King Modificado y Fórmula Racional. A continuación, se presenta la formulación de cada método de acuerdo al manual desarrollado por la DGA (1995).

8.3.1 Método DGA-AC

El método consiste en determinar una curva de frecuencias para el caudal instantáneo máximo de la cuenca. Para adimensionalizar las curvas de frecuencias regionales del método, se utiliza el caudal medio diario máximo de periodo de retorno 10 años, como muestran las siguientes ecuaciones.

$$\text{III y IV Región: } Q_{10} = 1,94 \times 10^{-7} Ap^{0,776} (P_{24}^{10})^{3,108} \quad \text{Ecuación 8.3-1}$$

V – RM – VI Región: $Q_{10} = 5,42 \times 10^{-8} A_p^{0,915} (P_{24}^{10})^{3,432}$ **Ecuación 8.3-2**

VII a IX Región: $Q_{10} = 2 \times 10^{-3} A_p^{0,973} (P_{24}^{10})^{1,224}$ **Ecuación 8.3-3**

Q_{10} : Caudal medio diario máximo de periodo de retorno 10 años, expresado en m³/s.

A_p : Área pluvial de la cuenca, expresada en Km².

P_{24}^{10} : Precipitación diaria máxima de periodo de retorno 10 años, expresada en mm.

Luego, es posible calcular la curva de frecuencias de cada cuenca mediante la multiplicación de factores adimensionales pertenecientes a zonas homogéneas definidas por el método. En particular, el Cuadro 8.3-1 muestra el valor de este parámetro para las cuencas en estudio.

Cuadro 8.3-1 Parámetro Zonas Homogéneas Método DGA-AC

Cuenca	Zona Homogénea	α
Copiapó	Ip	1,25
Limarí	Jp	2,14
Aconcagua	Pp	1,43
Maipo	Pp	1,43

Fuente: Elaboración Propia.

8.3.2 Método Verni King Modificado

El método relaciona el caudal instantáneo máximo de una crecida con la precipitación diaria máxima y el área pluvial, tal como se presenta en la Ecuación 8.3-4.

$$Q = C(T) \times 0,00618 \times P_{24}^{1,24} \times A_p^{0,88} \quad \text{Ecuación 8.3-4}$$

Q: Caudal instantáneo máximo de periodo de retorno T, expresado en m³/s.

C(T): Coeficiente empírico asociado al periodo de retorno T años.

P_{24} : Precipitación diaria máxima asociada al periodo de retorno T años, expresada en mm.

A_p : Área pluvial de la cuenca, expresada en Km².

El coeficiente empírico C(T) se obtiene a base del coeficiente asociado a un periodo de retorno de 10 años y su valor es variable de acuerdo a la región en que se ubica la cuenca analizada. Este parámetro ya se encuentra debidamente determinado por el método, por lo que su aplicación depende de la obtención del resto de las variables comprendidas en su formulación.

8.3.3 Método Formula Racional

El método propone la determinación del caudal instantáneo máximo por medio de la ecuación 8.3-5.

$$Q = \frac{C(T) i A}{3,6} \quad \text{Ecuación 8.3-5}$$

Q: Caudal instantáneo máximo de periodo de retorno T, expresado en m³/s.

C: Coeficiente de escorrentía asociado al periodo de retorno T.

i: Intensidad de la lluvia asociada al periodo de retorno T y a una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca pluvial, expresada en mm/hr.

A: Área pluvial aportante expresada en Km².

El coeficiente de escorrentía corresponde al mismo utilizado en el método de Verni King Modificado. Por otro lado, el cálculo de la intensidad de lluvia comprende las ecuaciones presentadas a continuación.

$$i_t^T = i_{24}^T \times \sqrt{\frac{24}{t}} \quad \text{Ecuación 8.3-6}$$

$$t_c = 0,95 \left(\frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad \text{Ecuación 8.3-7}$$

i_t^T : Intensidad media de periodo de retorno T y duración t, en mm/hr.

t_c : Tiempo de concentración de la cuenca, expresado en horas.

L: Longitud del cauce principal, expresada en Km.

H: Desnivel máximo de la cuenca, expresado en m.

Definidos los métodos utilizados para el análisis hidrológico de crecidas, se debió determinar los parámetros necesarios para su aplicación.

8.4 DELIMITACIÓN DE CUENCAS APORTANTES

La utilización de los métodos presentados conllevó definir el área pluvial asociada a cada estación pluviométrica seleccionada. La determinación de la cuenca aportante se realizó por medio del programa WMS. Junto con el área pluvial aportante, se obtuvo el valor de otras variables integradas a los métodos, tal como se presenta en el Cuadro 8.4-1. Dentro de éstas se encuentra la definición del centro de gravedad de cada cuenca con el objetivo de aplicar los métodos sobre este punto.

Cuadro 8.4-1 Parámetros Cuencas Análisis Hidrológico de Crecidas

Macrozona	Cuenca	Estación	Centro de Gravedad		Área (Km ²)	Cota Max (m s.n.m.)	Cota Min (m s.n.m.)	ΔCota (m)	Pend Media	L Cauce Max (Km)
			E (m)	N (m)						
Norte	Copiapó	Río Copiapó en Angostura	423.480	6.948.390	18.458	5.945	71	5.874	0,24	333
		Río Copiapó en la Puerta	438.170	6.908.100	8.345	5.946	886	506	0,29	205
		Río Jorquera en Vertedero	456.820	6.933.620	4.203	6.032	1.229	4.803	0,29	170
		Río Copiapó en Lautaro	442.550	6.907.780	7.492	6.032	1.112	492	0,32	182
		Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	430.430	6.913.800	10.159	6	532	5.468	0,28	243
		Río Manflas en Vertedero	410.190	6.854.830	971	5.673	1.465	4.208	0,33	87
		Río Pulido en Vertedero	433.270	6.882.510	2.021	5.793	1.307	4.486	0,37	79
	Limarí	Río Limarí en Peñones Bajos	332.020	6.593.070	9.349	5.517	224	5.293	0,30	153
		Río Guatulame en el Tomé	314.510	6.555.070	2.441	4.053	409	3.644	0,24	103
Río Rapel en Junta		350.560	6.603.090	824	4.737	515	4.222	0,39	69	
Centro	Aconcagua	Río Aconcagua en San Felipe	376.030	6.364.810	2.671	5.875	637	5.238	0,39	4
		Río Aconcagua en Chacabuquito	382.780	6.366.570	2.105	5.875	949	4.926	0,45	75
		Río Putaendo en Resguardo Los Patos	366.350	6.410.220	947	4.651	1.157	3.494	0,37	62
	Maipo	Estero Polpaico en Chicauma	332.980	6.340.580	1.077	2.689	518	2.172	0,17	54
		Río Mapocho en Rinconada de Maipú	336.150	6.326.900	2.477	3.737	450	3.287	0,16	101

Fuente: Elaboración Propia.

8.5 ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES

Previo a la aplicación de los métodos sobre los centros de gravedad, se debió asociar estadística pluviométrica a cada uno de ellos. Se comenzó con la asociación de una estación pluviométrica a cada cuenca en base a la cercanía geográfica al centro de gravedad, tal como muestra el Cuadro 8.5-1.

Cuadro 8.5-1 Estación Pluviométrica Asociada

Macrozona	Cuenca	Estación Fluviométrica	Estación Pluviométrica
Norte	Copiapó	Río Copiapó en Angostura	Jorquera en la Guardia
		Río Copiapó en la Puerta	Lautaro Embalse
		Río Jorquera en Vertedero	Jorquera en la Guardia
		Río Copiapó en Lautaro	Lautaro Embalse
		Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	Jorquera en la Guardia
		Río Manflas en Vertedero	Manflas
		Río Pulido en Vertedero	Manflas
	Limarí	Río Limarí en Peñones Bajos	Rapel
		Río Guatulame en el Tomé	Cogotí 18
Río Rapel en Junta		Rapel	
Centro	Aconcagua	Río Aconcagua en San Felipe	Riecillos
		Río Aconcagua en Chacabuquito	Riecillos
		Río Putaendo en Resguardo Los Patos	Resguardo Los Patos
	Maipo	Esteros Polpaico en Chicauma	Huechún Embalse
		Río Mapocho en Rinconada de Maipú	Huechún Embalse

Fuente: Elaboración Propia.

Sin embargo, para asociar la precipitación de la estación al centro de gravedad, es necesario obtener un factor de transposición que permita trasladar geográficamente su estadística pluviométrica. Desde el mapa topoclimático desarrollado, se extrae el valor de la precipitación media anual tanto en el punto de la estación pluviométrica como en el centro de gravedad. El Cuadro 8.5-2 muestra el valor obtenido y la proporción entre ambos.

Cuadro 8.5-2 Factor Transposición Análisis de Crecidas

Macrozona	Cuenca	Estación Fluviométrica	Pp Media Anual CG (mm)	Pp Media Anual Estación (mm)	Factor de Transposición
Norte	Copiapó	Río Copiapó en Angostura	46	42	1,10
		Río Copiapó en la Puerta	72	33	2,18
		Río Jorquera en Vertedero	58	42	1,38
		Río Copiapó en Lautaro	51	33	1,55
		Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	54	42	1,29
		Río Manflas en Vertedero	66	39	1,69
		Río Pulido en Vertedero	65	39	1,67
	Limarí	Río Limarí en Peñones Bajos	203	168	1,21
		Río Guatulame en el Tomé	203	216	0,94
Río Rapel en Junta		297	168	1,77	
Centro	Aconcagua	Río Aconcagua en San Felipe	1.209	755	1,60
		Río Aconcagua en Chacabuquito	2.141	755	2,84
		Río Putaendo en Resguardo Los Patos	767	243	3,16
	Maipo	Esteros Polpaico en Chicauma	249	256	0,97
		Río Mapocho en Rinconada de Maipú	349	256	1,36

Nota: CG corresponde a Centro de Gravedad.

Fuente: Elaboración Propia.

El factor de transposición obtenido se utilizó en el traslado de la estadística de precipitaciones máximas anuales en 24 horas desde la estación pluviométrica asociada a la cuenca hasta su centro de gravedad. Finalmente, se procedió a realizar un análisis de frecuencia que permitió obtener este valor para un periodo de retorno de $T = 10$ años, analizándose las distribuciones de probabilidad: Normal, Gumbel, Pearson III, Log Normal, Log Pearson III, Log Normal III y Gamma. En cada caso se seleccionó la distribución que presentó el mejor resultado en el análisis de bondad de ajuste mediante un test Chi-cuadrado. El Cuadro 8.5-3 presenta el resultado para cada cuenca seleccionada.

Cuadro 8.5-3 Análisis de Frecuencia Precipitación Máxima 24 Horas (mm)

Macrozona	Cuenca	Cuenca	Periodo de Retorno (años)						Distribución	
			2	5	10	20	25	50		100
Norte	Copiapó	Río Copiapó en Angostura	14	25,9	34	41,8	44,3	51,8	59,2	Gamma
		Río Copiapó en la Puerta	6,6	13,8	19	24,2	25,8	30,8	35,8	Gamma
		Río Jorquera en Vertedero	11,1	20,5	27	33,2	35,1	41,1	46,9	Gamma
		Río Copiapó en Lautaro	9,4	19,5	26,9	34,1	36,5	43,5	50,6	Gamma
		Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	12,2	22,3	29,2	35,8	37,9	44,3	50,6	Gamma
		Río Manflas en Vertedero	10,8	19,7	25,8	31,6	33,5	39,1	44,6	Gamma
		Río Pulido en Vertedero	11	20	26,2	32,1	34	39,7	45,3	Gamma
	Limarí	Río Limarí en Peñones Bajos	34,1	48,9	56,6	63	64,9	70,2	75	Normal
		Río Guatulame en el Tomé	46	71,8	88,1	102,9	107,4	120,8	133,4	LogPearson III
		Río Rapel en Junta	23,3	33,4	38,7	43,1	44,3	48	51,3	Normal
Centro	Aconcagua	Río Aconcagua en San Felipe	39,4	58,3	71,5	84,7	89	102,4	116,3	LogNormal
		Río Aconcagua en Chacabuquito	22,3	32,9	40,4	47,8	50,2	57,8	65,7	LogNormal
		Río Putaendo en Resguardo Los Patos	14,6	20,7	24,7	28,5	29,7	33,4	37,1	LogNormal III
	Maipo	Estero Polpaico en Chicauma	34,2	52,7	66	79,4	83,9	97,9	112,6	LogNormal
		Río Mapocho en Rinconada de Maipú	24,4	37,6	47,1	56,8	59,8	69,9	80,4	LogNormal

Fuente: Elaboración Propia.

8.6 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, tal como se presenta en los Cuadros 8.6-1, 8.6-2 y 8.6-3.

Cuadro 8.6-1 Caudal Máximo Instantáneo (m³/s), Método DGA-AC

Macrozona	Cuenca	Cuenca	Periodo de Retorno (años)						
			2	5	10	20	25	50	100
Norte	Copiapó	Río Copiapó en Angostura	14,8	22,8	28,5	38,3	41,7	53,4	66,5
		Río Copiapó en la Puerta	1,3	2,0	2,5	3,4	3,7	4,8	5,9
		Río Jorquera en Vertedero	2,3	3,5	4,4	5,9	6,5	8,2	10,3
		Río Copiapó en Lautaro	3,6	5,5	6,8	9,1	10,0	12,8	15,9
		Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	5,8	8,9	11,2	15,0	16,3	20,9	26,0
		Río Manflas en Vertedero	0,6	1,0	1,2	1,6	1,8	2,3	2,9
		Río Pulido en Vertedero	1,2	1,8	2,3	3,1	3,3	4,3	5,3
	Limarí	Río Limarí en Peñones Bajos	42,2	92,8	140,7	226,5	260,2	388,2	554,2
		Río Guatulame en el Tomé	58,7	129,1	195,6	314,9	361,8	539,8	770,5
		Río Rapel en Junta	139,7	201,0	245,1	343,1	377,4	500,0	642,2
Centro	Aconcagua	Río Aconcagua en San Felipe	2,0	4,3	6,5	10,5	12,1	18,1	25,8
		Río Aconcagua en Chacabuquito	15,8	22,7	27,7	38,8	42,7	56,5	72,6
		Río Putaendo en Resguardo Los Patos	46,1	66,3	80,8	113,1	124,4	164,8	211,7
	Maipo	Estero Polpaico en Chicauma	1,4	2,0	2,5	3,4	3,8	5,0	6,5
		Río Mapocho en Rinconada de Maipú	31,0	44,6	54,4	76,1	83,7	110,9	142,4

Fuente: Elaboración Propia.

Tanto el método de Verni King Modificado como la Fórmula Racional presentan en su formulación un coeficiente de escorrentía asociado al periodo de retorno y la zona geográfica.

Sin embargo, este parámetro no se encuentra definido para la Región Metropolitana, por lo que en las estaciones Río Putaendo en Resguardo Los Patos y Río Mapocho en Rinconada de Maipú se utilizaron los valores representativos de la V y VI Región, presentándose aquellos resultados que mejor se ajustan al caudal de crecida observado en la estación.

Cuadro 8.6-2 Caudal Máximo Instantáneo (m³/s), Método Verni King Modificado

Macrozona	Cuenca	Cuenca	Periodo de Retorno (años)						
			2	5	10	20	25	50	100
Norte	Copiapó	Río Copiapó en Angostura	22,5	50,8	75,1	106,8	118,8	155,7	197,1
		Río Copiapó en la Puerta	4,4	11,6	18,2	26,9	30,2	40,7	52,6
		Río Jorquera en Vertedero	4,6	10,4	15,3	21,8	24,2	31,8	40,2
		Río Copiapó en Lautaro	6,2	16,2	25,4	37,5	42,1	56,8	73,3
		Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	11,2	24,9	36,8	52,1	58,0	75,9	96,0
		Río Manflas en Vertedero	1,2	2,7	4,0	5,7	6,3	8,2	10,4
		Río Pulido en Vertedero	2,4	5,3	7,8	11,0	12,2	16,0	20,2
	Limarí	Río Limarí en Peñones Bajos	121,6	323,9	518,1	745,2	833,9	1.095,4	1.401,7
		Río Guatulame en el Tomé	54,1	159,9	274,7	419,7	477,8	658,7	878,4
		Río Rapel en Junta	67,2	241,3	370,2	525,0	592,0	797,5	1.075,3
Centro	Aconcagua	Río Aconcagua en San Felipe	8,9	23,8	38,1	54,8	61,3	80,6	103,1
		Río Aconcagua en Chacabuquito	26,8	96,3	147,8	209,5	236,3	318,3	429,2
		Río Putaendo en Resguardo Los Patos	25,3	95,6	150,5	218,0	247,3	339,1	464,5
	Maipo	Estero Polpaico en Chicauma	7,9	26,8	39,7	54,6	61,0	79,8	104,7
		Río Mapocho en Rinconada de Maipú	134,9	310,7	483,3	699,9	781,1	1.049,5	1.454,2

Fuente: Elaboración Propia.

Cuadro 8.6-3 Caudal Máximo Instantáneo (m³/s), Método Fórmula Racional

Macrozona	Cuenca	Cuenca	Periodo de Retorno (años)						
			2	5	10	20	25	50	100
Norte	Copiapó	Río Copiapó en Angostura	22,6	44,1	61,0	82,5	90,5	114,3	140,2
		Río Copiapó en la Puerta	6,2	13,7	19,9	27,7	30,6	39,5	49,3
		Río Jorquera en Vertedero	5,8	11,3	15,6	21,2	23,2	29,3	35,9
		Río Copiapó en Lautaro	8,4	18,5	26,9	37,5	41,5	53,5	66,8
		Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	12,8	24,7	34,1	46,0	50,5	63,7	78,1
		Río Manflas en Vertedero	1,9	3,6	5,0	6,8	7,3	9,2	11,3
		Río Pulido en Vertedero	4,2	8,1	11,2	15,1	16,5	20,8	25,5
	Limarí	Río Limarí en Peñones Bajos	182	444	685	960	1.067	1.375	1.732
		Río Guatulame en el Tomé	75	199	326	480	541	724	943
Río Rapel en Junta		449	1.467	2.143	2.919	3.253	4.236	5.540	
Centro	Aconcagua	Río Aconcagua en San Felipe	17	41	63	88	98	126	158
		Río Aconcagua en Chacabuquito	35	115	167	228	254	331	433
		Río Putaendo en Resguardo Los Patos	29	97	145	201	225	297	394
	Maipo	Estero Polpaico en Chicauma	11	34	49	64	71	91	116
		Río Mapocho en Rinconada de Maipú	228	473	697	965	1.063	1.376	1.844

Fuente: Elaboración Propia.

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. El Cuadro 8.6-4 presenta estos resultados.

Cuadro 8.6-4 Caudal Máximo Instantáneo Observado (m³/s)

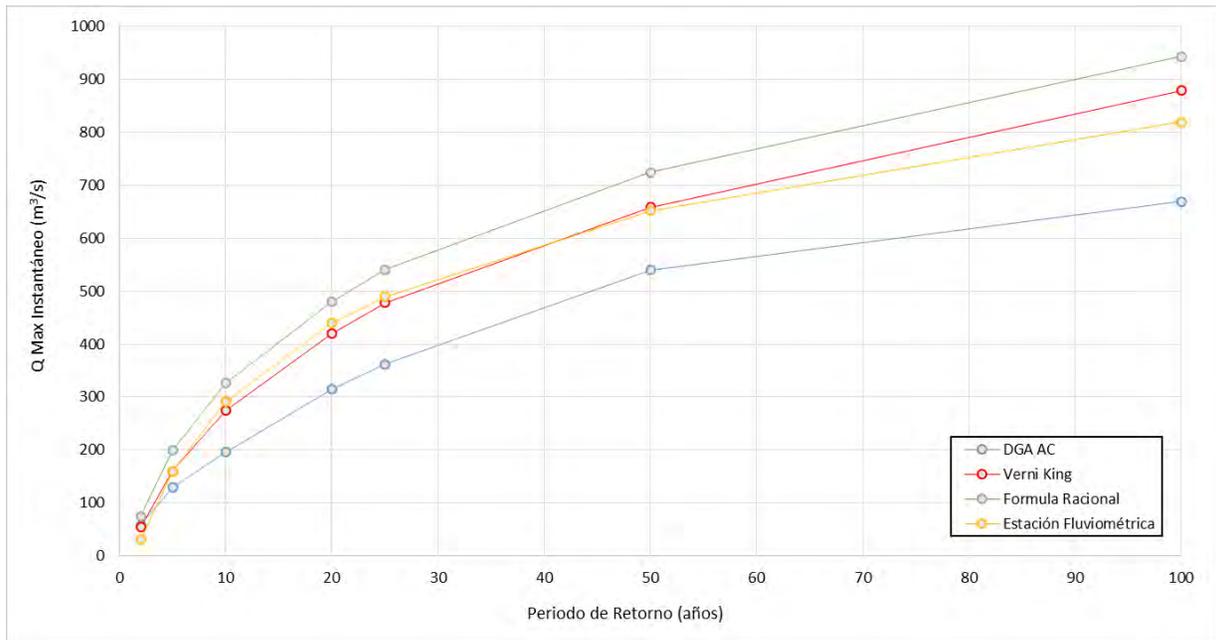
Macrozona	Cuenca	Cuenca	Periodo de Retorno (años)						
			2	5	10	20	25	50	100
Norte	Copiapó	Río Copiapó en Angostura	0,4	1,2	2,5	4,8	5,9	10,2	17
		Río Copiapó en la Puerta	3,1	6,9	11,5	17,8	20,4	30	42,7
		Río Jorquera en Vertedero	1,1	2	2,9	3,9	4,3	5,6	7,2
		Río Copiapó en Lautaro	2,9	5,1	6,9	8,8	9,5	11,7	14
		Río Copiapó en Mal Paso Aguas Arriba Canal	1,7	5,3	11	20,8	25,2	43,4	71,3
		Río Manflas en Vertedero	0,8	2	3,3	5,2	5,9	8,6	12,1
	Río Pulido en Vertedero	4	8,4	12,3	16,9	18,6	24,2	30,8	
	Limarí	Río Limarí en Peñones Bajos	27	161	351	618	720	1.082	1.506
		Río Guatulame en el Tomé	30	159	291	440	490	651	819
Río Rapel en Junta		82	186	285	406	450	605	788	
Centro	Aconcagua	Río Aconcagua en San Felipe	6	19	33	53	61	91	130
		Río Aconcagua en Chacabuquito	122	199	258	319	340	406	477
		Río Putaendo en Resguardo Los Patos	23	104	184	272	302	397	494
	Maipo	Esteros Polpaico en Chicauma	34	78	120	173	192	259	340
		Río Mapocho en Rinconada de Maipú	157	333	494	683	751	984	1.256

Fuente: Elaboración Propia.

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.

La comparación gráfica de los resultados se encuentra en el Anexo M, sin embargo, la Figura 8.6-1 presenta a modo de ejemplo los resultados en la estación Río Guatulame en el Tomé.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 8.6-1 Análisis de Crecidas Río Guatulame en el Tomé

8.7 CONCLUSIONES

Se analizó de manera gráfica los registros de caudal pasante en estaciones fluviométricas y niveles freáticos en pozos DGA en busca de una correlación entre los caudales de crecidas y un aumento de los niveles. Sobre aquellas identificadas se realizó un análisis de crecida utilizando los métodos DGA-AC, Verni King y Fórmula Racional, obteniendo resultados para los periodos de retorno 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años.

Los resultados se compararon con los caudales observados mostrando una sobreestimación de los métodos para las subcuencas de mayor dimensión. Esto se produce debido a que se utiliza el valor de la precipitación máxima en el centro de gravedad de la cuenca, lo cual en estos casos no corresponde a un valor representativo de la totalidad de la superficie.

CAPÍTULO 9 TALLER DE DIFUSIÓN

Con el objetivo de entregar los conocimientos necesarios al personal DGA para el entendimiento y familiarización de las técnicas de análisis utilizadas en el tratamiento de la información, se realizó un taller de difusión el día 07 de junio de 2016 en dependencias del Ministerio de Obras Públicas. El programa del taller, la lista de asistentes, la presentación e imágenes de la jornada, pueden ser consultados en el Anexo N.

El taller consistió en una presentación donde se abordó la metodología implementada y los resultados obtenidos para las cuencas prioritarias en estudio. Específicamente, contempló los temas y la distribución presentada a continuación.

Introducción y Alcances: Se describieron los fundamentos que justifican el estudio, sus alcances, objetivos generales y específicos.

Metodología del Estudio: Se presentó un cuadro general metodológico que pusiera en contexto el proyecto con sus respectivos productos entregables. Los temas abordados correspondieron a los siguientes:

- Criterios para la priorización de sistemas en estudio.
- Tratamiento de la información.
- Agregaciones Temporales adoptadas.
- Análisis Espacial.
- Análisis Temporal.
- Disponibilidad del recurso.
- Análisis de Recarga.

Resultados de la Metodología: Se presentó el resultado de la metodología adoptada en el desarrollo del estudio y descrita en el punto anterior. Los temas abordados correspondieron a lo que se detalla a continuación:

- Resultados de relleno.
- Modelos Topoclimáticos para las variables de una cuenca en particular.

- Ejemplos de periodos y ciclos detectados para un sistema.
- Indicador regional para la cuenca.
- Análisis estadístico sobre la cuenca.
- Comportamiento de las curvas de duración y de las CVE para los subperiodos analizados.
- Estudio de nieve y fSCA para una cuenca.
- Variación de la recarga.

Finalizada la presentación, se dio paso a una discusión abierta para resolver dudas o realizar comentarios, entre lo que se destaca:

El mapa topoclimático de temperatura en la cuenca del río Limarí presenta una condición homogénea en el sector costero debido a la falta de estaciones de medición que permitieran una mejor calibración. Se consultó si debido a esta falta de información es posible complementar con imágenes satelitales.

Se explicó que la utilización de imágenes satelitales fue considerada, pero que su aplicación presenta un orden de magnitud en términos de tiempo superior al alcance del estudio.

Referente al mismo punto, se comentó que efectivamente el clima en el sector es homogéneo. Por lo tanto, el resultado en la generación del mapa topoclimático responde a la condición de la cuenca.

Sin embargo, se destacó que, si bien la temperatura en el sector puede ser homogénea, una mayor información podría llevar a detectar zonas con microclimas que pueden producirse en pequeños valles, laderas u otras características geomorfológicas presentes en la cuenca.

Se consultó, respecto a las cuencas altiplánicas, si el estudio estableció algún patrón espacial de precipitaciones que permitan representar un sector especialmente cambiante.

Se expuso que la cuenca más altiplánica representada en el estudio correspondió a la del río Loa. Sin embargo, la metodología podría ser aplicable a cuencas altiplánicas si se aceptan las dificultades que presenta el sector tales como:

- La inconsistencia de la información, existiendo mediciones distintas en estaciones cercanas, de manera similar a que cada estación se encontrara en microclimas diferentes.
- Gran cantidad de datos vacíos y nulos en la estadística meteorológica existente.

A pesar de esto, se estimó que el patrón espacial de temperatura o precipitación, considerando las agregaciones temporales de invierno, verano y anual, que podría entregar el uso de esta metodología, sería un avance a la información base que existe actualmente representada en isoyetas.

Se consultó si el modelo permite una actualización constante que permita realizar un seguimiento a las variables analizadas que ayuden al trabajo diario de la DGA.

Ante esta consulta, se realizó una respuesta aclarando en primer lugar el concepto de modelo, el cual es errado para describir el estudio actual. La metodología propuesta corresponde a un análisis en función de la información registrada por la dirección y antecedentes relacionados. Por lo tanto, el mapa topoclimático es una herramienta propuesta para la caracterización de variables, lo cual se estima un avance, o bien una actualización, respecto a la información de isoyetas que posee la DGA desde el año 1987.

En segundo punto, se describe que no es estadísticamente relevante actualizar las series a una escala de tiempo baja. El análisis descrito en el estudio se realizó sobre datos pertenecientes a un lapso de 50 años, donde fue posible detectar ciclos cercanos a 10 años. Por lo tanto, la integración de un nuevo año de estadísticas no necesariamente podría detectar nuevos ciclos. A su vez, una actualización debiera responder a un aumento en la cantidad y calidad de los registros, lo cual no es posible de asegurar. Las condiciones climáticas a las que se exponen las estaciones conlleva a que en ciertas oportunidades se pierda su infraestructura sin ser reemplazada debido a problemas económicos, y junto con ello, la oportunidad de continuar con el registro histórico. Se complementa mencionando que el programa SSA Toolkit, utilizado en el análisis de las series, fue elegido debido a su capacidad de detectar ciclos en periodos cortos de medición. Es decir, se plantea la necesidad urgente de mayores recursos económicos y humanos que permitan levantar estaciones para no continuar perdiendo registros de monitoreo. En conclusión, los ciclos detectados se consideran representativos y entregan información de la variabilidad meteorológica de cada cuenca representada.

Respecto al punto de la representatividad de los ciclos detectados, se consultó si solo fue posible observar ciclos asociados al fenómeno ENSO (4 – 7 años) o la longitud de las estadísticas permitieron detectar otros.

A lo cual, se detalló que el análisis temporal entregó un ciclo cercano a los 12 años, posible de asociar con el fenómeno PDO (Pacifical Decadal Oscillation), e incluso uno de 20 años no considerado válido debido a la baja longitud de estadísticas sobre la que se trabajó (50 años). Sin embargo, el fenómeno ENSO no solo debe analizarse como un ciclo asociado a un periodo de años, pues se manifiesta con diferencias tanto en monto como variabilidad dependiendo de la cuenca y sector estudiado (costa, depresión intermedia, cordillera). Por lo tanto, los resultados son interesantes de analizar y entregan la posibilidad de conclusiones importantes.

CAPÍTULO 10 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

10.1 CONCLUSIONES GENERALES

A continuación, se describen las principales conclusiones de las actividades realizadas en pos de los objetivos definidos en el presente estudio.

- **Identificación de Cuencas Prioritarias**

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. Estos criterios evalúan desde la cantidad y calidad de la información muestreada en cada cuenca de interés hasta su nivel de estrés hídrico y relevancia estratégica. Los criterios evaluados fueron:

- C1: Criterio de selección DGA
- C2: Completitud y Registro de la Información Hidrometeorológica
- C3: Estrés Hídrico Superficial
- C4: Completitud y Registro de la Información Subterránea
- C5: Estrés Hídrico Subterráneo
- C6: Acuíferos en Restricción o Prohibición
- C7: Infraestructura

Mediante la aplicación de la metodología "multicriterio", cada criterio fue evaluado a través de un indicador cuya base se sustenta en la información revisada y analizada en los antecedentes de este estudio. En base a esta evaluación, se generó un listado de cuencas por macrozona ordenados por su nivel de prioridad.

El objetivo de este listado fue seleccionar las cuencas a estudiar en conjunto con la contraparte del estudio (2 por cada macrozona), de manera que el análisis a realizar signifique un real aporte para los objetivos del proyecto y en caso de cualquier dificultad que presente un sistema, que exista otro sistema de reemplazo que mantenga la calidad de información base y el carácter estratégico para el servicio. Finalmente, el Cuadro 10.1-1 resume las cuencas preseleccionadas luego de la evaluación experta, en que se consideró una cuenca adicional en la macrozona norte, en compensación a la cuenca faltante de la macrozona austral.

Cuadro 10.1-1 Cuenas 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.

- **Construcción y Validación de Base de Datos**

Respecto de las labores de relleno y completitud de la información es importante destacar que se llevó a cabo un proceso robusto, extensivo y debidamente respaldado para las cuencas seleccionadas. Para los fines del estudio es útil comprender que las metodologías de análisis que requieren de la información procesada y rellena utilizan agregaciones temporales de variables, pero que van de los 4 hasta los 12 meses, por lo que la calidad de la base de datos obtenida es suficiente para los propósitos del estudio, pasando por supuesto por una elección criteriosa de las estaciones que pueden o no ser utilizadas.

El proceso de relleno fue automatizado y corregido de acuerdo a la metodología estándar de relleno y se ha entregado como un producto en este estudio.

- **Análisis Espacial de Variables Hidrometeorológicas**

En el análisis espacial se presentaron modelos topoclimáticos para las variables de interés en cada una de las cuencas. Estos modelos experimentales fueron derivados utilizando la climatología de cada una de las variables (media del periodo histórico) medidas en cada una de las estaciones y las características fisiográficas/geográficas de cada una de las estaciones. Se observaron buenos resultados del ajuste de modelos en la variable precipitación. En general los patrones observados muestran una influencia importante del efecto orográfico, con precipitaciones más altas observadas en las zonas de la precordillera y cordillera. Una excepción a esta regla la constituye la cuenca del río Aysén, la cual muestra un decaimiento de la precipitación con la altura. Los ajustes de temperatura fueron menos exitosos que los de precipitación. Es probable que el número reducido de estaciones sea un factor importante en el caso del peor ajuste de la variable temperatura. Se observó además que los modelos topoclimáticos de temperatura son sensibles a climatologías fuera de lo esperado (por ejemplo, temperaturas más altas en estaciones más elevadas). Los resultados de este análisis experimental demuestran la utilidad práctica de contar con un mayor número de estaciones para lograr una mejor caracterización de las variables hidrometeorológicas de las cuencas

chilenas. En particular se destaca la necesidad de contar con un mayor número de estaciones en altura de manera de poder obtener una mejor representación de la variabilidad de la hidrometeorología en zonas de la cordillera.

- **Análisis Temporal de Variables Hidrometeorológicas**

Respecto del análisis temporal se ha hecho una revisión profunda de las metodologías adecuadas para caracterizar los ciclos irregulares que predominan en cada una de las cuencas. Se han analizado estaciones representativas de las zonas de costa o zona baja, depresión intermedia o zona media y zona cordillerana o zona alta. Esta clasificación ha permitido caracterizar la variabilidad temporal mediante la aplicación de la metodología del análisis espectral.

Los ciclos encontrados son variados y tienen una influencia con la latitud. En general se reconocen ciclos entre 2 y 7 años para la mayoría de las cuencas. Ciclos particularmente altos son encontrados en la agregación temporal de invierno o verano, dependiendo también de la latitud analizada. En general, para las cuencas de la macrozona norte, se espera una influencia con el indicador ENSO (El Niño Oscilación del Sur), por lo que los periodos entre 4 y 7 años son atingentes. Para las macrozona sur y austral, se han encontrado también influencias de periodos decadales, lo que puede significar una relación con los índices PDO (Oscilación Decadal del Pacífico) y la AAO (Oscilación Antártica).

El análisis de tendencias de precipitaciones mostró tendencias neutras o levemente negativas para todo el territorio nacional. Estas tendencias observadas son consistentes con las proyecciones de cambio climático señaladas en otros estudios realizados anteriormente, las cuales indican reducciones de la precipitación en el largo plazo. Los efectos de los últimos años de sequía no fueron directamente observados en las métricas de tendencias analizadas. Esta observación no limita la opción de que en un análisis futuro (con más años de datos) la sequía podría empezar a manifestarse de manera más fuerte en la serie de tiempo. Las tendencias neutras o levemente negativas son un escenario preocupante considerando las proyecciones de cambio climático que sugieren incrementos de temperaturas significativas para todo el territorio nacional. Mediante el test de diferencias de medias se determinó que al comparar el periodo 1960 – 1986 frente al de 1987 – 2014, en la mayoría de las estaciones analizadas se observan aumentos del orden de 0,5 y 1°C en la temperatura media anual. Esto, sumado a las tendencias negativas en precipitación, podría resultar en escenarios de escasez importantes para el futuro, especialmente en aquellos lugares que ya presentan un régimen árido o semi-árido de precipitaciones y que han ido avanzando en latitud sur. El alza de temperaturas y reducción de la precipitación inciden directamente en la hidrología de las cuencas chilenas de un modo mayormente negativo, resultando en un aumento del potencial evapotranspirativo, menor humedad del suelo, acumulación de nieve, y flujo base. Es posible anticipar (aunque esta observación debe ser verificada a través de modelos u observaciones) un aumento de los

caudales de fines del verano debido a un mayor derretimiento de glaciares en algunas cuencas (debido a menores precipitaciones y mayores temperaturas), sin embargo, dicho aumento de caudales será probablemente transitorio y no compensará en el largo plazo la menor oferta hídrica.

- **Caracterización de Evaporación y Evapotranspiración**

En relación a la evapotranspiración de referencia en las cuencas seleccionadas, ésta 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.

- **Caracterización de Caudales**

Se efectuó un análisis de estacionareidad y variabilidad temporal de los caudales en las cuencas seleccionadas, incluyendo una caracterización nival y análisis de sequías y tendencias históricas. Asimismo, se efectuó un análisis estadístico de las crecidas y precipitaciones, y su relación con las recargas a los acuíferos, así como un cálculo independiente (curva número) para esto último.

También se efectuó un análisis para inferir cambios en el régimen de precipitaciones en las cuencas seleccionadas, considerando tres distintas probabilidades de excedencia: 10%, 50% y 85%. El periodo analizado consiste en los años hidrológicos 1960-2014, dividido en dos periodos principales de comparación, 1960 a 1989 y 1985 a 2014 (30 años cada uno, definidos como periodos P1 y P2 respectivamente en el texto).

Finalmente, se realizó un análisis de los niveles y recarga al acuífero para las diferentes cuencas de estudio. Los niveles freáticos observados permitieron identificar que las cuencas de las macrozonas norte y centro, a excepción de la cuenca del río Loa, presentan tendencias decrecientes de nivel en ciertos sectores, los que podrían ser asociados en algunos casos a una alta explotación del acuífero, mientras que en otros casos se aprecia una asociación más directa al último periodo de sequía. En algunos sectores, principalmente las zonas altas de las cuencas Copiapó, Limarí y Aconcagua, se observó además una respuesta del comportamiento del nivel freático a eventos de crecidas en los cauces. Estos pozos en general son someros y se encuentran cerca del cauce superficial, lo que explica su rápida respuesta al evento.

En cuanto a la recarga, se analizó su variabilidad mediante la aplicación del método de la curva número, arrojando como resultado un comportamiento de esta variable que se corresponde al comportamiento de la precipitación, tanto en tendencia como en magnitud.

A continuación, se presentan los resultados específicos asociados a cada una de las cuencas de estudio.

- **Indicadores Regionales**

Los indicadores regionales muestran cambios medidos para cada una de las cuencas. Para la precipitación no se observan cambios significativos en la serie histórica generada. 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 (50 mm), 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 misma cuenca del río Copiapó, el único estadísticamente significativo atribuido a la presencia del evento extremo del año 1997/98.

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), lo que significa que los respectivos veranos definidos para cada uno de los sistemas han aumentado su intensidad. 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.

- **Cambios en las precipitaciones (Pexc=50% o P50)**

Los análisis efectuados permitieron determinar para cada una de las estaciones representativas por cuenca las variaciones porcentuales respecto del primer período de análisis o período 1 como se definió en el capítulo de variabilidad del régimen de precipitaciones.

A nivel anual, los cambios detectados muestran que en la macrozona norte los resultados dependen de la cuenca analizada. Para la cuenca del Loa se presenta una disminución del 18%, concentrado en la estación Linzor (cordillera), mientras que el resto permanece invariante.

En el caso de la cuenca del Copiapó, se aprecia un comportamiento disímil. La estación del Desierto de Atacama presenta disminuciones del orden del 36%, mientras que para el valle central y cordillera hay aumentos del orden del 20%.

La cuenca del Limarí presenta un aumento de su variación porcentual en su estación cordillerana “Las Ramadas” (39%), mientras que sus otras dos estaciones presentan reducciones del orden 5%. En el caso de Punitaqui, la reducción es más severa si se analiza el período invernal.

Se debe tener en cuenta que los porcentajes encontrados en Verano, obedecen a la presencia de eventos puntuales, y los montos asociados son muy bajos, por lo que pequeños cambios reportan diferencias porcentuales grandes. En este caso es recomendable analizar la agregación anual y de invierno solamente.

Para la macrozona centro, se observa que en la cuenca del Aconcagua tanto las estaciones de costa como de cordillera presentan una disminución del 7 y 11 % respectivamente, sin embargo, la estación San Felipe (valle central) presenta un aumento del 14%. Este comportamiento es más crítico en Invierno, donde la reducción en cordillera es de un 20%. Cabe destacar que para la agregación de Verano, se tienen variaciones porcentuales negativas importantes para todas las estaciones que varían entre un 23 y un 50%.

La cuenca del río Maipo presentó variaciones relevantes. En costa y valle central, se presentan disminuciones a nivel anual (5%) que se respaldan con el comportamiento de las reducciones de Verano del 40%. Sin embargo, para la estación de San José de Maipo, se exhiben alzas de un 9%.

Para la macrozona sur, la cuenca del Bío-Bío presentó variaciones porcentuales poco significativas, menores al 3%, salvo para la agregación de verano, en donde se encontraron disminuciones entre un 6 y 10% para las estaciones de valle y cordillera, y un aumento para la estación de costa de un 20%.

Finalmente la macrozona austral, representada por la cuenca del río Aysén, presentó variaciones porcentuales mixtas, positivas para las estación del valle central (2%), pero negativa para las estaciones de costa y cordillera, representadas por las estaciones de Puerto Aysén y Balmaceda, donde las disminuciones encontradas fueron del 7 y 6% respectivamente.

En Invierno se observan variaciones porcentuales negativas y neutras, pero el cambio más relevante sucede en verano, en donde existe un aumento consistente entre las tres estaciones, un 10% para las estaciones de costa y valle central, mientras que sólo de un 1% para la estación cordillerana de Balmaceda.

- **Cambios en las temperaturas (mínimas, máximas y promedio)**

Los cambios en temperatura muestran que en general existen evidencias de un alza generalizada de la variable para todas las macrozonas estudiadas.

La macrozona norte es la que presentan un comportamiento más variable. La cuenca del río Loa y Copiapó, presentan aumentos para la estación de costa (mínimos y promedios), pero reducciones de temperatura en cordillera para sus máximos, mínimos y promedios. La cuenca del río Limarí exhibe un comportamiento más regular por cuanto tanto sus temperaturas mínimas como promedio exhiben aumentos.

La macrozona centro y sur presentaron un aumento consistente de la temperatura para todas las cuencas que las conforman. Lo que evidencia desde ya un fenómeno de calentamiento. Cabe destacar que estos aumentos son consistentes tanto para temperaturas mínimas, medias y máximas., exceptuando las estaciones de Quillota (Aconcagua) y Melipilla (Maipo) que presentan leves reducciones en sus temperaturas mínimas.

Por último, la macrozona austral exhibe un comportamiento más errático, no concluyente. Si cabe destacar que la estación Teniente Vidal presenta reducciones en su temperatura mínima de 3,4 °C, cambio no detectado en las otras estaciones analizadas.

10.2 RESULTADOS Y CONCLUSIONES POR CUENCA

A continuación, se analizan las cuencas en estudio en base a los puntos relevantes en su desarrollo.

10.2.1 Cuenca del Río Loa

- **Precipitaciones**

La escasez de información meteorológica en la cuenca previa al año 1970, solo permitió obtener un registro completo para el periodo 1970 – 2015 de 27 estaciones de precipitación. En general las correlaciones obtenidas fueron bajas debido a las características particulares de la cuenca, la cual presenta eventos de precipitación aislados que no se manifiestan de la misma manera en los distintos sectores. Con el registro completo en el periodo, se determinaron las estaciones Linzor, Calama y El Loa Calama AD como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente, debido a la calidad de su información.

- **Análisis Espacial**

Se generaron mapas topoclimáticos de precipitación media, que permitieron observar su distribución espacial en la cuenca para las agregaciones temporales de invierno, verano y anual. El mapa mostró un contraste importante entre el clima del desierto de Atacama frente al sector de cordillera, que presenta precipitaciones características del “invierno Boliviano”, lo cual se condice al revisar la estadística de las estaciones representativas de la cuenca.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de las precipitaciones, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

En relación a los ciclos detectados, se observaron 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. Esto permite suponer la existencia de una influencia orográfica o de la presencia de un clima particular, en especial en la zona cordillerana.

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. Cabe destacar la detección de un periodo de 22,5 años para esta estación, pero si bien tiene la significancia estadística, podría no ser representativo de la escala de tiempo utilizada, debido a que un ciclo de 22 años en una serie de 55 sólo puede ser apreciado un máximo de 2 veces.

En el caso de la agregación de verano, la zona cordillerana presenta ciclos de precipitación de 2 y 5 años (Linzor) y de 6 años para la costa (El Loa Calama AD). Sin embargo, la estación Calama, es la que presenta los ciclos más elevados de 3, 7 y 8 años, lo que indica una importante variabilidad en el año, posiblemente marcada por la presencia de inviernos altiplánicos.

En relación a las tendencias, la precipitación muestra una señal hacia el descenso para el periodo 1986 – 2015, en comparación al periodo previo, particularmente en periodo de verano. Sin embargo, la gran variabilidad interanual en las precipitaciones de esta cuenca conduce a que sea difícil interpretar tendencias como un resultado robusto, especialmente considerando que la situación “normal” de esta zona es una situación con ausencia prolongada de lluvia. En tanto, al analizar el cambio en la varianza se aprecia una alta

variabilidad entre estaciones que puede estar relacionada además al régimen de precipitaciones conectivas que existe en la precordillera y en la cordillera de la cuenca.

- **Variabilidad de Precipitaciones**

El análisis del cambio en las precipitaciones se realizó sobre las probabilidades de excedencia 10% (P10), 50% (P50) y 85% (P85), mediante un análisis comparativo entre los periodos 1975 – 2004 y 1985 – 2014 y considerando las tres agregaciones temporales definidas (anual, invierno y verano). Los resultados presentaron una reducción de las precipitaciones en la estación Linzor para las probabilidades de excedencia 50 y 85%. Es importante recalcar que las precipitaciones sobre esta cuenca son extremadamente reducidas con una alta variabilidad interanual, por lo que los cambios detectados podrían ser producto de la variabilidad natural y no necesariamente signo de algún cambio significativo en el régimen de precipitaciones.

A nivel anual las variaciones detectadas para P50%, son representadas por la estación Linzor, la que se redujo en un 17,8%. Cabe destacar que se debe tener en cuenta la gran cantidad de datos nulos que exhiben estas series, por lo que el tratamiento de estos valores de variación debe ser tomado con cautela.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, presentó una correlación baja en la agregación temporal de verano y nula para la anual. La cuenca muestra una correlación negativa significativa entre ENSO anual y el Ind_{PP} Invierno, representando la excepción al comportamiento de las cuencas analizadas.

- **Temperatura**

La escasez de información meteorológica en la cuenca previa al año 1970, solo permitió obtener un registro completo para el periodo 1970 – 2015 de 10 estaciones de temperatura. Con el registro completo en el periodo, se determinaron las estaciones El Loa Calama AD y Parshall N°2 como representativas de la cuenca debido a la calidad de su información.

- **Análisis Espacial**

Los mapas topoclimáticos generados, permitieron observar que su distribución espacial en la cuenca se encuentra dominada por la elevación, lo cual no contradice la suposición inicial. No se observan gradientes latitudinales o longitudinales que permitan determinar influencia marítima. Sin embargo, este análisis debe ser confirmado con la implementación de un mayor número de estaciones, para nuevos modelos topoclimáticos.

- **Análisis Temporal**

Además de la distribución espacial de las temperaturas, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

Para la agregación temporal anual, 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”.

En la agregación de invierno, la estación Parshall N2 presenta un ciclo de 4 años, posiblemente ligado a efectos de indicadores regionales.

Finalmente, para la agregación de verano, el análisis exhibe ciclos de 3 años para la costa y un adicional de 6 para la depresión intermedia.

El análisis de tendencia para las temperaturas medias anuales se realizó para los periodos comprendidos por los años 1970 – 1998 y 1986 – 2014. La longitud de los periodos definidos busca considerar al menos 29 años, tras lo cual se estima que los resultados poseen validez estadística. El análisis indica una tendencia al alza de entre 0,5 y 1,0 °C para el periodo más reciente. Además, se observan cambios significativos, tanto positivos como negativos, en la varianza de la variable.

- **Variabilidad de Temperatura**

En términos promedio, la estación El Loa Calama AD presenta un aumento de temperatura de 0,58°C, explicada por la elevación de su temperatura mínima en 1,28°C, mientras que Parshall N2 (cordillera) presenta una disminución de -0,4°C, liderada por una reducción de su temperatura máxima en 1,5°C.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, presentó correlaciones positivas significativas para todos los indicadores ENSO (anual, invierno y verano) y PDO de invierno con el Ind_T anual.

- **Disponibilidad Hidrológica**

Se entiende por disponibilidad hidrológica a la diferencia entre oferta hidrológica y derechos constituidos. La oferta hídrica se estima a partir de las estimaciones efectuadas en los antecedentes consultados y presentados con anterioridad en el Cuadro 4.3-1 y el Cuadro

4.3-2. De acuerdo a ello, se observa que la cuenca del río Loa ha experimentado un aumento importante del otorgamiento de derechos a partir de la segunda mitad de la década de los 80, lo que a través del tiempo ha significado sobrepasar la oferta hídrica de la cuenca.

En el caso del sistema superficial, los antecedentes indican que el caudal medio total del río Loa es de aproximadamente 3.800 l/s, cuyo valor fue sobrepasado en 1987 por los derechos permanentes y consuntivos otorgados a la fecha y siendo actualmente mayor a 5.500 l/s.

En cuanto al sistema subterráneo, los antecedentes indican que la recarga media de la cuenca es de aproximadamente 2.330 l/s, cuyo valor fue sobrepasado en 1999 por los derechos permanentes y consuntivos otorgados a la fecha y siendo actualmente cercanos a 4.000 l/s.

- **Niveles de Pozos y Recarga Subterránea**

En general, no se manifiesta ninguna tendencia de largo plazo en el comportamiento de los niveles ni se observan cambios asociados a eventos de precipitación y/o crecidas en los cauces, siendo su comportamiento relativamente estable en el tiempo.

En cuanto a la recarga, se realizó un análisis de su variabilidad temporal mediante la aplicación del método de la curva número para los periodos comprendidos por los años 1960 – 1988 y 1986 – 2014. La longitud de los periodos definidos se determinaron buscando validez estadística de los resultados. De acuerdo a esto, se observó que esta variable corresponde a aproximadamente un 14% de la precipitación. En términos medios, la cuenca ha experimentado una disminución del valor de su recarga, lo que se asocia a lo observado de manera similar en el caso de la precipitación. La variación observada es de un 24%, lo cual, debido a las bajas precipitaciones existentes en la cuenca, en términos de caudal representa un valor de 0,6 l/s.

- **Caudales**

Se analizó la serie fluviométrica de Loa en Lequena, la que presentó dificultades en su proceso de relleno, dado que no se encontró una estación base confiable para poder completar esta estación en régimen natural, teniendo que recurrir a un método de autorelleno según año hidrológico.

La estación cumple con los criterios de estacionareidad débil y adicionalmente no presentó tendencias significativas en ninguna de sus agregaciones temporales.

Los periodos significativos encontrados corresponden a 3, 6 y 9 años. Teniendo en cuenta la limitación de este resultado, producto del método de 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.

- **Comentario General de la Cuenca**

En términos generales, los patrones hidrometeorológicos analizados para la cuenca del río Loa han experimentado cambios en los últimos años, los cuales se han manifestado en una reducción de la precipitación y un aumento de la temperatura. Estos cambios aún no se manifiestan en una tendencia a la baja en estaciones de caudal cordilleranas, pero los ciclos de variabilidad concuerdan con los obtenidos para la precipitación y temperatura.

10.2.2 Cuenca del Río Copiapó

- **Precipitaciones**

La cuenca presenta 6 estaciones con estadística de precipitación con buena disponibilidad y calidad de información, es decir el registro necesitó menos de un 10% de datos rellenados o corregidos dentro del periodo de análisis 1960 – 2014. Con el registro completo, se determinaron las estaciones Desierto de Atacama Caldera A.P., Lautaro Embalse y Jorquera en la Guardia como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente.

- **Análisis Espacial**

Posteriormente, se generaron mapas topoclimáticos de precipitación media, que permitieron observar su distribución espacial en la cuenca para las agregaciones temporales de invierno, verano y anual. El mapa mostró que la cuenca presenta un marcado régimen orográfico y 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.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de las precipitaciones, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

Para la agregación anual, periodos significativos de 3 a 5 años junto a uno de 7 en el sector costero. Por otro lado, para la agregación de invierno se presentan ciclos en torno al rango de 2 y 5 años, observándose un ciclo anómalo de 27,5 años considerado fuera de escala de frecuencias admitidas en el test. Mientras que, en verano, los ciclos presentan mayor variabilidad, detectándose uno de 13,1 años en el sector costero.

En relación a las tendencias, se observó que la precipitación en su agregación temporal de verano presenta una leve señal hacia el descenso en la zona sur de la cuenca. Esta tendencia no se propaga a los resultados para las precipitaciones totales anuales o de invierno, las cuales en general aportan la mayoría de la precipitación de la cuenca. Adicionalmente, se observa un aumento significativo de su variabilidad (>50%), lo cual se puede atribuir a la presencia de varios años húmedos durante el periodo 1986-2014.

- **Variabilidad de Precipitaciones**

El análisis del cambio en las precipitaciones se realizó sobre las probabilidades de excedencia 10% (P10), 50% (P50) y 85% (P85), mediante un análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 y considerando las tres agregaciones temporales definidas (anual, invierno y verano). Los resultados presentaron un aumento consistente de las precipitaciones P10 anuales para todas las estaciones, y para los periodos de invierno y verano exceptuando la estación Desierto de Atacama Caldera donde se observó un descenso. El aumento generalizado no debe considerarse como señal clara de incremento en el régimen de precipitaciones debido a que solo corresponde a eventos extremos de probabilidad de excedencia del 10% en una zona de clima árido.

En términos de P50% a nivel anual, la estación Desierto de Atacama Caldera AP es la que presenta una reducción más relevante de un 36%, mientras que las estaciones Lautaro Embalse y Jorquera en la Guardia presentan aumentos del orden del 20%.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, presentó una mayor correlación con el indicador ENSO, dando cuenta de su amplio rango de influencia sobre la precipitación anual. Se observó una fuerte consistencia entre las agregaciones de invierno y anual, lo cual sugiere que este periodo sería el más relevante desde el punto de vista de las precipitaciones. Por su parte, para el verano se identificó una baja respuesta a los indicadores climáticos.

- **Temperatura**

La cuenca presenta 2 estaciones con estadística de temperatura que son consideradas con buena disponibilidad y calidad de información, es decir el registro necesitó menos de un 10% de datos rellenados o corregidos dentro del periodo de análisis 1970 – 2014. Con el registro completo, se determinaron las estaciones Copiapó DMC y Lautaro Embalse como representativas de la cuenca.

- **Análisis Espacial**

Los mapas topoclimáticos generados permitieron observar que su distribución espacial en la cuenca se encuentra dominada por la elevación, lo cual no contradice la suposición inicial.

No se observan gradientes latitudinales o longitudinales que permitan determinar influencia marítima. Sin embargo, este análisis debe ser confirmado con la implementación de un mayor número de estaciones, para futuros nuevos modelos topoclimáticos.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de la temperatura, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

En su agregación temporal anual, al igual que para la precipitación, mostró ciclos entre los 3 a 5 años, detectándose un ciclo particular de 10 años. En el análisis del periodo de invierno, en el sector costero se detectaron ciclos entre los 3 a 8 años, mayores a lo observado en la zona cordillerana donde no se presentaron ciclos sobre los 5 años. Finalmente, para la agregación de verano, se observan ciclos en torno a los 4 años y llegándose a detectar uno de 20, sin embargo, éste último es considerado fuera de la escala de estimación, a pesar de su significancia estadística.

El análisis detectó una tendencia negativa durante el verano, con indicios de aumentos leves, pero poco significativos, para temperaturas medias anuales y de invierno (0,25 a 0,5°C), junto a cambios significativos tanto positivos como negativos de su varianza (Negativos desde un 40 a 60% al Norte de la cuenca, y aumentos de un 20 a 60% al sur de esta).

- **Variabilidad de Temperatura**

En términos de comportamiento medio, la cuenca del Copiapó es similar a la del río Loa. Exhibe un aumento en sus temperaturas mínima y promedio para la estación copiapó DMC de 0,78 y 0,1°C, mientras que Lautaro Embalse presenta reducciones en sus temperaturas mínimas, máximas y promedios del orden de 0,3, 1 y 0,2 °C respectivamente.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, presentó correlaciones positivas significativas para todos los indicadores ENSO (anual, invierno y verano) y PDO (anual, invierno y verano) de invierno con el Ind_T anual, siendo mayor para el PDO de verano. Llama la atención que cuyos tres Ind_T (anual, invierno y verano) muestran correlaciones negativas significativas con el indicador AAO de verano, lo cual requiere análisis adicionales para explicar la influencia tan aislada y al norte de Chile de este forzante climático.

- **Disponibilidad Hídrica**

El análisis de disponibilidad hídrica en la cuenca, toma en consideración los antecedentes indicados en el Cuadro 4.3-1 y el Cuadro 4.3-2 que presentan valores medios de oferta hídrica superficial y subterránea.

En el sistema superficial los antecedentes indican que el caudal medio del río Copiapó corresponde a 3.501 l/s, existiendo una demanda hídrica inferior de acuerdo a los derechos superficiales permanentes y consuntivos otorgados a la fecha que llegan a los 1.353 l/s. Sin embargo, la situación cambio en el sistema subterráneo, donde los antecedentes indican una oferta de 4.500 l/s, que habría sido superada cerca del año 1990, llegando en la actualidad a 21.096 l/s otorgados en derechos, siendo la cuenca más afectada de la macrozona Norte.

- **Niveles de Pozos y Recarga Subterránea**

Se identificaron pozos que manifiestan una relación en sus niveles freáticos con el aumento del caudal superficial, ubicándose principalmente en la zona cordillerana de la cuenca. A su vez, se analizaron los niveles freáticos de los pozos en busca de identificar tendencia en sus mediciones. Se determinó la existencia de pendientes negativas en la zona cordillerana y costera, sin embargo, en este último se aprecian dos pozos con pendiente positiva al contrario de la tendencia general del sector, los cuales han experimentado un aumento de nivel aproximado de 1 m durante los últimos 30 años.

Por otro lado, en el análisis realizado a la variabilidad temporal de la recarga, se observó que en términos medios corresponde a un 14% de la precipitación de la cuenca. El análisis estadístico presentó un aumento del 32% de la recarga media, lo cual equivale a 1,3 l/s, en el periodo comprendido por los años 1986 – 2014 soportada por un aumento en la varianza que, al igual que las precipitaciones, se puede asociar a la existencia de varios años húmedos en el periodo.

- **Caudales**

En términos de caudales, se analizó la estación Jorquera en Vertedero, debido a que presento la mejor extensión y fue susceptible de ser rellenada considerando un régimen natural. La serie de tiempo es estacionaria, por lo que no presenta dificultades para el análisis temporal.

El análisis temporal detectó ciclos que 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 Jorquera en la Guardia y Lautaro Embalse. El ciclo de 4,8 años es exclusivo de la serie de caudales, por lo que corresponde a una característica particular de la zona.

- **Comentario General de la Cuenca**

En términos globales, los mayores cambios en el patrón hidrometeorológico se producen en términos de variabilidad, más que en magnitud. Esto quiere decir, que se observan más cambios ligados a eventos extremos. En términos espaciales se puede decir que las tendencias están localizadas en una zona específica de la cuenca y no representan necesariamente un cambio global de la misma. En opinión de este consultor este podría ser una cuenca que se encuentra en una transición hacia un patrón de cambio más definitivo que debe ser evaluado con mejor información.

10.2.3 Cuenca del Río Limarí

- **Precipitaciones**

La cuenca presenta 22 estaciones con estadística de precipitación que permitió un relleno adecuado del periodo de análisis 1960 – 2014. Con el registro completo, se determinaron las estaciones Paloma Embalse, Punitaqui y Las Ramadas como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente.

- **Análisis Espacial**

La generación de los mapas topoclimáticos de precipitación media permitieron observar su distribución espacial en la cuenca para las agregaciones temporales de invierno, verano y anual. El mapa mostró que la cuenca presenta un marcado régimen orográfico y una variación importante de las precipitaciones de Norte a Sur.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de las precipitaciones, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

En relación a los ciclos detectados, la agregación anual exhibe rangos entre 3 a 7 años, siendo los mayores los de la estación La Paloma Embalse, al igual que para su agregación de invierno, mientras que las otras estaciones presentan ciclos entre 2 a 4 años. En el caso de la agregación de verano, y al contrario de la agregación de invierno, 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).

El análisis no detectó ninguna tendencia que sea estadísticamente significativa, salvo en una estación, la cual sugiere una disminución de la magnitud de la variable (Estación La Placilla). Además, se observan aumentos de la varianza significativos durante el periodo de verano (10 a 20% concentrados en la parte norte de la cuenca).

- **Variabilidad de Precipitaciones**

El análisis del cambio en las precipitaciones se realizó sobre las probabilidades de excedencia 10% (P10), 50% (P50) y 85% (P85), mediante un análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 y considerando las tres agregaciones temporales definidas (anual, invierno y verano). Los resultados muestran signos inconsistentes entre las estaciones de la cuenca, los que sin embargo no corresponden a cambios significativos en el régimen de precipitaciones.

Para P50% a nivel anual, la cuenca del río Limarí presenta un comportamiento más errático. Tanto las estaciones de Punitaqui y Paloma Embalse presentan reducciones de un 6,8 y 5,3%, mientras que la estación Las Ramadas presenta un aumento considerable estimado en 38,8%, explicado por el alza en el período de invierno definido

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, presentó una mayor correlación con el indicador ENSO, dando cuenta de su amplio rango de influencia sobre la precipitación anual. Se observó una fuerte consistencia entre las agregaciones de invierno y anual, lo cual sugiere que este periodo sería el más relevante desde el punto de vista de las precipitaciones. Por su parte, para el verano se identificó una baja respuesta a los indicadores climáticos.

- **Temperatura**

La cuenca presenta 6 estaciones con estadística de temperatura que permitió un relleno adecuado del periodo de análisis 1970 – 2014. Con el registro completo, se determinaron las estaciones Las Ramadas, Cogotí Embalse y Paloma Embalse como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente.

- **Análisis Espacial**

Posteriormente, los mapas topoclimáticos de temperatura media presentaron dificultades en la representación de la variabilidad espacial debido al bajo rango de elevaciones que poseen las estaciones disponibles. Aun así, el patrón espacial informa, más que una variación orográfica (que debiese existir a un nivel teórico), de una zona homogénea con un mismo rango de temperatura.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de la temperatura, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

En la agregación anual, se detectaron ciclos entre 3 a 5 años, concentrándose los mayores ciclos en la estación La Paloma Embalse. En cuanto al periodo de invierno, es la estación Las Ramadas, cordillerana, 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. Finalmente, para 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.

El análisis de tendencia para las temperaturas medias anuales se realizó para los periodos comprendidos por los años 1970 – 1998 y 1986 – 2014. La longitud de los periodos definidos busca considerar al menos 29 años, tras lo cual se estima que los resultados poseen validez estadística. Por medio del análisis, se observó un alza en la magnitud de la variable para todas las agregaciones temporales, con aumentos que se encuentran en el rango 0,5 – 1,0 °C.

- **Variabilidad de Temperatura**

Las variaciones presentadas para esta cuenca son bastante más consistentes. Todas las estaciones analizadas presentan un alza de temperatura tanto en su valor medio como en su temperatura mínima. Las estaciones Paloma Embalse, Cogotí y Las Ramadas exhiben aumentos promedios de 0,16, 0,93 y 0,2 °C, liderados por sus elevaciones de temperaturas mínimas de 0,58, 3,89 y 1,02 °C, por cuanto la temperatura mínima presenta un comportamiento mucho más significativo en esta cuenca. Sólo la estación Las Ramadas exhibe una reducción de 0,5 °C en su máxima.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, presentó correlaciones positivas significativas para todos los indicadores ENSO (anual, invierno y verano) con el Ind_T anual.

- **Disponibilidad Hídrica**

Los antecedentes consultados en la generación del análisis de disponibilidad hídrica corresponden a los mencionados en el Cuadro 4.3-1 y el Cuadro 4.3-2, los que presentan valores medios para la oferta hídrica superficial y subterránea de la cuenca.

La cuenca del río Limarí experimentó un peak de otorgamiento de derechos superficiales el año 1978, cuando se otorgaron más de 23.000 l/s de derechos permanentes y consuntivos. En adelante, los derechos otorgados aumentaron lentamente hasta el año 2008, donde hasta la actualidad, se han alcanzado valores superiores a 29.000 l/s. Si se considera que, de acuerdo a los antecedentes, el caudal medio de la cuenca es levemente superior a 24.000

l/s, la disponibilidad del recurso superficial fue utilizada en su totalidad en 1978, siendo superada en los años venideros.

En cuanto al sistema subterráneo, los antecedentes indican que la recarga media de la cuenca es de aproximadamente 2.569 l/s, cuyo valor fue sobrepasado en 2006 por los derechos permanentes y consuntivos otorgados a la fecha y siendo actualmente cercanos a 6.000 l/s.

- **Niveles de Pozos y Recarga Subterránea**

Se identificó en algunos casos una recuperación influenciada al aumento del caudal superficial, ubicándose principalmente en la zona de depresión intermedia. A su vez, se analizaron los niveles freáticos de los pozos en busca de identificar tendencia en sus mediciones. Se determinó la existencia de pendientes negativas en las cercanías de Ovalle junto a una leve disminución de los niveles en la zona de depresión intermedia en los últimos 2 años.

En cuanto a la recarga, se realizó un análisis de su variabilidad temporal mediante la aplicación del método de la curva número para los periodos comprendidos por los años 1960 – 1989 y 1986 – 2014. La longitud de los periodos definidos se determinaron buscando validez estadística de los resultados. De acuerdo al análisis se observó que esta variable corresponde a aproximadamente un 3% de la precipitación y que en términos medios, no ha experimentado cambios en su valor a través del tiempo. No obstante, su variabilidad si ha tenido cambios notorios, reflejado en un aumento del 31% del valor máximo en el periodo actual, correspondiente a 2,4 l/s.

- **Caudales**

Por medio del análisis temporal se detectaron ciclos que comprenden valores entre los 3 y 7 años, los 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, por lo que la caracterización temporal es consistente con sus forzantes meteorológicas.

A nivel de cuenca, los análisis muestran que 7 de las 8 estaciones analizadas no presentan una tendencia estadísticamente significativa, siendo Combarbalá en Ramadillas la única que presenta cambios significativos a nivel anual y en el periodo de verano.

- **Comentario General de la Cuenca**

En términos generales, los patrones meteorológicos analizados para la cuenca del río Limarí han experimentado cambios significativos en algunas variables. La precipitación no ha

presentados cambios significativos en su media, pero si los ha experimentado en su varianza, principalmente en periodo de verano, mientras que la temperatura, al igual que en las cuencas del río Loa y Copiapó, ha mostrado una tendencia al alza. Estos cambios son consistentes con la señal de caudal en la zona de cordillera, el que, si bien presenta ciclos dominantes similares, no presentan tendencias significativas de cambio globales.

10.2.4 Cuenca del Río Aconcagua

- **Precipitaciones**

La cuenca presenta 18 estaciones con estadística de precipitación que permitió un relleno adecuado del periodo de análisis 1960 – 2014. Con el registro completo, se determinaron las estaciones Lo Rojas, San Felipe y Riecillos como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente.

- **Análisis Espacial**

Se generaron mapas topoclimáticos de precipitación media, que permitieron observar su distribución espacial en la cuenca para las agregaciones temporales de invierno, verano y anual. El mapa mostró que la cuenca presenta una gran variabilidad de la precipitación con la altura, lo cual es correcto, pero es importante hacer notar que la cuenca no posee mediciones por sobre los 3.000 m s.n.m., por lo que la zona alta de las cuencas podría presentar sobreestimaciones en su magnitud.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de las precipitaciones, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

La agregación anual presenta ciclos entre 3 y 5 años. La mayor variabilidad en ciclos lo tiene la estación Lo Rojas, representante de la zona costera, la cual advierte de ciclos de 2, 3, 5 e incluso 7 años de recurrencia. San Felipe (depresión intermedia) y Riecillos (zona cordillerana) exhiben un ciclo común de 5 años, pero Riecillos además posee un ciclo bianual. Para el periodo de invierno, lo más significativo ocurre con la estación Lo Rojas, que exhibe un ciclo de 12 a 13 años, el cual también es observado en San Felipe, lo que podría indicar el efecto de una forzante decadal en la zona. Finalmente, en la agregación de verano, la precipitación en zona de cordillera exhibe 2 ciclos estables de 3 y 4 años, mientras que la estación más costera, Lo Rojas, exhibe ciclos de 2 y 7 años.

El análisis no detectó tendencia que sea estadísticamente significativa. Sin embargo, se observan aumentos de la varianza significativos sólo durante el periodo de verano.

- **Variabilidad de Precipitaciones**

El análisis del cambio en las precipitaciones se realizó sobre las probabilidades de excedencia 10% (P10), 50% (P50) y 85% (P85), mediante un análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 y considerando las tres agregaciones temporales definidas (anual, invierno y verano). Los resultados muestran un decaimiento generalizado para todas las probabilidades de excedencia y estaciones.

En términos de P50% y a nivel anual, la cuenca del Aconcagua presenta una reducción en la estación Lo Rojas y Riecillos de un 6,6 y 11,6% respectivamente, en cambio, la estación San Felipe, muestra un aumento del 12,4%. En general, los cambios detectados en invierno son mucho más dominantes para el cambio explicado a nivel anual. Se detectaron reducciones de precipitaciones para todo el período de verano.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, presentó además de las correlaciones del Ind_{PP} anual con ENSO, correlaciones positivas con los indicadores de agregación anual y verano de PDO. También es significativa la correlación negativa con el indicador de verano AAO, observándose de igual forma esta situación en las cuencas de los ríos Maipo y Bío-Bío.

- **Temperatura**

La cuenca presenta 4 estaciones con estadística de temperatura que permitió el relleno del periodo de análisis 1970 – 2014. Sin embargo, las correlaciones obtenidas no fueron adecuadas debido al bajo número de estaciones. Con el registro completo, se determinaron las estaciones Lliu-Lliu Embalse, Quillota y Vilcuya como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente.

- **Análisis Espacial**

Posteriormente, los mapas topoclimáticos permitieron observar el efecto de la elevación en los valores medios, aunque el bajo número de estaciones de temperatura existentes conlleva a una zonificación más gruesa de la variabilidad existente.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

En su agregación temporal anual, Vilcuya presenta el mismo ciclo bianual de Riecillos. Las otras estaciones, Quillota y Lliu-Lliu Embalse, presentan ciclos bastante más variables y distintos entre sí. Quillota presenta ciclos de 3 y 7 años (descartando el de 22 años),

mientras que 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. Los ciclos de 4, 5 y 9 años se observan también para la agregación temporal de invierno en el caso de la temperatura de Lliu-Lliu, mientras que Quillota agrega los ciclos de 3 y 7 años (descartándose también el ciclo de 22,5 años). Finalmente, en el periodo de verano, Vilcuya y Lliu-Lliu Embalse presentan ciclos de 5 y 4 años respectivamente, sin embargo, Quillota, agrega un ciclo del orden de los 9 años.

El análisis de tendencia para las temperaturas medias anuales se realizó para los periodos comprendidos por los años 1970 – 1998 y 1986 – 2014. La longitud de los periodos definidos busca considerar al menos 29 años, tras lo cual se estima que los resultados poseen validez estadística. El análisis de tendencia, presentó un aumento significativo en la magnitud de la variable para las agregaciones temporales anual y verano, con aumentos que se encuentran en el rango 0,5 – 1,0 °C.

- **Variabilidad de Temperatura**

Esta cuenca, se exhibe un aumento, aunque leve de la temperatura promedio. Las estaciones de Lliu-Lliu, Quillota y Vilcuya presentaron aumentos de 0,05, 0,28 y 0,22 °C respectivamente, explicado también por su variación en las temperaturas mínimas.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, presentó correlaciones positivas significativas con los indicadores ENSO anual y de verano, siendo levemente mayores las correlaciones con ENSO de verano.

- **Disponibilidad Hídrica**

El análisis de disponibilidad fue realizado tomando como referencia los valores de oferta hídrica estimados en los antecedentes consultados y presentados con anterioridad en el Cuadro 4.3-1 y el Cuadro 4.3-2.

La cuenca del río Aconcagua experimentó el otorgamiento de casi la totalidad de los derechos superficiales durante la década de los años 70, totalizando aproximadamente 123.000 l/s de derechos permanentes y consuntivos. En adelante, los derechos otorgados aumentaron lentamente hasta la actualidad a valores superiores a 146.000 l/s. Si se considera que, de acuerdo a los antecedentes, el caudal asociado al 85% de probabilidad de excedencia de la cuenca es levemente superior a 25.000 l/s, la disponibilidad del recurso superficial fue superada en 1974, siendo superada en la actualidad en más de 5 veces. En cuanto al sistema subterráneo, los antecedentes indican que la recarga media de la cuenca

es de aproximadamente 18.620 l/s, cuyo valor fue sobrepasado en 2003 por los derechos permanentes y consuntivos otorgados a la fecha y siendo actualmente cercanos a 35.500 l/s.

- **Niveles de Pozos y Recarga Subterránea**

En cuanto a los niveles subterráneos en la cuenca, se identificó en algunos casos una recuperación influenciada al aumento del caudal superficial, ubicándose principalmente en la zona de depresión intermedia, cercano a la ciudad de San Felipe. A su vez, se analizaron los niveles freáticos de los pozos en busca de identificar tendencia en sus mediciones. Se determinó la existencia de pendientes negativas en la zona costera y depresión intermedia, cercanos a los poblados de La Calera y San Felipe respectivamente.

En cuanto a la recarga, los análisis de su comportamiento muestran que esta variable oscila entre un 5% y un 9% de la precipitación y que, en términos medios, no ha experimentado cambios notorios en el tiempo, salvo en los últimos 10 años, donde ha decrecido en términos porcentuales. Al comparar los periodos 1960-1988 y 1986-2014 se observa una disminución en su valor medio de aproximadamente un 6%, correspondiente a 1,1 l/s, mientras que su varianza también se ha visto disminuida.

- **Caudales**

El análisis de tendencia para las estaciones fluviométricas analizadas, mostró que sólo la estación Juncal en Juncal presenta una tendencia a la baja (anual e invierno), mientras que las otras 3 estaciones no muestran ninguna señal significativa a la baja. Cabe destacar que la estación posee un régimen hidrológico nival, la que puede ser mucho más sensible a los cambios de temperatura.

Para el análisis de los ciclos, se seleccionó la estación Aconcagua en Chacabuquito. Los ciclos de caudales detectados 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. Estos ciclos sugieren relaciones con forzantes externas.

- **Comentario General de la Cuenca**

Los patrones meteorológicos analizados para la cuenca del río Aconcagua han experimentado cambios significativos en algunas variables. La precipitación no ha presentados cambios significativos en su media, pero si los ha experimentado en su varianza, principalmente en periodo de verano, mientras que la temperatura, al igual que en las cuencas de la macrozona norte, ha mostrado una tendencia al alza. Las series de caudales

analizadas aun no presentan una tendencia global a la baja, la excepción es Juncal en Juncal, que, al ser una estación alta, de régimen nival, es mucho más sensible al cambio de temperatura.

10.2.5 Cuenca del Río Maipo

- **Precipitaciones**

La cuenca presenta 39 estaciones con estadística de precipitación que permitió un relleno adecuado del periodo de análisis 1960 – 2014. Con el registro completo, se determinaron las estaciones San Antonio (Pta. Panul), Quinta Normal Santiago y San José de Maipo Retén como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente.

- **Análisis Espacial**

Luego, los mapas topoclimáticos de precipitación media, permitieron observar su distribución espacial en la cuenca para las agregaciones temporales de invierno, verano y anual. El mapa mostró que la cuenca presenta una gran variabilidad de la precipitación con la altura, pero al igual que en la cuenca del río Aconcagua, no se tienen mediciones por sobre los 3.000 m s.n.m., por lo que la zona alta de las cuencas podría presentar sobreestimaciones en su magnitud.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de las precipitaciones, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

En relación a los ciclos detectados, la agregación anual presenta ciclos entre 2, 4, 5 y 7 años. Los mayores periodos están asociados a la estación Quinta Normal, mientras que la estación San Antonio (costera) presenta ciclos acotados de 2,5 y 6 años. Por otra parte, la estación San José de Maipo (cordillera) presenta ciclos no mayores a 4 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. Mientras en el periodo de verano, los mayores periodos se observan para Quinta Normal (2 y 7 años), seguidos de San Antonio (4 años) y San José de Maipo (2-3 años).

Finalmente, el análisis de tendencia no presentó ninguna que sea estadísticamente significativa. Sin embargo, se observan aumentos de la varianza significativos durante el periodo de verano.

- **Variabilidad de Precipitaciones**

El análisis del cambio en las precipitaciones se realizó sobre las probabilidades de excedencia 10% (P10), 50% (P50) y 85% (P85), mediante un análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 y considerando las tres agregaciones temporales definidas (anual, invierno y verano). Los resultados no presentan un patrón de cambios consistente, a excepción de una reducción de las precipitaciones P50 durante el periodo de verano.

Para P50% y a nivel anual, las estaciones de San Antonio y Quinta Normal presentan una reducción promedio de 5,4%, mientras que San José de Maipo, exhibe un aumento de 8,9%.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, presentó además de las correlaciones del Ind_{PP} anual con ENSO, correlaciones positivas con los indicadores anual y de verano de PDO. También es significativa la correlación negativa con el indicador de verano AAO, observándose de igual forma esta situación en las cuencas de los ríos Aconcagua y Bío-Bío.

- **Temperatura**

La cuenca presenta 11 estaciones con estadística de temperatura que permitió un relleno adecuado del periodo de análisis 1970 – 2014. Con el registro completo, se determinaron las estaciones Melipilla, Pudahuel Santiago y El Yeso Embalse como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente.

- **Análisis Espacial**

Los mapas topoclimáticos de temperatura media, permitieron observar su distribución espacial en la cuenca para las agregaciones temporales de invierno, verano y anual. El mapa mostró el efecto de la elevación en los valores medios, observándose también situaciones climáticas particulares, como la zona de mayor temperatura observada en el sector norte de la cuenca.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de la temperatura, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

En la agregación temporal anual, 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. Melipilla (costa) presenta ciclos que no superan los 3 años. Dentro del periodo de invierno, 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. Mientras que, en la agregación temporal de verano, todas las estaciones presentan ciclos comunes entre 2 y 4 años, pero sólo Pudahuel exhibe un ciclo de 7 años.

El análisis de tendencia para las temperaturas medias anuales se realizó para los periodos comprendidos por los años 1970 – 1998 y 1986 – 2014. La longitud de los periodos definidos busca considerar al menos 29 años, tras lo cual se estima que los resultados poseen validez estadística. De esta forma, se observó un aumento significativo en la magnitud de la variable para las agregaciones temporales anual y verano, con aumentos que se encuentran en el rango 0,5 – 1,0 °C.

- **Variabilidad de Temperatura**

La cuenca presenta un comportamiento consistente al alza de las temperaturas en todas sus estaciones. A nivel promedio, las estaciones de Melipilla, Pudahuel y El Yeso exhiben un alza de 0,22, 0,44 y 0,38°C respectivamente.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, presentó correlaciones positivas significativas con los indicadores ENSO anual y de verano, siendo levemente mayores las correlaciones con ENSO de verano.

- **Disponibilidad Hídrica**

El análisis de disponibilidad hídrica fue realizado tomando como referencia los valores de oferta hídrica estimados en los antecedentes consultados y presentados con anterioridad en el Cuadro 4.3-1 y el Cuadro 4.3-2.

Una parte importante de los derechos superficiales permanentes y consuntivos fueron otorgados en 1969 (aprox. 86.000 l/s), para luego ir aumentando paulatinamente hasta llegar a los más de 206.000 l/s otorgados en la actualidad. Si se considera que, de acuerdo a los antecedentes, el caudal asociado al 85% de probabilidad de excedencia de la cuenca es levemente superior a 116.000 l/s, la oferta hídrica superficial fue superada en 1979, siendo superada en la actualidad en aproximadamente 1,8 veces.

En cuanto al sistema subterráneo, los antecedentes indican que la recarga media de la cuenca es de aproximadamente 57.663 l/s, cuyo valor fue sobrepasado en 1999 por los derechos permanentes y consuntivos otorgados a la fecha y siendo actualmente cercanos a 120.000 l/s, es decir, aproximadamente el doble de la oferta.

- **Niveles de Pozos y Recarga Subterránea**

Se identificó en algunos casos una recuperación de los niveles freáticos asociados al aumento del caudal superficial, ubicándose principalmente en la zona de depresión intermedia. A su vez, se analizaron los niveles freáticos de los pozos en busca de identificar tendencia en sus mediciones. Se determinó la existencia de pendientes negativas extendidas de norte a sur en la zona de depresión intermedia, sin un punto de concentración claro dentro de la misma.

En cuanto a la recarga subterránea, los análisis de su comportamiento muestran que esta variable oscila entre un 20% y un 25% de la precipitación y que, en términos medios, no ha experimentado cambios notorios en el tiempo en términos porcentuales. Al comparar los periodos 1960-1988 y 1986-2014 se observa un aumento en su valor medio de aproximadamente 8%, equivalentes a 4,8 l/s, mientras que su varianza también ha aumentado. Lo anterior se debe principalmente a los eventos de precipitación observados los años 1997 y 2003, que generan un aumento significativo de la recarga.

- **Caudales**

El análisis de tendencia sobre las 3 estaciones analizadas muestra que la estación Mapocho en los Almendros, de régimen mixto nivo-pluvial, presenta una tendencia significativa a la baja, concentrada en la agregación temporal anual e invierno, señal que aún no es estadísticamente significativa para Maipo en San Alfonso ni Arrayan en la Montosa.

El análisis de los ciclos dominantes fue realizado sobre la estación Maipo en San Alfonso, detectándose ciclos de 2, 4, 6, 7 y 12 años. En comparación con la cuenca del Aconcagua los ciclos son mayores en magnitud. La agregación temporal de invierno concentra los ciclos más altos, seguido por la de verano. Los ciclos de 2, 3 y 4 años fueron detectados para la estación de precipitación 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 podría condecir con influencias de forzantes externas u microclimas.

- **Comentario General de la Cuenca**

Los patrones meteorológicos analizados para la cuenca del río Maipo han experimentado cambios significativos en algunas variables. La precipitación no ha presentados cambios significativos en su media, pero sí los ha experimentado en su varianza, principalmente en periodo de verano, mientras que la temperatura, al igual que en las cuencas de la macrozona norte, ha mostrado una tendencia al alza. Cambios globales en tendencia de los caudales no son apreciables de manera uniforme sobre las series analizadas, y tal como en el caso de la cuenca del Aconcagua, una de 3 estaciones analizadas es la que presenta una tendencia estadísticamente significativa a la baja. Esto puede ser visto como un proceso de transición

hacia una señal de descenso que podría relacionarse con la señal que se observa en la temperatura.

10.2.6 Cuenca del Río Bío-Bío

- **Precipitaciones**

La cuenca presenta 5 estaciones con estadística de precipitación que permitió un relleno adecuado del periodo de análisis 1960 – 2014. Con el registro completo, se determinaron las estaciones Río Bío-Bío en Desembocadura, Las Achiras y Laguna Malleco como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente.

- **Análisis Espacial**

Luego, los mapas topoclimáticos de precipitación media, permitieron observar su distribución espacial en la cuenca para las agregaciones temporales de invierno, verano y anual. El mapa mostró que las precipitaciones de la cuenca presentan una dependencia orográfica, sin embargo, las variables que conforman el modelo presentaron el ajuste más débil entre las cuencas estudiadas.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de las precipitaciones, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y detectar posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

En su agregación anual, se detectaron ciclos menores de 2,5 años en el sector de costa y cordillera, a diferencia de la zona depresión intermedia que exhibe ciclos de 3, 6 y 9 años, dando cuenta de una influencia climática externa. Se debe tener presente que los efectos de ENSO pasados la VII Región, ya no están ligados a las magnitudes de la precipitación, sino que a la variabilidad de la misma. Este comportamiento se observa de manera opuesta en invierno, detectándose ciclos de 3 años en la depresión intermedia y ciclos de 2 y 6 años en la zona costera y cordillerana. Finalmente, se observa para la agregación temporal de verano, ciclos de 5 y 9 años en la zona cordillerana, ratificando la posible existencia de una influencia decadal detectada en la agregación anual.

Adicionalmente, algunas estaciones presentaron leves tendencias negativas de la precipitación, pero la mayoría mostró un régimen inalterado y con una reducción leve en su varianza.

- **Variabilidad de Precipitaciones**

El análisis del cambio en las precipitaciones se realizó sobre las probabilidades de excedencia 10% (P10), 50% (P50) y 85% (P85), mediante un análisis comparativo entre los periodos 1960

– 1989 y 1985 – 2014 y considerando las tres agregaciones temporales definidas (anual, invierno y verano). Los resultados muestran una reducción de los valores P10 en todas las estaciones y agregaciones temporales. A su vez, no se observó un patrón consistente de cambio para P50 y P80.

Para P50% y a nivel anual, la estación de costa presenta un aumento de 2.7%, mientras que Las Achiras una disminución del 2.6%. La estación Laguna Malleco no presenta un cambio significativo.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, presentó además de las correlaciones del Ind_{pp} anual con ENSO, correlaciones positivas con los indicadores anual y de verano de PDO. También es significativa la correlación negativa con el indicador de verano AAO, observándose de igual forma esta situación en las cuencas de los ríos Maipo y Aconcagua.

- **Temperatura**

La cuenca presenta 1 estación con estadística de temperatura considerada con buena disponibilidad y calidad de información. El registro se rellenó para el periodo de análisis 1970 – 2014. Con el registro completo, se determinaron las estaciones Lonquimay, Quilaco y Angol (La Mona) como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente.

- **Análisis Espacial**

Los mapas topoclimáticos de temperatura media, permitieron observar su distribución espacial en la cuenca para las agregaciones temporales de invierno, verano y anual. A diferencia de lo acontecido con el análisis de precipitación, los resultados sugieren que las estaciones de la cuenca, en general, muestran una respuesta consistente a cambios en la latitud, longitud y elevación.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de la temperatura, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

La agregación temporal anual presentó ciclos de 3 años en el sector cordillerano y en la depresión intermedia, junto a un ciclo de 7 años detectado en la estación Angol que representa el sector costero, pero sin una influencia oceánica marcada. El comportamiento para el periodo de invierno se observó bastante regular, presentando un ciclo de 2 años en toda la cuenca junto a uno de 4 años en el sector cordillerano. En la agregación temporal de

verano, la mayor variabilidad de ciclos está concentrada en cordillera con 2 ciclos muy marcados de 2 y 6 años, mientras que en el sector costero se detecta uno de 5 años.

El análisis de tendencia para las temperaturas medias anuales se realizó para los periodos comprendidos por los años 1970 – 1998 y 1986 – 2014. La longitud de los periodos definidos busca considerar al menos 29 años, tras lo cual se estima que los resultados poseen validez estadística. El análisis indicó aumentos significativos para el periodo anual y de verano, mostrando una tendencia al incremento en todas las estaciones analizadas. En términos medios, se observó un aumento de 0,5°C hasta más de 1°C y una reducción de la variabilidad.

- **Variabilidad de Temperatura**

Las estaciones de Angol Quilaco y Lonquimay presentan un aumento consistente evaluado en 0,34, 0,42 y 0,65°C respectivamente. Es destacable que tanto los cambios de mínimas y máximas son significativos del orden de 0,9°C promedio para las máximas y 1,9°C para las mínimas.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, una mayor influencia geográfica del indicador ENSO anual, de verano e invierno, con correlaciones positivas significativas. Se observaron correlaciones significativas con el indicador AAO, siendo dichas correlaciones más extensas geográficamente en el caso del Ind_T Invierno.

- **Disponibilidad Hídrica**

El análisis de disponibilidad hídrica se realizó utilizando los valores de oferta hídrica estimados en los antecedentes consultados y presentados en el Cuadro 4.3-1 y el Cuadro 4.3-2. De acuerdo a ello, se observa que en el sistema superficial el caudal medio del río Bío-Bío corresponde a 1.874.000 l/s, existiendo una demanda hídrica inferior de acuerdo a los derechos superficiales otorgados a la fecha que llegan a los 168.573 l/s. Al contrario, para el sistema subterráneo, los antecedentes indican una oferta de 46.463 l/s, siendo mayor a los derechos otorgados en la cuenca que alcanzan 10.536 l/s.

- **Niveles de Pozos y Recarga Subterránea**

Esta cuenca no posee registros de nivel freático, por lo que no se ha realizado un análisis al respecto.

En cuanto a la recarga, se realizó un análisis de su variabilidad temporal mediante la aplicación del método de la curva número para los periodos comprendidos por los años 1960 – 1989 y 1986 – 2014. La longitud de los periodos definidos se determinaron buscando

validez estadística de los resultados. El análisis realizado a la variabilidad temporal de la recarga, mostró que en términos medios corresponde a un 2% de la precipitación de la cuenca. El análisis estadístico presentó una leve disminución de la media en torno al 6%, lo que equivale a 3,1 l/s, en el periodo comprendido por los años 1986 – 2014, acompañada de una baja en la varianza.

- **Caudales**

Sólo la estación Bío-Bío en Rucalhue pudo ser analizada, presentando una tendencia significativa a la baja para su agregación temporal de invierno. Lamentablemente, no se pudo encontrar otra estadística que pudiese ser considerada o documentada en régimen natural.

Los ciclos detectados 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 las de precipitación y temperatura.

- **Comentario General de la Cuenca**

La precipitación sigue siendo una señal estable que no tiene aún cambios estadísticamente significativos como los de la temperatura. La señal de caudales es a la baja, pero sólo en una estación, la cual posee una estadística que termina en marzo del 2008, por lo que la tendencia podría ser más marcada.

10.2.7 Cuenca del Río Imperial

- **Precipitaciones**

La cuenca presenta 6 estaciones con estadística de precipitación con buena disponibilidad y calidad de información, que permitieron un relleno adecuado del periodo de análisis 1960 – 2014. Con el registro completo, se determinaron las estaciones Vilcún, Puerto Saavedra y Maquehue Temuco AD como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente.

- **Análisis Espacial**

Los mapas topoclimáticos de precipitación media, permitieron observar su distribución espacial en la cuenca para las agregaciones temporales de invierno, verano y anual, mostrando la dependencia orográfica esperada de la variable.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de las precipitaciones, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

El análisis temporal en su agregación anual presentó ciclos de 3, 4 y 5 años para la zona cordillerana, de 2 y 5 años en costa y de 8 y 10 años para la depresión intermedia, lo que sugiere una influencia forzante decadal. En el periodo de invierno, se observan ciclos de 2,5 años en la depresión intermedia y cordillera, a los que se adiciona uno de 4 en el sector costero. Finalmente, para la agregación temporal de verano se observan ciclos bajo los 5 años en la zona de costa y cordillera, mientras que en la depresión intermedia se destaca un ciclo de 8 años que ratificaría la posible influencia decadal.

El análisis de tendencia detectó algunas que resultan ser estadísticamente significativas, pero poco relevantes. Se encontraron estaciones que presentaron leves tendencias negativas, pero la mayoría mostrando un régimen inalterado y con una reducción leve en su varianza. Más importantes son los cambios en diferencias de media que se concentran en la simetral transversal de la cuenca, la cual presenta 4 estaciones con reducciones del orden de 10 a 20 mm. Los cambios más relevantes siguen siendo en términos de varianza, los que se dan uniformemente en el espacio.

- **Variabilidad de Precipitaciones**

El análisis del cambio en las precipitaciones se realizó sobre las probabilidades de excedencia 10% (P10), 50% (P50) y 85% (P85), mediante un análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 y considerando las tres agregaciones temporales definidas (anual, invierno y verano). Los resultados muestran una reducción consistente de las precipitaciones en las P50 y P85 para las tres estaciones analizadas en el periodo de verano y para dos de las estaciones en el periodo de invierno y anual.

Para P50% y a nivel anual, las estaciones de Puerto Saavedra y Manquehue Temuco presentan reducciones de 6,9 y 9,6% respectivamente. La estación Vilcún muestra un aumento de 2,1%. La cuenca exhibe un comportamiento similar a la del BíoBío, pero con porcentajes de reducción mayores.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, presentó una mayor correlación con el indicador ENSO, dando cuenta de su amplio rango de influencia sobre la precipitación anual. Se observó una fuerte consistencia entre las agregaciones de invierno y anual, lo cual sugiere

que este periodo sería el más relevante desde el punto de vista de las precipitaciones. Resulta interesante su correlación negativa durante el periodo de verano con ENSO, 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.

- **Temperatura**

La cuenca presenta 1 estación con estadística de temperatura considerada con buena disponibilidad y calidad de información. El registro se rellenó para el periodo de análisis 1970 – 2014. Con el registro completo, se determinaron las estaciones Malalcahuello, Puerto Saavedra y Maquehue Temuco AD como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente.

- **Análisis Espacial**

Posteriormente, los mapas topoclimáticos permitieron observar el efecto de la elevación en los valores medios, pero el bajo número de estaciones de temperatura existentes conlleva a una zonificación más gruesa de la variabilidad existente. Por lo tanto, nuevamente este resultado debe confirmarse con más detalle ya que el bajo número de estaciones disponibles puede ocultar la señal de variabilidad longitudinal de temperaturas.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de la temperatura, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

La agregación temporal anual evidenció ciclos de 3 y 7 años en el sector de cordillera, observándose en el resto de la cuenca ciclos inferiores a los 5 años. En el periodo de invierno, los ciclos detectados son menores a los 4 años, donde para la zona media solo se observa un ciclo bianual. Por último, en la agregación de verano, la zona alta presenta solo un ciclo de 4 años, observándose ciclos de 2 y 3 años en el resto de la cuenca. Sin embargo, se detecta un ciclo de 7 años en el sector de depresión intermedia.

El análisis de tendencia para las temperaturas medias anuales se realizó para los periodos comprendidos por los años 1970 – 1998 y 1986 – 2014. La longitud de los periodos definidos busca considerar al menos 29 años, tras lo cual se estima que los resultados poseen validez estadística. El análisis de tendencia indicó aumentos significativos para el periodo anual y de verano, con un incremento en todas las estaciones analizadas. En términos medios, se observó un aumento de 0,5°C hasta más de 1°C y una reducción de la variabilidad.

- **Variabilidad de Temperatura**

Al igual que la cuenca del BíoBío, la cuenca del río Imperial presenta un aumento consistente de la temperatura. Las estaciones Puerto Saavedra, Manquehue Temuco y Malalcahuello exhiben aumentos de temperatura de 0,43, 0,13 y 0,16 °C.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, una mayor influencia geográfica del indicador ENSO anual, de verano e invierno, con correlaciones positivas significativas. Se observaron correlaciones significativas con el indicador AAO, siendo dichas correlaciones más extensas geográficamente en el caso del Ind_T Invierno.

- **Disponibilidad Hídrica**

El análisis de disponibilidad fue realizado tomando como referencia los valores de oferta hídrica estimados en los antecedentes consultados y presentados con anterioridad en el Cuadro 4.3-1 y el Cuadro 4.3-2.

En el sistema superficial, los antecedentes indican que el caudal medio del río Imperial corresponde a 591.180 l/s, existiendo un total de derechos superficiales permanentes y consuntivos constituidos a la fecha, que llegan a los 295.209 l/s.

Por otro lado, en el sistema subterráneo, los antecedentes indican una oferta de 30.782 l/s, siendo mayor a los derechos otorgados en la cuenca que alcanzan 10.719 l/s.

- **Niveles de Pozos y Recarga Subterránea**

La cuenca no posee registros de nivel freático, por lo que no se ha realizado un análisis al respecto.

Sin embargo, en el análisis realizado a la variabilidad temporal de la recarga, se observó que en términos medios corresponde a un 4% de la precipitación de la cuenca. A su vez, el análisis estadístico presentó un comportamiento sin variaciones importantes, pues en términos medios, la recarga se ha reducido en torno a un 1%, equivalente a 0,4 l/s.

- **Caudales**

La calidad y cantidad de información de esta cuenca resulta ser mucho mejor que la del Bío-Bío, analizándose al menos 6 estaciones, de las cuáles sólo una, Cautín en Rari Ruca, presenta una señal estadísticamente significativa a la baja de caudal para la agregación de invierno, efecto que también se detectó en Bío-Bío.

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 en la precipitación en todas las agregaciones, los ciclos más altos son particularmente observados en la estación de Maquehue Temuco AD.

- **Comentario General de la Cuenca**

En términos de patrones meteorológicos, se observa que la precipitación está pasando por una transición hacia la disminución en el último periodo analizado, lo que se ratifica con las tendencias detectadas (aunque son poco relevantes aún). La temperatura es la variable que tiene una señal más fuerte, mientras que el caudal no consigue aún validar un cambio en magnitud generalizado. En general, siguen siendo mucho más relevantes los cambios asociados a la varianza de las variables (eventos extremos) que a su magnitud, por eso es más correcto hablar de una transición del patrón hidrometeorológico.

10.2.8 Cuenca del Río Aysén

- **Precipitaciones**

La cuenca presenta 11 estaciones con estadística de precipitación que permitieron un relleno adecuado del periodo de análisis 1960 – 2014. Con el registro completo, se determinaron las estaciones Puerto Aysén, Teniente Vidal y Balmaceda como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente.

- **Análisis Espacial**

Los mapas topoclimáticos de precipitación media, permitieron observar su distribución espacial en la cuenca para las agregaciones temporales de invierno, verano y anual. Los resultados mostraron una transición desde un régimen húmedo oceánico en la costa hasta un clima de estepa en las zonas altas, en que el efecto orográfico es menos relevante en comparación a las otras macrozonas.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de las precipitaciones, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

La agregación anual presentó ciclos de 4, 6 y 7 años para la estación Balmaceda (zona alta u cordillerana), mientras que para la estación Tte. Vidal (zona media) se observaron ciclos de 3, 5 y 9 años, nuevamente se advierte la presencia de un ciclo decadal para la zona sur y austral. Por otro lado, Puerto Aysén (zona baja o costera) presenta ciclos menores, de 3 y 4 años.

La agregación de invierno informó 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). En este último caso se vuelve a ratificar la posible influencia de una forzante externa con un ciclo decadal.

La agregación temporal de verano informa de variados ciclos detectados para la precipitación. En el caso de la zona alta, se confirma un ciclo de 2 a 3 años (MTM) mientras que MEM adiciona un ciclo de 6 años. La zona media tiene ciclos de 3, 5 y 7 años (los dos primeros detectados sólo con MEM) y la zona baja en Puerto Aysén informa ciclos de 2, 3, 4 y 6 años.

Finalmente, las precipitaciones totales anuales y de invierno presentaron tendencias negativas significativas tanto en la parte baja (clima más oceánico) como en la parte alta (clima de estepa) de la cuenca. En cuanto a la varianza, se observa una disminución en términos anuales.

- **Variabilidad de Precipitaciones**

El análisis del cambio en las precipitaciones se realizó sobre las probabilidades de excedencia 10% (P10), 50% (P50) y 85% (P85), mediante un análisis comparativo entre los periodos 1960 – 1989 y 1985 – 2014 y considerando las tres agregaciones temporales definidas (anual, invierno y verano). Los resultados muestran una reducción de las precipitaciones para P10, mientras que para el resto de las probabilidades de excedencia el cambio no es significativo y no se observa un patrón consistente.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, no presentó correlaciones con ninguno de los indicadores climáticos evaluados (ENSO, PDO y AAO).

Para P50% y a nivel anual, las estaciones de Puerto Aysén y Balmaceda muestran reducciones de 6,8 y 5,7%. La estación Teniente Vidal muestra un aumento de 2,1%.

- **Temperatura**

La cuenca presenta 8 estaciones con estadística de temperatura que permitieron un relleno adecuado del periodo de análisis 1970 – 2014. Con el registro completo, se determinaron las estaciones Puerto Aysén, Teniente Vidal y Balmaceda como representativas de las zonas costeras, valle y cordillera, respectivamente.

- **Análisis Espacial**

Posteriormente, los mapas topoclimáticos permitieron observar el efecto de la elevación en los valores medios, aunque debido a las menores elevaciones en la cuenca, en comparación

a las demás macrozonas, la temperatura se presenta en una distribución más homogénea en el espacio.

- **Análisis Temporal**

Determinada la distribución espacial de la temperatura, se realizó un análisis temporal a la estadística de las estaciones representativas con el objetivo de determinar ciclos irregulares y entender posibles cambios en el registro histórico. Los resultados del análisis muestran que:

En el caso de la zona alta, se detectaron ciclos de 4 años. Tanto Tte. Vidal como Puerto Aysén presentan ciclos de 5 y 4 años respectivamente, sin embargo, MEM atribuyó un ciclo adicional 6 años para la primera.

Para la temperatura en su agregación temporal de invierno fue donde se obtuvieron mayores diferencias respecto de los métodos utilizados en la detección de los ciclos. Mientras MTM informa de ciclos de 10 años para la zona baja (corroborado por MEM), para la zona media y alta MTM sólo informó de un ciclo 4 y 2 años respectivamente, pero MEM detectó un ciclo de 10 y otro de 14 años. Este último se encuentra en el límite de la frecuencia detectable propia del método y debe ser tomado con cautela.

Finalmente, en el periodo de verano, la zona baja presentó la misma variabilidad detectada con la precipitación, mientras que la zona media y alta exhiben ciclos de 2 y 3 años detectados con MTM, sumado a ciclos de 6 y 14 años sumados con MEM, los cuales requieren de mayor análisis con índices o forzantes externas.

Dentro del análisis de tendencia, no se observaron cambios significativos en esta variable.

- **Variabilidad de Temperatura**

En el caso de la temperatura, no se presentan porcentajes de variación significativos generales. Lo único a destacar es que para la temperatura mínima, para la estación Teniente Vidal y Balmaceda se tienen reducciones de 3,4 y 0,2 °C. Mientras que la estación Puerto Aysén presenta un aumento de 0,25°C. Pero no hay cambios robustos a nivel anual.

- **Forzantes Climáticas Externas**

El análisis de las posibles influencias climáticas de alcance global durante las tres agregaciones temporales de análisis definidas, presentó que el indicador AAO (anual, invierno y verano) es el único que se correlaciona positivamente con los Ind_T Anual e Invierno.

- **Disponibilidad Hídrica**

El análisis de disponibilidad fue realizado tomando como referencia los valores de oferta hídrica estimados en los antecedentes consultados y presentados con anterioridad en el Cuadro 4.3-1 y el Cuadro 4.3-2.

Los derechos superficiales permanentes y consuntivos han sido otorgados desde la década de los 80, correspondiendo sólo a un pequeño porcentaje de la oferta hídrica total de la cuenca.

En cuanto al sistema subterráneo, no existen antecedentes que permitan definir de manera precisa la recarga de la cuenca, sin embargo, el bajo caudal de explotación otorgado a la actualidad (aprox. 352 l/s) permite indicar que los derechos no han superado la oferta hídrica subterránea.

- **Niveles de Pozos y Recarga Subterránea**

En cuanto a los niveles subterráneos, esta cuenca no posee registros de nivel freático, por lo que no se ha realizado un análisis al respecto.

En cuanto a la recarga, si bien no se dispone de antecedentes, los análisis de su comportamiento mediante la utilización de parámetros asociados a la macrozona sur muestran que esta variable oscila entre un 3% y un 4% de la precipitación y que en términos medios, ha experimentado una leve baja porcentual. Al comparar los periodos 1960-1988 y 1986-2014 se observa una disminución en su valor medio de aproximadamente 12%, lo cual corresponde a 1,4 l/s, mientras que su varianza también ha disminuido.

- **Caudales**

Para la cuenca del río Aysén, al igual que en el caso del Bío-Bío, se analizó una estación pluviométrica, debido al corto registro disponible (35 años), la cual también fue completada por el método del autorellenado según año hidrológico. Sólo la estación Coyhaique en Tejas Verdes presenta una señal inequívoca en las tres agregaciones temporales calculadas de tendencia hacia la baja.

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.

- **Comentario General de la Cuenca**

En términos generales, los patrones meteorológicos analizados para la cuenca del río Aysén han experimentado cambios significativos en algunas variables. La precipitación ha presentado una disminución en su media y su varianza, mientras que la temperatura no ha

experimentado cambios significativos a través del tiempo. Una serie de caudal presenta una señal inequívoca a la baja, mientras que el ciclo característico de 5 años es observado en la precipitación.

Finalmente, se presenta el Cuadro 10.2-1 correspondiente a un resumen de las variables analizadas y sus principales resultados para la agregación anual.

10.3 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. En este sentido la metodología aplicada de curvas doble acumuladas, correlaciones y chequeo de consistencia son las adecuadas. Las series fluviométricas representan una dificultad mayor, exclusivamente debido a que la disponibilidad de estadística en régimen natural es escasa.

Adicionalmente se han definido agregaciones temporales que buscan caracterizar los regímenes hidrológicos de cada una de las cuencas y que permiten precisar los cambios de variabilidad en el tiempo, dado que no todos los cambios se producen a nivel anual, sino que pueden concentrarse en un periodo de invierno y verano, donde pueden resultar incluso más significativos, mientras que sólo considerar un nivel anual puede “diluir o modular” el cambio detectado.

La variabilidad espacial ha sido analizada a través de la construcción de modelos topoclimáticos los cuáles buscan una relación entre la variable (precipitación o temperatura) con variables o parámetros geográficos y geomorfológicos, lo que representa una visión más real de la variabilidad espacial de estas variables, y una actualización del análisis tradicional de isoyetas o isothermas, particularmente para las tres agregaciones temporales evaluadas aquí. Adicionalmente presentan una visión más actualizada del balance hídrico.

Los análisis sobre la precipitación en dos periodos (P1 y P2), buscan identificar los cambios en probabilidades de excedencia características (10, 50 y 85%), así como en su respectiva curva de variación estacional. Estos cambios pueden influir directamente en futuros cambios de comportamiento del caudal. Adicionalmente, el periodo 1 posee una relación mucho más cercana con la estadística disponible del balance hídrico, por lo que los cambios que se presentan en el periodo 2 corresponden a actualizaciones relevantes en términos de caracterización de cambios en las variables.

La detección de periodos dominantes mediante la aplicación de los métodos SSA, MTM y MEM ha permitido caracterizar todos los periodos dominantes no regulares que permiten discernir entre ciclos relacionados con una dinámica local y la presencia de otros ciclos de mayor escala que pueden tener una relación con forzantes externas como ENSO, PDO y AAO.

Parte de este estudio contempló el análisis de la cobertura nival y la variación del equivalente líquido en agua (EA) a través del procesamiento de imágenes satelitales. Esto ha permitido identificar importantes tendencias al descenso del EA en las cuencas de la macrozona norte (Copiapó y Limarí), centro (Aconcagua y Maipo) y sur (Itata). Adicionalmente se ha presentado el patrón de acumulación promedio mensual como también para un año húmedo y un año seco, para analizar las diferencias en términos de cobertura. Esta información es muy relevante para la planificación de instrumental hidrometeorológico en altura, pues permite la identificación de zonas de acumulación y derretimiento y presenta un “intervalo espacial de confianza” en donde es susceptible de medir en ambas condiciones hidrológicas.

Respecto a la asignación de derechos que lleva a cabo la DGA, ésta debería considerar el análisis de toda la estadística existente en la zona donde se solicita otorgar un derecho de aprovechamiento o traslado de ejercicio de manera de constatar la existencia o no de cambios en la disponibilidad de los recursos superficiales y subterráneos. Esto significa que, por ejemplo, el caudal disponible tipo 85% (derecho permanente) podría variar a futuro según sea el horizonte de análisis, debiendo reducirse la disponibilidad efectiva proyectada. Para el caso de las cuencas en que ya se haya declarado el agotamiento para efectos de constituir nuevos derechos de aprovechamiento de aguas permanente y continuos, se podría utilizar algunos de los mecanismos contemplados en el código de aguas (artículos 62 y 314). En concreto se trataría de establecer una especie de factor de corrección de los caudales (85% u otro), el cual variaría espacialmente dentro del país (asociándose a una cuenca o subcuenca).

Es importante mencionar que los resultados presentados en relación al otorgamiento de derechos deben ser interpretados de manera conservadora, debido a que implica una serie de supuestos en base a la información disponible en la base de datos del CPA. Para obtener resultados de manera más precisa se requiere un análisis detallado de los informes técnicos y expedientes asociados a los derechos de aguas.

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. De acuerdo a ello, no entregar los permisos de manera permanente y se estima conveniente establecer la temporalidad de estos caudales, definiéndose un período máximo de 10 años para la otorgación de los permisos de descarga, plazo después del cual deberán establecerse los nuevos valores de los caudales de dilución en los puntos de interés.

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. Por ejemplo, estudios recientes realizados por la Subsecretaría de Energía (Eridanus et al., 2016) muestran no solo una reducción de los caudales disponibles para generación en la cuenca del Maule, pero además un reordenamiento del caudal disponible durante el año. Los modelos hidrológicos sugieren que cuencas que actualmente se rigen por un régimen nival van a presentar regímenes pluvio-nivales en el futuro, observándose una alteración importante en las curvas de variación estacional.

Tal como muestra este informe, la presencia de tendencias en las variables hidrometeorológicas puede presentar variaciones espaciales. Dada la gran variabilidad climática del país, esto es esperable. Por eso, es importante que la gestión hídrica de largo plazo considere esta variabilidad al momento de establecer reglamentos de otorgamiento y constitución de derechos, dado que el impacto del cambio climático podría tener una componente de variabilidad espacial importante.

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. En particular, para las 29 estaciones de caudal originalmente escogidas, se observaron que el número de vacíos o datos inválidos de los últimos años es comparable al mismo porcentaje de omisión de información que se tenía entre los años 1970-1980. Esto sin duda representa un retroceso para el futuro de esta clase de estudios, más aún pensando en que las series que aquí se han escogido son representativas del régimen natural de los sistemas, y por ende son la oferta hídrica hacia aguas abajo. Más aún, existen estaciones meteorológicas en el Norte, como “El Indio”, que han dejado de medirse, y que son muy relevantes para el análisis de patrones temporales y espaciales.
- 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, por lo que la generación de estos modelos puede dificultarse. Por ejemplo, en el Norte, la temperatura es homogénea en una extensión de área bastante mayor, por lo que un modelo topoclimático difícilmente podrá proporcionar una ecuación que para una misma longitud, y diferentes latitudes a lo largo de esta, presente un mismo valor de, por ejemplo, temperatura.

Adicionalmente, sigue siendo desafiante la aplicación de estos métodos en regiones más al Norte, en donde además de la poca variabilidad espacial, las precipitaciones tienden a ser muy bajas. Sin embargo, existen herramientas computacionales, como los datos provenientes de diferentes “Reanálisis” proporcionados por la NASA, que estiman información en zonas donde no se tienen mediciones. Si bien es necesario pasar por una

etapa de ajuste, el uso de esta clase de herramientas debiese ser un eje central en el desarrollo de las capacidades de los equipos técnicos de la DGA.

En particular, para este estudio, los modelos ajustados tuvieron la misma base paramétrica, pues se basaron en variables de fácil estimación para cualquier organismo y teniendo en consideración el criterio de aplicabilidad para cualquier cuenca. Esto significa que hay un espacio para la mejora de estos modelos, por ejemplo, mediante un levantamiento de información extra que permita mejorar las relaciones encontradas y haciendo más robustos los patrones espaciales. En el caso de la zona norte, es primordial aumentar la densidad de estaciones para mejorar la validación de dichos modelos.

Finalmente, los modelos topoclimáticos fueron traspados a través de un archivo raster, por lo que se pueden generar tanto isoyetas como isotermas a partir de esta información las cuáles estarán actualizadas para el quehacer de la DGA y como base para los consultores. La generación de estas curvas, si bien puede automatizarse, debe incluir una revisión del resultado, respecto de la consistencia del patrón espacial que proporcionen.

- 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. Adicionalmente muchas de estas minutas están basadas en estudios hidrológicos e hidrogeológicos que requieren de actualizaciones.

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 infructoso) 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.
- 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.

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.

CAPÍTULO 11 BIBLIOGRAFÍA

<http://www.cr2.cl/recursos-y-publicaciones/bases-de-datos/>

Arulampalam, M. S., Maskell, S., Gordon, N., & Clapp, T. (2002). A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking. *Signal Processing, IEEE Transactions on*, 50(2), 174-188.

Benítez, C., Arias, W., Quiroz, J. (1980). *Manual de Conservación de Suelos y Aguas*. Ministerio de Agricultura y Alimentación. Lima (Perú).

Boisier, J. P., R. Rondanelli, R. D. Garreaud, and F. Muñoz (2016), Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 413–421, doi:[10.1002/2015GL067265](https://doi.org/10.1002/2015GL067265).

Box, G. E., Jenkins, G. M., & Reinsel, G. C. (1976). *Time series analysis: Forecasting and control*. San Francisco: Holdenday.

CANESSA, F. 2006. Evaluación de los recursos climáticos de la IV Región de Coquimbo, mediante la utilización de Topoclimatología e imágenes NOAA-AVHRR. Memoria (Ingeniero en Recursos Naturales Renovables). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Cs. Agronómicas, 178 p

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

Cortés, G., Giroto, M., & Margulis, S. A. (2013, December). A snow water equivalent reanalysis case study over an Andean watershed. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 1, p. 0628).

Cortés, G., Giroto, M., & Margulis, S. A. (2014a). Analysis of sub-pixel snow and ice extent over the extratropical Andes using spectral unmixing of historical Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 141, 64-78.

Cortés, G., Giroto, M., & Margulis, S. A. (2014b, December). Snow Water Equivalent Reanalysis Over a Scarce Data Region Via Assimilation of Snow Covered Area from Landsat 5, 7 and 8. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 1, p. 0411).

Cortés, G. (2015). "Gaining insight into Andean snowpack climatology and change using a snow reanalysis approach applied over the Landsat satellite record". Tesis para optar al grado de Doctor de Filosofía en Ingeniería Civil, con especialización Hidrología y Sistemas de Recursos Hídricos. Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de California (UCLA), Los Ángeles, EEUU.

Cortés, G., Giroto, M., & Margulis, S. (2016). Snow process estimation over the extratropical Andes using a data assimilation framework integrating MERRA data and Landsat imagery. *Water Resources Research*, 52(4), 2582-2600.

Cortés, G., Vargas, X., & McPhee, J. (2011). Climatic sensitivity of streamflow timing in the extratropical western Andes Cordillera. *Journal of Hydrology*, 405(1), 93-109.

Cortés, G., Schaller, S., Rojas, M., Garcia, L., Descalzi, A., Vargas, L., & McPhee, J. (2012). *Assessment of the current climate and expected climate changes in the Metropolitan Region of Santiago de Chile* (No. 03/2012). UFZ-Report, Helmholtz Centre for Environmental Research.

Cryer, D. (2009). *Time Series Analysis: With Applications in R*. Second Edition. Springer. ISBN-10: 1441926135.

DGA (1995). Dirección General de Aguas. "Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica".

DGA (2006). Modelación Superficial para la Cuenca de los ríos Maipo Mapocho. Estimación de la Recarga para Escenario Actual 2005. SDT N°235.

DGA (2008). Dirección General de Aguas. "Manual de Normas y Procedimientos para la Administración de Recursos Hídricos".

DGA (2016). Atlas del Agua Chile 2016.

Díaz, D., Morales, L., Castellaro, G., & Neira, R. (2010). Elaboración de Modelos Topoclimáticos de Variables Termopluviométricas para las Regiones del Bío-Bío y La Araucanía, Chile. *Chilean journal of agricultural research*, 70(4), 604-615.

Díaz, D., Morales, L., Castellaro, G., & Neira, F. (2011). Topoclimatic modeling of thermopluviometric variables for the Bío-Bío and La Araucanía Regions, Chile.

Donald, J. R., Soulis, E. D., Kouwen, N., & Pietroniro, A. (1995). A Land Cover-Based Snow Cover Representation for Distributed Hydrologic Models. *Water Resources Research*, 31(4), 995-1009.

Falvey, M., & Garreaud, R. D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D4).

Fernández, B., Salas, J. (1995). Transferencia de información hidrológica por correlación. *Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*. Vol. 10 N°1.

Fernandez, B. (1997). Identificación y Caracterización de Sequías Hidrológicas en Chile Central. *Ingeniería del Agua Vol.4 Num 4*, p 37-46.

Ghil, M., et al. (2002), Advanced spectral methods for climatic time series, *Rev. Geophys*, 40(1), 1003.

Giroto, M., Margulis, S. A., & Durand, M. (2014a). Probabilistic SWE reanalysis as a generalization of deterministic SWE reconstruction techniques. *Hydrological Processes*, 28(12), 3875-3895.

Giroto, M., Cortés, G., Margulis, S. A., & Durand, M. (2014b). Examining spatial and temporal variability in snow water equivalent using a 27year reanalysis: Kern River watershed, Sierra Nevada. *Water Resources Research*, 50(8), 6713-6734.

Helsel, D.R., Hirsch, R.M., 1992. *Statistical Methods in Water Resources*. Elsevier, Amsterdam.

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

Japan International Cooperation Agency (JICA) (1995). The study on the development of water resources in northern Chile = El estudio sobre el desarrollo de los recursos de agua en la parte norte de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Pacific Consultants International, 1995.

Jenkins, G., Box, George E.P., et al. (2008). *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Fourth Edition. ISBN-10: 0470272848.

Lehmann, E. L., & D'Abrera, H. J. (2006). *Nonparametrics: statistical methods based on ranks* (p. 464). New York: Springer.

Liston, G. E. (2004). Representing subgrid snow cover heterogeneities in regional and global models. *Journal of climate*, 17(6), 1381-1397.

Maidment (1993). D.R. Maidment. "Handbook of Hydrology".

Margulis, S. A., Giroto, M., Cortés, G., & Durand, M. (2015). A Particle Batch Smoother Approach to Snow Water Equivalent Estimation. *Journal of Hydrometeorology*, (2015).

Markowski, C. A., & Markowski, E. P. (1990). Conditions for the effectiveness of a preliminary test of variance. *The American Statistician*, 44(4), 322-326.

Masiokas, M. H., Villalba, R., Luckman, B. H., Le Quesne, C., & Aravena, J. C. (2006). Snowpack variations in the central Andes of Argentina and Chile, 1951-2005: Large-scale atmospheric influences and implications for water resources in the region. *Journal of Climate*, 19(24), 6334-6352.

Mineurita (2015). Análisi Vocación Productiva Regional para la Gestión de los Recursos Hídricos Cuenca del Río Copiapó, III Región de Atacama.

Milly, P. C. D., Julio, B., Malin, F., Robert, M., Zbigniew, W., Dennis, P., & Ronald, J. (2007). Stationarity is dead. *Ground Water News & Views*, 4(1), 6-8.

Molotch, N. P., Colee, M. T., Bales, R. C., & Dozier, J. (2005). Estimating the spatial distribution of snow water equivalent in an alpine basin using binary regression tree models: the impact of digital elevation data and independent variable selection. *Hydrological Processes*, 19(7), 1459-1479.

Moradkhani, H., Hsu, K. L., Gupta, H., & Sorooshian, S. (2005). Uncertainty assessment of hydrologic model states and parameters: Sequential data assimilation using the particle filter. *Water Resources Research*, 41(5).

Morales, L., Canessa, F., Mattar, C., Orrego, R., & Matus, F. (2006). Caracterización y zonificación edáfica y climática de la Región de Coquimbo, Chile. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 6(3), 52-74.

Pacheco, J.F. & Contreras, E. 2008. Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos. Serie Manuales N°58. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES). CEPAL, Naciones Unidas.

Painter, T. H., Dozier, J., Roberts, D. A., Davis, R. E., & Green, R. O. (2003). Retrieval of subpixel snow-covered area and grain size from imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, 85(1), 64-77.

Pellicciotti, F, Burlando, P, Van Vliet, K., 2007. Recent trends in precipitation and streamflow in the Aconcagua River basin, central Chile. In: Ginot, P., Sicart, J. (Eds.), *Glacier Mass Balance Changes and Meltwater Discharge (selected papers from sessions at the IAHS Assembly in Foz do Iguaçu, Brazil, 2005)*. IAHS Publication 318, Wallingford, UK, pp. 17–38.

Qiyao, L., Jingming, Y. and Baopu, F. (1991), A method of agrotopoclimatic division and its practice in China. *Int. J. Climatol.*, 11: 85–96. doi: 10.1002/joc.3370110107

Robertson, A. W. (1996), Interdecadal variability over the North Pacific in a multi-century climate simulation, *Climate Dynamics*, 12(4), 227-241.

Rubio-Álvarez, E., and J. McPhee (2010), Patterns of spatial and temporal variability in streamflow records in south central Chile in the period 1952–2003, *Water Resour. Res.*, 46, W05514, doi:10.1029/2009WR007982

Stowhas (2003). Ludwig Stowhas B. “Uso del Método de la Curva Número en Cuencas Heterogéneas”. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XVI Congreso Nacional.

Saavedra y Stowhas (2003). Carlos Saavedra y Ludwig Stowhas B. “Cálculo y Análisis Crítico del Método de la curva Número para Cuencas del País”. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, XVI Congreso Nacional.

Viale, M., & Nuñez, M. N. (2011). Climatology of winter orographic precipitation over the subtropical central Andes and associated synoptic and regional characteristics. *Journal of Hydrometeorology*, 12(4), 481-507.

V.T. Chow (1996). Ven Te Chow, David R. Maidment, Larry W. Mays. “Hidrología Aplicada”.

Von Storch, H., & Zwiers, F. W. (2002). *Statistical analysis in climate research*.

Wilks, D. (2007). *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*, Volume 100, Third Edition. ISBN-10: 0123850223.

Xue Y, Sun S, Kahan DS, Jiao Y. 2003. Impact of parameterizations in snow physics and interface processes on the simulation of snow cover and runoff at several cold region sites. *Journal of Geophysical Research* 108(D22): 8859. doi:10.1029/2002JD003174.

Yi, Y., Kimball, J. S., Jones, L. A., Reichle, R. H., & McDonald, K. C. (2011). Evaluation of MERRA land surface estimates in preparation for the soil moisture active passive mission. *Journal of Climate*, 24(15), 3797-3816.

Zhou, Y., McLaughlin, D., & Entekhabi, D. (2006). Assessing the performance of the ensemble Kalman filter for land surface data assimilation. *Monthly weather review*, 134(8), 2128-2142.