



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**

**EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD DE
RECURSOS HÍDRICOS A NIVEL DE CUENCA – IMPLEMENTACIÓN DE UN
MODELO INTEGRADO A NIVEL SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA, MENCIÓN RECURSOS Y MEDIO AMBIENTE HÍDRICO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

RENÉ ANTONIO FIGUEROA LEIVA

**PROFESOR GUÍA:
XIMENA VARGAS MESA (INGENIERÍA Y MAGISTER)**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
JULIO CORNEJO MORALES (INGENIERÍA)
CARLOS ESPINOZA CONTRERAS (INGENIERÍA Y MAGISTER)
DAMARIS ORPHANÓPOULOS STEHR (MAGISTER)**

**SANTIAGO DE CHILE
JUNIO 2008**

RESUMEN

El cambio climático es un tema que en las últimas décadas ha provocado permanente atención a nivel mundial. Algunos planteamientos sugieren que dicho cambio es atribuible al aumento de CO₂ generado por la actividad humana, y otros indican que se debe a un proceso de cambio natural del clima del planeta. De acuerdo al tercer informe del año 2001 del IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), en el transcurso del siglo XX se han experimentado aumentos de 0.6 ± 0.2 [°C] de la temperatura media mundial, e incrementos de la precipitación promedio entre 7 a 12% para las zonas comprendidas entre 30°N a 85°N, y en un 2% entre 0° S a 55°S; entre otros cambios.

El principal objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos que el cambio climático podría generar, en la disponibilidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de una cuenca chilena, y cómo afectarían éstos a actividades tales como la agricultura, la minería, la generación hidroeléctrica y el consumo de agua potable; que utilizan dicho recurso como insumo fundamental.

La cuenca estudiada fue la del río Cachapoal, ubicada en la VI Región del país. Para dicha cuenca se construyó y calibró un modelo (el período de calibración fue 1999-2005) que permitió integrar la componente superficial y subterránea de los recursos hídricos. Para simular la escorrentía superficial se utilizó el Modelo Sacramento + SNOW-17, para el Modelo de Aguas Subterráneas se actualizó y mejoró un modelo previo de la DGA en Visual Modflow, y a base de los dos modelos anteriores se elaboró un Modelo de Simulación Operacional de la cuenca. Para evaluar los efectos del cambio climático, se consideraron dos escenarios incluidos en el tercer informe del IPCC, SRES A2 y B2, para los cuales existe información disponible para la zona de estudio, del modelo de circulación general de la atmósfera HadCM3. Para llevar a cabo el escalamiento de las variables meteorológicas, se utilizó el programa SDSM 4.2, mediante el cual se generaron 6 escenarios de cambio climático, con horizontes de 30 años (2005-2035) que fueron evaluados en el Modelo Integrado de la cuenca.

En cuanto a los resultados obtenidos para los escenarios de cambio climático, para la temperatura en la estación Rengo se verificaron aumentos de los valores mensuales, estacionales y anuales promedio, mientras que para la estación Convento Viejo se verificaron disminuciones con respecto al período observado (1980-2005); para la precipitación, en las estaciones estudiadas se observó una tendencia al aumento en los valores mensuales, estacionales y anuales promedio con respecto al período observado (1971-2005). De acuerdo a esto, los caudales medios mensuales de salida de la cuenca del río Cachapoal, se verían afectados por el cambio climático, ya que con respecto al Período Base de calibración (1999-2005), se obtuvieron aumentos de los valores promedio en el período de deshielo y disminuciones en el período invernal. Para los recursos hídricos subterráneos, no se pudo concluir que existirían efectos asociados al cambio climático. Con respecto a las actividades asociadas, para los escenarios planteados, en el riego se observó una disminución de la satisfacción de la demanda con respecto al Período Base en toda la cuenca, excepto en la parte baja; para las extracciones superficiales de las plantas de agua potable y de las centrales hidroeléctricas, se obtuvo una disminución de los caudales asociados a las mayores seguridades de abastecimiento; la única actividad que no se vería afectada sería la minería.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1	MOTIVACIÓN	5
1.2	OBJETIVOS	6
1.2.1	Objetivos Generales.....	6
1.2.2	Objetivos Específicos.....	6
1.3	ORGANIZACIÓN DEL INFORME.....	6

CAPÍTULO 2: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1	ANTECEDENTES DEL CAMBIO CLIMÁTICO	9
2.1.1	Clima.....	9
2.1.2	Cambio Climático	10
2.1.3	Efectos del cambio climático en los recursos hídricos	20
2.2	MODELOS.....	22
2.2.1	Modelos Climáticos	22
2.2.2	Modelos Superficiales	27
2.2.3	Modelos de Aguas Subterráneas	33

CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN ZONA DE ESTUDIO

3.1	INTRODUCCIÓN	35
3.2	UBICACIÓN ZONA DE ESTUDIO	35
3.3	ANTECEDENTES GENERALES DEL SISTEMA	36
3.3.1	Relieve	36
3.3.2	Clima Regional.....	38
3.3.3	Economía Regional.....	39
3.3.4	Uso de Suelo.....	39
3.4	ANTECEDENTES CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL	40
3.4.1	Hidrografía	40
3.4.2	División Administrativa río Cachapoal	41
3.4.3	Hidrogeología.....	42
3.4.4	Información Disponible.....	47

CAPÍTULO 4: MODELO INTEGRADO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO

4.1	INTRODUCCIÓN	57
4.2	MODELO INTEGRADO	57
4.3	MODELO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	60
4.3.1	Delimitación de la cuenca del río Cachapoal y sus sub-cuencas, a nivel superficial..	60
4.3.2	Estaciones Fluviométricas y Meteorológicas a utilizar en la calibración, validación y generación de escorrentías mediante el modelo Sacramento	69

4.3.3	Descripción Teórica Modelo Sacramento	71
4.3.4	Calibración y Validación del Modelo Sacramento en Cuencas en Régimen Natural..	74
4.3.5	Parámetros de Sacramento en Cuencas no calibradas.....	91
4.4	MODELO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	92
4.4.1	Descripción Visual Modflow.....	92
4.4.2	Construcción del Modelo	92
4.4.3	Calibración del Modelo de Aguas Subterráneas.....	110
4.5	MODELO SIMULACIÓN OPERACIONAL.....	131
4.5.1	Construcción del Modelo	131
4.5.2	Calibración del MSO	141

CAPÍTULO 5: GENERACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO

5.1	INTRODUCCIÓN	153
5.2	TÉCNICA DE ESCALAMIENTO DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.....	153
5.3	PROCESO DE ESCALAMIENTO DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS.....	156
5.3.1	Datos de entrada.....	156
5.3.2	Parámetros del modelo	158
5.3.3	Determinación variables predictoras.....	159
5.3.4	Calibración del modelo.....	160
5.3.5	Validación del modelo	162
5.3.6	Generación de Escenarios de Cambio Climático.....	166
5.4	EVALUACIÓN DE ESCENARIOS EN EL MODELO INTEGRADO	185
5.4.1	Modificaciones al Modelo Sacramento	185
5.4.2	Modificaciones al Modelo de Simulación Operacional	185
5.4.3	Modificaciones al Modelo de Aguas Subterráneas	186

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1	INTRODUCCIÓN	187
6.2	EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CUENCAS EN RÉGIMEN NATURAL	187
6.2.1	Cuenca Cortaderal – Cachapoal (CA-CC1-1).....	187
6.2.2	Cuenca Pangal-Blanco (PAN-CC1-1).....	201
6.2.3	Comparación de los Efectos del Cambio Climático en las dos cuencas en estudio .	202
6.3	EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS USOS SUPERFICIALES DEL RECURSO HÍDRICO.....	210
6.3.1	Riego Agrícola.....	210
6.3.2	Agua Potable.....	216
6.3.3	Minería	219
6.3.4	Centrales Hidroeléctricas	224
6.3.5	Comparación de los efectos del cambio climático en los distintos usos.....	227
6.4	EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS.....	229

6.4.1	Descensos Nivel Piezométrico	229
6.4.2	Recargas al Acuífero.....	235
6.4.3	Interacción río – acuífero.....	239
6.4.4	Satisfacción de la Demanda.....	245
6.4.5	Balance Hídrico Subterráneo	248
6.5	EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA SALIDA DE CADA MÓDULO.....	255
6.5.1	Módulo Cachapoal Alto (CA)	256
6.5.2	Módulo Estero La Cadena (ELC).....	258
6.5.3	Módulo Claro de Rengo (CR)	259
6.5.4	Módulo Estero Zamorano (EZ)	260
6.5.5	Módulo Cachapoal Bajo (CB)	261
<u>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>		
7.1	INTRODUCCIÓN	267
7.2	CONCLUSIONES GENERALES	267
7.3	CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.....	270
7.3.1	Modelo Superficial.....	270
7.3.2	Modelo de Aguas Subterráneas	271
7.3.3	Modelo Integrado	272
7.3.4	Escenarios de Cambio Climático.....	273
7.3.5	Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos	276
7.3.6	Validez de los resultados obtenidos	280
7.4	RECOMENDACIONES.....	281
7.4.1	Modelo Sacramento	281
7.4.2	Modelo de Simulación Operacional	281
7.4.3	Modelo de Aguas Subterráneas	282
7.4.4	Modelo Integrado	282
7.4.5	Generación y Análisis de Nuevos Resultados	282
7.4.6	Escenarios de Cambio Climático.....	283
7.4.7	Efectos del Cambio Climático en los Usos del Recurso Hídrico	283
REFERENCIAS		285

ANEXOS (DIGITALES)

ANEXO A: ANEXOS CAPÍTULO 2
ANEXO B: ANEXOS CAPÍTULO 3
ANEXO C: ANEXOS CAPÍTULO 4
ANEXO D: ANEXOS CAPÍTULO 5
ANEXO E: ANEXOS CAPÍTULO 6

Capítulo 1

Introducción

1.1 MOTIVACIÓN

El cambio climático global es un tema que ha experimentado un interés creciente en las últimas décadas, no sólo a nivel de instituciones científicas o gubernamentales, sino que también a nivel de la población en general. En este sentido existen diversas corrientes de pensamientos relacionadas al tema, algunas indican que los cambios observados están asociados a las variaciones propias (naturales) del sistema climático, y otras afirman que la influencia del ser humano (a partir de la revolución industrial del siglo XVIII) en las emisiones de gases de efecto invernadero (en particular de CO₂), ha jugado un rol fundamental en los mencionados cambios.

De acuerdo al último informe realizado por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) el año 2001, son claros los diversos efectos que podrían causar, o ya causan, los cambios climáticos en los ecosistemas naturales (bosques, tierras de pastoreo, humedales, etc.), los recursos hídricos, las zonas costeras, la agricultura y la salud humana. Las magnitudes de dichos cambios determinados por el IPCC, pueden resumirse en los siguientes datos:

- Durante el transcurso del siglo XX, la temperatura media mundial en la superficie de la Tierra aumentó 0.6 ± 0.2 [°C].
- Durante el siglo XX, la precipitación promedio se incrementó entre 7 a 12% para las zonas comprendidas entre 30°N a 85°N y en un 2% entre 0°S a 55°S.
- Datos satelitales muestran que ha habido aproximadamente un 10% de reducción de la capa de nieve desde fines de los años setenta.
- El ritmo de aumento del nivel medio del mar durante el siglo XX varió entre 1 y 2 [mm/año].
- El fenómeno de El Niño se ha vuelto relativamente más frecuente, persistente e intenso que el fenómeno de La Niña, lo cual incide en las precipitaciones y temperaturas de las zonas tropicales y subtropicales del planeta.

Por lo recién mencionado, resulta muy interesante estudiar el caso particular de los efectos, que se pueden producir en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel superficial y subterráneo, debido a los cambios climáticos que se registran en el planeta, y que se podrían estar registrando en el país.

Este estudio busca integrar tres componentes esenciales en la determinación de los recursos de agua a nivel de una cuenca, las cuales son: el clima, los recursos hídricos a nivel superficial y a nivel subterráneo; los cuales usualmente no se trabajan de manera

integrada, lo que obviamente no permite obtener modelos apropiados de lo que puede ser el “comportamiento” de una cuenca, en lo que respecta a las variaciones en su disponibilidad de recursos hídricos totales.

Como resultado principal de este trabajo, se espera obtener un Modelo Integrado que permita hacer un análisis cuantitativo, de los efectos que puede tener el cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca seleccionada, para así evaluar las posibles repercusiones en las actividades que se desarrollen en dicha cuenca.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos Generales

El objetivo general que se persigue consiste en evaluar los efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos en una cuenca específica, tanto a nivel superficial como subterráneo.

1.2.2 Objetivos Específicos

Los principales objetivos específicos del estudio son:

1. Calibrar modelos de simulación hidrológica a nivel superficial y subterráneo, que sean aplicables en la cuenca escogida.
2. Generar posibles escenarios futuros del cambio climático, para la cuenca en estudio, que permitan evaluar a través del Modelo Integrado, cómo se podría ver afectada la disponibilidad de recursos hídricos en ésta.
3. Desarrollar y operar un Modelo Integrado de disponibilidad de recursos hídricos, que incorpore dichos recursos tanto a nivel superficial como subterráneo.
4. Evaluar cuales son los efectos secundarios (en actividades tales como agricultura, minería, asentamientos humanos, etc.), que se pueden tener en la cuenca en estudio, debido a variaciones en la disponibilidad de recursos hídricos.

1.3 ORGANIZACIÓN DEL INFORME

En el Capítulo 2 se entregan algunos antecedentes recopilados en la literatura, relacionados con el cambio climático y sus efectos en los recursos hídricos, y con los modelos estudiados durante el proceso de selección de aquellos que se utilizarían para cada componente del Modelo Integrado.

En el Capítulo 3 se entrega una descripción de la zona de estudio, junto con un análisis de las curvas de variación estacional, de los caudales medios mensuales en algunos puntos relevantes de la cuenca.

En el Capítulo 4 se describen los procesos de implementación de cada componente del Modelo Integrado, y cómo fueron éstos relacionados, para lograr la integración de la fase superficial y subterránea de los recursos hídricos.

En el Capítulo 5 se describen los escenarios de cambio climático derivados (mediante el programa SDSM) de los resultados del modelo HadCM3.

En el Capítulo 6 se analizan los efectos en los recursos hídricos y los usos asociados a éstos, resultantes de la evaluación de los escenarios de cambio climático en el Modelo Integrado.

Por último en el Capítulo 7 se entregan una serie de comentarios, conclusiones y recomendaciones relacionados con los resultados obtenidos del presente trabajo.

Es importante destacar que los gráficos a nivel mensual, que se entregan en los Capítulos 2 a 6, tienen los nombres de los meses en inglés, esto se debe a que la configuración regional del computador tiene que ser usada en dicho idioma, para así poder ejecutar de buena manera los programas requeridos en el desarrollo de esta tesis; luego, al ir desarrollando los gráficos, para los distintos resultados derivados en cada etapa del trabajo, resultaba demasiado engorroso modificar la configuración a cada momento, y por lo tanto, se optó por dejar los gráficos en el mencionado formato. En este mismo sentido, el formato numérico utilizado en esta tesis corresponde al inglés (punto para los decimales y comas para los miles).

Capítulo 2

Revisión Bibliográfica

2.1 ANTECEDENTES DEL CAMBIO CLIMÁTICO

2.1.1 Clima

Usualmente, se tiende a pensar que el “tiempo” y el “clima” son términos que definen el mismo concepto, y aunque están fuertemente ligados, no son exactamente iguales.

El “tiempo”, es el estado fluctuante de la atmósfera que rodea al planeta, caracterizado por la temperatura, el viento, la precipitación, las nubes y otros elementos. El “tiempo” tiene una predictibilidad limitada, que va desde algunas horas con alta seguridad hasta una semana con alta incerteza.

El clima se puede definir como un “conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región” (RAE, 2008). Si se busca una definición más científica, se puede decir que el clima corresponde a un “estado promedio del tiempo atmosférico, o más rigurosamente, a una descripción estadística en términos del promedio y variabilidad de cantidades relevantes sobre un período de tiempo que puede ir desde meses a miles o millones de años. El período clásico es de 30 años, según lo indica la Organización Meteorológica Mundial (WMO). Estas cantidades son típicamente variables superficiales tales como temperatura, precipitación y viento. El clima en un amplio sentido es un estado, incluyendo una descripción estadística, del sistema climático” (Baede et al, 2001).

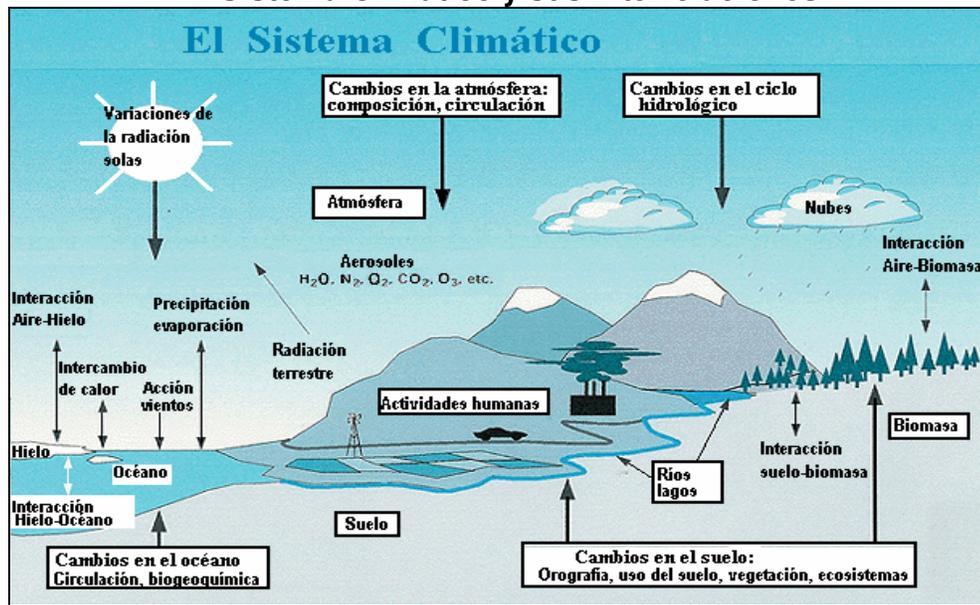
El clima varía de un lugar a otro, dependiendo de la latitud, distancia al mar, vegetación, presencia o ausencia de montañas, las capas de hielo, los organismos vivientes y los suelos, sedimentos y rocas. Estos componentes que constituyen el sistema climático, se esquematizan en la Figura 2.1.

El sistema climático, se puede definir como un sistema interactivo consistente en cinco componentes principales: *la atmósfera, la hidrosfera, la criosfera, la superficie terrestre y la biosfera*, los cuales se ven influenciados por varios mecanismos de forzamiento externos, de los cuales el más importante es el Sol. También se considera que el efecto directo de las actividades humanas en el sistema es un forzamiento externo.

El clima varía también en el tiempo, de una estación a otra, de un año a otro, de una década a otra, o en escalas de tiempo mucho más grandes, tales como las eras glaciares. Variaciones estadísticamente significativas de un estado promedio del clima, que persisten por décadas o más, se refieren a un ***cambio climático***.

Los cambios del clima tanto a nivel espacial como temporal se pueden deber a su variabilidad natural o la influencia de las actividades humanas en el sistema climático.

Figura 2.1
El Sistema Climático y sus interrelaciones



Fuente: DMC (2006 c).

Algunos otros conceptos relevantes del clima se entregan en el Anexo A1, mientras en el Anexo A2 se entrega una breve descripción del clima de Chile.

2.1.2 Cambio Climático

El cambio climático se refiere a una variación estadística significativa, ya sea de las condiciones climáticas medias o de su variabilidad, que persiste por un período extenso de tiempo (usualmente décadas o períodos más largos). Puede ser causado por procesos naturales internos, por forzamientos externos, o por cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera o en el uso de la tierra (Baede et al, 2001).

Resulta muy importante poder diferenciar cuáles son los cambios climáticos producidos naturalmente y cuáles se producen por actividades humanas, ya que ello permite determinar de manera efectiva los efectos que produce el ser humano al afectar al sistema climático en sus distintas componentes.

En el Anexo A3 se detallan las variaciones del clima por efectos naturales y por efectos de la actividad humana.

2.1.2.1 Cambio Climático observado a nivel mundial

Los cambios observados en el sistema climático se resumen en los siguientes puntos (Houghton et al, 2001).

a) Cambios en la temperatura

Durante el transcurso del siglo XX, la temperatura media mundial en la superficie de la Tierra aumentó 0.6 ± 0.2 [°C]. En este sentido la década de los noventa ha sido la más cálida desde 1861.

Entre 1910 y 1945 el calentamiento estuvo concentrado en el Atlántico Norte. Entre 1946 y 1975 el calentamiento estuvo concentrado en gran parte del hemisferio sur, y en el hemisferio norte se produjo un importante enfriamiento. El período más reciente de calentamiento ha sido casi mundial, pero los mayores aumentos se han producido en las latitudes medias y altas del hemisferio norte.

Estudios realizados entre 1950 y 1993 muestran que en promedio, las temperaturas mínimas de la superficie terrestre han aumentado en 0.2 [°C/decenio], lo cual es el doble del incremento observado en la temperatura máxima (0.1 [°C/decenio]).

El contenido de calor de los océanos a escala mundial, ha aumentado considerablemente desde fines de los años cincuenta. Más del 50% de dicho aumento se ha producido en los 300 [m] superiores de los océanos, lo que equivale a un aumento de 0.04 [°C/decenio].

b) Cambios en las precipitaciones

La precipitación a nivel global se ha incrementado en aproximadamente 2% desde comienzos del siglo XX.

Durante el siglo XX, la precipitación promedio se incrementó entre 7 a 12% para las zonas comprendidas entre 30°N a 85°N y en un 2% entre 0°S a 55°S.

Diversos estudios a nivel mundial muestran tendencias variadas entre las distintas zonas del planeta, por lo que los aumentos considerables que se observan en algunas latitudes, son contrarrestados por las disminuciones que se observan en otras. Por ejemplo, en las áreas de la costa este de Sudamérica se han observado aumentos de precipitación desde 1900, con incrementos menos intensos desde 1976, por el contrario, durante los últimos 50 años se ha observado una ligera disminución de la precipitación anual en China, lo cual está asociado principalmente a la disminución de los días de lluvia.

c) Cambios en la capa de nieve y hielo

La reducción de la capas de nieve y hielo que se forman en la superficie de algunas zonas del planeta, está directamente relacionada con el aumento de las temperaturas. Datos satelitales muestran que ha habido aproximadamente un 10% de reducción de la capa de nieve desde fines de los años setenta.

En cuanto a los hielos, en el Ártico se ha observado una reducción de 10 a 15% en su extensión durante la primavera y el verano, no hay mayores indicios de reducciones durante el invierno. En la Antártica, después de una reducción a principios de los setenta, la capa de hielo se ha mantenido estable.

De todas maneras, la corta extensión de los datos con los que se cuenta, no permite una interpretación muy concluyente.

d) Cambios en el nivel del mar

El ritmo de aumento del nivel medio del mar durante el siglo XX varió entre 1 y 2 [mm/año]. Según estudios geológicos, el nivel del mar puede haber subido a un ritmo de 0.5 [mm/año] en los últimos 6,000 años, lo que claramente es un ritmo inferior al registrado durante el siglo XX.

e) Cambios en la circulación atmosférica y oceánica

El fenómeno de El Niño se ha vuelto relativamente más frecuente, persistente e intenso que el fenómeno de La Niña, lo cual incide en las precipitaciones y temperaturas de las zonas tropicales y subtropicales del planeta.

Otro factor de circulación importante, que afecta el clima en grandes regiones del planeta, es la Oscilación Atlántico Norte (OAN), que se vincula con la intensidad de los vientos del oeste sobre el Atlántico y en Eurasia extratropical. Este fenómeno ha experimentado algunas variaciones, que se piensa han influido en los cambios en el hielo marino en el Ártico.

2.1.2.2 Cambio Climático en Chile

Si bien los estudios a nivel mundial muestran que existe un cambio climático a nivel global, es importante conocer de manera más precisa que es lo que sucede al respecto en Chile. Para ello, a continuación se describen los resultados de dos estudios que profundizan los cambios que han experimentado en el país, las variables más importantes en lo que se refiere a la caracterización del sistema climático.

El primero de dichos trabajos fue realizado por Harry King en el año 1970 (King, 1970), en él se analizó a través de promedios móviles, la existencia de alguna tendencia en el tiempo, de una serie de estadísticas de precipitaciones, temperaturas y presión atmosférica, registradas hasta 1968 en 17 estaciones meteorológicas a lo largo de Chile, comprendidas entre Copiapó y Punta Arenas. Además se analizaron estadísticas de temperaturas medias, máximas medias y mínimas medias y presión atmosférica de 4 estaciones ubicadas en Valparaíso, Santiago, Valdivia y Punta Arenas.

El segundo trabajo fue realizado por D'Arcangeli en el año 1997 (D'Arcangeli, 1997) y en él se tuvo como principal objetivo actualizar y complementar el estudio realizado en 1970 por Harry King, en base a la nueva información recopilada, hasta 1992, en las mismas estaciones utilizadas en el estudio anterior.

Dentro de las principales conclusiones de dichos estudios se pueden mencionar:

a) Precipitación

En el estudio de King, para el análisis de promedios móviles de 10, 30 y 40 años, se observó que desde la zona norte de Chile (sin considerar Copiapó, que se mantuvo

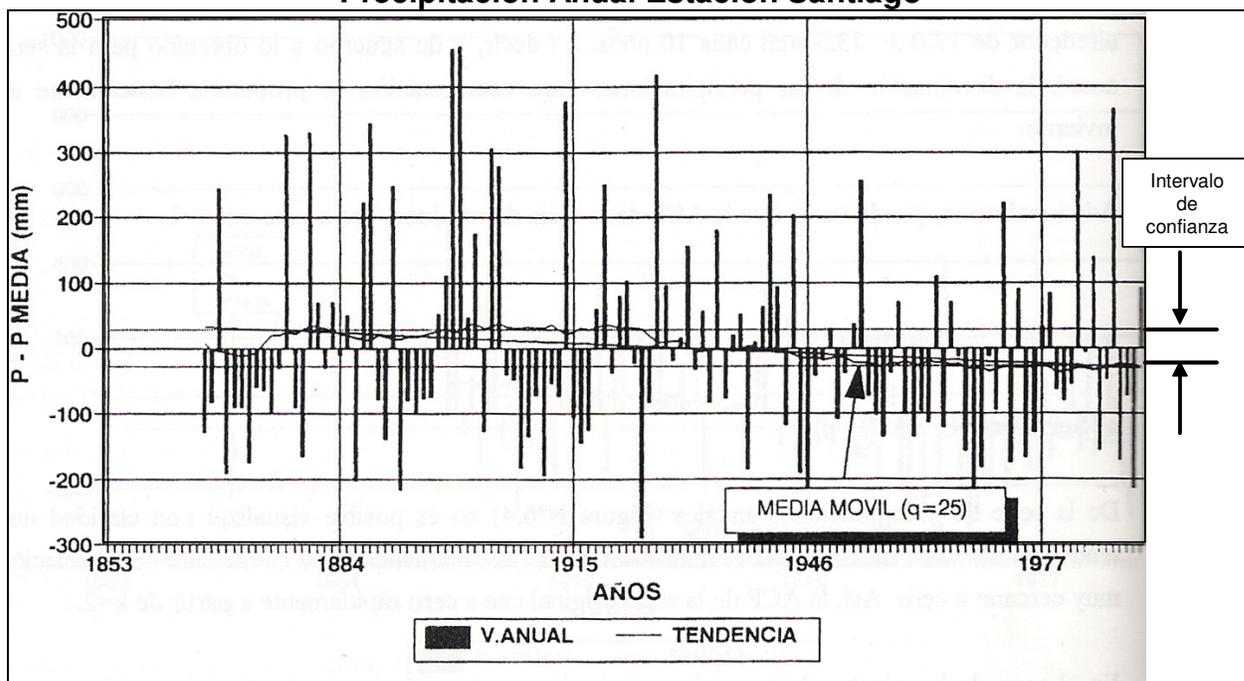
bastante estable) hasta Concepción, existía una disminución de las precipitaciones, la cual decrecía (la disminución) a medida que se avanzaba hacia el sur, hasta prácticamente desaparecer en la zona de Puerto Montt.

En el mismo estudio, en lo que respecta a las precipitaciones a nivel mensual, en las estaciones ubicadas entre la Serena y Puerto Montt, se observó una disminución de las precipitaciones en Junio y un aumento en Agosto. Desde Padre Las Casas a Isla Huafu se ve un incremento de las precipitaciones en Mayo, el que se convierte en el mes más lluvioso.

En el estudio de D'Arcangeli, en 15 de las 17 estaciones analizadas se observó una tendencia, ya sea significativa, levemente significativa o no significativa, a la disminución de las precipitaciones.

A modo de ejemplo, en la Figura 2.2, del estudio de D'Arcangeli se muestra la serie de precipitaciones anuales para Santiago. La serie de promedios móviles indica que éstos se mantienen relativamente constantes hasta el año 1925, para después disminuir hasta aproximadamente el año 1960. En el período siguiente los valores nuevamente se mantienen constantes e inferiores a la media. Esta secuencia produce el efecto de disminución global de las precipitaciones.

Figura 2.2
Precipitación Anual Estación Santiago



Fuente: D'Arcangeli (1997).

En el mencionado estudio, a partir de la década del 60, desde la IX Región al sur, se observó una marcada disminución de la precipitación, lo que constituye una continuidad con respecto a las tendencias obtenidas en el estudio de King, pero cabe destacar que en dicho estudio la tendencia a la disminución se hacía menos fuerte para latitudes

mayores, al contrario del estudio de D'Arcangeli, en el que se tenía un aumento de la tendencia a la disminución de la precipitación hacia el sur de Chile.

En el estudio de D'Arcangeli, también se observó una tendencia, aunque no significativa, al aumento de las precipitaciones para la estación de Rancagua.

En términos generales, en los resultados del estudio de D'Arcangeli se observa una mantención de las tendencias obtenidas en el estudio de King (más o menos pronunciadas), en cuanto a la disminución de las precipitaciones a lo largo del país, durante gran parte del siglo XX.

b) Temperatura

En el estudio de King, en Valparaíso se observó desde principios del siglo XX, que los promedios estacionales y anuales de las temperaturas máximas diarias aumentaban y que las temperaturas mínimas diarias disminuían, ambas variaciones del orden de 0.5 [°C]. En cuanto a las temperaturas medias, éstas permanecen prácticamente constantes.

En cambio, en el estudio de D'Arcangeli, en Valparaíso se observó que los promedios estacionales y anuales de las temperaturas máximas diarias disminuían y de las temperaturas mínimas diarias aumentaban. Claramente los resultados muestran que no existe mantención de una tendencia con respecto a lo obtenido por King, lo que indica una cierta ciclicidad de la variable a lo largo del tiempo.

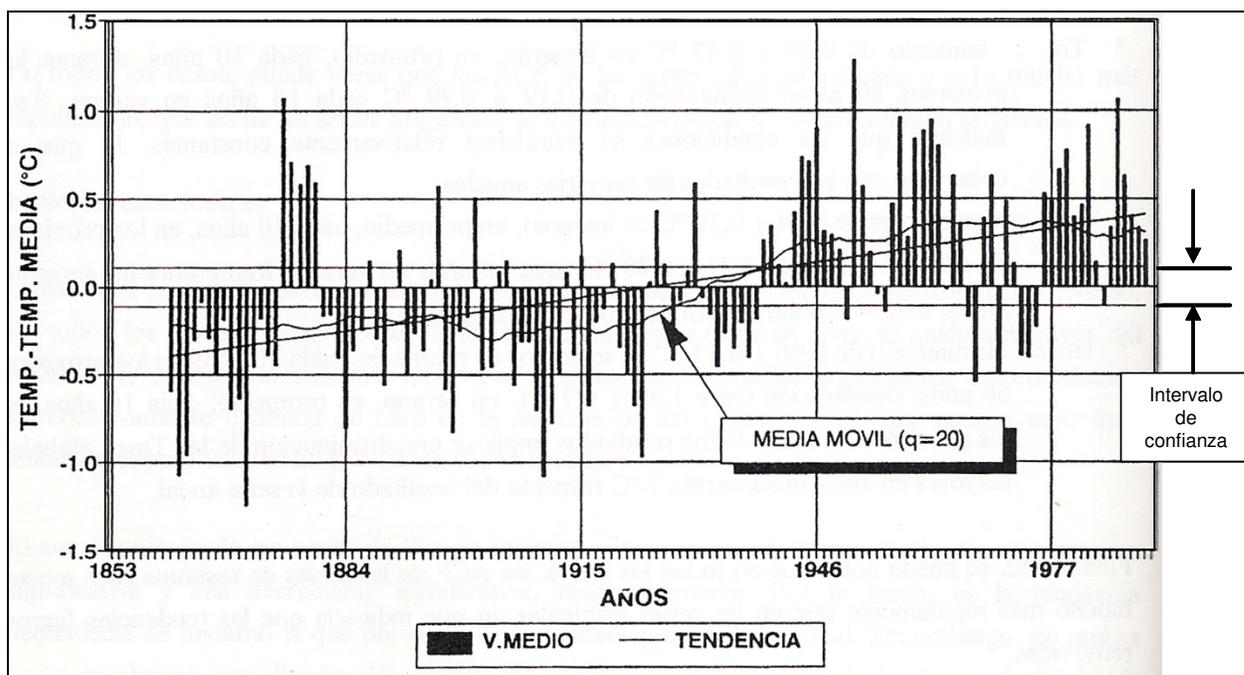
En el estudio de King, en Santiago se observó entre 1908 y 1968, un aumento de las temperaturas, lo mismo que en Valdivia; pero en Punta Arenas se observó una tendencia a la disminución de esta variable.

En el estudio de D'Arcangeli, en Santiago se observó que las temperaturas han aumentado, pero en el sur, tanto en Valdivia como en Punta Arenas, han disminuido. Por lo tanto, desde Valdivia hacia el sur, los resultados de ambos estudios muestran una mantención de la tendencia a la disminución de la temperatura.

A modo de ejemplo, en la Figura 2.3, del estudio de D'Arcangeli se muestra la serie de temperaturas medias anuales para Santiago. Al revisar el comportamiento de las series de promedios móviles, se observa que éstas tienen dos largos períodos en los cuales los valores se mantienen prácticamente constantes, existiendo un período de crecimiento rápido, entre los años 1915 y 1945 aproximadamente, que une los dos períodos estacionarios; esto es lo que produce el efecto de crecimiento continuo de las temperaturas medias anuales en el tiempo.

En términos generales se puede decir que la temperatura en la parte norte del país ha experimentado cambios cíclicos, aumentando el rango entre las temperaturas máximas y mínimas para la primera mitad del siglo XX y disminuyéndolo para la segunda mitad. Por otro lado, para la zona central y la zona sur, la tendencia se ha mantenido a través del siglo XX, con aumentos de temperatura en el centro y disminuciones en el sur.

Figura 2.3
Temperatura Media Anual Estación Santiago



Fuente: D'Arcangeli (1997).

c) Presión Atmosférica

En el estudio de King, en Valparaíso se registró una disminución con respecto a los valores medidos a principios del siglo XX, la cual en los últimos períodos medidos (década de 1960) se comienza a revertir lentamente.

Por otro lado, en el estudio de D'Arcangeli, se obtiene una tendencia al aumento de la presión atmosférica. Claramente los resultados muestran que no existe mantención de una tendencia con respecto a lo obtenido por King, lo que indica una cierta ciclicidad de la variable a lo largo del tiempo.

En el estudio de King, en Santiago se registró una tendencia al aumento con respecto a los valores medidos a fines del siglo XIX, en cambio, en el estudio de D'Arcangeli no se puede obtener una tendencia clara para dicho parámetro.

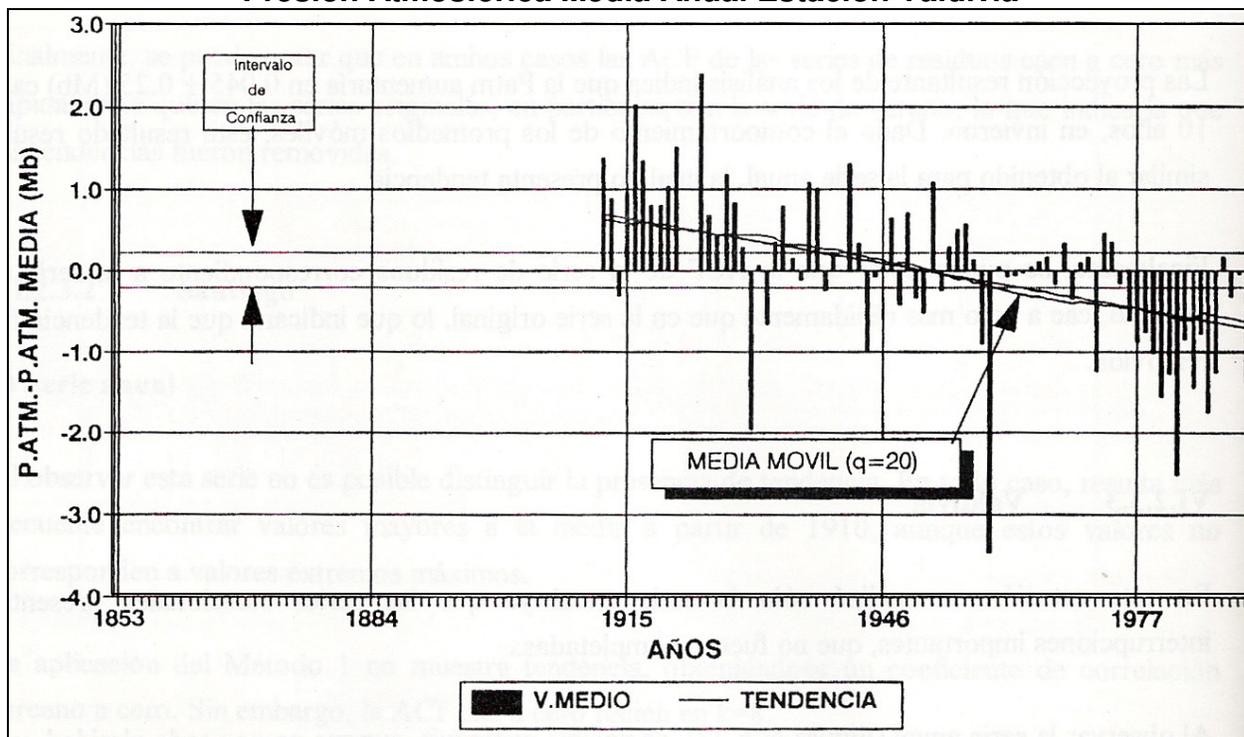
En el estudio de King, en Valdivia se registró una disminución con respecto a los valores medidos a principios del siglo XX. En Punta Arenas se registró un aumento con respecto a los valores medidos a principios del siglo XX.

En el estudio de D'Arcangeli, en el sur se obtienen tendencias a la disminución de la presión atmosférica, por lo tanto, en Valdivia los resultados muestran una mantención de tendencias con respecto a lo obtenido por King, en cambio, en Punta Arenas no.

A modo de ejemplo, en la Figura 2.4, del estudio de D'Arcangeli se muestra la serie de presiones atmosféricas medias anuales para Valdivia. Al observar la serie anual, es

posible distinguir una tendencia a la disminución de esta variable, encontrándose más frecuentemente valores menores a la media a partir de la década del 70.

Figura 2.4
Presión Atmosférica Media Anual Estación Valdivia



Fuente: D'Arcangeli (1997).

Para este parámetro, en términos generales, se observa una mayor ciclicidad en comparación con la precipitación y la temperatura, ya que de los resultados de los períodos estudiados en ambos casos (King y D'Arcangeli), se obtienen tendencias distintas para la zona norte y la zona sur del país.

d) Radiación Solar

En el estudio de King no se estudió esta variable, y en el estudio de D'Arcangeli, para las estaciones analizadas, no se observó un patrón común que permitiera determinar una tendencia en los datos estadísticos.

Como se aprecia de los resultados de los dos estudios mencionados, en términos generales en el país, se han experimentado cambios en las tendencias de las variables climáticas más representativas. Si bien estos cambios no son homogéneos, ya que en algunos puntos se tienen aumentos y en otros disminuciones, de todas maneras permiten establecer que las variaciones que se observan a nivel global también se hacen presentes en Chile (aunque no necesariamente en el mismo sentido, por ejemplo, la precipitación a nivel mundial se dice que en términos generales ha aumentado, pero los estudios recién mencionados muestran, para Chile, una disminución), lo cual confirma la importancia de evaluar cuáles son los posibles efectos de un eventual cambio climático más pronunciado, y en particular determinar cómo se

vería afectada la disponibilidad de los recursos hídricos en algún sistema específico como puede ser una cuenca.

2.1.2.3 Estudios de posibles efectos del cambio climático en Chile

A continuación se entregan las principales ideas y conclusiones de algunos trabajos relacionados con los efectos del cambio climático en los recursos hídricos en Chile.

Resulta de interés el estudio realizado por Fuenzalida et al (1989), pues se dan algunas proyecciones de cambios en la temperatura y precipitación para Chile, y se proponen posibles efectos de dichos cambios en los recursos hídricos y su utilización.

Dentro de las principales conclusiones de este estudio, se destacan las siguientes:

- Para el año 2050 se sugiere que la temperatura aumentará en 2 a 3 [°C] para el norte del país, en 3 [°C] para el centro del país, en 4 [°C] en el sur y en 5 [°C] en el extremo austral. Se dice que el calentamiento máximo ocurrirá a los 70° de latitud sur para luego disminuir hacia el sur.
- En cuanto a las precipitaciones se dice que sus eventuales variaciones son muy discrepantes a lo largo del país. En la zona norte, el aumento esperado de temperatura incrementaría el contenido atmosférico de vapor de agua, y por lo tanto, se intensificaría y expandiría hacia el sur el régimen de lluvias estivales del Altiplano. Para la zona centro – sur del país se espera que las precipitaciones disminuyan debido a la disminución del gradiente térmico entre las zonas sub – tropicales y las regiones frías antárticas.
- Con respecto al impacto en los recursos hídricos, se dice que el aumento esperado de temperatura elevará la línea de nieves con el consiguiente incremento en las cuencas aportantes en las hoyas pluvionivales. Además, se dice que el aumento de la temperatura intensificará la evapotranspiración, aumentando la demanda de riego. A todo esto se le debe agregar los posibles cambios en el régimen pluviométrico, los cuales de tender a la disminución, harán que la disponibilidad del recurso obviamente disminuya.
- Otra consecuencia importante de la variación climática, sería el aumento del nivel del mar por la fusión de hielo continental y dilatación volumétrica del agua. Se dice que las estimaciones para el año 2050 indican aumentos entre 20 y 80 [cm], lo cual implicaría una mayor penetración de salinidad en el sub – suelo costero y anegamiento de las localidades bajas.

Por otra parte, Peña (1989) analizó, en base a un modelo de simulación matemático, la sensibilidad del régimen hidrológico del río Maipo superior a un cambio climático caracterizado por un aumento de temperatura de 3 [°C].

Con respecto a las demás variables, se supuso que: la evaporación tendría un aumento de 10% (en relación al aumento de temperatura), se tendría una reducción del área total

de glaciares de un 17% y la precipitación y radiación solar se consideraron sin alteraciones.

De los resultados obtenidos en este estudio, se destacan los siguientes:

- La línea de nieves ascendería, lo que provocaría que en años de alta pluviosidad, durante los meses de invierno, los caudales mensuales puedan aumentar en forma significativa, alcanzando en años extremos a duplicar los valores observados en las condiciones actuales (las consideradas en el trabajo).
- Debido a la intensificación del deshielo durante el período primaveral, se puede esperar una reducción de los caudales de verano. Esta reducción en años secos se estima del orden de 10 – 20 %, y en ausencia de precipitaciones ella puede prolongarse a los meses de otoño.

También López (2001) intenta determinar posibles impactos sobre los recursos hídricos de Chile Central producto de cambios climáticos susceptibles de ocurrir debido a aumentos de temperatura. En particular se analiza la cuenca alta del Río Mapocho (cuenca definida a partir de la Estación Mapocho en los Almendros) a través del Snowmelt Runoff Model, el cual calcula a nivel diario los caudales provenientes de cuencas de montañas.

Con el fin de determinar la variación de los caudales, producto de cambios climáticos probables de ocurrir en el futuro, de acuerdo a los pronósticos de los modelos de circulación general de la atmósfera GISS y GFDL, López (2001) considera variaciones mensuales de temperatura, precipitación y cobertura nival en las temporadas 1988-1989, 1989-1990, 1991-1992 y 1993-1994. Los escenarios climáticos hipotéticos se generaron en base a la información proveniente del Centro de Agricultura y Medio Ambiente de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad de Chile (1998), para un horizonte de 50 años. Estos modelos entregan resultados bastante distintos con respecto a las variaciones de temperatura y precipitación, pero ambos concuerdan en que la radiación solar prácticamente no sufrirá modificaciones ante el aumento de CO₂ atmosférico.

Los resultados obtenidos al considerar un aumento de la temperatura media de 4.5 [°C], una redistribución mensual de las precipitaciones y variaciones de la línea de nieve de acuerdo al aumento de temperatura pronosticado, indican una disminución de la escorrentía media de primavera (34%) y de verano (10%), así como un aumento de los caudales de otoño (15%) e invierno (24%).

De todos los resultados obtenidos, López (2001) concluyó que al aumentar la temperatura, los caudales medios de la temporada de acumulación aumentarán, mientras que en la temporada de deshielo la escorrentía superficial disminuirá. Sin embargo, la magnitud de estos cambios dependerá de la variación de las condiciones climáticas y de las características propias de la zona en estudio.

En el trabajo realizado por Ledermann (2001), se analizaron los efectos de la variabilidad climática en el diseño de embalses de riego en Chile. El análisis fue realizado en dos embalses de riego en proyecto (Tabón y Minillas), ubicados en la

cuenca del río Aconcagua. Se plantearon escenarios futuros para un horizonte de 30 años (a partir del año 2000), en los que se utilizaron los resultados de modelos de circulación general de la atmósfera para los cambios de temperatura, precipitación y radiación solar.

Para evaluar el efecto sobre la escorrentía superficial, se obtuvieron series de caudal medio mensual, para la situación actual y futura, utilizando un modelo de simulación hidrológica, a partir de los cuales se pudieron determinar los volúmenes de regulación necesarios para satisfacer la demanda de riego, imponiendo un 85% de seguridad de riego. De esta manera se comparó la situación actual con los posibles escenarios futuros.

Los resultados obtenidos por Ledermann (2001), muestran una disminución en los niveles medios mensuales de precipitación, lo que implicaría una escorrentía superficial menor. Además, se tendría un aumento en los niveles de evaporación debido al aumento de temperatura. Con todo esto, los embalses diseñados en base a las estadísticas disponibles, no serían capaces de otorgar una seguridad de riego del 85%, por lo que el cambio climático afectaría fuertemente en la agricultura.

De los estudios más recientes sobre efectos del cambio climático en recursos hídricos, en Chile, destaca el realizado por Osses (2006), donde se analizan los efectos del cambio climático, en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel mensual en el embalse El Yeso, ubicado en la cordillera de los Andes, cercano a Santiago.

Para llevar a cabo este estudio se realizó un escalamiento de variables meteorológicas afectadas por el cambio climático, cuyos valores se obtuvieron del modelo de circulación general de la atmósfera (GCM, general circulation model), HadCM3; el escalamiento se llevó a cabo mediante el programa SDSM versión 3. La aplicación de estas variables en un modelo hidrológico permitió simular la variación de las entradas de caudales al embalse y así estudiar los cambios en el balance hídrico de éste.

Como ya se mencionó anteriormente, el GCM seleccionado por Osses (2006), para el análisis con los escenarios de cambio climático del IPCC (A2 y B2), fue HadCM3. El modelo hidrológico seleccionado fue Sacramento, con un modelo nival acoplado (basado en SNOW-17).

Para determinar la existencia de efectos del cambio climático, se compararon los flujos actuales y modificados de entrada al embalse, se estudiaron las variaciones en el volumen del embalse y la acumulación nival.

Con respecto a los resultados obtenidos por Osses (2006), se puede destacar que se detectó un aumento en los caudales más bajos y un incremento de las probabilidades de excedencia de dichos caudales; en relación a la disponibilidad de agua, se concluyó que ésta no estaría en riesgo, incluso si se considerara un aumento de 40% de la demanda.

Finalmente, el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (CONAMA, 2006) desarrolló un estudio en el que se llevaron a cabo dos tareas principales: el análisis del

clima observado durante la parte final del siglo XX y su proyección hacia fines del presente siglo.

En este estudio se analizaron dos escenarios de emisiones incluidos en el último informe del IPCC, uno severo (SRES A2) y otro moderado (SRES B2). Para hacer el escalamiento a nivel regional, se utilizó el modelo regional PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies).

Con respecto a los resultados obtenidos por CONAMA (2006) para el análisis de la parte final del siglo XX, se destacan los siguientes:

- En la región entre 30°S y 39°S se aprecia el predominio de una tendencia a la disminución de la precipitación hasta aproximadamente 1970. Posteriormente en esta región se observó un cambio en la tendencia, registrándose aumento de la precipitación.
- En la década de 1940 a 1950, en la zona centro-sur del país, se observó un marcado descenso de la temperatura media; lo cual fue interrumpido por un aumento relativamente abrupto a mediados de la década de 1970.

Con respecto a los resultados obtenidos por CONAMA (2006) para la proyección de los cambios climáticos hacia fines del siglo XXI, se destacan los siguientes:

- Para la temperatura en superficie, se observan mayoritariamente aumentos de ésta en todas las regiones del país, siendo estos mayores para el escenario A2. El cambio de temperatura media del escenario A2, con respecto a la temperatura actual, es de 2 a 4 [°C]. Estacionalmente el calentamiento es mayor en verano, excediendo los 5 [°C] en algunos sectores altos de la Cordillera de los Andes.
- Con respecto a la precipitación, en la región de Chile Central hay una pérdida generalizada de precipitación bajo el escenario A2, condición que se mantiene en el escenario B2, con la excepción de la estación de otoño para latitudes inferiores a 33°S. La pérdida es del orden del 40% en las tierras bajas, ganando en magnitud hacia la ladera andina durante el verano, pero reduciéndose durante el otoño y el invierno bajo el escenario B2.

2.1.3 Efectos del cambio climático en los recursos hídricos

Los recursos hídricos del planeta que están disponibles para que los seres humanos satisfagan sus necesidades, provienen (en términos generales) de un desbalance entre el agua que precipita y la que se evapora o evapotranspira. En el caso de los continentes la precipitación tiende a ser mayor que los otros procesos, por lo tanto existe un excedente que puede ser utilizado. En los océanos el fenómeno es inverso, la evaporación es aproximadamente un 10% superior a la precipitación (Iglesias et al, 2005), pero este déficit es cubierto por el excedente continental que escurre hacia el mar a través de los ríos.

Si se considera el principio de conservación de la masa, el agua presente en el ciclo hidrológico se mantiene constante, transformándose continuamente al estado líquido, sólido o gaseoso. El sistema climático es el que regula este ciclo de transformación del agua, por lo tanto, cualquier cambio en dicho sistema puede modificar de manera importante la distribución espacial y temporal del recurso hídrico.

La influencia de los cambios climáticos en los recursos hídricos superficiales, pueden resultar un poco más evidentes que en el caso de los recursos subterráneos.

La precipitación afecta de manera directa a la escorrentía superficial, y también determina la cantidad de agua presente en el suelo, y por lo tanto, cuanta de ésta infiltra hacia los estratos más profundos y se transforma en escorrentía subterránea. Por ello, variaciones tanto en la distribución temporal como en el régimen de precipitaciones, pueden influir fuertemente en la disponibilidad del recurso hídrico a nivel superficial, ya sea provocando grandes crecidas o períodos de sequías.

La temperatura puede influir en varias partes del ciclo hidrológico a nivel superficial, ya que altos valores de este parámetro inciden, por ejemplo, en la tasa de evaporación desde la superficie de un cuerpo de agua, así como también pueden influir en el derretimiento de nieves, y por lo tanto, en los volúmenes de escorrentía superficial.

Para el caso de los recursos hídricos subterráneos, puede ser que la influencia directa de los cambios en el sistema climático no sea tan simple de observar. Por esto, a continuación se explica de manera más detallada la influencia de algunas variables meteorológicas, que pueden afectar a las napas subterráneas, tales como: la presión atmosférica, la precipitación y la temperatura.

Cambios en la presión atmosférica producen fluctuaciones considerables en los niveles de agua observados en pozos que penetran acuíferos confinados. Por ejemplo, un aumento de la presión atmosférica produce, en un acuífero confinado, los siguientes efectos (Espinoza, 2005):

- Se transmite en forma total y directamente sobre los espejos de agua que puedan existir en pozos y sondajes.
- Se transmite, a través de la capa impermeable que limita superiormente al acuífero, a los materiales permeables que constituyen el sistema y el agua contenida en él. Parte del aumento de presión es tomado por los materiales permeables y parte por el agua.

La superposición de estos dos efectos, hace bajar el nivel de agua que se observa en un pozo en una cantidad menor que el correspondiente aumento de presión, debido a que si bien el agua contenida en el acuífero también aumenta de presión, lo hace en una cantidad menor (Espinoza, 2005).

Para acuíferos no confinados, los cambios de presión atmosférica no se hacen sentir en los niveles de agua, ya que estos están sometidos a dicha presión en todo punto, por lo tanto, no se producen movimientos diferenciales entre el agua contenida en el acuífero y la que se encuentra en pozos y sondajes.

En cuanto a la precipitación, ésta no es un buen indicador de recarga subterránea debido a las pérdidas a nivel superficial y sub – superficial, y a los tiempos de viaje de la percolación vertical. El tiempo de viaje puede variar desde algunos minutos, hasta varios meses o años, dependiendo de la permeabilidad del sistema (Todd et al, 2005). Por lo tanto, la dependencia de los acuíferos a la cantidad de precipitación, está ligada a las características propias de cada sistema, aunque de todas maneras los niveles de aguas subterráneas, en varios casos, deberían mostrar una cierta variación estacional asociada a las precipitaciones.

Con respecto a la temperatura, ésta puede tener influencia en acuíferos no confinados, a través de la variación en el contenido de agua del suelo no saturado, inmediatamente por encima de su nivel freático. Dado que las variaciones de la temperatura exterior se propagan muy lentamente al interior de los terrenos, este efecto prácticamente carece de importancia, salvo en caso de estudios de muy larga duración. Es importante señalar que las oscilaciones de temperatura a lo largo del día, en general no se detectan más allá de 1 [m] de profundidad bajo la superficie del terreno (Espinoza, 2005).

También es importante considerar fenómenos asociados a la temperatura, como lo son la evaporación y la transpiración. En acuíferos no confinados con niveles de agua muy cercanos a la superficie, usualmente se tienen fluctuaciones diarias asociadas a los fenómenos mencionados. Ambos procesos producen salidas de agua subterránea hacia la atmósfera, con variaciones diarias similares, debido a su alta correlación con la temperatura (Todd et al, 2005).

2.2 MODELOS

2.2.1 Modelos Climáticos

El comportamiento del sistema climático, sus componentes, y sus interacciones, pueden ser estudiados y simulados utilizando herramientas conocidas como modelos climáticos. Estos son diseñados principalmente para estudiar procesos climáticos y variabilidad climática natural, y para proyectar la respuesta del sistema climático al forzamiento producido por las actividades humanas (Baede et al, 2001).

El núcleo de los modelos atmosféricos y oceánicos más complejos, llamados Modelos de Circulación General (GCM, General Circulation Model), está basado en leyes físicas que describen la dinámica de la atmósfera y el océano, expresada por ecuaciones matemáticas (Baede et al, 2001).

Los modelos atmosféricos actuales se resuelven espacialmente en una grilla tridimensional, con una resolución horizontal típica de 250 [km] y 10 a 30 niveles en la vertical. La resolución temporal típica es de 30 [min].

Para efectos de esta tesis, se utilizaron exclusivamente los resultados del modelo HadCM3, ya que éste es el único que posee datos de libre disposición para Sudamérica.

2.2.1.1 Modelo HadCM3

El modelo HadCM3 es un Modelo de Circulación General en el que la atmósfera y el océano están acoplados (AOGCM, atmosphere – ocean general circulation model), desarrollado por el Hadley Centre for Climate Prediction and Research (UK). Este modelo no necesita ajuste de flujos (calor “artificial” adicional y flujos de agua fresca en la superficie oceánica) para producir buenas simulaciones, a diferencia de modelos anteriores como el HadCM2. La mayor resolución del HadCM3 es un factor importante en este aspecto (Osses, 2006).

La componente atmosférica del modelo tiene 19 niveles en la vertical, con una resolución horizontal de 2.5° de latitud y 3.75° de longitud, que produce una grilla global de 96 x 73 celdas. Esto es equivalente a una resolución superficial de aproximadamente 417 [km] x 278 [km] en el Ecuador, y de 295 [km] x 278 [km] a 45° de latitud (CONAMA, 2006).

La componente oceánica del modelo tiene 20 niveles en la vertical, con una resolución horizontal de 1.25° x 1.25°. Con este nivel de resolución es posible representar detalles importantes en las estructuras de corrientes oceánicas (CONAMA, 2006).

La discretización temporal del modelo es de 30 minutos, sin embargo, la información no es almacenada a esta resolución temporal (Osses, 2006).

2.2.1.2 Técnicas de Escalamiento (Downscaling)

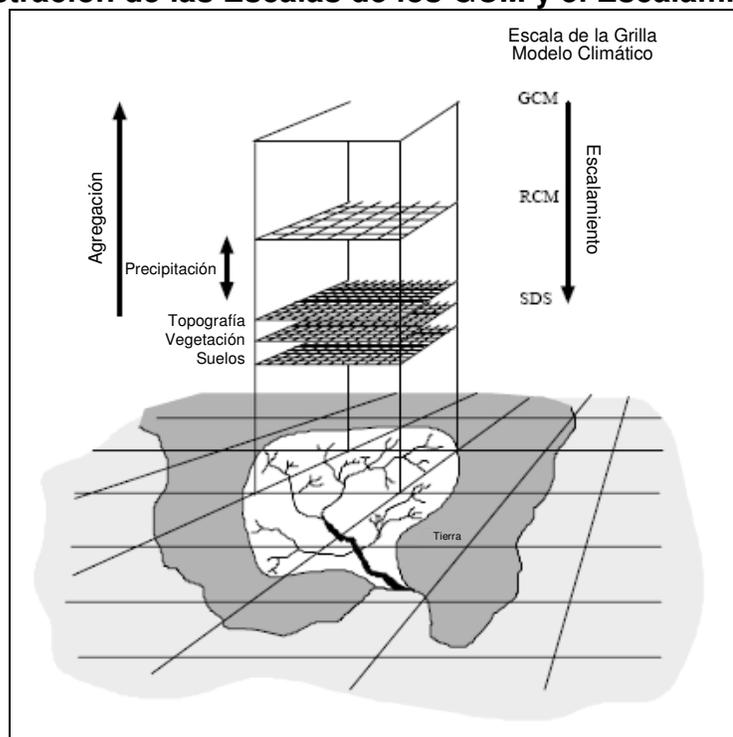
Los modelos de circulación general de la atmósfera (GCM), en general indican que los aumentos en la concentración de los gases de invernadero, tendrán importantes implicancias para el clima global y regional. El problema es que los GCM tienen una escala demasiado grande (típicamente del orden de 50,000 [km²]), por lo que sus resultados no son útiles en estudios a una escala más pequeña, como en el caso de una cuenca hidrográfica.

Para solucionar este problema de escala, existen distintas técnicas que permiten derivar variables meteorológicas a escala local, a partir de variables asociadas a un modelo atmosférico a nivel regional. Un esquema de las distintas escalas asociadas al problema de derivar variables a nivel local (escala menor), se muestra en la Figura 2.5.

Es importante tener presente que, debido a las diferencias que existen entre las técnicas de escalamiento, los resultados que éstas entregan para cada variable meteorológica estudiada, pueden diferir de manera considerable, afectando los resultados en estudios de impacto en recursos hídricos, como el que se realiza en el presente trabajo.

Las técnicas de escalamiento (downscaling), típicamente se agrupan en 4 categorías, las cuales se describen a continuación (Wilby et al, 2007).

Figura 2.5
Ilustración de las Escalas de los GCM y el Escalamiento



Fuente: Wilby et al (2007).

a) Modelación Climática Dinámica

El escalamiento dinámico implica anidar un Modelo Climático Regional (RCM, Regional Climate Model) de resolución mayor dentro un GCM de resolución menor. Los RCM usan la información de los GCM, para definir condiciones de borde atmosféricas, que varían en el tiempo, dentro de un dominio finito, dentro del cual la dinámica física de la atmósfera es modelada, usando una grilla horizontal de celdas de 20 a 50 [km].

La principal limitación de los RCM es que son computacionalmente tan demandantes como los GCM, pero presentan como principal ventaja, que permiten realizar análisis a escalas mucho más acotadas que en los casos de los GCM.

b) Generación Climática en base a datos observados

Esta técnica implica el agrupamiento, a nivel local, de datos meteorológicos, en relación con patrones prevalecientes de circulación atmosférica. Los escenarios de cambio climático son construidos por un re-muestreo de la distribución de datos observados (condicionados por los patrones de circulación generados por un GCM), o mediante la generación de secuencias sintéticas de patrones climáticos, para luego realizar un re-muestreo de los datos observados.

Esta técnica se basa principalmente en la sensible relación entre el clima a grandes escalas y el clima a nivel local.

La principal limitación de esta técnica es que los cambios de precipitación, producidos por cambios en la frecuencia de patrones climáticos, son rara vez consistentes con los cambios producidos por el GCM utilizado.

c) Generación Climática Estocástica

La aproximación de escalamiento estocástico típicamente implica modificar los parámetros de generadores climáticos convencionales como WGEN, LARS-WG o EARWIG.

Los escenarios de cambio climático son generados estocásticamente usando parámetros escalonados de acuerdo a las salidas del GCM utilizado.

La principal ventaja de esta técnica, es que puede reproducir exactamente varias estadísticas meteorológicas observadas, y ha sido utilizada ampliamente, especialmente en la determinación de impactos climáticos en la agricultura. Aún más, los generadores climáticos estocásticos permiten la generación de escenarios para el análisis de riesgos. Las principales desventajas se relacionan con la baja capacidad para reproducir variabilidades climáticas a nivel anual o de décadas, y a los efectos que pueden producir los cambios en la precipitación en variables secundarias como la temperatura.

d) Funciones de Transferencia

El escalamiento basado en funciones de transferencia, se basa en las relaciones empíricas entre los predictandos (variables a predecir) a nivel local y los predictores (variables utilizadas para predecir) a nivel regional (mayor explicación de predictandos y predictores en el Capítulo 5).

La principal virtud del escalamiento basado en funciones de transferencia, es su relativamente fácil aplicación. Su principal debilidad es que, los modelos usualmente son capaces de reproducir sólo una parte de la variabilidad climática (especialmente en series de precipitación).

Al igual que los generadores climáticos basados en datos observados, en este método también se considera la validez de los parámetros bajo condiciones climáticas futuras, y el escalamiento es altamente sensible a la elección de las variables predictoras.

2.2.1.3 Escenarios de cambio climático del IPCC

El desarrollo de escenarios comenzó previo a la creación del Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Sin el marco creado por el IPCC, existía una gran heterogeneidad de escenarios y realizar comparaciones de los diferentes estudios generados a partir de dichos escenarios, resultaba también difícil. En el período 1999 – 2001, durante el proceso del IPCC Third Assessment Report (TAR), se lograron varios avances en este sentido, logrando determinar escenarios únicos de cambio climático. Con los modelos de circulación general acoplados (atmósfera – océano) funcionando en un régimen transiente, se desarrollaron los escenarios SRES (Osses, 2006).

Los escenarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios) fueron construidos para explorar los futuros desarrollos en el medioambiente global, con especial énfasis en la producción de gases de efecto invernadero y emisiones de aerosoles precursores (Carter et al, 1999).

Se definieron cuatro grupo de escenarios, cada uno de ellos fue determinado en base a características demográficas, político – económicas, sociales y tecnologías futuras. Dentro de cada grupo, uno o más escenarios exploran los desarrollos en los usos de energías, en la industria y otros aspectos, para determinar sus implicancias en las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes (Carter et al, 1999).

A continuación se entregan las definiciones generales de cada grupo de escenarios determinados por el SRES.

- **A1:** un mundo futuro de rápido crecimiento económico, bajo crecimiento poblacional y una rápida introducción de nuevas y más eficientes tecnologías. Los temas base más importantes son la convergencia económica y cultural y la capacidad de construcción, con una sustancial reducción en las diferencias regionales de los ingresos per capita. En este mundo, la gente persigue el bienestar personal antes que la calidad ambiental.
- **A2:** un mundo diferenciado. El tema subyacente es el de fortalecimiento de las identidades culturales regionales, con un énfasis en valores familiares y tradiciones locales, gran crecimiento poblacional, y menos preocupación por el rápido crecimiento económico.
- **B1:** un mundo convergente con un rápido cambio de las estructuras económicas, “des-materialización” e introducción de tecnologías limpias. El énfasis está en las soluciones globales de sustentabilidad medioambiental y social, incluyendo esfuerzos para un rápido desarrollo económico, des-materialización de la economía, y mejoramiento de la equidad.
- **B2:** un mundo en el cual el énfasis está sobre las soluciones locales para la sustentabilidad económica, social, y ambiental. Este es un mundo heterogéneo con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso, pero con un fuerte énfasis en la iniciativa comunitaria y en la innovación social, para encontrar soluciones locales más que globales.

Las principales características de cada grupo de escenarios, se muestran en la Tabla 2.1.

Se observa claramente que el grupo de escenarios más severo es el A2, y el menos es el B1.

Para este trabajo de tesis se utilizaron sólo los escenarios A2a y B2a (para los escenarios A2 y B2, existen sub – escenarios entre los que se encuentran el A2a y el B2a), que son los únicos disponibles para el modelo HadCM3 en Sudamérica. Dentro de estos dos escenarios disponibles, el más severo es el A2a y el menos severo el B2a.

Tabla 2.1
Principales características de cada grupo de escenarios SRES

Tema	1990	SRES Escenarios para 2100			
		A1	A2	B1	B2
Población (billones)	5.252	7.1	15.1	7.2	10.4
Concentración de CO ₂ [ppmv]	354	680	834	547	601
Cambio de temperatura media anual global [°C]	---	2.52	3.09	2.04	2.16
Rango [°C]	---	1.70 – 3.66	2.12 – 4.41	1.37 – 2.99	1.45 – 3.14
Elevación del nivel del mar promedio global [cm]	---	58	62	50	52
Rango [cm]	---	23 – 101	27 – 107	19 – 90	20 – 93

Fuente: Carter et al (1999).

2.2.2 Modelos Superficiales

2.2.2.1 Modelos de Simulación Hidrológica

La mayoría de los sistemas hidrológicos son extremadamente complejos, y por lo tanto no es posible entenderlos en todos sus detalles. Por lo tanto, para comprender o controlar algunos aspectos de su comportamiento, es necesaria la abstracción. Los modelos de simulación hidrológica han sido desarrollados principalmente con dos objetivos (Xu, 2002):

- Adquirir un mejor entendimiento de los fenómenos hidrológicos que ocurren en un sistema, y como los cambios en dicho sistema pueden afectar a los fenómenos.
- Generar secuencias sintéticas de datos hidrológicos para el diseño de obras o para pronósticos, y proveer información para el estudio de impactos potenciales de cambios en los usos del suelo o cambios en el clima.

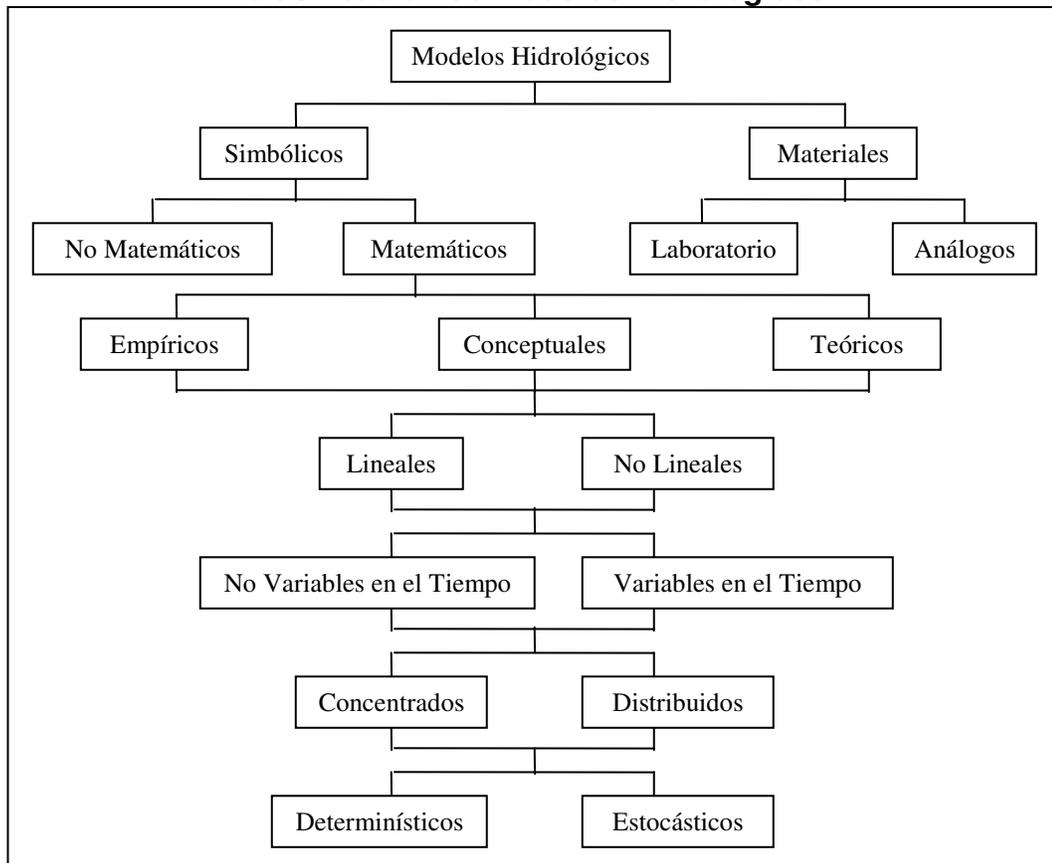
Los modelos de simulación hidrológica son de distintos tipos y fueron desarrollados con distintos propósitos (la clasificación de los modelos se observa en la Figura 2.6). Sin embargo, muchos de los modelos son estructuralmente similares, ya que los supuestos en los que se basan son los mismos (Singh, 1995). Dichos modelos pueden ser clasificados de acuerdo a diferentes métodos, uno de ellos es el de Singh (1988), el cual diferencia a los modelos como (1) materiales y (2) simbólicos o formales.

Los modelos materiales (también llamados modelos físicos) son una representación de los sistemas reales, que tienen propiedades similares, pero son mucho más simples para trabajar. Los modelos de laboratorio son aquellos que representan el sistema en una escala más pequeña, reproduciendo sus características principales. Los modelos análogos no son “físicamente” similares al sistema original, pero igual buscan reproducir sus características principales.

Los modelos simbólicos o formales (también llamados modelos abstractos) son una expresión simbólica en términos lógicos de una situación idealizada, que comparte las

propiedades estructurales del sistema original. Los modelos simbólicos pueden ser expresados de distintas maneras, una de ellas es la naturaleza matemática (Xu, 2002).

Figura 2.6
Clasificación de Modelos Hidrológicos



Fuente: Xu (2002).

Los modelos teóricos (también llamados modelos de caja blanca) resumen las leyes más importantes que gobiernan al fenómeno. Un modelo teórico tiene una estructura similar al sistema del mundo real y puede ser muy útil para analizar posibles cambios en dicho sistema. Ejemplos de estos modelos son aquellos basados en las ecuaciones de Saint Venant, modelos de evaporación basados en turbulencia y difusión, etc. (Xu, 2002).

Los modelos empíricos (también llamados modelos de caja negra) no se relacionan directamente con el mundo real, ellos contienen parámetros que prácticamente no tienen sentido físico. Los modelos ARMA (autoregressive moving average model) son ejemplos de esta clasificación (Xu, 2002).

Los modelos conceptuales (también llamados modelos de caja gris) son el punto medio entre los modelos teóricos y los empíricos. Generalmente estos modelos consideran leyes físicas, pero de manera muy simplificada (Xu, 2002).

Los modelos teóricos, empíricos y conceptuales pueden ser lineales o no lineales. Y se dice que un modelo no varía en el tiempo si las relaciones entre las entradas y las salidas no varían con él (Xu, 2002).

Los modelos concentrados son generalmente expresados mediante ecuaciones diferenciales ordinarias, que no consideran la variabilidad espacial de los procesos, entradas, condiciones de borde y de las características geométricas del sistema. Los modelos distribuidos toman en cuenta de manera explícita la variabilidad espacial de los procesos, entradas, condiciones de borde y/o características físicas del sistema. En algunos casos, se tiene una mezcla entre ambos modelos, éstos se conocen como semi-distribuidos (Singh, 1995).

Los modelos estocásticos son aquellos en que alguna de sus variables (en una ecuación) es aleatoria con distribución de probabilidad. Los modelos determinísticos son aquellos en que ninguna de sus variables (en una ecuación) es aleatoria o tiene una distribución de probabilidad.

2.2.2.2 Modelos de Generación de Escorrentía Superficial

Existen diversos modelos de generación de escorrentía superficial, algunos de los estudiados durante la realización de esta tesis se describen a continuación.

a) TOPMODEL

El desarrollo de este modelo comenzó con Mike Kirkby en 1974, en la Escuela de Geografía de la Universidad de Leeds. Desde la primera versión se han desarrollado muchas versiones de este modelo, en Leeds, Lancaster y en muchas otras partes del mundo, por eso se dice que no existe una versión definitiva del modelo. Es un modelo gratuito para fines académicos, y una versión de éste puede ser descargada desde http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg_freeware_top.htm (Departamento de Ciencia Medioambiental de la Universidad de Lancaster).

TOPMODEL es un modelo distribuido que simula los flujos hidrológicos del agua (flujos de los excesos de infiltración, las infiltraciones, los afloramientos, el flujo sub-superficial, evapotranspiración, pérdidas en canales, etc.) en una cuenca. El modelo simula interacciones explícitas entre la componente superficial y subterránea mediante la predicción del movimiento de la napa freática.

b) MIKE 11

MIKE 11 es un modelo comercial, desarrollado por el Danish Hydraulic Institute (<http://www.dhigroup.com>), que permite resolver diversos problemas relacionados con los recursos hídricos, tales como la simulación de flujos superficiales y niveles piezométricos, calidad de agua y transporte de sedimentos en ríos, predicción de crecidas, canales de irrigación, etc.

El módulo de precipitación – escorrentía (RR, rainfall – runoff) contiene un grupo de diversas aplicaciones, las que pueden ser utilizadas para estimar la escorrentía de las cuencas. Dentro de estas aplicaciones, existe un modelo hidrológico conceptual (NAM)

cuasi distribuido, en el que se tiene en cuenta la nieve, el almacenamiento superficial y radicular, la evapotranspiración, la infiltración, la escorrentía superficial y subterránea.

c) MPL

El MPL es un modelo desarrollado conceptualmente por Pablo Isensee (basado en el trabajo “Simulación Matemática del Régimen de Escorrentía en una Cuenca Pluvial”, realizado por Ernesto Brown en 1968, en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile) a fines de la década de los 80, corresponde a un modelo hidrológico de generación de caudales que simula el ciclo de escorrentía de una cuenca pluvial aplicando la ecuación de continuidad sobre un elemento de área y/o volumen de control en la cuenca. Este modelo, considera que existen dos elementos de embalse de agua (DGA, 2004 a):

- Un volumen de almacenamiento cercano a la superficie del suelo, cuya magnitud representa la capacidad media de retención de agua en la cuenca y desde el cual se extrae agua para satisfacer la demanda evapotranspirativa.
- Un volumen subterráneo que retiene el agua que percola y que al vaciarse en forma lenta, contribuye al escurrimiento sub-superficial y subterráneo. Este almacenamiento es el que produce la escorrentía en los períodos de estiaje.

En comparación con otros modelos, como el Sacramento, el MPL tiene pocos parámetros de calibración, éstos se muestran en la Tabla 2.2.

Los datos de entrada que requiere el modelo corresponden básicamente a las estadísticas de precipitación y de evaporación de alguna estación base, además del área de la cuenca y los factores de precipitación y evaporación que multiplican a las estadísticas base para obtener los valores asociados a la cuenca en análisis (DGA, 2004 a).

Este modelo ha sido utilizado en el país, en diversos proyectos en los que se ha requerido modelar cuencas pluviales, tales como los realizados por DGA (2004 a y b).

Tabla 2.2
Parámetros de Calibración del MPL

Parámetro	Descripción
FC	Tasa de infiltración correspondiente a suelo saturado (s=1) [mm/día]
ALFA	Variación de la tasa de infiltración por unidad de variación del grado de humedad
Smin	Grado de humedad correspondiente al punto de marchitez permanente
Scrit	Grado de humedad crítico bajo el cual se restringe la evapotranspiración
Sc	Grado de humedad correspondiente a la capacidad de campo
Hmáx	Máxima lámina de agua contenida en el suelo saturado [mm]
K	Constante de tiempo del embalse subterráneo [días]
Pmín	Porcentaje de la lluvia que se manifiesta como escorrentía superficial inmediata

Fuente: DGA (2004 a).

d) SACRAMENTO

El modelo Sacramento se denomina “Sacramento Soil Moisture Accounting”, es decir es un balance de humedad del suelo y forma parte de un sistema global denominado “National Weather Service River Forecast System” (NWSRFS), el cual corresponde al servicio meteorológico de USA, cuyas funciones son pronosticar tormentas. El modelo permite calcular la escorrentía, para lo cual utiliza información meteorológica, además puede ser aplicado tanto a cuencas pluviales como cuencas nivales (Muñoz, 2006).

El Sacramento consiste en un modelo conceptual que genera el caudal como escorrentía superficial a partir de las áreas porosas e impermeables de la cuenca, en conjunto con el flujo sub-superficial y dos niveles de flujo base. El modelo representa la cuenca como un conjunto de almacenamientos de determinada capacidad, los cuales retienen agua temporalmente y luego la ceden gradualmente, conforme su contenido disminuye por la percolación, evapotranspiración y drenaje lateral (Robles, 1985).

Una descripción detallada de este modelo, que corresponde al seleccionado para este estudio, se entrega en el Capítulo 4.

2.2.2.3 Modelos de Simulación Operacional

Existen dos categorías básicas de modelos operacionales: simulación y optimización. Un modelo de simulación es una conceptualización del sistema hídrico, utilizada para predecir su respuesta hidrológica, y en algunos casos su desempeño económico, bajo condiciones operacionales predefinidas. Tales modelos están basados en procedimientos, que realizan un balance de agua a través de los distintos elementos que componen la red hídrica simulada. Los modelos de simulación, normalmente son diseñados específicamente, para responder a las particularidades de la cuenca que se desea estudiar, lo cual impide su reutilización en otra cuenca (DGA, 2005 a).

Los modelos de optimización, en cambio, buscan una solución óptima al problema de asignación y distribución del recurso hídrico. La optimización se refiere a una formulación matemática, en la cual un algoritmo formal busca los valores óptimos de un conjunto de variables de control, los cuales minimizan o maximizan una función objetivo, sujeta a un conjunto de restricciones operacionales preestablecidas. Tanto la función objetivo como las restricciones están representadas por expresiones matemáticas que son función de las variables de control ya definidas por el modelador (DGA, 2005 a).

Existen diversos modelos de simulación operacional que fueron analizados durante la realización de esta tesis, algunos de ellos se describen a continuación.

a) MAGIC

A mediados del año 2002, la Dirección General de Aguas (DGA) comenzó un proyecto destinado a fusionar las mejores características de los modelos MOS Aconcagua (DOH, 1998) y SsuRH (DGA, 2000), en un único modelo genérico, flexible e integrado, que permitiera realizar una simulación hidrológica superficial y subterránea, de cualquier cuenca en la cual se dispusiera de toda la información necesaria, sin la necesidad de

destinar recursos económicos a la elaboración de un nuevo modelo, cada vez que se requiere simular el comportamiento de una nueva cuenca, sino que destinar dichos recursos, sólo a la recopilación de la información necesaria para alimentar el modelo. Este proyecto se denominó MAGIC, Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas (DGA, 2005 b).

Para escribir el código fuente del modelo, se utilizó el lenguaje de programación Delphi 7.0, hasta obtener la versión 1.0 del modelo MAGIC.

Las ventajas de este modelo son que es *analítico* por la naturaleza de todas las relaciones matemáticas y computacionales involucradas en él, es *genérico*, porque puede ser aplicado a cualquier cuenca (siempre que exista información) y es *integrado* porque abarca tanto la parte superficial como subterránea de la *cuenca* bajo estudio (DGA, 2005 b).

Las principales desventajas del modelo son que requiere ingresar demasiada información (la base de datos utilizada por este modelo, está compuesta de 43 tablas con distinta información requerida) y la modelación de la componente subterránea es bastante simplificada.

b) OASIS

OASIS es un modelo de simulación y optimización, desarrollado por la empresa Hydrologics (<http://www.hydrologics.net>), que permite modelar la gestión del recurso agua en un sistema tipo cuenca hidrográfica, en la que existen obras de almacenamiento, de captación y de conducción artificiales; y además necesidades de uso del agua para diferentes fines, en distintos puntos. El modelo simula los flujos de agua en un sistema representado por nodos y arcos.

Una de las características más poderosas de este modelo, es que simula los flujos del agua utilizando programación lineal entera. Esto significa para el usuario, que todas las reglas de operación son expresadas como Función Objetivo, Variables y Restricciones (Basaure, 2005).

Algunos de los defectos de este modelo son que en algunos casos resulta complicado la programación de algunas rutinas (como las salidas del modelo) y que no incorpora la interacción con la componente subterránea de los recursos hídricos.

Según el trabajo realizado por Basaure (2005), OASIS es una herramienta muy poderosa para modelar los recursos hídricos, ya que posee muchas alternativas de modelación, es decir, además de las herramientas que posee, permite programar externamente lo que no es capaz de realizar. Además en dicho trabajo, el modelo entregó resultados bastante aceptables, para las calibraciones de caudales en la cuenca del río Maule, en la VII Región del país.

c) MODSIM

MODSIM es un modelo de simulación operacional de sistemas hidráulicos tales como ríos y embalses; fue desarrollado en la década de 1970 por John Labadie de la

Universidad Colorado State. Se puede descargar de manera gratuita desde la página web <http://modsim.engr.colostate.edu/>.

El modelo tiene la capacidad de incorporar simultáneamente la complejidad física, hidrológica y los aspectos institucionales y administrativos del manejo de una cuenca, incluyendo los derechos de agua (Basaure, 2005).

Dentro de las principales ventajas de este modelo, se pueden mencionar las siguientes: permite el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y así caracterizar de manera más fácil al sistema modelado; en su versión 8.1, permite la interacción con modelos de aguas subterráneas, como Visual Modflow; se pueden incorporar derechos de agua, restricciones legales y administrativas; se pueden simular posibles impactos ambientales y ecológicos.

Dentro de los defectos, el principal de ellos es que requiere incorporar demasiada información de la cuenca, la cual no siempre está disponible para todas las cuencas que se quieren modelar.

d) AQUATOOL

Este modelo fue desarrollado a partir de 1990 en la Universidad Politécnica de Valencia, e incluye un módulo de optimización de cuencas, un módulo de simulación de acuíferos y un módulo de utilidades. El sistema no es específico para una cuenca determinada, sino que está previsto para un uso general puesto que permite la representación de diferentes configuraciones de sistemas hidráulicos.

El modelo está formado por una serie de módulos: SimWin, OptiWin, MashWin y Aquival, que permiten llevar a cabo las distintas aplicaciones del programa.

Desde la página web del programa (<http://www.upv.es/aquatool/>) se puede descargar un demo de éste, que tiene una capacidad de trabajo limitada con respecto a las versiones completas, pero permite hacerse una idea de cómo funciona este modelo; además se pueden obtener los manuales del programa.

2.2.3 Modelos de Aguas Subterráneas

La variedad de modelos de aguas subterráneas existentes, no es tan amplia como en los casos de los modelos superficiales, dentro de los más destacados se pueden mencionar: MODFLOW, FEFLOW, ASMWIN y FEMWATER.

En Chile el modelo de aguas subterráneas utilizado en gran parte de las modelaciones de sistemas acuíferos es MODFLOW, por lo que los otros modelos no fueron mayormente estudiados. Más información de MODFLOW se entrega en el Capítulo 4.

Capítulo 3

Descripción Zona de Estudio

3.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se hace una breve descripción de la zona de estudio, la cuenca del río Cachapoal, la cual fue escogida debido a que:

- Se cuenta con información suficiente (meteorológica, fluviométrica, etc.) para llevar a cabo de manera satisfactoria el presente trabajo.
- En dicha cuenca se tienen diversos usos del recurso hídrico, ya que existe una intensa actividad agrícola (en la parte baja de la cuenca), una importante actividad minera del cobre (El Teniente), usos para agua potable y generación hidroeléctrica; todo lo cual permite analizar los efectos del cambio climático en distintas actividades relacionadas con el uso del agua.
- Existe un modelo de aguas subterráneas previo, que se puede usar como base para generar uno nuevo que forme parte del Modelo Integrado.

En cuanto a la caracterización de la cuenca, se entregan antecedentes de su ubicación, clima, uso de suelo, geología, etc. Además, se detalla la información disponible de precipitación, temperatura, evaporación, caudales superficiales y pozos de bombeo.

Por último, con respecto a la información disponible, se generan curvas de variación estacional, que permiten caracterizar los tipos de régimen en distintos puntos de la cuenca del río Cachapoal.

3.2 UBICACIÓN ZONA DE ESTUDIO

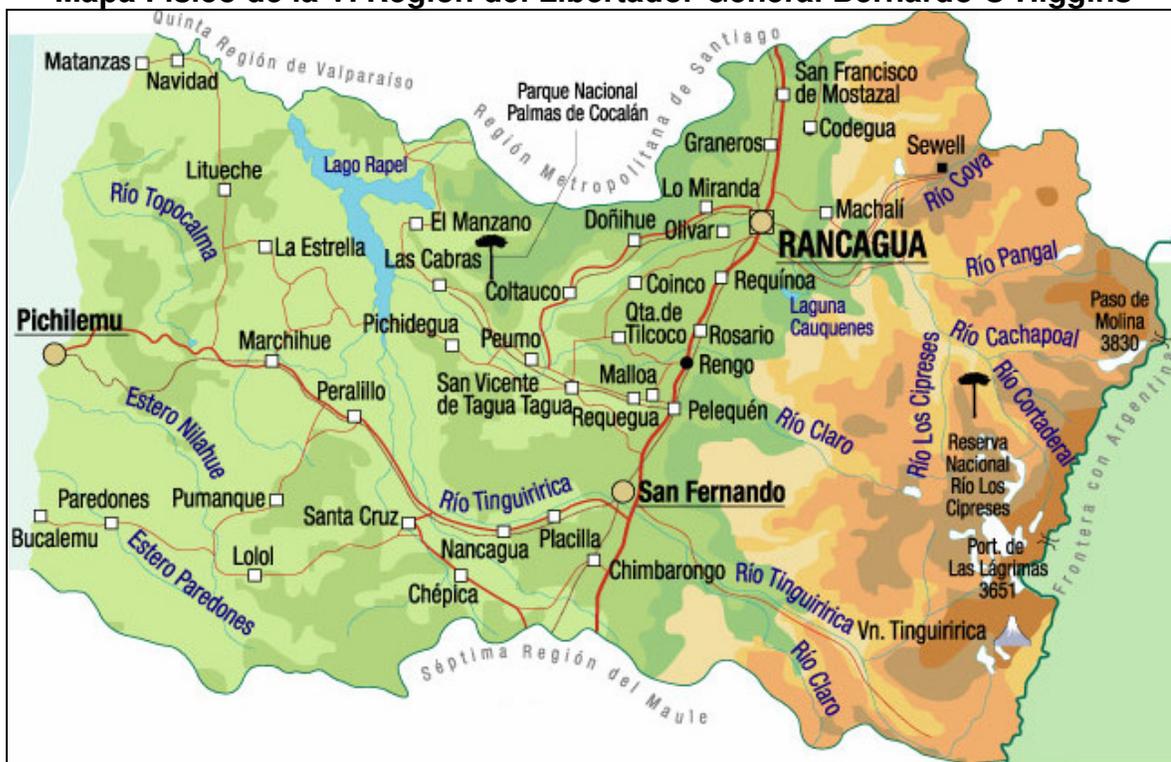
La VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins está ubicada en la zona central de Chile, limitando al norte con la V Región, de Valparaíso, al sur con la VII Región, del Maule, al oeste con el océano Pacífico y al este con Argentina. Se encuentra entre los 33° 51' y 35° 01' de Latitud Sur y entre los 72° 02' y 70° 02' de Longitud Oeste.

Esta región (ver Figura 3.1) abarca una superficie aproximada de 16,338 [km²] (que corresponde aproximadamente al 2.3% del territorio Chileno continental) y se encuentra dividida en tres provincias: Cachapoal, Colchagua y Cardenal Caro.

La zona de estudio, la cuenca del río Cachapoal, se encuentra ubicada dentro de esta región, abarca 18 comunas y tiene 584,000 habitantes. Cuenta con una superficie aproximada de 6,250 [km²], correspondiente al 38% de la región (CNR, 2005).

Su ubicación más específica dentro de la VI Región, se observa en la Figura 3.2.

Figura 3.1
Mapa Físico de la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins



Fuente: <<http://www.icarito.cl>>.

3.3 ANTECEDENTES GENERALES DEL SISTEMA

3.3.1 Relieve

En esta región se tienen cuatro fajas longitudinales: Cordillera de Los Andes, Depresión Intermedia, Cordillera de la Costa y Planicies Costeras.

- ***Cordillera de Los Andes***

Su altitud varía entre los 3,000 y 4,000 [m.s.n.m] y tiene un ancho aproximado de 50 [km]. En esta región, con un marcado volcanismo, se destacan los conos volcánicos como El Tinguiririca, de 4,620 [m.s.n.m], y El Palomo, de 4,860 [m.s.n.m]. La máxima cima corresponde al cerro Alto de los Arrieros, que tiene una altura de 4,990 [m.s.n.m].

- ***Depresión Intermedia***

Se caracteriza por las planicies generadas por el acarreo de materiales, principalmente de origen glacio-fluvio-volcánico.

Está cortada por dos angosturas, la de Paine (por el norte) y la de Regolemu (al norte de San Fernando), las que se forman debido a que ambas cordilleras tienden a juntarse en el centro del valle longitudinal, conformando una llanura de relleno, principalmente aluvial, donde se alojan los mejores suelos de la región. Al sur de la angostura de Regolemu, la depresión se ensancha.

Figura 3.2
Cuenca del Río Cachapoal



Fuente: CNR (2005).

- ***Cordillera de la Costa***

En esta región la Cordillera de la Costa se presenta baja y redondeada, no sobrepasando los 800 [m.s.n.m]. Además, se desvía hacia el interior, lo que le da mayor amplitud a las planicies litorales.

- ***Planicies Litorales***

Las Planicies Litorales presentan una gran extensión en el litoral al sur del estero Yali, en las cercanías del río Rapel. Lo mismo sucede en Bucalemu y Pichilemu donde se presentan hasta tres niveles de terrazas, el contacto con la Cordillera de la Costa se hace por medio de diferentes cursos de agua que penetran hasta 25 [km] hacia el interior.

3.3.2 Clima Regional

En la VI Región se pueden distinguir 3 tipos de climas, cuyas características principales son las siguientes (DMC, 2006 b):

a) Clima templado cálido con estación seca prolongada y gran nubosidad.

Este clima se encuentra en el sector costero de la parte norte de la región, abarcando las planicies litorales y la ladera occidental de la Cordillera de la Costa. Está determinado por la cercanía al mar, que modera las temperaturas y produce una gran humedad que se manifiesta en una gran cantidad de días nublados.

Las precipitaciones son de origen frontal y se concentran en invierno. Las sumas anuales varían entre 500 [mm] en la parte norte hasta 800 [mm] en el sector sur. Entre los meses de Mayo y Agosto cae entre el 76% y el 80% de la precipitación total anual. Los meses de Octubre a Abril presentan menos de 40 [mm] de agua caída, definiendo así una estación seca que dura 7 meses.

b) Clima templado cálido con estación seca prolongada.

Este tipo de clima se da en la zona ubicada en la depresión intermedia o en el valle longitudinal de esta región, mostrando características mediterráneas con veranos cálidos y secos e inviernos lluviosos, frescos y húmedos.

Las precipitaciones son algo menores que en el litoral. En este caso también hay 7 meses con precipitación inferior a 40 [mm], que van de Octubre a Abril. Las precipitaciones se incrementan de norte a sur, mientras en Rancagua el promedio anual es 400 [mm], en San Fernando es 700 [mm].

Las amplitudes térmicas tanto diarias como anuales son mayores que en el litoral. La diferencia de temperatura entre el mes más cálido y el más frío es del orden de 13 [°C] en Rancagua (la temperatura media durante los meses fríos es 7 [°C] y en el verano es de 20 [°C]) y sólo llega a 8 [°C] en la costa.

La Cordillera de la Costa limita el alcance de la influencia marítima, lo que se manifiesta en una menor cantidad de días nublados que en el litoral.

c) Clima templado cálido con estación seca.

En el sector cordillerano de la región, por sobre los 800 [m], el ascenso del relieve provoca grandes variaciones en el clima.

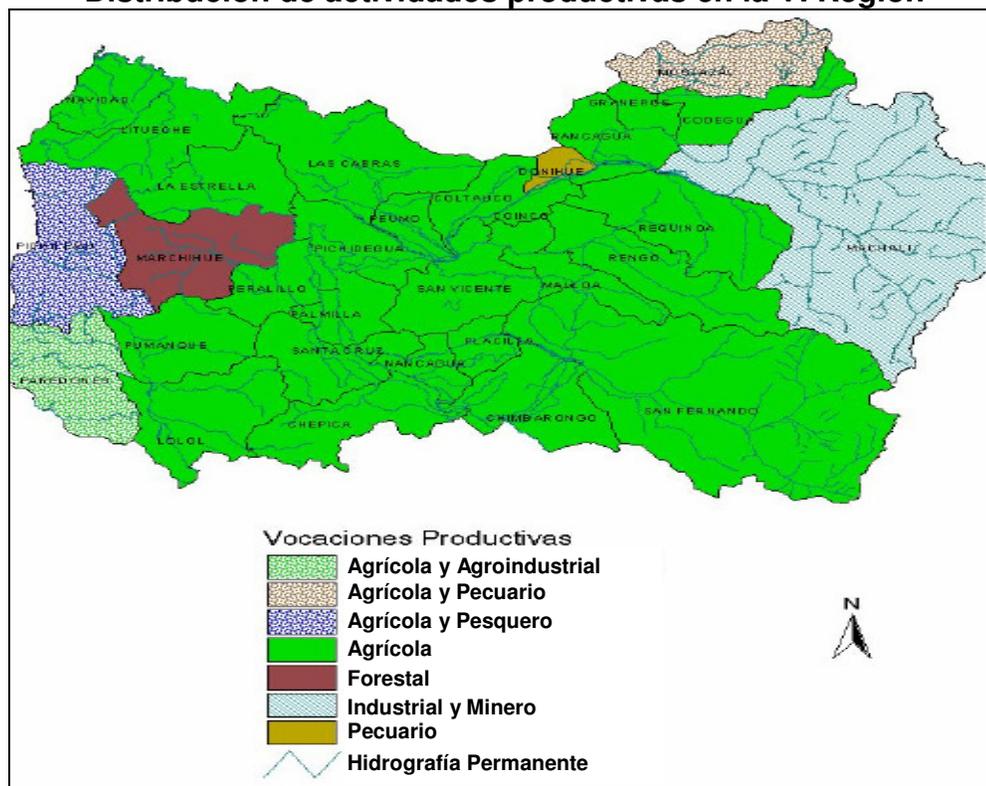
Las temperaturas medias en el invierno están entorno a los 0 [°C] y son aproximadamente 4 [°C] más bajas que en el valle. La diferencia entre el mes más cálido y el más frío también desciende a cerca de 11 [°C].

Las precipitaciones invernales se hacen sólidas, al mismo tiempo que aumentan a cerca de 1,000 [mm] anuales, acortándose así la duración de la estación seca a sólo 4 - 5 meses con precipitación inferior a 40 [mm].

3.3.3 Economía Regional

La economía de la región está basada principalmente en la actividad agrícola, forestal y minera. En la Figura 3.3 se muestra la distribución de actividades productivas comunales dentro de la región.

Figura 3.3
Distribución de actividades productivas en la VI Región



Fuente: DNP (2006). (NO A ESCALA)

Dentro de la actividad minera destaca la mina El Teniente, ubicada a 44 [km] de Rancagua, la cual está asociada a la producción minera de cobre (principalmente), plata, oro y molibdeno.

Con respecto al sector agrícola, la VI Región ocupa el quinto lugar en el ranking nacional de exportaciones de productos silvo – agropecuarios y también se destaca en los cultivos hortofrutícolas (frescos y procesados), la producción vinífera de alta calidad, y su potencial maicero (DNP, 2006).

3.3.4 Uso de Suelo

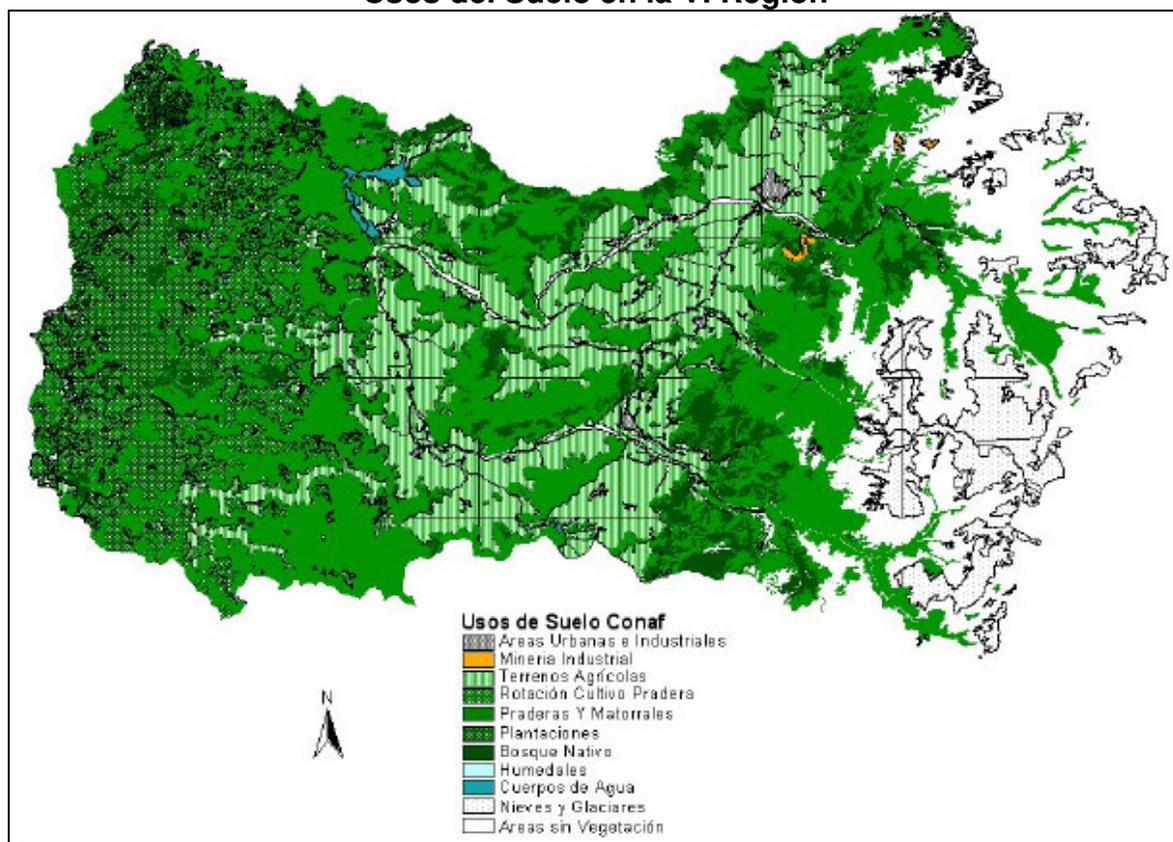
Los usos del suelo en la VI Región se pueden resumir en la Tabla 3.1 y la Figura 3.4 que se muestran a continuación:

Tabla 3.1
Usos del Suelo VI Región

Uso	Superficie [há]	%
Áreas Urbanas e Industriales	17,771	1.1
Terrenos Agrícolas	423,783	25.9
Praderas y Matorrales	627,336	38.4
Bosques	237,987	14.6
Humedales	4,342	0.3
Áreas Desprovistas de Vegetación	301,695	18.5
Nieves y Glaciares	11,262	0.7
Cuerpos de Agua	9,636	0.6
Áreas No Reconocidas	0	0.0
Total	1,633,811	100

Fuente: DNP (2006).

Figura 3.4
Usos del Suelo en la VI Región



Fuente: DNP (2006).

3.4 ANTECEDENTES CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL

3.4.1 Hidrografía

Tal como se observa en la Figura 3.2, el río Cachapoal se inicia en la Cordillera de Los Andes a los pies de las cumbres Pico del Barroso, 5,160 [m.s.n.m.] (Hadjigeorgalis et al., 2002), y Nevado de Los Piuquenes, 4,440 [m.s.n.m.] (Bustamante, 2002). Desde su

nacimiento corre en dirección oeste recibiendo el aporte de varios cajones cordilleranos, entre los cuales destacan el de Las Vegas, de Don Manuel, de La Fortuna y el Estero de Los Cipresitos.

Luego, sigue su avance hacia el noroeste recibiendo el aporte de tributarios importantes, entre los cuales se destacan los ríos Las Leñas (a 25 [km] desde el nacimiento), Cortaderal y Los Cipreses, los cuales llegan al Cachapoal por su ribera izquierda. Posteriormente recibe el aporte del río Pangal por su ribera derecha.

Cerca del pueblo minero de Coya recibe por su ribera norte al río del mismo nombre (a 28 [km] de Las Leñas).

En seguida, dobla bruscamente al suroeste por 9 [km] hasta la confluencia con el río Claro de Cauquenes (por la ribera sur), próximo a esta última confluencia se encuentra la Central Hidroeléctrica Sauzal (de 76,000 [kW] de potencia).

Desde este punto, el río se dirige hacia el noroeste por una extensión de 20 [km], hasta las cercanías de Rancagua, en plena depresión intermedia. En este tramo recibe por la ribera norte el aporte del Estero La Cadena y por la ribera sur el aporte del estero Cauquenes.

Luego el Cachapoal se dirige hacia el suroeste por 48 [km], siguiendo el pie oriental de la cordillera de la Costa (en este tramo recibe el aporte del Estero La Cadena) hasta la localidad de Peumo donde se le une, por la ribera sur, el río Claro de Rengo.

En este punto se forma un codo donde el río cambia su dirección hacia el noroeste, recorriendo 34 [km] hasta juntarse con el río Tinguiririca, donde comienza el embalse Rapel. En dicho último tramo recibe el aporte de esteros como el Antivero y el Zamorano.

La longitud total del río Cachapoal, desde su nacimiento en la Cordillera de Los Andes hasta la confluencia con el río Tinguiririca, es de aproximadamente 164 [km].

En el Anexo B1 se muestran fotografías de algunos de los puntos mencionados del río Cachapoal.

3.4.2 División Administrativa río Cachapoal

Como se observa en la Figura 3.2 el río Cachapoal está dividido en tres secciones, las cuales están reguladas por juntas de vigilancia que agrupan a los usuarios correspondientes a cada una de ellas. Las juntas de la primera y segunda sección se constituyeron en 1953 y 1968, respectivamente, y se encuentran registradas en la Dirección General de Aguas (DGA); la del tercer tramo está constituida por Escritura Pública desde 1938, pero aún no ha realizado los trámites para su registro en la DGA (CNR, 2005).

- **Primera Sección**

Está comprendida entre el nacimiento del río hasta Punta Cortés, aguas arriba de la confluencia del estero La Cadena con el río Cachapoal.

Esta sección está dividida en 1,000 acciones y el río es sometido a turnos cuando el caudal baja a 80 [m³/s]. El valor medio mensual de una acción es de 62.7 [l/s/acción] con 85% de probabilidad de excedencia, según distribuciones extremas (Bustamante, 2002).

- **Segunda Sección**

Está comprendida entre Punta Cortés y la confluencia del Estero Purén o Idahue con el río Cachapoal.

Esta sección está constituida principalmente por derrames y recuperaciones. Los canalistas tienen derecho a usar el total del caudal del río.

- **Tercera Sección**

Se extiende entre la confluencia del Estero Purén o Idahue con el río Cachapoal hasta la junta del río Cachapoal con el río Tinguiririca.

Esta sección está dividida en 4,000 acciones y el río es sometido a turnos cuando el caudal baja de 34 [m³/s] (Bustamante, 2002).

En la Tabla 3.2 se muestra un resumen de la infraestructura y número de regantes por sección del río Cachapoal.

Tabla 3.2
Infraestructura y número de regantes por sección

Infraestructura	Sección			Río
	1	2	3	
Bocatomas	12	13	8	33
Canales	31	19	11	61
Regantes	10,272	4,147	4,888	19,307

Fuente: Hadjigeorgalis et al (2002).

3.4.3 Hidrogeología

La breve caracterización hidrogeológica que se hace en el presente acápite, se basa en el trabajo realizado por DGA (2005 c).

3.4.3.1 Geología de Superficie

La geología de la zona de estudio se muestra en la Figura 3.5.

a) Rocas Estratificadas

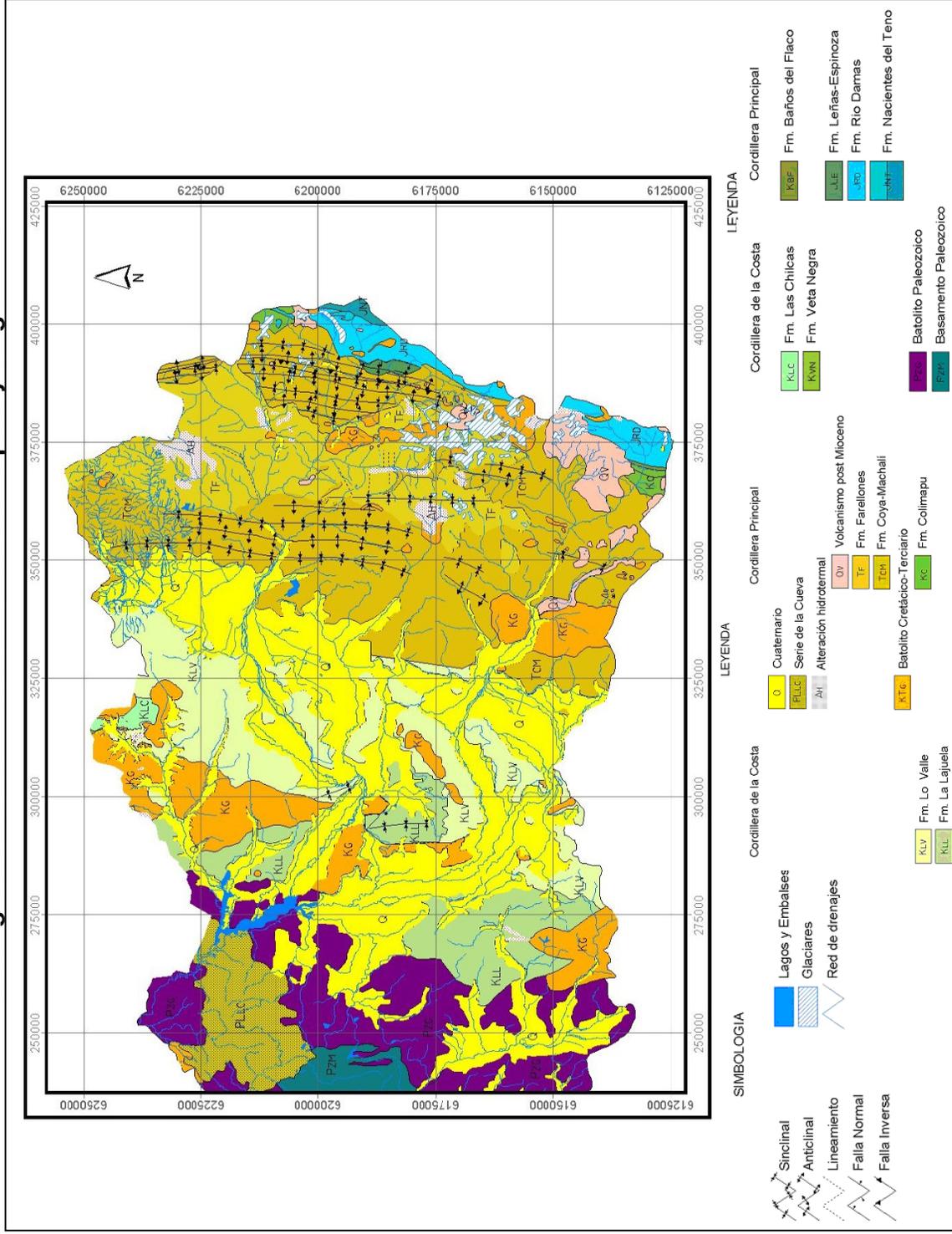
En este acápite se describen sólo aquellas formaciones de la Figura 3.5, que pertenecen a la cuenca del río Cachapoal.

- Formación Nacientes del Teno (Caloviano? a Oxfordiano): sedimentos marinos clásticos organogénicos y químicos con intercalaciones de material piroclástico.
- Formación Río Damas (Kimmeridgiano): grandes espesores de conglomerados y brechas de diversa composición, areniscas y sedimentos finos. Estos depósitos continentales se caracterizan por un escaso contenido de fósiles y una típica coloración rojiza.
- Formación Leñas – Espinoza (Caloviano): esta formación está constituida por una serie detrítica en la parte inferior y por un paquete calcáreo en la parte superior.
- Formación La Lajuela (Titotiano? a Hauteriviano?): esta unidad está constituida principalmente por volcanitas queratofíricas y andesitas. Se han reconocido también algunos niveles riolíticos constituidos por coladas y brechas con clastos con estructura fluidal.
- Formación Lo Valle (Cretácico Superior): secuencia volcánica.
- Formación Coya – Machalí (Eoceno Superior a Mioceno Inferior): potentes series continentales predominantemente volcánicas, con potentes intercalaciones sedimentarias.
- Formación Farellones (Mioceno): potente serie volcánica (coladas, brechas y tobas de composición riolítica, andesítica y basáltica) con intercalaciones clásticas (conglomerados, brechas, areniscas y limonitas) continentales.
- Volcanismo post Mioceno (Plioceno inferior a Holoceno): incluye toda la actividad volcánica post Mioceno.

b) Depósitos Cuaternarios

- Depósitos Fluviales y Aluviales: rellenan todos los valles y se presentan formando terrazas. La depresión central ha sido fuertemente rellena por este y otro tipo de depósitos. En la actualidad presentan amplios conos aluviales en la desembocadura de los ríos.
- Depósitos Morrénicos: se encuentran exclusivamente en la Cordillera Principal, a lo largo de los cauces de ríos.

Figura 3.5
Geología de las cuencas de los Ríos Cachapoal y Tinguiririca



Fuente: DGA (2005 c).

- Depósitos Lacustres de tipo Fluvioglacial: son depósitos acumulados detrás de las morrenas frontales, una vez que se retiran los hielos. Estos lagos presentan distintos niveles de evolución geomorfológica.

c) Rocas Intrusitas

Las rocas graníticas se pueden subdividir en dos grupos, uno Paleozoico y otro post Paleozoico. Las primeras (Batolito de la Costa) forman un cuerpo intrusivo que se distribuye en la parte más occidental de la zona de estudio. Son rocas de composición muy variada, predominantemente tonalíticas y granodioríticas de grano grueso. Las segundas, se encuentran repartidas en toda el área de estudio, y se trata, principalmente, de granodioritas de granos más finos y menos alteradas. Debido a que éstos últimos cortan la Formación Farellones, su edad es post Mioceno.

d) Estructuras

En la Cordillera de la Costa, las principales estructuras son las fallas normales que la limitan hacia el este, y que han permitido el hundimiento del bloque que constituye la depresión intermedia.

En la Cordillera Principal se reconocen tres unidades separadas por discordancias. La más antigua (que reúne a las unidades del Jurásico medio al Cretácico medio) aparece separada de la segunda unidad. La segunda unidad (Formación Coya – Machalí) se encuentra frecuentemente cortada por fallas inversas con poco desplazamiento. La última unidad corresponde a la Formación Farellones y se caracteriza por plegamientos de gran amplitud.

3.4.3.2 Estratigrafía del Acuífero Cachapoal

La cuenca del río Cachapoal está dominada por dos estratos, uno de granulometría gruesa (ripios, gravas y arenas, con muy escasos finos) y otro que subyace al anterior y que presenta una mayor fracción de finos que abarca toda su área.

El estrato de granulometría gruesa, por sus características sedimentológicas, constituye un medio permeable susceptible de constituir un atractivo acuífero. Este estrato aflora en gran parte del área estudiada y alcanza un espesor mayor a 100 [m] en la depresión central, en el sector ubicado entre Rancagua y Rosario, alcanzando un máximo de 150 [m] en Rancagua. Al norte de este sector, este mismo estrato alcanza espesores variables entre 5 y 10 [m], y presenta algún grado de confinamiento, debido a la presencia de un estrato con abundante matriz arcillosa y limosa.

Hacia la costa, el primer estrato sigue presentando un espesor variable entre 60 y 100 [m] y apareciendo como un acuífero libre. La única variación se observa en el sector de las confluencias de los ríos Claro y Cachapoal, y Cachapoal y Estero Zamorano, donde se presenta como una alternancia de niveles predominantemente gruesos y otros con mayor contenido de arcillas. Aguas abajo de la última confluencia, el estrato vuelve a tener las mismas características que en el resto de la cuenca. En el valle del Estero Zamorano, el estrato presenta características similares al resto de la cuenca, pero con un espesor menor.

El segundo estrato aparece como una alternancia de niveles arenosos y otros con abundante arcilla, lo que hace que se caracterice como un estrato de baja permeabilidad. Este estrato, aunque es encontrado por pocos sondajes, presenta importante continuidad lateral en toda la cuenca. Ningún sondaje encuentra su base, lo que impide que se determine su espesor, el que presumiblemente, está ubicado en la base rocosa de la cuenca.

3.4.3.3 Piezometría y Sentido de Esguerrimiento

Las mayores alturas piezométricas (≈ 500 [m.s.n.m.]) se alcanzan en torno al Estero Codegua, disminuyendo sus niveles tanto hacia el norte, como hacia el sur. Esto indica que, por un lado, hay un esguerrimiento que sale desde la depresión intermedia de la sexta región hacia el norte, a través de la cuenca del río Angostura, y por otra parte, un flujo hacia el sur.

En las proximidades de la ciudad de Rancagua (≈ 425 [m.s.n.m.]), las aguas subterráneas provienen del este, para luego curvarse en dirección suroeste (donde una parte fluye hacia el valle inferior del río Cachapoal, aguas abajo de Punta Cortés) y posteriormente esguerrir en dirección sur, para encontrarse con las aguas que provienen del valle superior del río Claro de Rengo y tomar dirección oeste hasta la confluencia del río Cachapoal con el río Claro de Rengo (≈ 200 [m.s.n.m.]).

Unos 5 [km] más abajo se juntan con los flujos subterráneos que vienen bajo el Estero Zamorano. Desde aquí hacia el Embalse Rapel, el agua se sigue moviendo en la misma dirección que el río Cachapoal, aunque cada vez con un gradiente menor. En el Estero Zamorano, el flujo subterráneo, va de este a oeste, pero con un gradiente menor que los dos ríos principales (Cachapoal y Claro de Rengo).

3.4.3.4 Conductividades Hidráulicas y Coeficientes de Almacenamiento

La conductividad hidráulica en la zona de la depresión central va aumentando de norte a sur, empezando en el sector de Angostura donde las conductividades medidas en pozos varían en torno a 1 [m/día], alcanzando un valor máximo muy variable entre Rancagua y Rengo, donde los valores extremos son 7.49 [m/día] y 199.74 [m/día].

Cuando la cuenca empieza a atravesar la Cordillera de la Costa, la conductividad comienza a disminuir progresivamente, con valores cercanos a 100 [m/día] en la depresión central, pasando por valores variables entre 2.76 y 42.26 [m/día] en la comuna de Coltauco, y mostrando una disminución lenta pero constante desde Peumo (valores entre 20.38 y 62.5 [m/día]) hasta el Embalse Rapel, con una permeabilidad de 0.62 [m/día].

En el Estero Zamorano, las conductividades medidas en pozos pasan desde valores cercanos a 1.3 [m/día] en la parte más alta, a valores que varían en torno a 24 [m/día] en la parte media, llegando a valores de gran variabilidad cerca de San Vicente de Tagua Tagua (entre 0.59 y 105.40 [m/día]).

En los sectores donde entran ríos y esteros a la cuenca, las conductividades son más bien bajas, con valores típicos entre 1 y 15 [m/día].

Con respecto al coeficiente de almacenamiento, en el estudio de la DGA (2005 c) se indica que las pruebas de bombeo, no permitieron estimar en forma confiable los valores de dicho parámetro, debido básicamente a que sólo consideran mediciones de niveles en el pozo de producción. Por ello se definieron valores de coeficiente de almacenamiento asociados a los rangos de conductividad hidráulica (que se muestran en el Capítulo 4).

Tanto la conductividad hidráulica como el coeficiente de almacenamiento (sus valores y maneras de determinarlos), para el acuífero Cachapoal, son descritos en detalle en el Capítulo 4.

3.4.3.5 Geometría del Acuífero

El acuífero de Cachapoal cubre un área aproximada de 6,000 [km²] (área considerada para la modelación) y está limitado en gran parte de su extensión, por bordes impermeables (contacto roca – relleno). Los otros límites de este acuífero están asociados al Embalse Rapel, por el oeste; y a cursos de agua superficial, como los ríos Cachapoal, Claro de Rengo (al este) y a los esteros Peumo y Codegua (noreste).

Los niveles de terreno en el sector noreste del acuífero están en torno a los 500 [m.s.n.m], reduciendo sus valores a medida que se avanza en dirección suroeste, llegando a valores cercanos a 100 [m.s.n.m] en las cercanías del Embalse Rapel.

Con respecto al espesor del acuífero, éste alcanza sus valores máximos en torno a la ciudad de Rancagua, con espesores mayores a 200 [m], y sus valores mínimos se observan en los sectores del Estero Zamorano, en la confluencia de éste con el río Cachapoal y en la desembocadura del mencionado río en el Embalse Rapel, con espesores entre 60 y 100 [m].

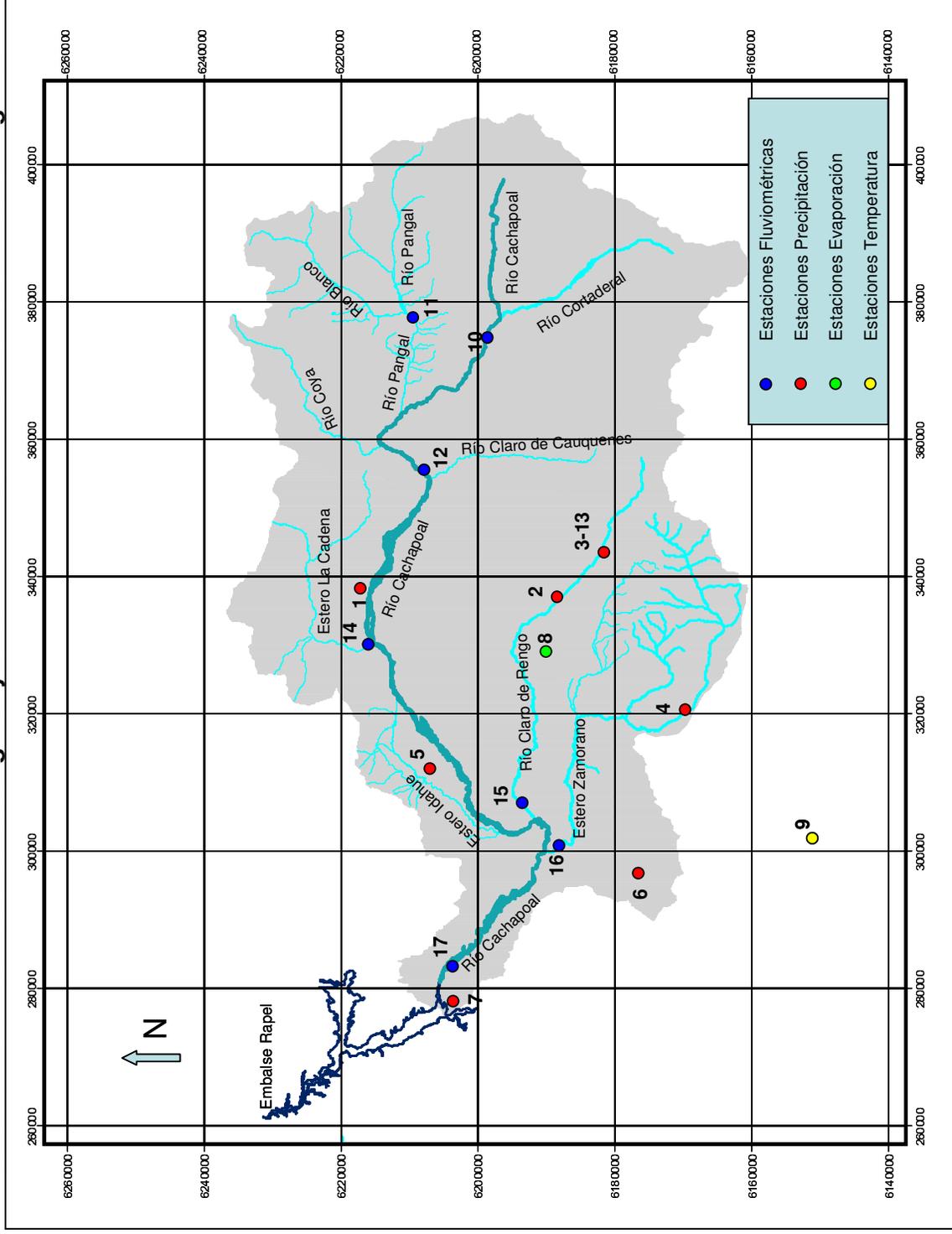
La geometría del acuífero se describe en detalle en el Capítulo 4.

3.4.4 Información Disponible

En la Figura 3.6 se muestran las estaciones meteorológicas y fluviométricas, que tienen información suficiente para llevar a cabo la implementación de cada una de las componentes del Modelo Integrado.

En la Tabla 3.3 se entrega la información que aporta cada estación, y la fuente desde donde se obtuvieron los datos de dichas estaciones.

Figura 3.6
Ubicación Estaciones Meteorológicas y Fluviométricas utilizadas en el Modelo Integrado



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 3.3
Estaciones Meteorológicas y Fluviométricas utilizadas en el Modelo Integrado

Número	Nombre Estación	Variable Medida	Fuente Información
1	Rancagua Endesa	Precipitación	DGA
2	Popeta	Precipitación	DGA
3	Las Nieves Central	Precipitación	DGA
4	San Fernando	Precipitación	DGA
5	Coltauco	Precipitación	DGA
6	Millahue	Precipitación	DGA
7	Pichidegua	Precipitación	DGA
8	Rengo	Evaporación, Precipitación, Temperatura	DGA
9	Convento Viejo	Temperatura	DGA
10	Río Cachapoal 5 [km] aguas abajo junta Cortaderal	Caudales medios diarios	DGA
11	Río Pangal en Pangal	Caudales medios diarios	DGA
12	Río Cachapoal en Puente Termas	Caudales medios diarios	ENDESA
13	Río Claro en Hacienda Las Nieves	Caudales medios diarios	DGA
14	Estero de La Cadena antes junta Río Cachapoal	Caudales medios diarios	DGA
15	Río Claro en Tunca	Caudales medios diarios	DGA
16	Estero Zamorano en Puente El Niche	Caudales medios diarios	DGA
17	Río Cachapoal en Puente Arqueado	Caudales medios diarios	ENDESA

En la cuenca del río Cachapoal existen varias otras estaciones meteorológicas y fluviométricas, pero éstas no cuentan con información suficiente para ser consideradas en la implementación del Modelo Integrado.

3.4.4.1 Variables Meteorológicas

a) Precipitación

De acuerdo a la información disponible, las estaciones que pueden ser utilizadas en la calibración y validación del Modelo Integrado (Capítulo 4), son: Popeta, Las Nieves Central, San Fernando, Millahue, Pichidegua, Coltauco y Rancagua Endesa. Por otro lado, para la generación de escenarios de cambio climático, la estación Rengo tiene la información suficiente para ser utilizada en dicho proceso (más detalles en Capítulo 5).

En las Figuras 3.7 a 3.14 se muestran las precipitaciones totales mensuales promedio, en cada estación pluviométrica indicada en el párrafo anterior, para los períodos con datos (se promedia la precipitación total de cada mes en todos los años con información). Se observa que la temporada de mayores lluvias se da entre los meses de Abril a Octubre.

Figura 3.7

Precipitación Total Mensual Promedio Estación Rancagua Endesa

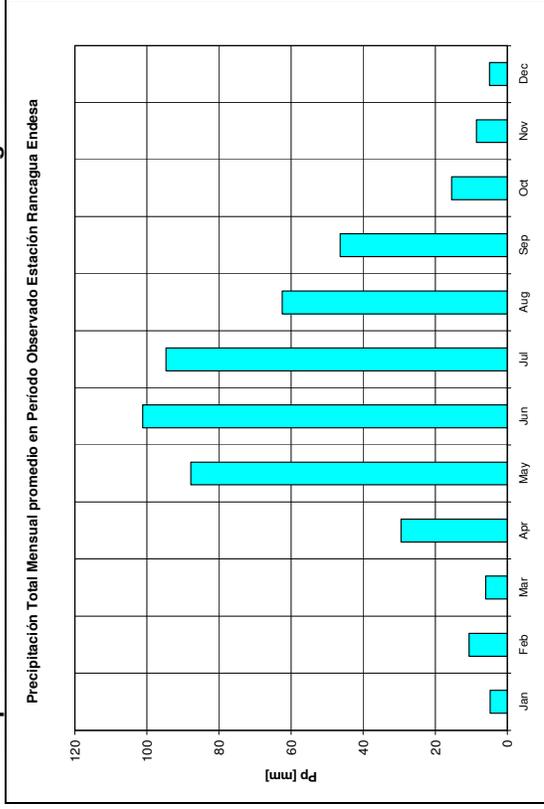


Figura 3.8

Precipitación Total Mensual Promedio Estación Popeta

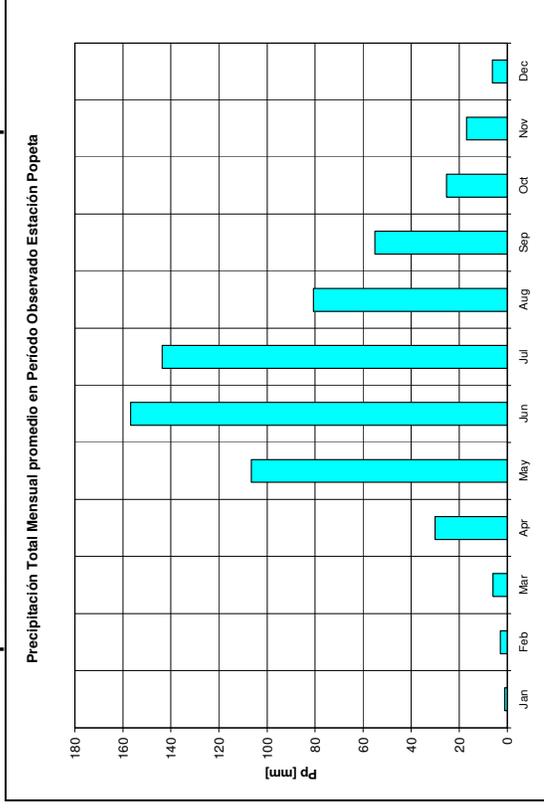


Figura 3.9

Precipitación Total Mensual Promedio Estación Las Nieves Central

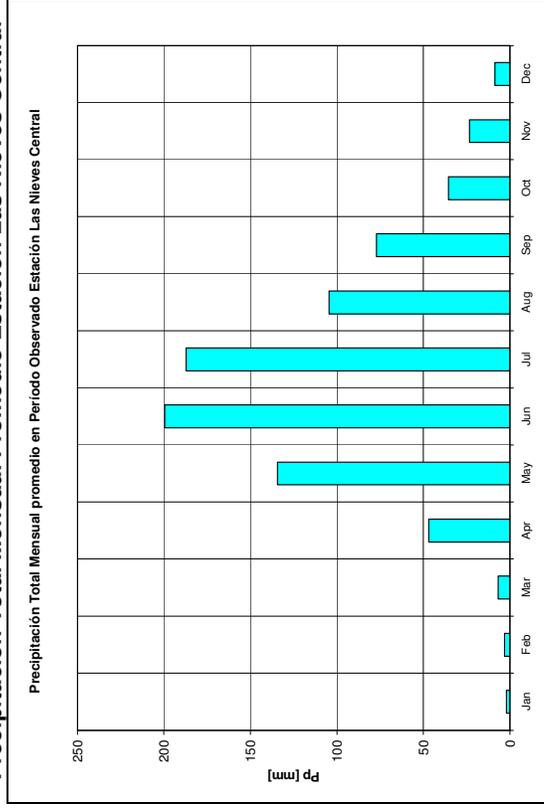


Figura 3.10

Precipitación Total Mensual Promedio Estación San Fernando

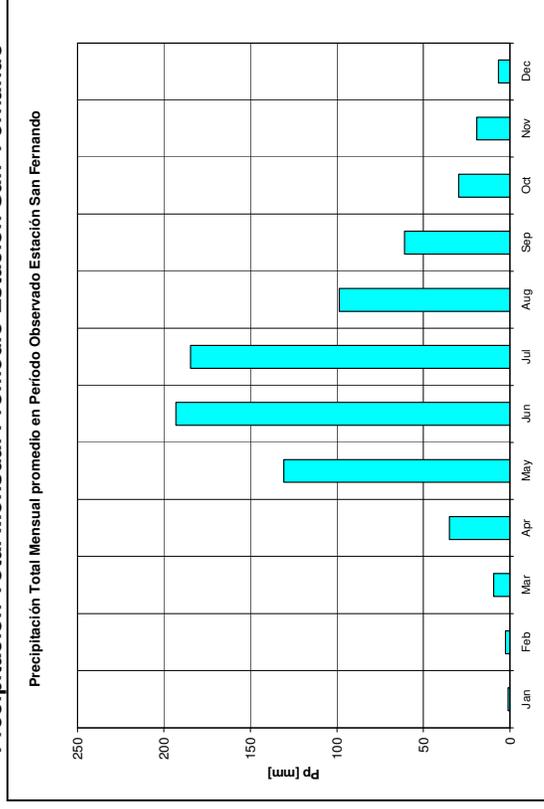


Figura 3.11

Precipitación Total Mensual Promedio Estación Coltauco

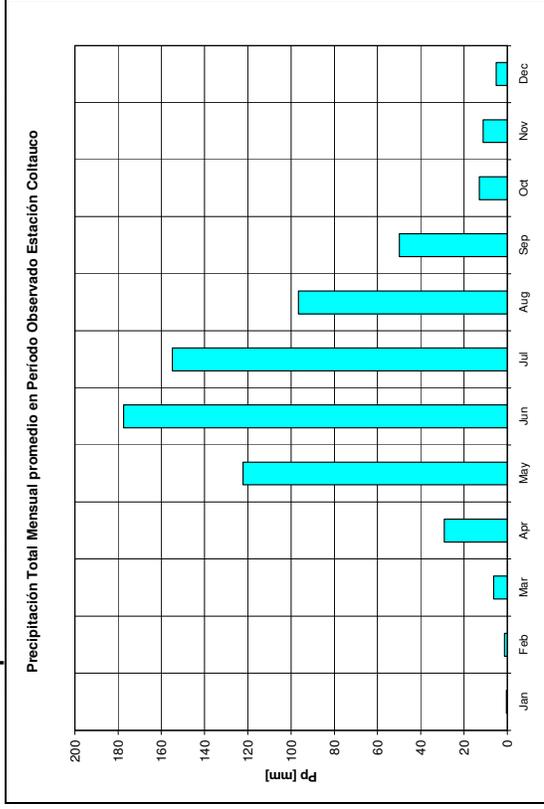


Figura 3.12

Precipitación Total Mensual Promedio Estación Millahue

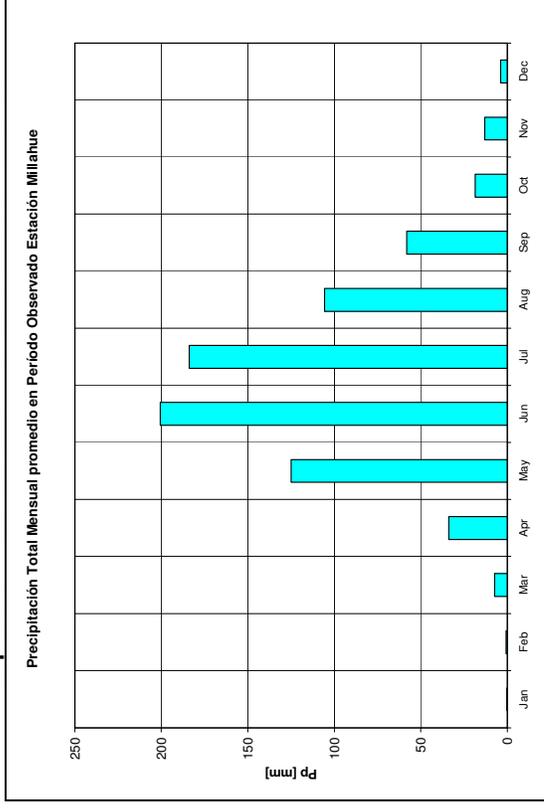


Figura 3.13

Precipitación Total Mensual Promedio Estación Pichidegua

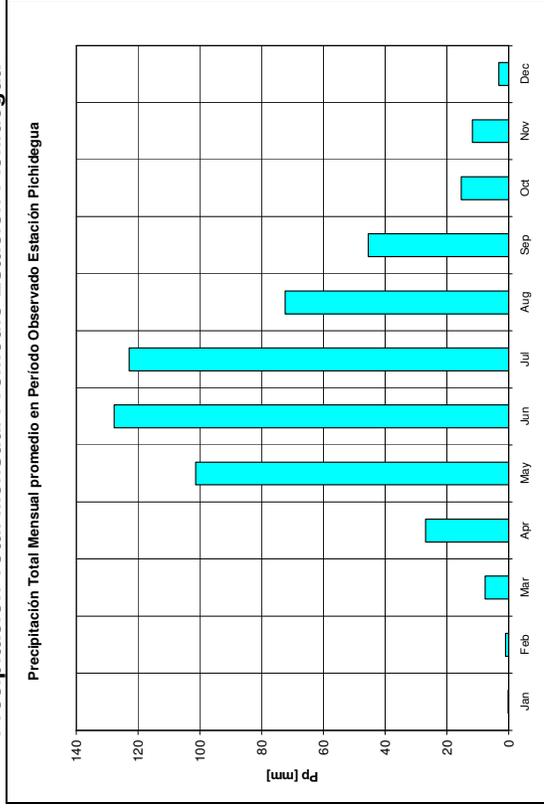
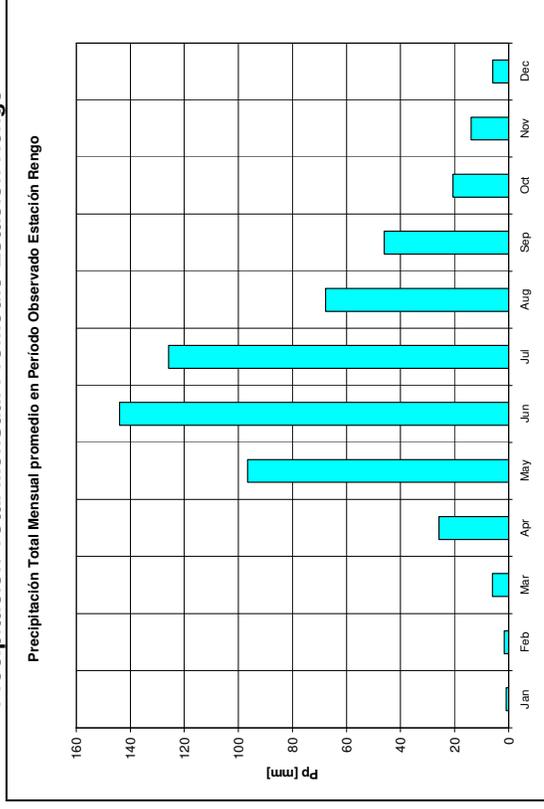


Figura 3.14

Precipitación Total Mensual Promedio Estación Rengo



b) Temperatura

De acuerdo a la información disponible, la estación que puede ser utilizada en la calibración y validación del Modelo Integrado (Capítulo 4), es Convento Viejo. Por otro lado, para la generación de escenarios de cambio climático, la estación Rengo tiene la información suficiente para ser utilizada en dicho proceso (más detalles en Capítulo 5).

En las Figuras 3.15 y 3.16 se muestran las temperaturas medias mensuales en cada estación termométrica indicada en el párrafo anterior, para los períodos con datos (valor promedio de las temperaturas medias mensuales en todos los años con información). Se observa que la temporada de mayores temperaturas se tiene en el período de deshielo (Octubre a Marzo), mientras que en el período invernal (Abril a Septiembre) se tienen las menores temperaturas.

Figura 3.15
Temperatura Media Mensual Promedio Estación Convento Viejo

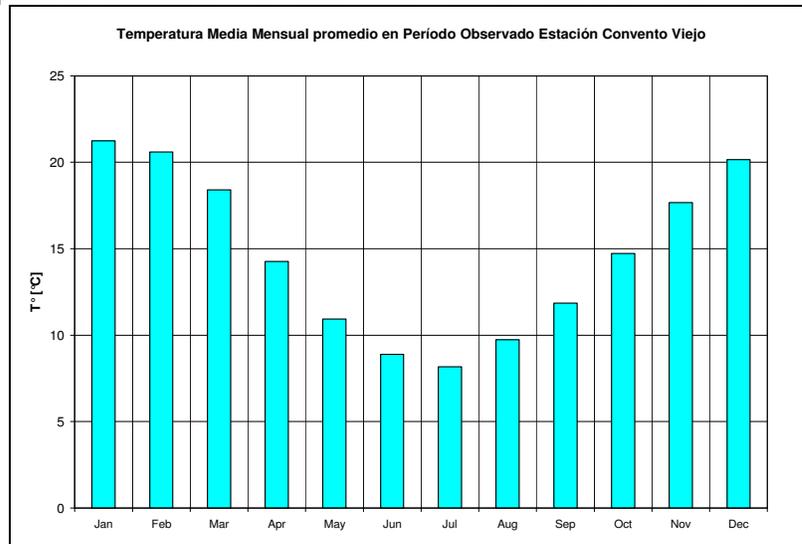
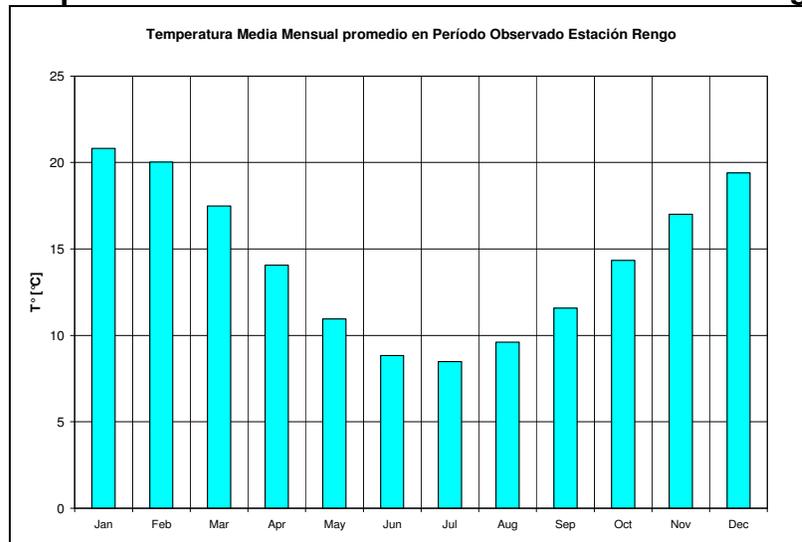


Figura 3.16
Temperatura Media Mensual Promedio Estación Rengo

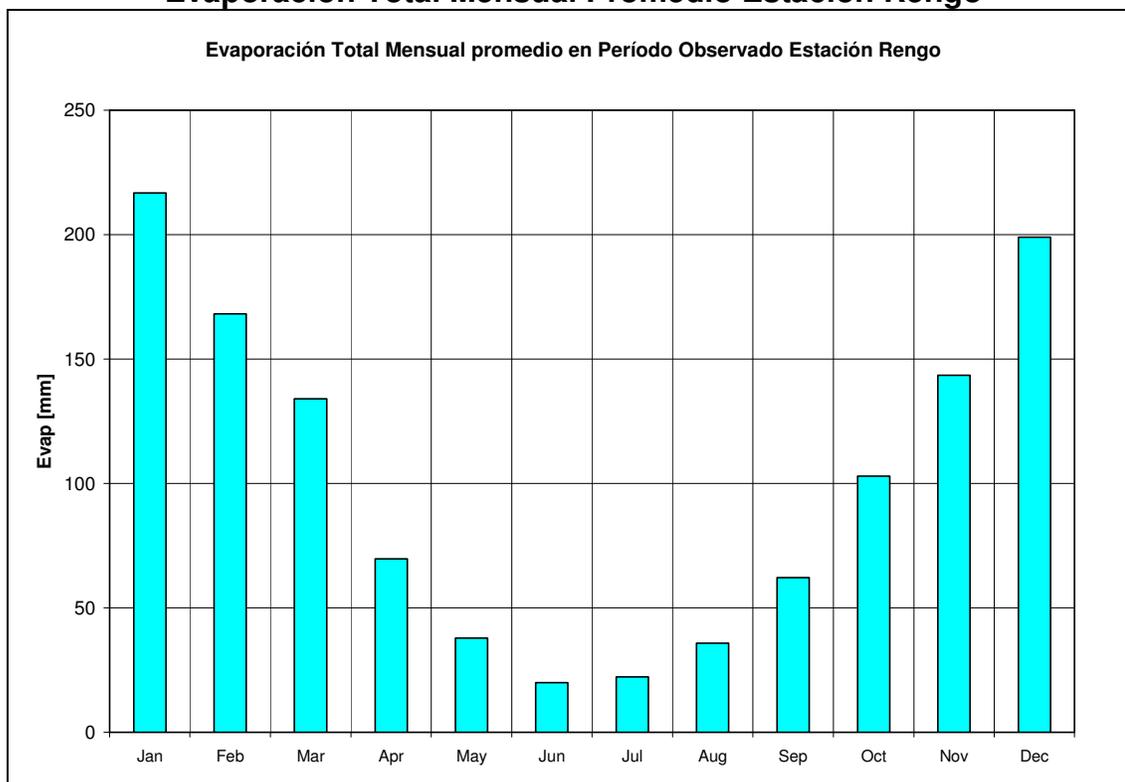


c) Evaporación

De acuerdo a la información disponible, la estación que puede ser utilizada en la calibración y validación del Modelo Integrado es Rengo, lo mismo para el proceso de generación de escenarios de cambio climático.

En la Figura 3.17 se muestra la evaporación total mensual promedio, de la estación Rengo. Se observa que las mayores evaporaciones se dan en el período de deshielo.

Figura 3.17
Evaporación Total Mensual Promedio Estación Rengo



3.4.4.2 Caudales Superficiales

En las Figuras 3.18 a 3.25 se muestran las curvas de variación estacional (CVE) de los caudales medios mensuales para las estaciones fluviométricas indicadas en la Tabla 3.3. Estas CVE son de 25, 50 y 75% de probabilidad de excedencia.

Para la cuenca en régimen natural, asociada a la estación Río Cachapoal 5 [km] aguas abajo junta Cortaderal (Figura 3.18), se observa que el régimen del río Cachapoal en dicho punto es claramente nival.

Para la cuenca en régimen natural, asociada a la estación Río Pangal en Pangal (Figura 3.19), se observa que el régimen del río Pangal en dicho punto es claramente nival.

Figura 3.18
CVE Río Cachapoal 5 [km] aguas abajo junta Cortaderal

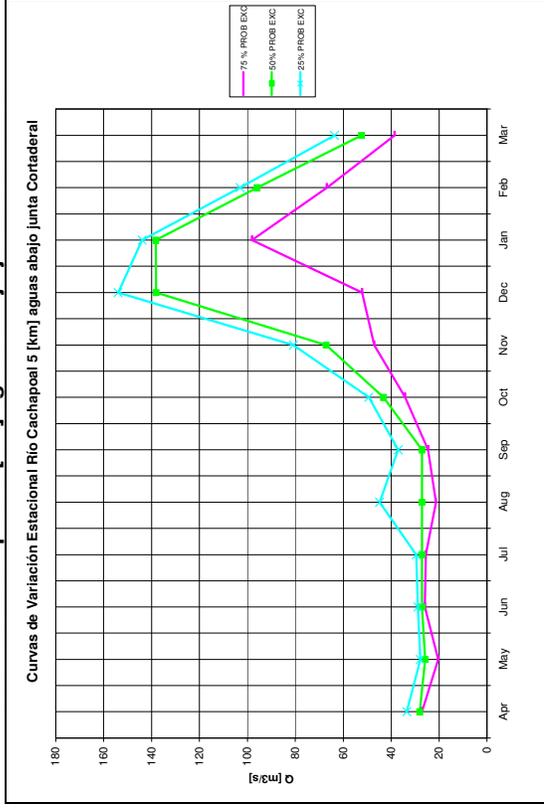


Figura 3.19
CVE Río Pangal en Pangal

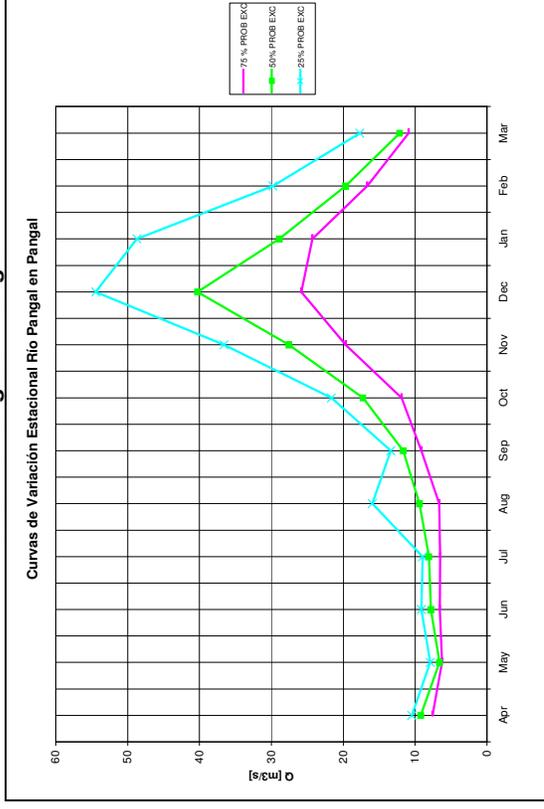


Figura 3.20
CVE Río Cachapoal en Puente Termas

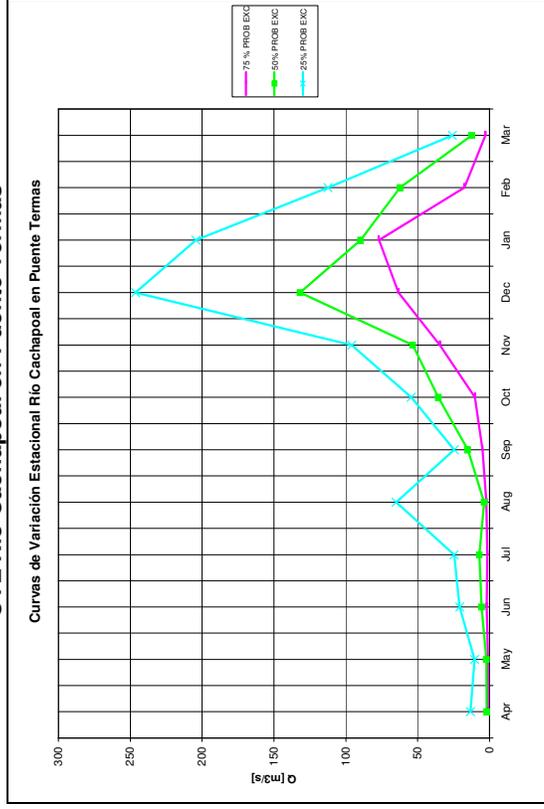


Figura 3.21
CVE Río Claro en Hacienda Las Nieves

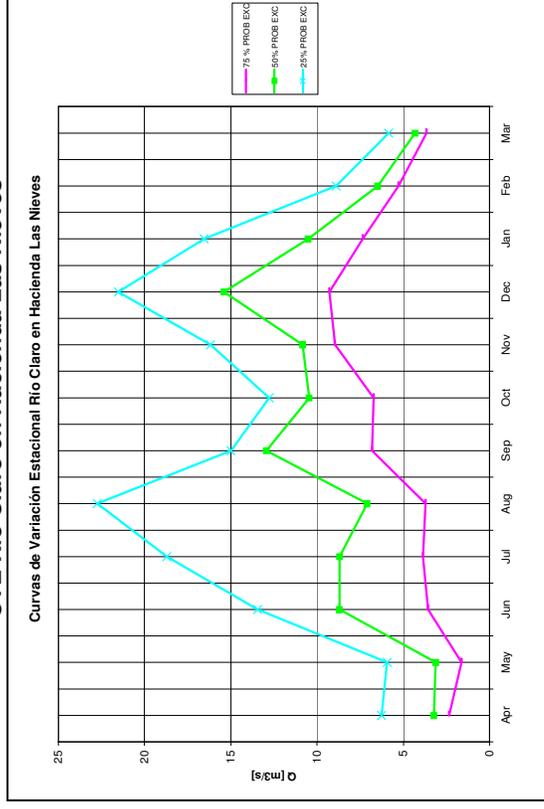


Figura 3.22
CVE Estero de La Cadena antes junta río Cachapoal

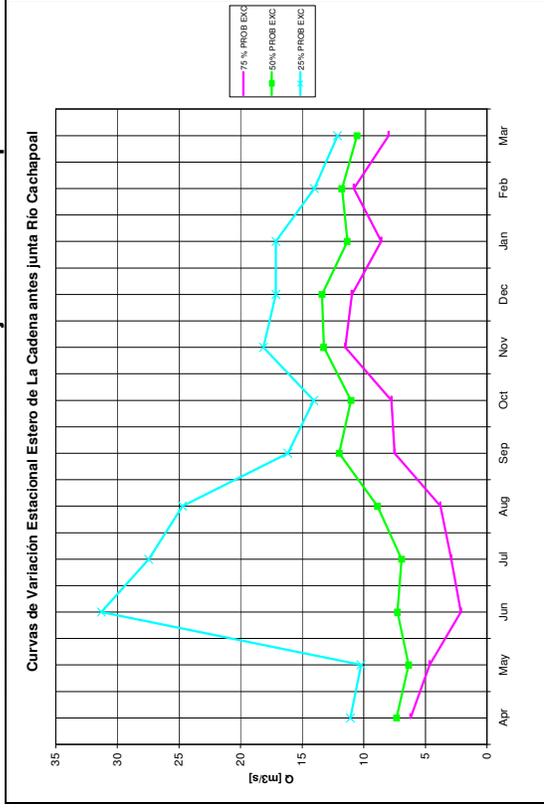


Figura 3.23
CVE Río Claro en Tunca

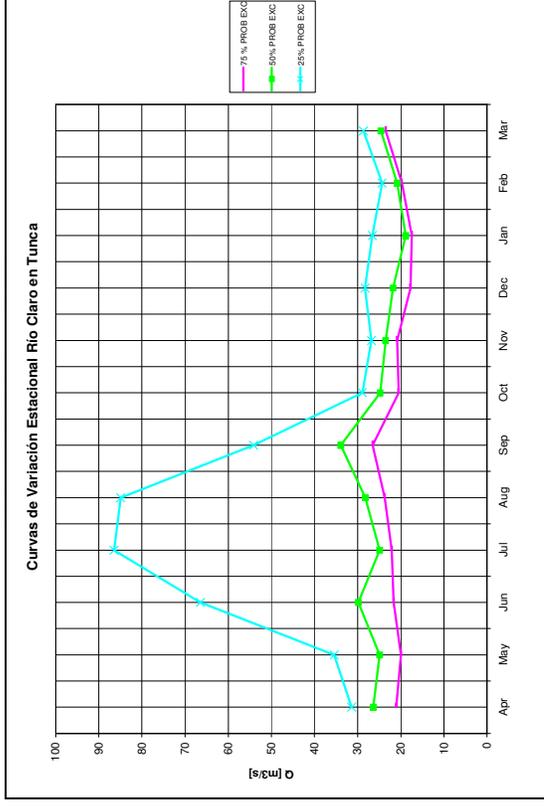


Figura 3.24
CVE Estero Zamorano en Puente El Niche

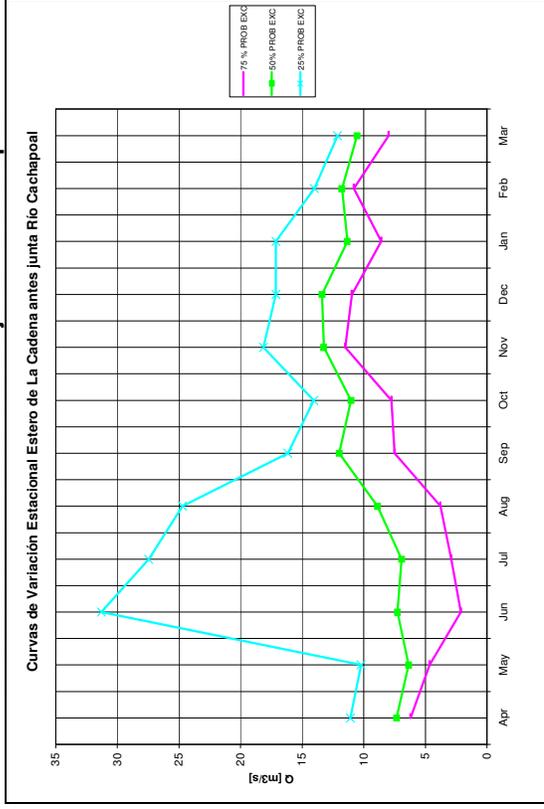
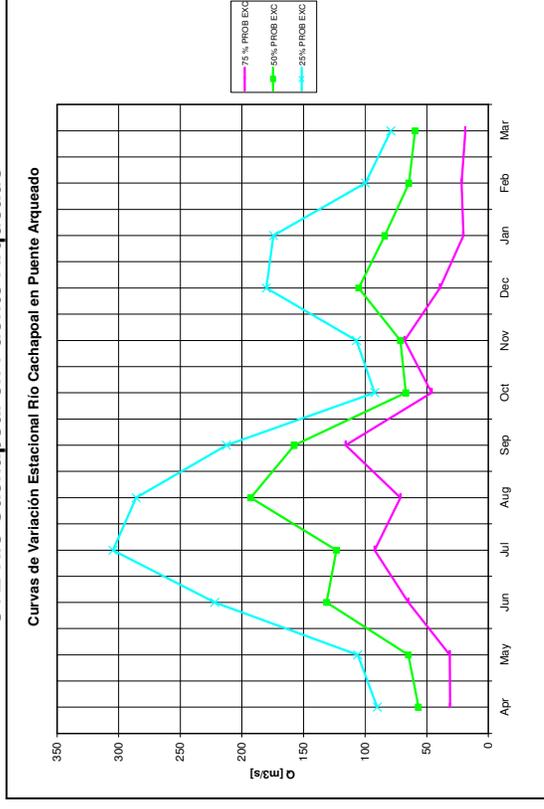


Figura 3.25
CVE Río Cachapoal en Puente Arqueado



Para la cuenca en régimen natural, asociada a la estación Río Claro en Hacienda Las Nieves (Figura 3.21), se observa que el régimen del río Claro de Rengo en dicho punto es nivo – pluvial.

Para la cuenca intervenida, asociada a la estación Río Cachapoal en Puente Termas (Figura 3.20), se observa que el régimen del río Cachapoal en dicho punto es nival, lo que está influenciado por la parte alta de la cuenca de dicho río.

Para el resto de las cuencas intervenidas (Figuras 3.22 a 3.25) se observa que el régimen es preponderantemente pluvial, a excepción de la salida de la cuenca del río Cachapoal en que se tiene un régimen pluvio – nival.

3.4.4.3 Pozos de Bombeo y Observación

Una parte de la información de los pozos de observación fue extraída del estudio de la DGA (2005 c), y la otra parte fue extraída de los datos de niveles proporcionados por el CIRH (Centro de Información de Recursos Hídricos) de la DGA.

La información de pozos de bombeo, fue extraída del catastro de pozos de la VI Región, actualizado al 2 de Mayo del 2007, proporcionado por la DGA.

El detalle de la información de los pozos de bombeo y observación se entrega en el Capítulo 4.

Capítulo 4

Modelo Integrado Superficial y Subterráneo

4.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describen los procesos de desarrollo conceptual, construcción, calibración y validación del modelo de escorrentía superficial, de simulación operacional y de aguas subterráneas, así como su posterior acoplamiento, que dio paso al Modelo Integrado de la cuenca del río Cachapoal.

En la etapa de desarrollo conceptual se establecieron todas las variables y parámetros que debían ser considerados en cada una de las componentes (los modelos antes mencionados) del Modelo Integrado, así como las interrelaciones entre ellas, que debían ser incluidas en el proceso de construcción y que permitirían el acoplamiento final del sistema.

En la etapa de construcción de cada uno de las componentes del Modelo Integrado, si bien se llevaron a cabo por separado, se tuvo especial consideración en el manejo de información que ingresaba y salía de cada uno de los modelos, de tal manera de automatizar el proceso de traspaso de información entre uno y otro.

La calibración del Modelo Integrado se realizó para el período comprendido entre Abril 1999 y Marzo 2005, el cual se escogió principalmente por dos motivos, el primero tiene relación con la información disponible para cada una de las componentes del Modelo Integrado, que tiene que ser lo más completa posible, lo cual sólo se observó para el mencionado período; la segunda está asociada a calibrar el modelo del sistema con todos los usos asociados, en un período representativo del funcionamiento actual, de manera que el Período Base, con el que se comparan los escenarios de cambio climático, sea lo más cercano posible a lo que sucede hoy en día en la cuenca del río Cachapoal.

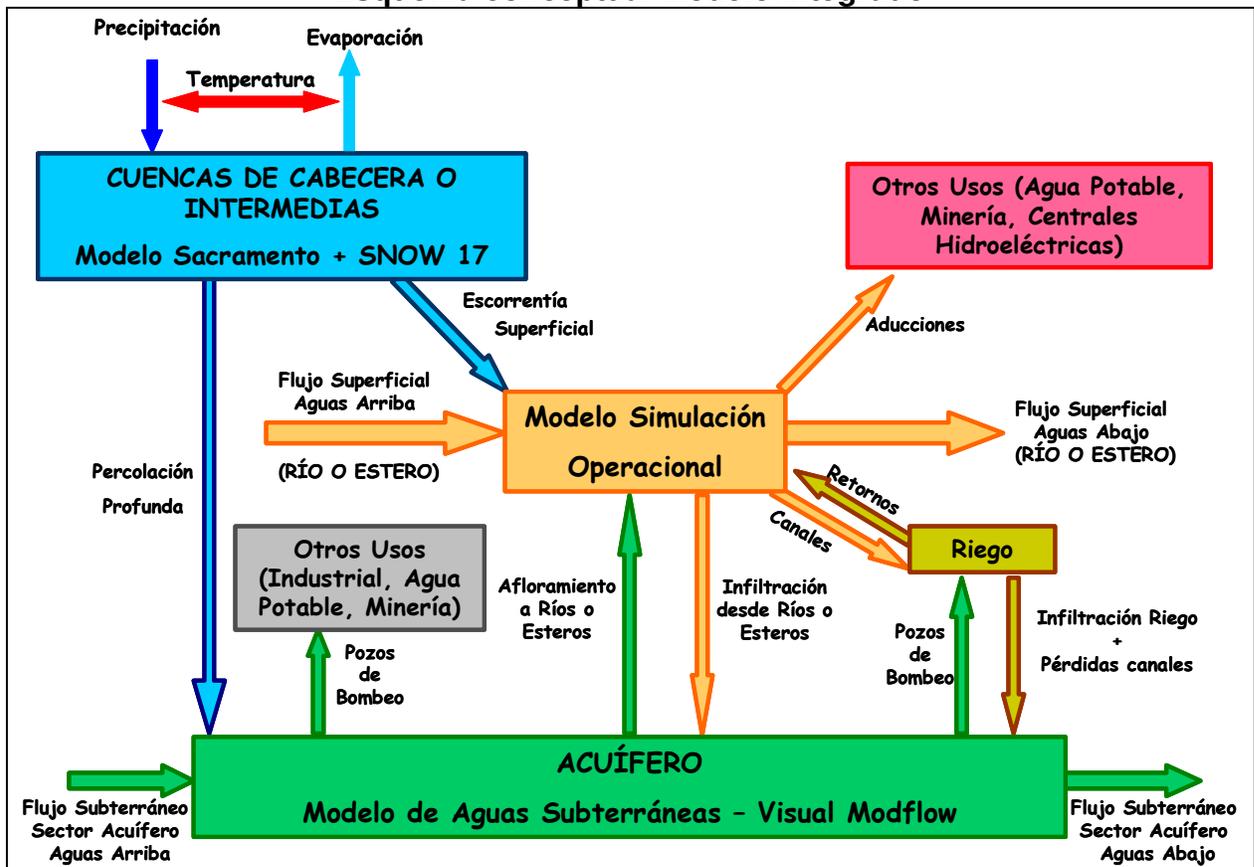
Con respecto a la validación, ésta sólo se realizó en el modelo de escorrentía superficial (Sacramento), ya que debido a la escasa información asociada a las otras componentes del Modelo Integrado, modelo de aguas subterráneas y de simulación operacional, se optó por calibrar con un período de tiempo más largo (Abril 1999 – Marzo 2005), en vez de dividirlo en dos más pequeños para calibrar y validar.

4.2 MODELO INTEGRADO

En el presente acápite se describe de manera simplificada en qué consiste el Modelo Integrado a nivel superficial y subterráneo de la cuenca del río Cachapoal, y cuáles son los elementos que lo componen.

En la Figura 4.1 se muestra un esquema conceptual del Modelo Integrado, en el que se observan todas las componentes de éste y como se relacionan entre ellas.

Figura 4.1
Esquema conceptual Modelo Integrado



Fuente: Elaboración Propia.

Del esquema conceptual, se observa que el Modelo Integrado consiste básicamente en tres elementos:

- **Modelo de Escorrentía Superficial**

Para llevar a cabo la modelación de la escorrentía superficial, de todas las cuencas de cabecera e intermedias que forman parte de la hoya del río Cachapoal (más detalles de estas cuencas en el acápite 4.3), se utiliza el modelo Sacramento acoplado con un modelo nival, SNOW-17.

Este modelo acoplado permite generar la escorrentía superficial que drena a los ríos y esteros, además genera una recarga que va hacia el acuífero. La precipitación, evaporación y temperatura constituyen uno de los input a este modelo, e influyen en el proceso de generación de escorrentía y recarga; la temperatura afecta tanto a la precipitación como a la evaporación, haciendo que la primera tenga una componente nival más importante que la líquida (o al revés, una componente líquida más importante que la nival), e influyendo en valores más altos o más bajos de evaporación.

Los detalles referentes a este modelo se entregan en el acápite 4.3.

- ***Modelo de Aguas Subterráneas***

El acuífero, modelado con Visual Modflow, recibe el aporte de la percolación desde las cuencas de cabecera e intermedias. Además, recibe aportes desde los ríos y esteros (infiltración) y entrega agua a éstos (afloramiento); también recibe agua por infiltración de riego en las zonas agrícolas y pérdidas en los canales que abastecen a dichas zonas.

El flujo subterráneo simboliza que existe una conexión entre los distintos sectores acuíferos, desde la parte alta a la baja de éste.

Desde esta componente del modelo, además existen extracciones (pozos de bombeo) para uso en la industria, las plantas de agua potable y la minería.

Los detalles referentes a este modelo se entregan en el acápite 4.4.

- ***Modelo de Simulación Operacional***

El modelo de simulación operacional es la componente del Modelo Integrado, que permite acoplar los dos modelos descritos anteriormente. Este modelo recibe los aportes de escorrentía que drenan desde las cuencas, los cuales sumados al caudal que viene por el río (o estero) desde aguas arriba, permiten entregar agua a usos como el riego (y otros), del cual además recibe retornos. La satisfacción de la demanda de todos los usos referentes al recurso hídrico, también es verificada mediante este modelo, por lo tanto, la recarga al acuífero asociada al riego, es regulada por esta componente del Modelo Integrado.

Por otro lado, según la condición de carga con respecto al acuífero (si la napa está por sobre o debajo de la altura del río), se pueden producir infiltraciones hacia la componente subterránea o afloramientos desde ésta.

Luego de toda la interrelación con los demás componentes del Modelo Integrado, el caudal disponible escurre aguas abajo por el río (o estero).

Los detalles referentes a este modelo se entregan en el acápite 4.5.

A continuación se describe, de manera simple, el proceso realizado para completar con éxito la calibración del Modelo Integrado, la cual se realiza en el período Abril 1999 – Marzo 2005 con un intervalo de tiempo mensual, por lo tanto se tienen 72 períodos (el modelo Sacramento se trabaja a nivel diario, pero los caudales se promedian para obtener los valores mensuales).

1. En la primera etapa del trabajo, se procedió a delimitar todas las sub-cuencas que conforman la hoya del río Cachapoal.
2. Luego de esto se procedió a calibrar los parámetros del modelo Sacramento, en aquellas cuencas en régimen natural que tuvieran información de caudal disponible.

3. Una vez que se realizó la calibración en dichas cuencas, se procedió a traspasar los parámetros, a aquellas cuencas en que no se tenía información para calibrar.
4. Cuando se completó este proceso, se comenzó a programar el modelo de simulación operacional, incluyendo todos los usos asociados a la operación de la cuenca del río Cachapoal.
5. A continuación se procedió a calibrar estas dos componentes del Modelo Integrado (modelo de escorrentía superficial y modelo de simulación operacional, sin considerar la fase subterránea), para así tener una primera aproximación de los parámetros de calibración asociados.
6. Posteriormente se comenzó la construcción del modelo de aguas subterráneas, utilizando como base un modelo construido para el estudio de la DGA (2005 c), al cual se le modificaron las entradas al modelo y los parámetros hidrogeológicos.
7. Cuando el modelo de aguas subterráneas estuvo completamente construido, se procedió a la calibración del Modelo Integrado (calibración simultánea de cada una de sus componentes), lo que implicó re-calibrar los parámetros de Sacramento (no de las cuencas mencionadas en el paso 2, sino que aquellas a las que se traspasaron parámetros) y realizar algunos ajustes del modelo de simulación operacional.
8. Finalmente se logró una calibración satisfactoria para cada una de las componentes del Modelo Integrado, lo que permitió concluir que se contaba con una herramienta adecuada para caracterizar el funcionamiento de la cuenca estudiada, y su posterior uso en la evaluación de escenarios de cambio climático.

En los siguientes acápites del presente capítulo, se explica en detalle cada uno de los pasos del proceso y los resultados de la calibración simultánea, para los componentes del Modelo Integrado.

4.3 MODELO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL

4.3.1 Delimitación de la cuenca del río Cachapoal y sus sub-cuencas, a nivel superficial

Antes de analizar los resultados de la calibración y validación de la modelación de escorrentía superficial, es necesario mostrar la delimitación gráfica (a nivel superficial) que se hizo de la cuenca del río Cachapoal, la cual se refiere a dividir la cuenca en unidades más pequeñas, para la generación de escorrentías y el análisis de los usos del recurso hídrico, en particular en lo que se refiere a la agricultura y el riego asociado.

La mencionada delimitación se hizo mediante el programa ArcView GIS 3.2, utilizando coberturas SIG (Sistema de Información Geográfica) proporcionadas por la DGA (Dirección General de Aguas) y la CNR (Comisión Nacional de Riego).

Como primer paso, se dividió la cuenca en distintos **módulos**, asociados a puntos en los que se cuenta con información fluviométrica, para llevar a cabo la calibración del

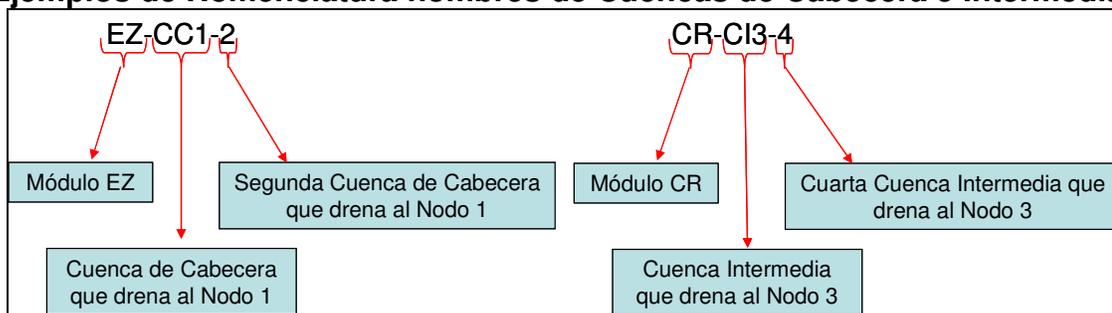
modelo de simulación operacional, una vez integrado completamente el modelo (los puntos de calibración se detallan en el acápite 4.5.2). Dichos módulos son:

- **Módulo CA (Cachapoal Alto):** este módulo está asociado a la parte alta del río Cachapoal, desde su nacimiento hasta la estación fluviométrica “Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes”.
- **Módulo ELC (Estero La Cadena):** este módulo está asociado al Estero La Cadena, desde su nacimiento hasta la estación fluviométrica “Estero de La Cadena antes junta Río Cachapoal”.
- **Módulo CR (Claro de Rengo):** este módulo está asociado al río Claro de Rengo, desde su nacimiento hasta la estación fluviométrica “Río Claro en Tunca”.
- **Módulo EZ (Estero Zamorano):** este módulo está asociado al Estero Zamorano, desde su nacimiento hasta la confluencia con el río Cachapoal.
- **Módulo CB (Cachapoal Bajo):** este módulo está asociado a la parte baja del río Cachapoal, desde la salida del módulo CB hasta la estación fluviométrica “Río Cachapoal en Puente Arqueado”.

Luego, para cada módulo se hizo otra sub-división, dando paso a cuencas intermedias y cuencas de cabecera. Las primeras, no son propiamente cuencas, sino que corresponden a laderas que drenan hacia los ríos o esteros asociados a los módulos. Por otro lado, las cuencas de cabecera, corresponden a unidades definidas por un río o estero, que tienen un único punto de salida.

Es importante explicar la nomenclatura utilizada para los nombres de las cuencas intermedias y de cabecera. Para ello se utilizarán como ejemplo dos nombres, los que se ven en la Figura 4.2.

Figura 4.2
Ejemplos de Nomenclatura nombres de Cuencas de Cabecera e Intermedias



Como se observa en la Figura 4.2, los nombres de las cuencas intermedias y de cabecera, están asociados al nodo al que drenan. La determinación de la ubicación de dichos nodos, se explica en el acápite 4.5.

En la Figura 4.3 se muestran los módulos en los que se dividió la cuenca del río Cachapoal, junto con los puntos de salida de cada uno de ellos (puntos azules). En las

Figuras 4.4 a 4.8, se muestran las cuencas intermedias y de cabecera, para cada uno de los módulos antes mencionados.

Con respecto a la Figura 4.4, las cuencas de cabecera están asociadas a los siguientes cursos de agua:

- CA-CC1-1: río Cachapoal 5 [km] aguas abajo de la confluencia con el río Cortaderal (en dicho punto se ubica una estación fluviométrica del mismo nombre).
- CA-CC2-2: río De Los Cipreses hasta confluencia con río Cachapoal.
- CA-CC3-1: río Pangal hasta confluencia con río Cachapoal. Es importante destacar que esta cuenca de cabecera, se divide a su vez en PAN-CC1-1 (su salida está en la estación fluviométrica “río Pangal en Pangal”), PAN-CI2-1 y PAN-CI2-2, tal como se muestra en la Figura 4.4.
- CA-CC4-1: río Coya hasta confluencia con río Cachapoal.

Las cuencas intermedias están asociadas a quebradas y esteros menores que drenan hacia el río Cachapoal.

Con respecto a la Figura 4.5, existe una única cuenca de cabecera, ELC-CC1-1, asociada al Estero La Cadena (cuya salida es la misma del módulo ELC). Para este módulo no se definen cuencas intermedias, pero sí se definen zonas asociadas a los cultivos dentro de las mencionadas cuencas (esto se detalla en el acápite 4.5.1.2).

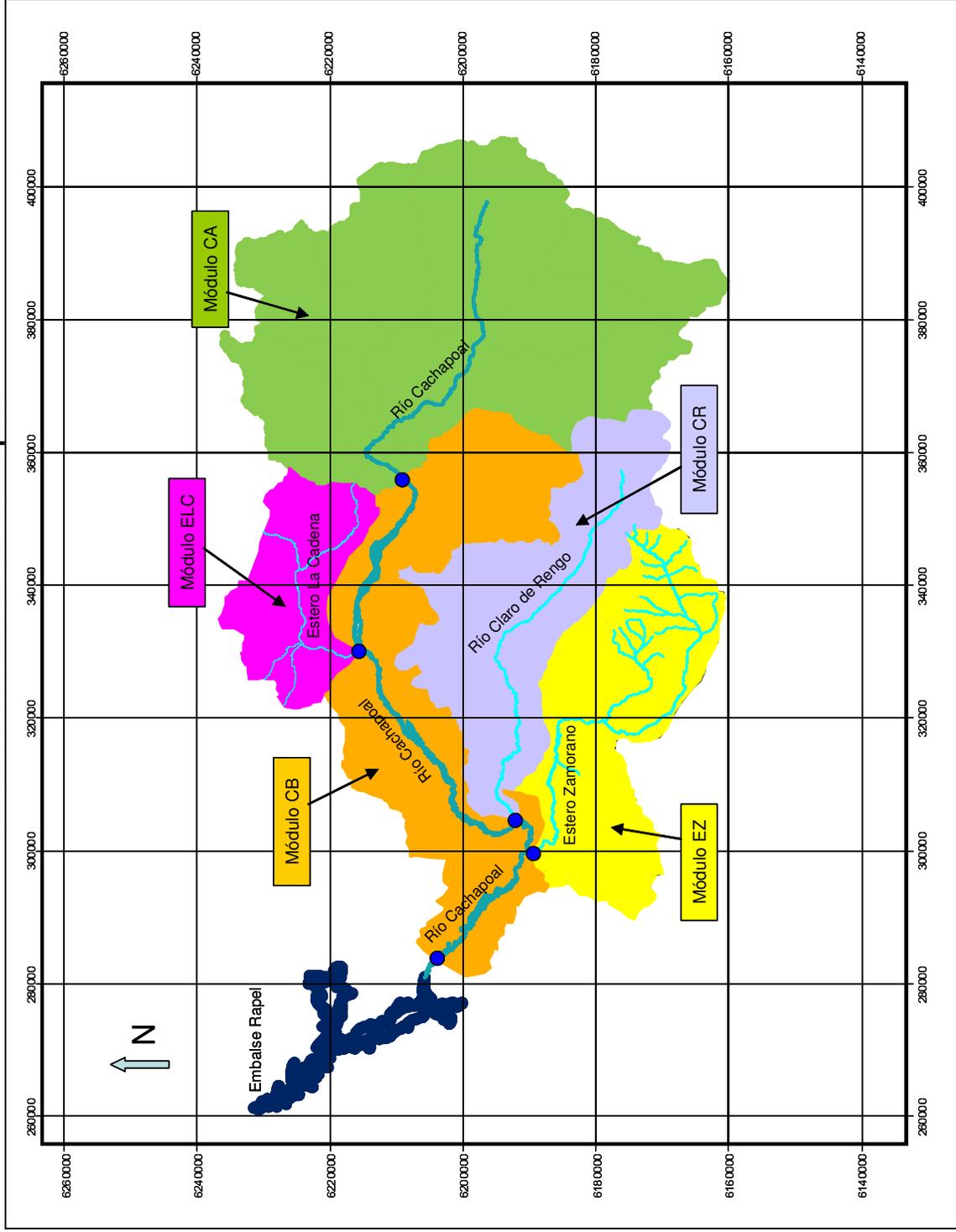
Con respecto a la Figura 4.6, las cuencas de cabecera están asociadas a los siguientes cursos de agua:

- CR-CC1-1: río Claro de Rengo hasta estación fluviométrica “río Claro en Hacienda Las Nieves”.
- CR-CC5-1: estero Tipaume hasta confluencia con río Claro de Rengo.
- CR-CC8-1: estero Guacarhue (o el Cerro) hasta confluencia con río Claro de Rengo.

Las cuencas intermedias están asociadas a quebradas y esteros menores que drenan hacia el río Claro de Rengo.

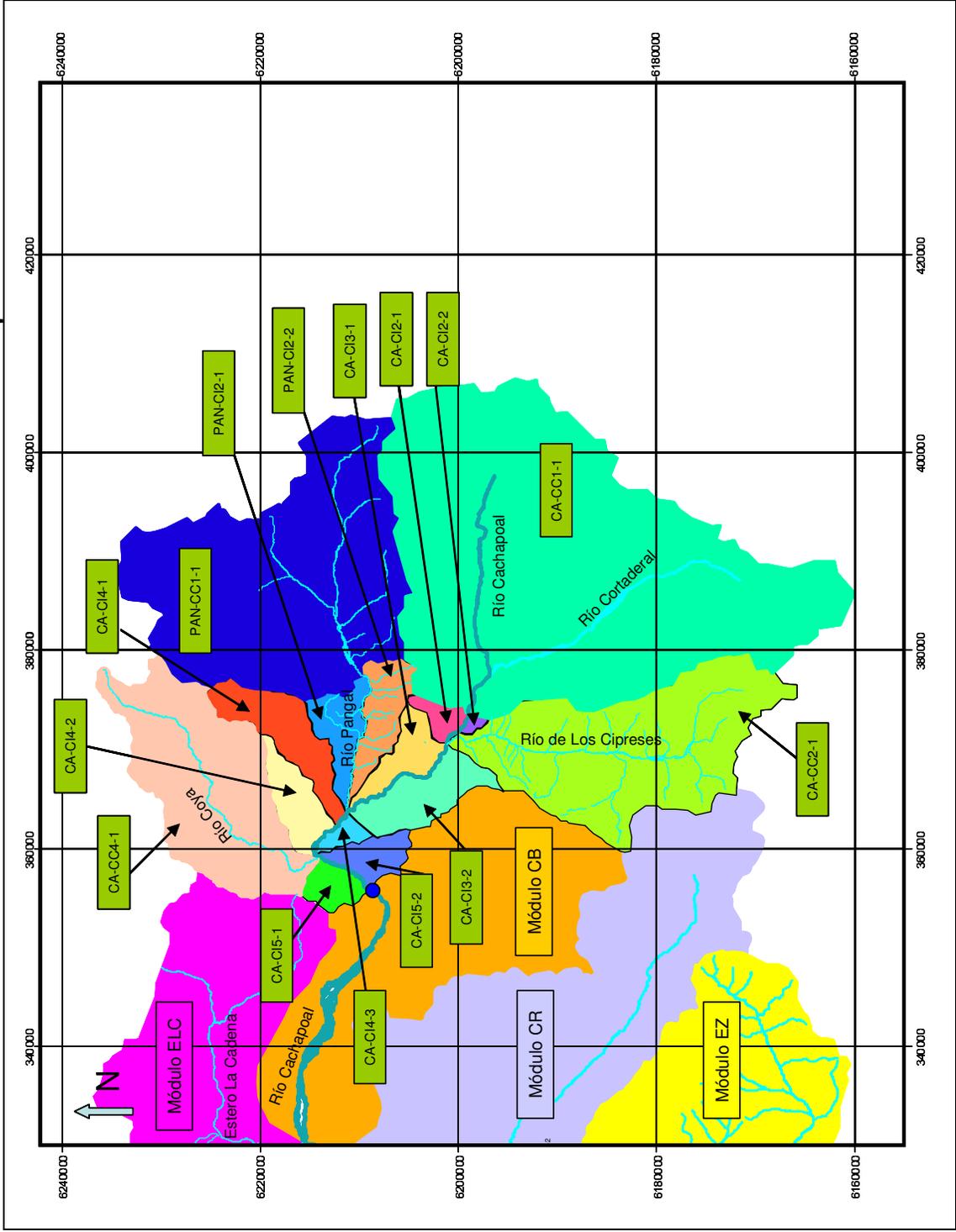
Con respecto a la Figura 4.7, existe una única cuenca de cabecera, EZ-CC1-1, asociada al Estero Zamorano, cuya salida está en la estación fluviométrica “Estero Zamorano en Puente el Niche”. Para este módulo se definen cuencas intermedias asociadas a quebradas y esteros menores que drenan hacia el Estero Zamorano, pero además se definen zonas asociadas a los cultivos dentro de la mencionada cuenca de cabecera (esto se detalla en el acápite 4.5.1.2).

Figura 4.3
Módulos Cuenca del río Cachapoal



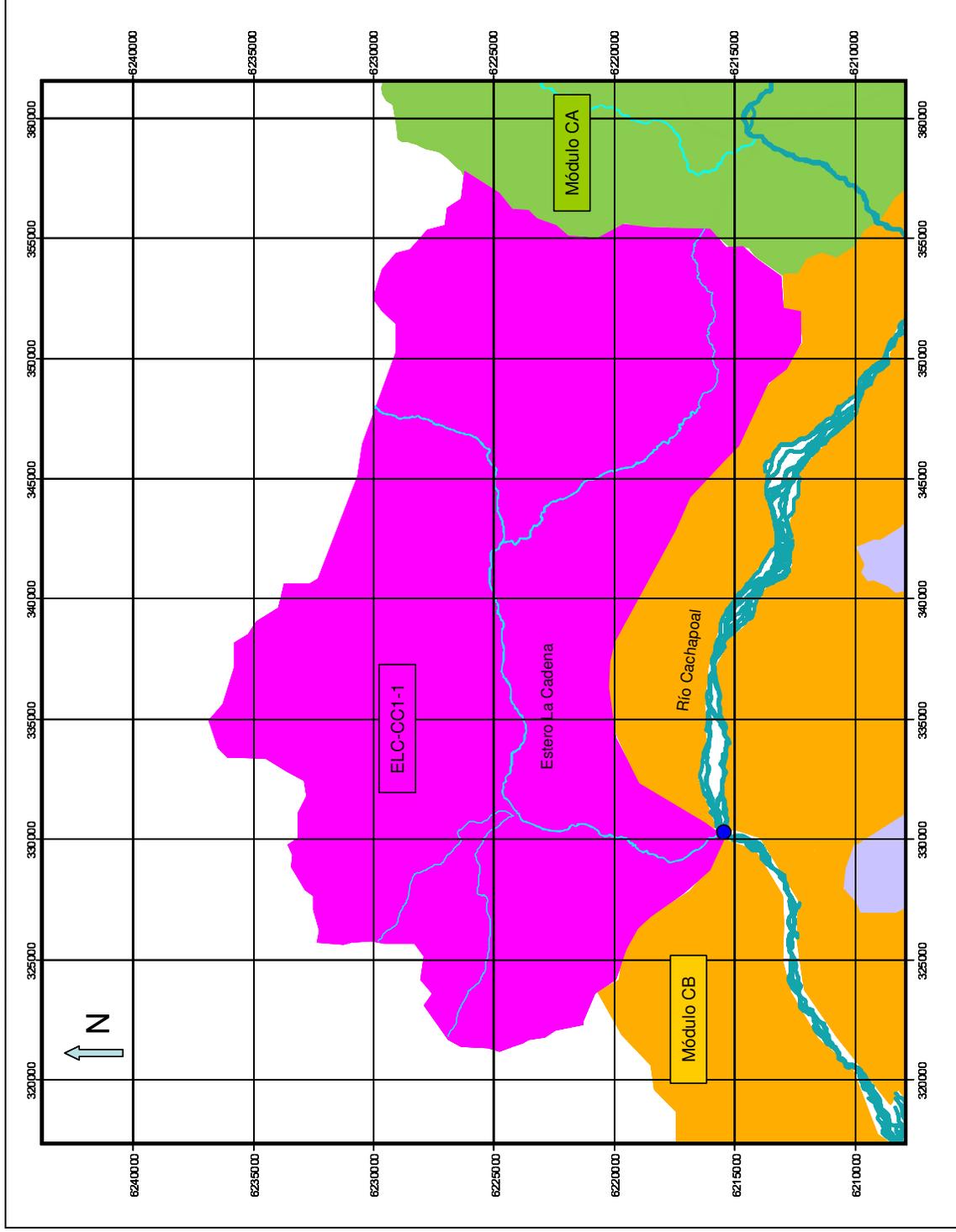
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.4
Cuencas de Cabecera e Intermedias del Módulo Cachapoval Alto



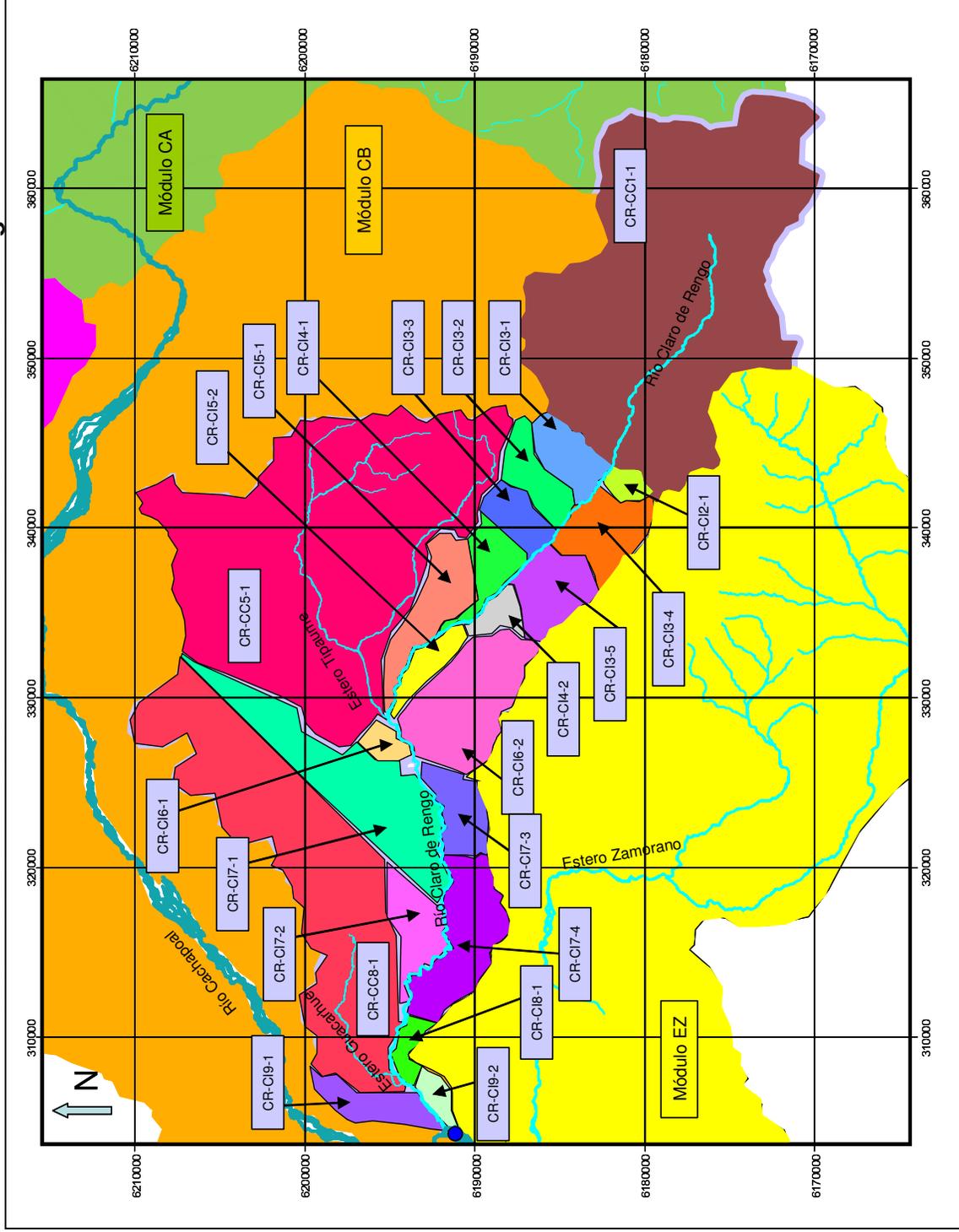
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.5
Cuencas de Cabecera e Intermedias del Módulo Estero La Cadena



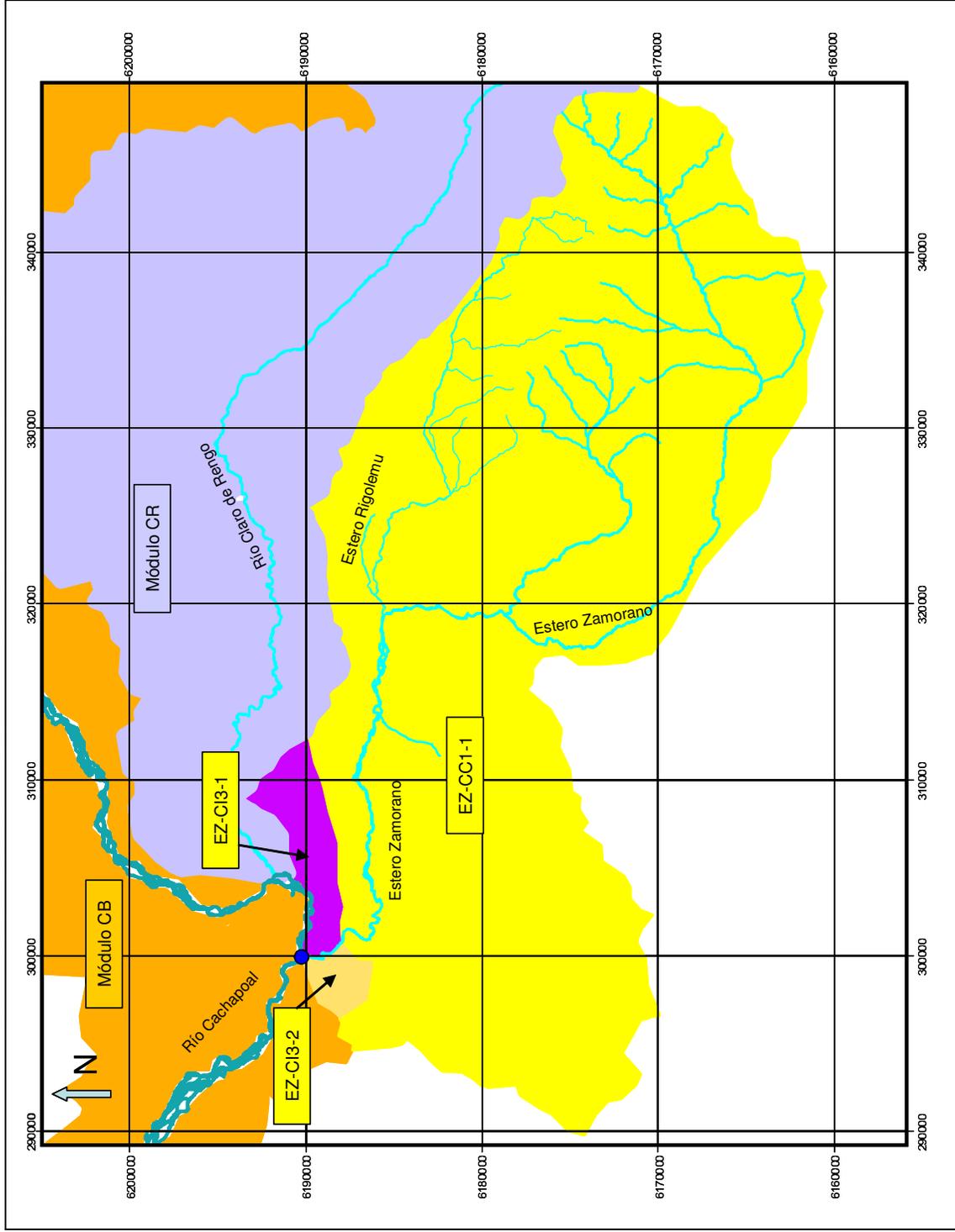
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.6
Cuencas de Cabecera e Intermedias del Módulo Claro de Rengo



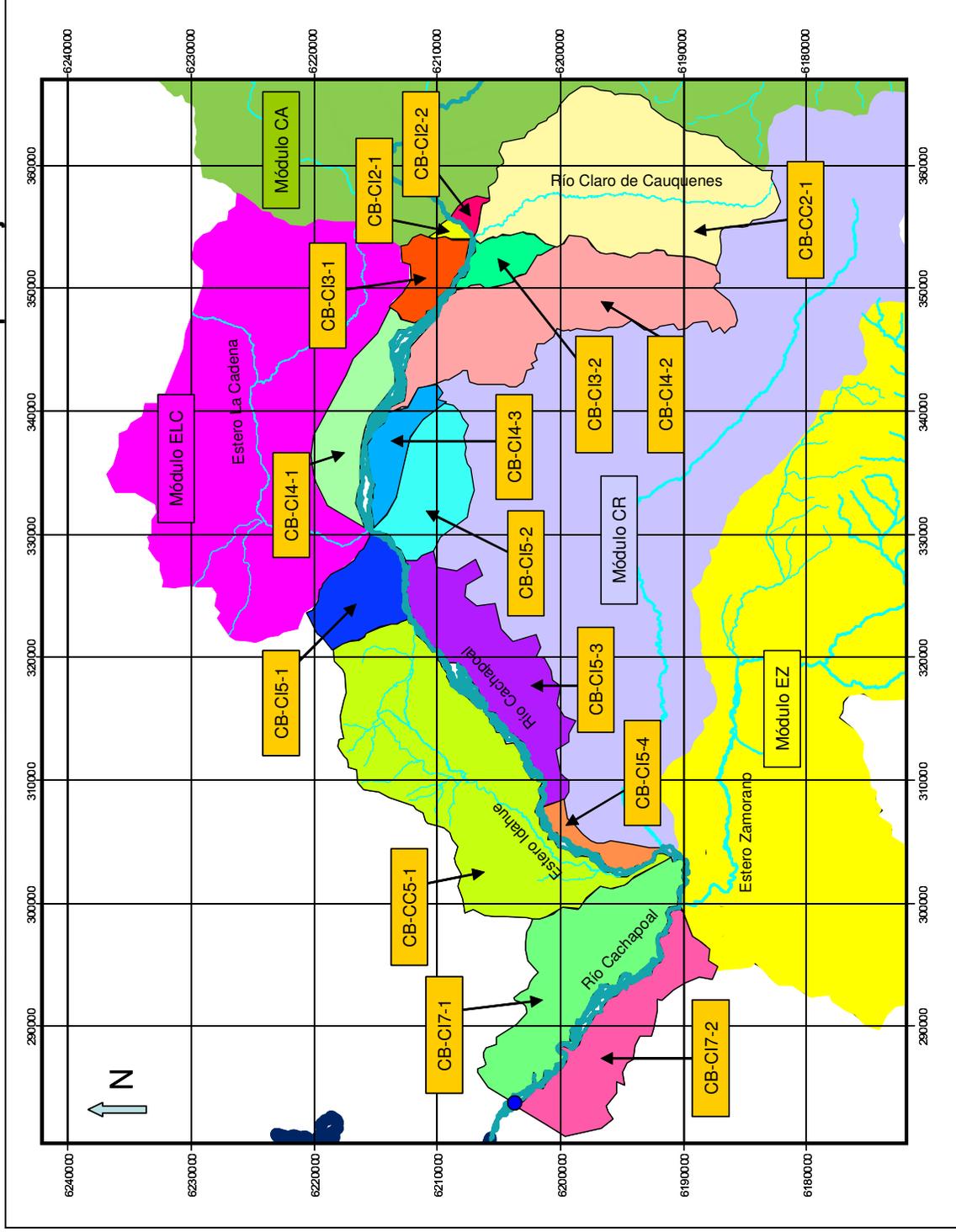
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.7
Cuencas de Cabecera e Intermedias del Módulo Estero Zamorano



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.8
Cuencas de Cabecera e Intermedias del Módulo Cachapal Bajo



Fuente: Elaboración Propia.

Con respecto a la Figura 4.8, las cuencas de cabecera están asociadas a los siguientes cursos de agua:

- CB-CC2-1: río Claro de Cauquenes hasta confluencia con río Cachapoal.
- CB-CC5-1: Estero Idahue o Purén hasta confluencia con río Cachapoal.

Las cuencas intermedias están asociadas a quebradas y esteros menores que drenan hacia el río Cachapoal.

Con respecto a las cuencas en régimen natural en las cuales se calibran los parámetros del modelo Sacramento, sus características principales, determinadas con el software WMS (Watershed Modeling System) versión 7.1, se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1
Principales características Cuencas de calibración en modelo Sacramento

Datos relevantes	CR-CC1-1	CA-CC1-1	PAN-CC1-1
Área [km ²]	245.6	970.91	521.53
Cauce Principal	Río Claro de Rengo	Río Cachapoal	Río Pangal
Largo Cauce Principal [km]	24.56	47.67	28.20
Pendiente media	0.51	0.56	0.56
Régimen Hidrológico	Nivo - pluvial	Nival	Nival

Nota: el régimen hidrológico fue determinado según el análisis de curvas de variación estacional, realizado en el Capítulo 3.

4.3.2 Estaciones Fluviométricas y Meteorológicas a utilizar en la calibración, validación y generación de escorrentías mediante el modelo Sacramento

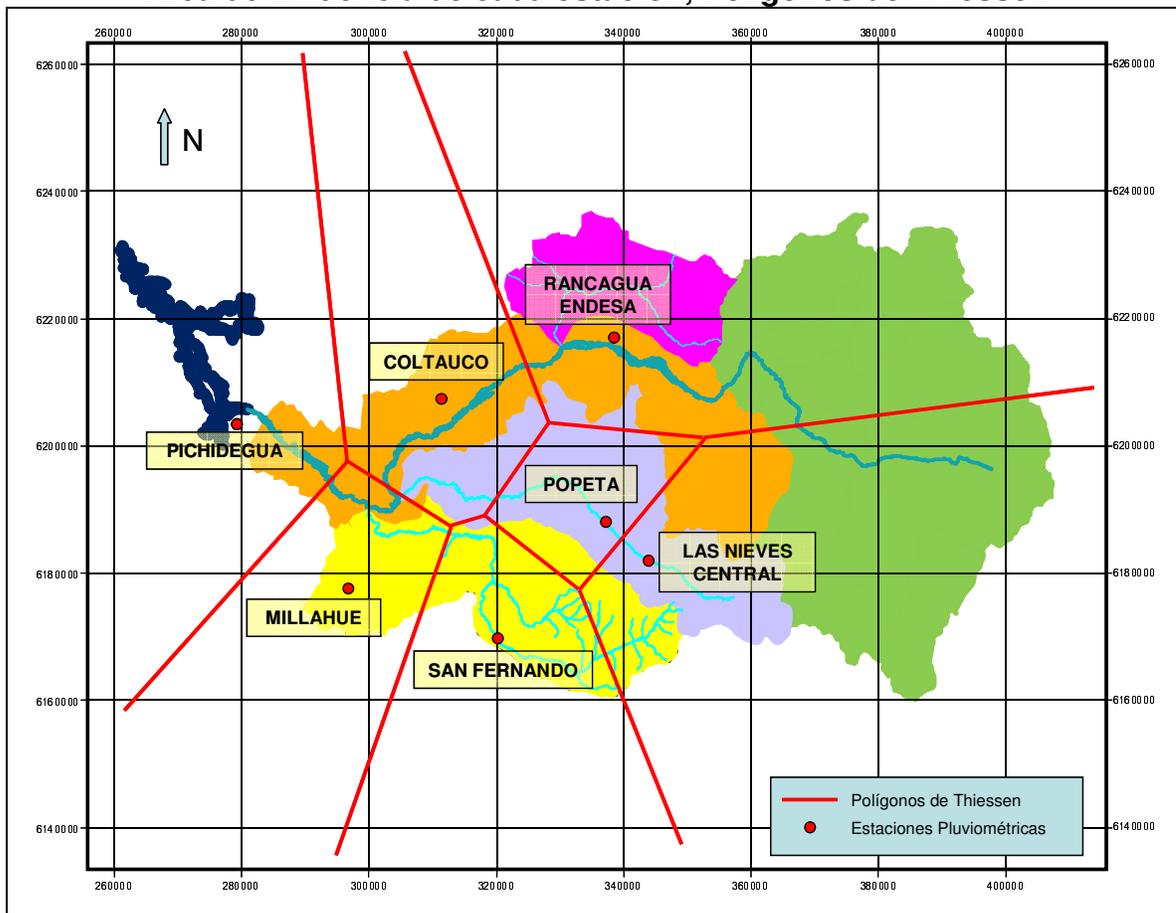
Para llevar a cabo las calibraciones en las cuencas en régimen natural y para generar escorrentías (trasladando parámetros) en el resto de las cuencas, fue necesario determinar la estación pluviométrica representativa de cada una de dichas cuencas. Utilizando WMS 7.1, se calcularon los Polígonos de Thiessen para las estaciones con información completa (que se muestran en la Figura 4.9), mencionadas en el Capítulo 3.

De estos polígonos, se determinan las estaciones pluviométricas que fueron usadas en las cuencas de cabecera e intermedias, en las que se dividieron los módulos. Esto se detalla en la Tabla 4.2.

Con respecto a las estaciones de medición de temperatura y evaporación, según lo indicado en el Capítulo 3, sólo se tiene información suficiente en la estación Rengo (evaporación) y Convento Viejo (temperatura), por lo que dichas estaciones bases serán utilizadas en todas las cuencas de cabecera e intermedias.

Según toda la información entregada para las cuencas de cabecera en régimen natural, en la Tabla 4.3 se detallan las estaciones fluviométricas y meteorológicas, utilizadas para la calibración de dichas cuencas.

Figura 4.9
Área de influencia de cada estación, Polígonos de Thiessen



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4.2
Estaciones Pluviométricas asociadas a Cuencas Intermedias y de Cabecera

Estación Pluviométrica	Cuencas de Cabecera e Intermedias
Las Nieves Central	CA-CC1-1, CA-CC2-1, CA-CI2-1, CA-CI2-2, CR-CC1-1, CR-CI2-1, CR-CI3-1, CR-CI3-2, CR-CI3-4, CB-CC2-1
Rancagua Endesa	CA-CI3-1, CA-CI3-2, PAN-CC1-1, PAN-CI2-1, PAN-CI2-2, CA-CI4-1, CA-CI4-2, CA-CI4-3, CA-CC4-1, CA-CI5-1, CA-CI5-2, CB-CI3-1, CB-CI3-2, CB-CI4-1, CB-CI4-2, CB-CI4-3, ELC-CC1-1, CB-CI5-1, CB-CI5-2
Popeta	CR-CI3-3, CR-CI3-5, CR-CI4-1, CR-CI4-2, CR-CI5-1, CR-CI5-2, CR-CC5-1, CR-CI6-1, CR-CI6-2, CR-CI7-1, CR-CI7-3
Coltauco	CB-CC5-1, CB-CI5-3, CB-CI5-4, CR-CI7-2, CR-CI7-4, CR-CI8-1, CR-CC8-1, CR-CI9-1, CR-CI9-2
San Fernando	EZ-CC1-1, EZ-CC1-2, EZ-CI2-1, EZ-CI2-2
Millahue	EZ-CI3-1, EZ-CI3-2
Pichidegua	CB-CI7-1, CB-CI7-2

Tabla 4.3
Estaciones Fluviométricas y Meteorológicas a utilizar en la calibración de modelo Sacramento en Cuencas de Cabecera en régimen natural

Tipo Estación	CR-CC1-1	CA-CC1-1	PAN-CC1-1
Fluviométrica	Río Claro en Hacienda Las Nieves	Río Cachapoal 5 [km] aguas abajo junta Cortaderal	Río Pangal en Pangal
Pluviométrica	Las Nieves Central	Las Nieves Central	Rancagua Endesa
Termométrica	Convento Viejo	Convento Viejo	Convento Viejo
Evaporimétrica	Rengo	Rengo	Rengo

4.3.3 Descripción Teórica Modelo Sacramento

Para el desarrollo de esta tesis, se utilizó el esquema conceptual del modelo “Sacramento Soil Moisture Accounting” incorporado como parte del sistema global denominado “National Weather Service River Forecast System (NWSRFS)” de Estados Unidos.

De acuerdo a la clasificación de la Figura 2.6 (Capítulo 2) Sacramento es un modelo hidrológico conceptual, no variable en el tiempo, concentrado y determinístico (Osses, 2006).

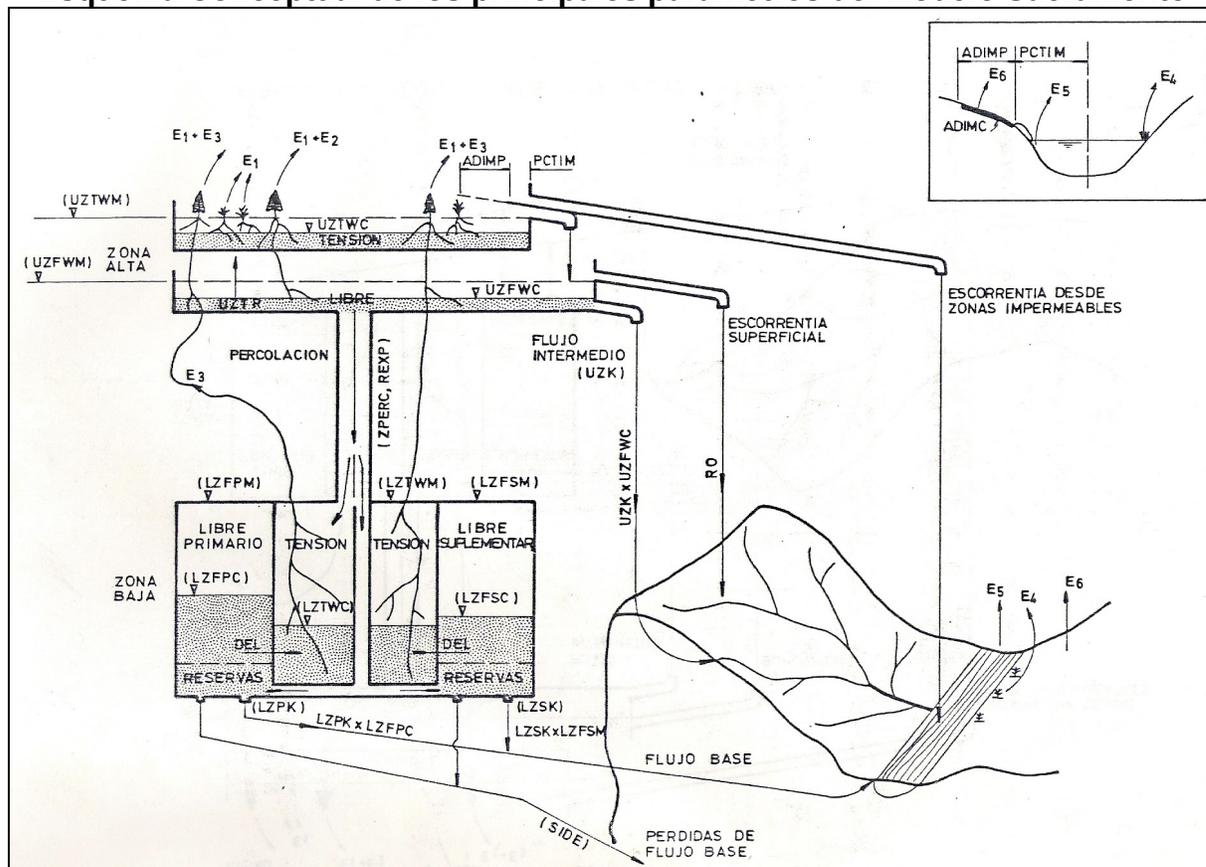
Este modelo ha sido utilizado por muchos investigadores como una herramienta estándar en los pronósticos de crecidas en los Estados Unidos, así como también en la determinación de disponibilidad de recursos hídricos y en los impactos del cambio climático (Xu, 2002). Con respecto a su uso en Chile, distintas versiones de este modelo han sido utilizadas en varios estudios, algunos de ellos son: Edwards (1987), Muñoz (2006) y Osses (2006).

El Sacramento consiste en un modelo conceptual que genera el caudal como escorrentía superficial a partir de las áreas porosas e impermeables de la cuenca, en conjunto con el flujo sub-superficial y dos niveles de flujo base. El modelo representa la cuenca como un conjunto de almacenamientos de determinada capacidad, los cuales retienen agua temporalmente y luego la ceden gradualmente, conforme su contenido disminuye por la percolación, evapotranspiración y drenaje lateral (Robles, 1985). En la Figura 4.10 se muestra un esquema conceptual de los principales parámetros del Modelo Sacramento.

En esta tesis se utilizó una versión del modelo (de máximo 6 bandas), implementada por Muñoz (2006), en la cual se incorpora:

- El uso de incertidumbre, en la usual técnica de escalamiento espacial de las variables meteorológicas (variación con la altura), que se ingresan al modelo, particularmente de la precipitación, temperatura y evaporación.
- El uso de algoritmos genéticos en la calibración del modelo.
- Una extensión del modelo a cuencas nivo-pluviales, para lo cual se implementó el modelo SNOW-17.

Figura 4.10
Esquema Conceptual de los principales parámetros del Modelo Sacramento



Fuente: Edwards (1987).

Es importante mencionar que, con respecto a la versión implementada por Muñoz (2006), se hicieron varias modificaciones y correcciones, que permitieron mejorar el funcionamiento del modelo. Para futuros usos de este modelo, se sugiere trabajar con la versión corregida utilizada en esta tesis.

Para operar el modelo Sacramento, que incorpora el modelo SNOW-17, se debe contar con la siguiente información de entrada:

- Estadística pluviométrica.
- Estadística fluviométrica.
- Estadística evaporimétrica.
- Estadística termométrica (sólo para cuencas Pluvio-Nivales).
- Hidrograma Unitario para cada banda.
- Gradientes de las variables meteorológicas (gradiente promedio y desviación estándar). En particular para la temperatura se considera un gradiente diferente en días con y sin precipitación.

- Curva Hipsométrica, la cual es utilizada para sub-dividir la cuenca en bandas.

La escorrentía generada a partir del modelo SNOW-17 se incorpora al modelo Sacramento en el estanque en tensión de la parte alta (ver Figura 4.10).

En la Tabla 4.4 se describen los parámetros de calibración del modelo Sacramento y del modelo SNOW-17.

Tabla 4.4
Parámetros de Calibración modelos Sacramento y SNOW-17

Parámetro	Definición
UZTWM	Capacidad máxima estanque de agua en tensión zona alta
UZFWM	Capacidad máxima estanque de agua libre de la zona alta
LZTWM	Capacidad máxima estanque de agua en tensión de la zona baja
LZFPWM	Capacidad máxima estanque de agua libre primario de la zona baja
LZFSWM	Capacidad máxima estanque de agua libre secundario de la zona baja
UZK	Tasa de recesión estanque libre de la zona alta
LZPK	Tasa de recesión estanque libre primario de la zona baja
LZSK	Tasa de recesión estanque libre secundario de la zona baja
RSERV	Porción de la capacidad del agua libre de la zona baja incapaz de transferir agua a la zona en tensión
SIDE	Flujo base no Observado/Flujo base observado
ZPERC	Aumento relativo de percolación al cambiar condiciones secas por saturadas
REXP	Forma de la curva de percolación entre los valores extremos fijos.
PFREE	Porción de la percolación que llega directamente al acuífero
PCTIM	Máxima fracción de la cuenca permanentemente impermeable
ADIMP	Máxima fracción de la cuenca temporalmente impermeable
RIVA	Porción de la cuenca cubierta por vegetación ribereña
PX-ADJ	Factor de Ampliación de los índices de precipitación
PE-ADJ	Factor de Ampliación de los índices de evapotranspiración
UZTWC	Capacidad estanque de agua en tensión de la zona alta (variable de estado inicial)
UZFWC	Capacidad estanque de agua libre de la zona alta (variable de estado inicial)
LZTWC	Capacidad estanque de agua en tensión de la zona baja (variable de estado inicial)
LZFPWC	Capacidad estanque de agua libre primario de la zona baja (variable de estado inicial)
LZFSWC	Capacidad estanque de agua libre secundario de la zona baja (variable de estado inicial)
ADIMC	Cantidad de agua en tensión almacenada en el área ADIMP (variable de estado inicial)
TCR	T° que diferencia entre precipitación de lluvia o de nieve
TBAS	T° base para calcular derretimiento en días sin precipitación
CMFMX	Factor de fusión máxima (21/DIC)
CMFMN	Factor de fusión mínima (21/JUN)
KV	KV factor de intercambios turbulentos
KTS	KTS factor de permanencia de la temperatura superficial de la nieve
CNMF	Máximo factor de pérdida de calor
CKWL	Parámetro del modelo relativo a la retención
WE	Acumulación Nival expresado en equivalente en agua
TSA	T° superficial del manto de nieve
SF	Almacenamiento de frío
WL	Almacenamiento de agua líquida
Lactiva	Máxima capa activa que participa en el derretimiento

Para no extender demasiado el texto del presente capítulo, una descripción teórica detallada del modelo se entrega en el Anexo C1.

4.3.4 Calibración y Validación del Modelo Sacramento en Cuencas en Régimen Natural

En el presente acápite, se describen las calibraciones de las tres cuencas de cabecera en régimen natural, que cuentan con información suficiente para llevar a cabo este proceso. Dichas cuencas son las ya descritas en el Capítulo 3, Claro de Rengo Alto (CR-CC1-1), Cortaderal – Cachapoal (CA-CC1-1) y Pangal – Blanco (PAN-CC1-1).

Existen otras cuencas de cabecera con información en la salida, como ELC-CC1-1, pero ésta no se encuentra en régimen natural, por lo que los datos con los que se cuentan, son utilizados para calibrar el modelo de simulación operacional, una vez que el modelo está integrado.

4.3.4.1 Función Objetivo

Para la calibración y validación, se utilizará como función objetivo, el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), el cual se define como:

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{obs\text{prom}})^2} \quad (4.1)$$

Donde:

Q_{obs} : caudal observado.
 $Q_{obs\text{prom}}$: promedio de los caudales observados.
 Q_{sim} : caudal simulado.

Este coeficiente es una medida de la eficiencia del modelo e indica el ajuste entre los valores observados y los simulados. El rango de valores puede estar entre -1 y 1 (Osses, 2006), donde 1 indica que el ajuste de los valores simulados y observados es perfecto. Si el coeficiente es 0, indica que usar el modelo tiene la misma precisión que la media de los valores observados. Por último, si el coeficiente es menor que 0, implica que el modelo no es útil, ya que su precisión es menor que la media de los valores observados.

4.3.4.2 Procedimiento Calibración y Validación

En el presente acápite se describe, de manera breve, el procedimiento seguido para llevar a cabo la calibración y validación de las cuencas en régimen natural.

1. Se calcularon los gradientes de precipitación, temperatura y evaporación. Los que están asociados al escalamiento de cada una de dichas variables. Para más detalles de cómo se calcularon estos valores referirse a Anexo C2.

2. Se calcularon las curvas hipsométricas asociadas a cada una de las cuencas. Mediante estas curvas se determinan las cotas de las bandas en las que se separa la cuenca. Este cálculo se hizo mediante el uso del programa WMS 7.1. Para las cuencas de calibración, se dividió el área en 6 bandas.
3. Se calculó el Hidrograma Unitario Sintético (HUS), de cada banda en las que se dividieron las cuencas simuladas mediante Sacramento. Con respecto al cálculo de los HUS, es importante destacar que, el centro de gravedad y el largo de cada banda, fueron medidos con respecto a la salida de la cuenca completa. Los HUS para las tres cuencas de calibración, se entregan en el Anexo C5.
4. Se introdujeron en el modelo las estadísticas de precipitación, temperatura y evaporación, así como los caudales observados en los puntos de salida de cada cuenca.
5. Se realizó una primera calibración mediante el uso de algoritmos genéticos (para detalles de la teoría de algoritmos genéticos, referirse al trabajo realizado por Muñoz (2006)), la cual permitió acotar los rangos de valores para los parámetros del modelo Sacramento. Los valores mínimos y máximos iniciales de dichos parámetros, fueron extraídos de los trabajos anteriores realizados por Muñoz (2006) y Osses (2006).
6. Luego de realizar varias calibraciones, en las que se probaron distintos valores para los parámetros y los aleatorios asociados a las variables meteorológicas (Anexo C2), se escogieron los parámetros de dos de aquellas que tuvieran los mejores valores de NS, para los caudales a nivel diario y mensual.
7. Posteriormente, en la validación, se utilizaron los parámetros ya calibrados para generar caudales de salida, que fueron comparados, mediante NS, con los valores observados en el período de validación. Esto se hizo para los dos set de parámetros mencionados en el punto 6. En cada caso se probaron 10 series distintas de aleatorios, luego se seleccionaron los 5 mejores resultados de NS diario y mensual, para finalmente promediar los caudales obtenidos para dichas series seleccionadas, lo cual constituye el resultado para los caudales en la validación.
8. Por último, aquel set de parámetros que tuviera los mejores valores de NS, para la calibración y la validación, fue escogido como el definitivo.

4.3.4.3 Claro de Rengo Alto (CR-CC1-1)

a) Calibración CR-CC1-1

Para la calibración se utilizó información de caudales, precipitación, temperatura y evaporación para el período Abril 1999 – Marzo 2005 (6 años hidrológicos). Las estaciones para cada una de estas variables se detallaron en el acápite 4.3.2.

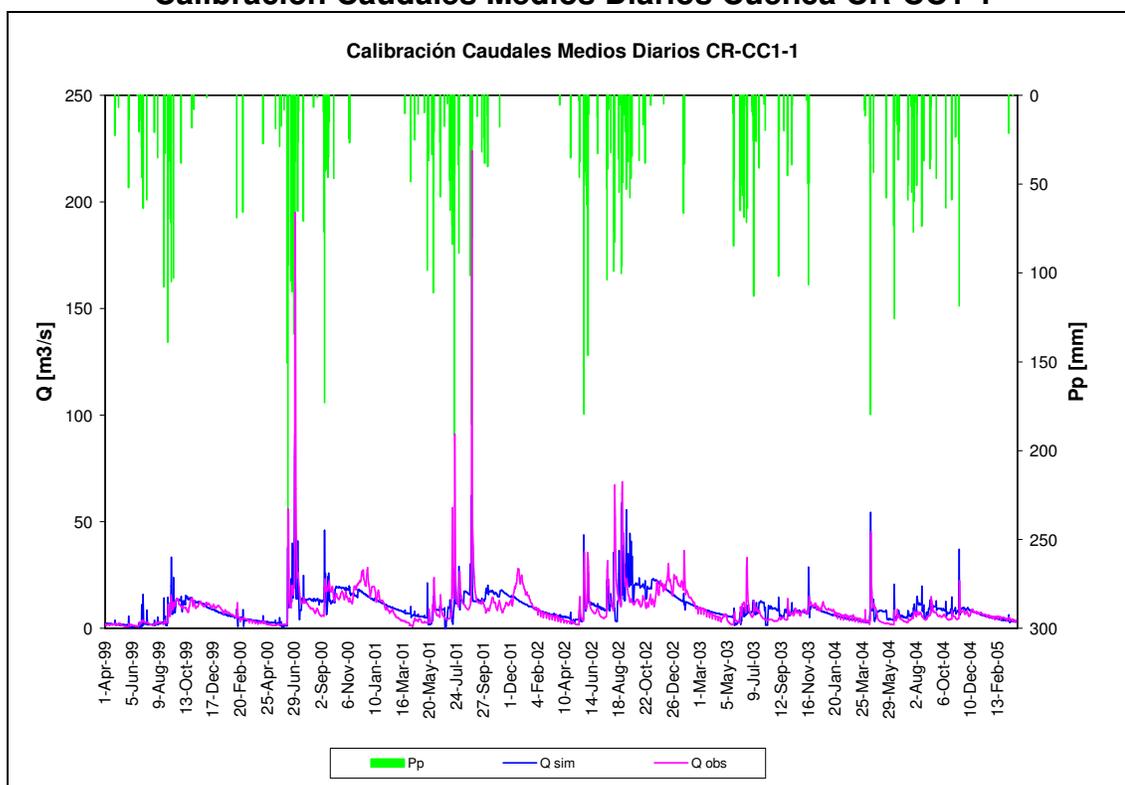
A continuación se muestran los resultados para la mejor calibración lograda en esta cuenca. Los caudales diarios (observados y simulados), se entregan en el Anexo C4.

En la Figura 4.11 se muestran los caudales observados y simulados a nivel diario. El valor del coeficiente NS en este caso es 0.34, que constituye un resultado aceptable, considerando la cantidad de información que se intenta ajustar a nivel diario.

En la mencionada figura también se muestra la precipitación de la cuenca CR-CC1-1, que corresponde al promedio ponderado, por el área de cada banda, de los valores escalonados (según lo explicado en el Anexo C2), asociados a cada banda en la que se subdivide la cuenca. Se observa que las principales diferencias, entre los caudales simulados y observados, se refieren a que el modelo no es capaz de reproducir, los valores peak asociados a las mayores precipitaciones (Junio-00 y Julio/Agosto-2001). Además, se aprecia que en los períodos de deshielo de los años 2000 a 2002, el modelo no simula de buena manera los valores máximos, ya que existe un desfase, en el cual los caudales modelados se producen antes que los observados.

Lo indicado en el párrafo anterior, es en gran parte, lo que lleva a que el valor del coeficiente NS no sea mayor, ya que las diferencias entre los caudales más grandes, aportan más error al cálculo del mencionado coeficiente.

Figura 4.11
Calibración Caudales Medios Diarios Cuenca CR-CC1-1

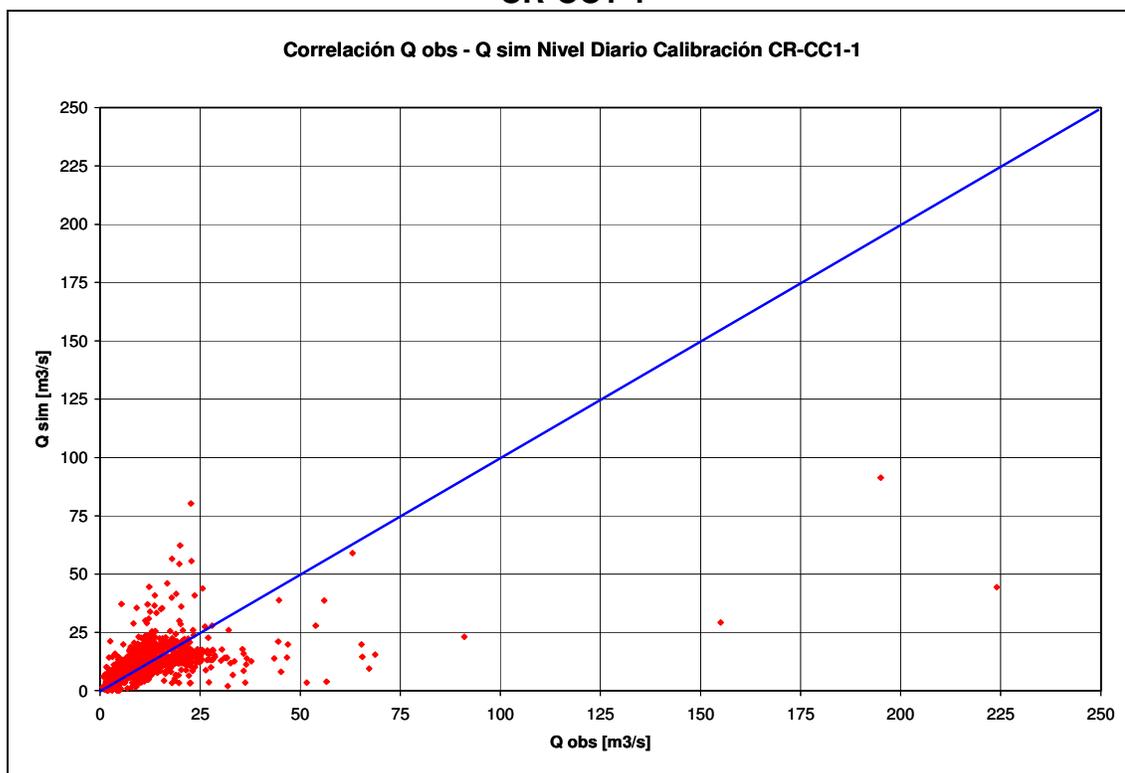


En la Figura 4.12 se muestra la correlación entre los caudales observados y simulados, para la calibración a nivel diario.

Para la correlación entre los caudales observados y simulados, se aprecia que la distribución de puntos en torno a la recta de 45° es relativamente homogénea, es decir, aproximadamente la misma cantidad de caudales son sobrestimados y subestimados

por el modelo, aunque para los valores máximos observados, es donde el modelo más falla en la simulación, ya que dichos valores son muy subestimados (puntos que se alejan demasiado hacia la derecha de la recta de 45°).

Figura 4.12
Correlación Caudales Medios Diarios Observados y Simulados Calibración CR-CC1-1



En la Figura 4.13 se muestran los caudales observados y simulados a nivel mensual. El valor del coeficiente NS en este caso es 0.68, que constituye un resultado bastante bueno, sobre todo si se compara con el valor a nivel diario.

En la mencionada figura se aprecia que a nivel mensual, el ajuste entre los valores simulados y los observados, es mucho mejor que a nivel diario. Pese a esta mejora, de todas maneras se observa que, el modelo no es capaz de reproducir de buena manera, las disminuciones de caudal que se producen, entre los valores máximos del período invernal y de deshielo. En todos los años dicho valor es sobrestimado, e incluso se encuentra algo desfasado (se produce antes) con respecto a lo observado. Además, en los años 2000 a 2003, el valor peak es subestimado para el período invernal y de deshielo, para los años 1999 y 2004 sucede lo contrario.

En la Figura 4.14 se muestra la correlación entre los caudales observados y simulados, para la calibración a nivel mensual.

Figura 4.13
Calibración Caudales Medios Mensuales Cuenca CR-CC1-1

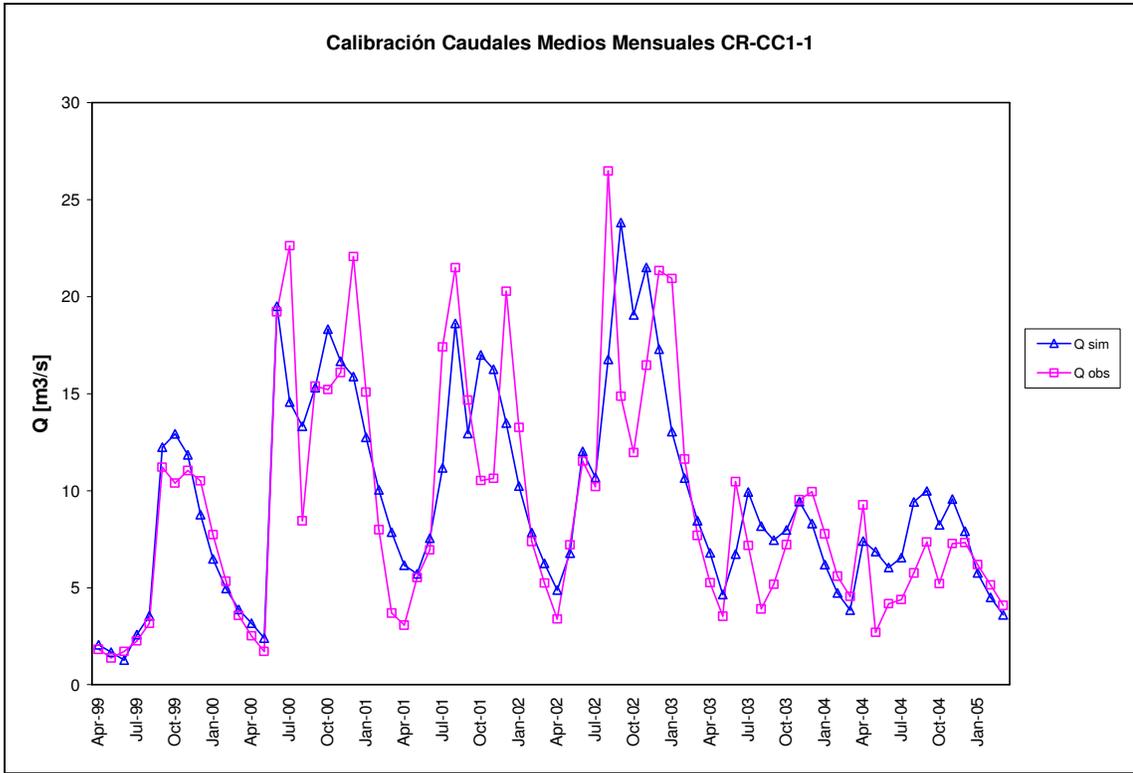
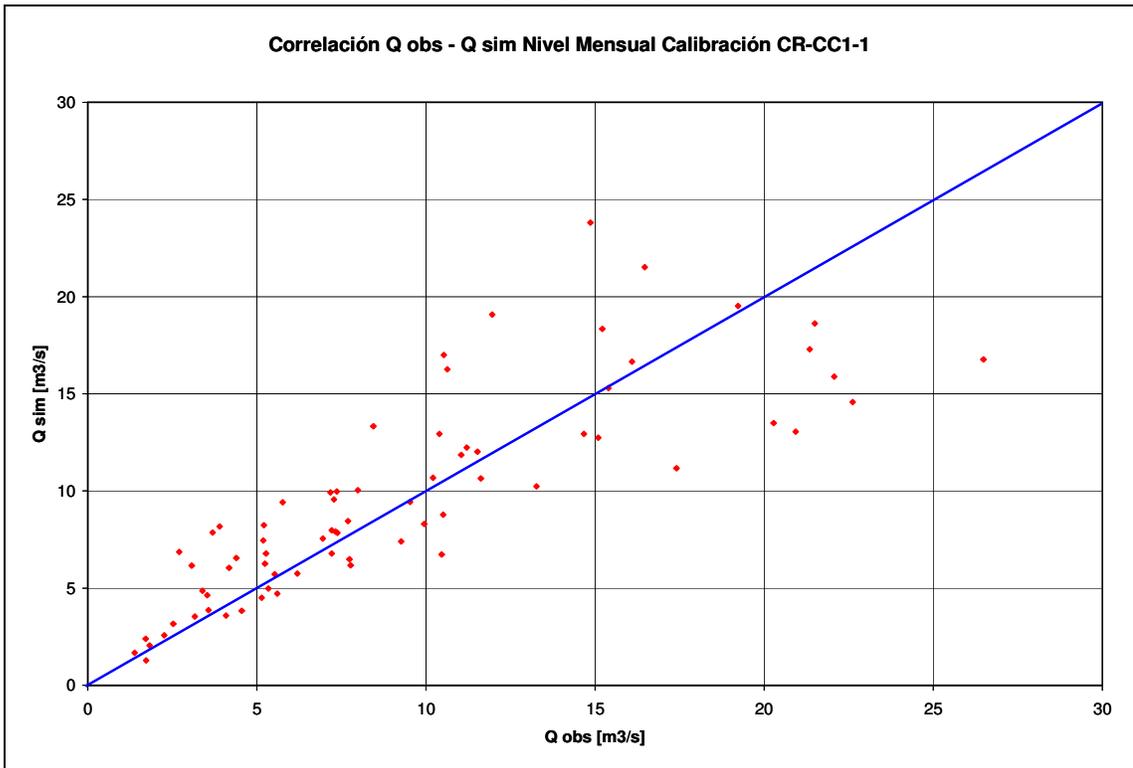


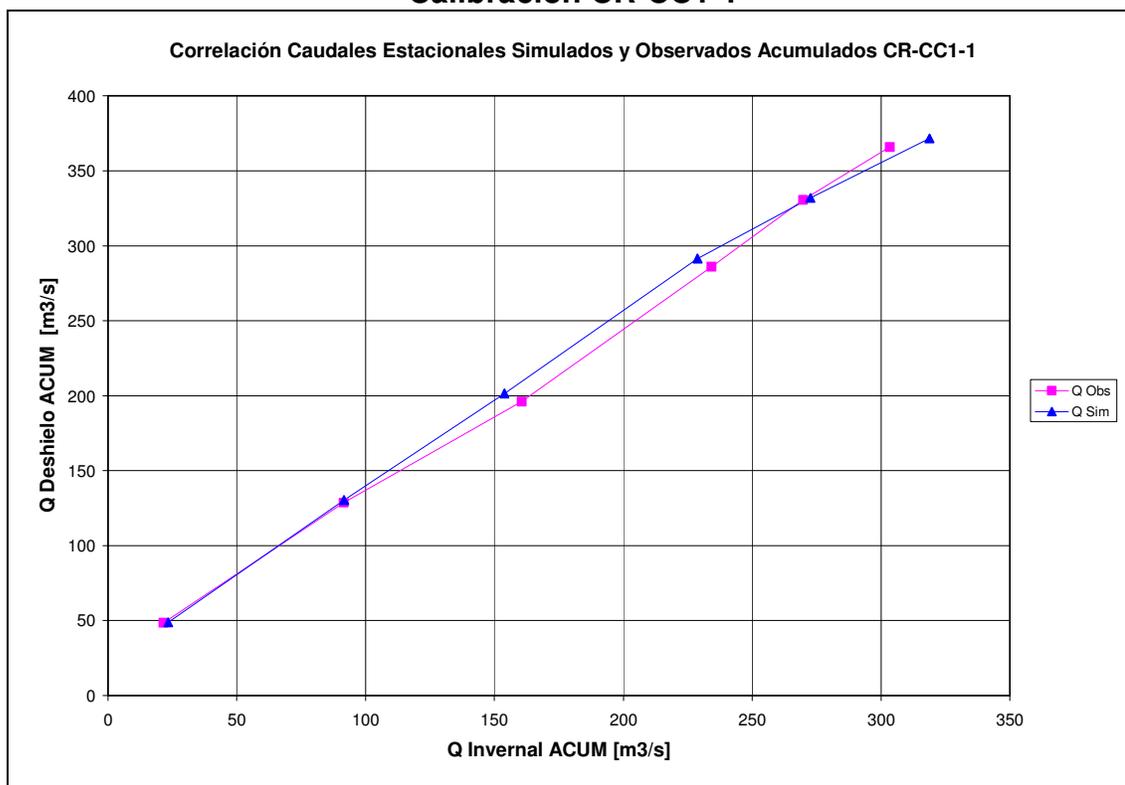
Figura 4.14
Correlación Caudales Medios Mensuales Observados y Simulados Calibración CR-CC1-1



En la Figura 4.14 se observa que, a diferencia de los resultados a nivel diario, en este caso no hay puntos que se alejen demasiado de la recta de 45°, lo que indica que no hay diferencias tan grandes, entre los caudales del modelo y lo observado. Además, se aprecia que la distribución de puntos en torno a la recta de 45°, es relativamente homogénea, aunque se observa una leve mayoría en los puntos que se encuentran sobre la mencionada recta (sobre todo para los caudales más pequeños), lo que indica que a nivel mensual, el modelo mayoritariamente sobrestima los caudales.

También es importante verificar si la correlación entre los caudales estacionales, es reproducida de buena manera por el modelo. En la Figura 4.15 se muestran las mencionadas correlaciones para los caudales estacionales acumulados (se van sumando los caudales estacionales para los 6 años hidrológicos simulados, los caudales de deshielo corresponden a la suma de los valores medios mensuales entre Octubre y Marzo y los caudales invernales son la suma del resto de los meses), tanto para los valores observados como los simulados. Se aprecia que para el modelo, la relación entre caudales invernales y de deshielo, es bastante similar a la relación de los caudales estacionales observados, por lo tanto, a nivel estacional no hay mayores diferencias, entre los valores que entrega el modelo y los caudales observados.

Figura 4.15
Comparación Correlación Caudales Estacionales Simulados y Observados
Calibración CR-CC1-1



Por último, para determinar las diferencias en cuanto a la cantidad de agua que simula el modelo, versus lo observado, se calculó el volumen total producido en ambos casos (en el período de calibración), obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 4.5. Se observa que el modelo sobrestima en un 3.05% el volumen de agua que

realmente se produce en la cuenca CR-CC1-1, lo que constituye un porcentaje bastante aceptable para una modelación de estas dimensiones.

Tabla 4.5
Volumen de agua Observado y Simulado CR-CC1-1

VOL TOTAL OBS [10^6 m^3]	VOL TOTAL SIM [10^6 m^3]
1,764	1,817
% Volumen Exceso (+) o Defecto (-)	
	3.05%

b) Validación CR-CC1-1

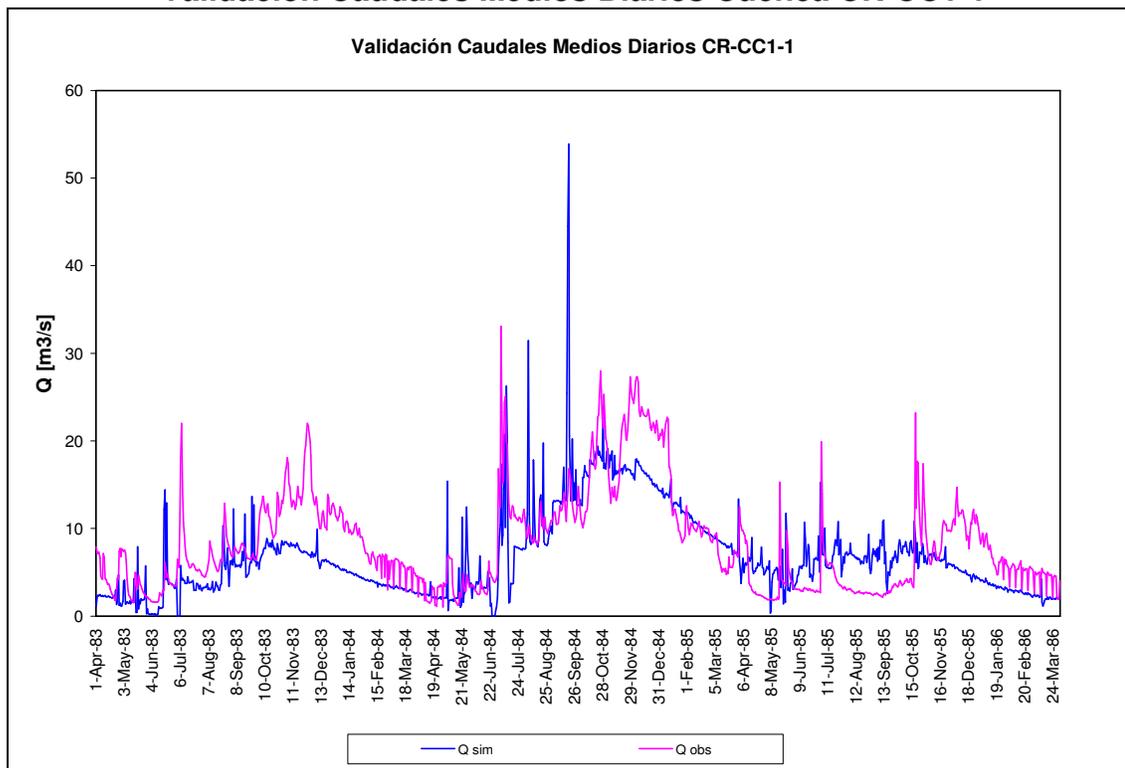
Para la validación se utilizó información de caudales, precipitación, temperatura y evaporación para el período Abril 1983 – Marzo 1986 (3 años hidrológicos).

A continuación se muestran los resultados, para la validación asociada a la calibración analizada en el acápite anterior. Los caudales diarios (observados y simulados), se entregan en el Anexo C4.

En la Figura 4.16 se muestran los caudales observados y simulados a nivel diario. El valor del coeficiente NS en este caso es 0.34, que constituye un resultado aceptable, considerando que al menos es igual al valor obtenido en la calibración.

En la mencionada figura se observa que, sucede algo muy similar a lo analizado para la calibración, en que los caudales en el período de deshielo no son bien simulados.

Figura 4.16
Validación Caudales Medios Diarios Cuenca CR-CC1-1



En la Figura 4.17 se muestra la correlación entre los caudales observados y simulados, para la validación a nivel diario. En dicha figura se observa que, en este caso la distribución de puntos en torno a la recta de 45°, no es tan homogénea como en la calibración, ya que aproximadamente la mayor cantidad de éstos, se encuentra por debajo de la mencionada recta, por lo que para la validación, el modelo subestima buena parte de los caudales diarios observados. Además, en este caso se observa que el mayor error del modelo, está asociado a la sobrestimación de los caudales peak observados (para el período de deshielo del 2004).

En la Figura 4.18 se muestran los caudales observados y simulados a nivel mensual. El valor del coeficiente NS en este caso es 0.57, que constituye un resultado satisfactorio, sobre todo si se compara con el valor a nivel diario, pero, que es inferior al valor obtenido en la calibración.

En dicha figura, se aprecia que a nivel mensual, el ajuste entre los valores simulados y los observados, no es tan bueno como para la calibración, ya que los caudales peak del período invernal, prácticamente no son modelados, por lo menos para los 2 primeros años. Con respecto al período de deshielo, se observa que los valores peak, tampoco son bien reproducidos por el modelo, ya que para los tres años, los valores máximos simulados son menores y se producen antes que los observados.

Figura 4.17
Correlación Caudales Medios Diarios Observados y Simulados
Validación CR-CC1-1

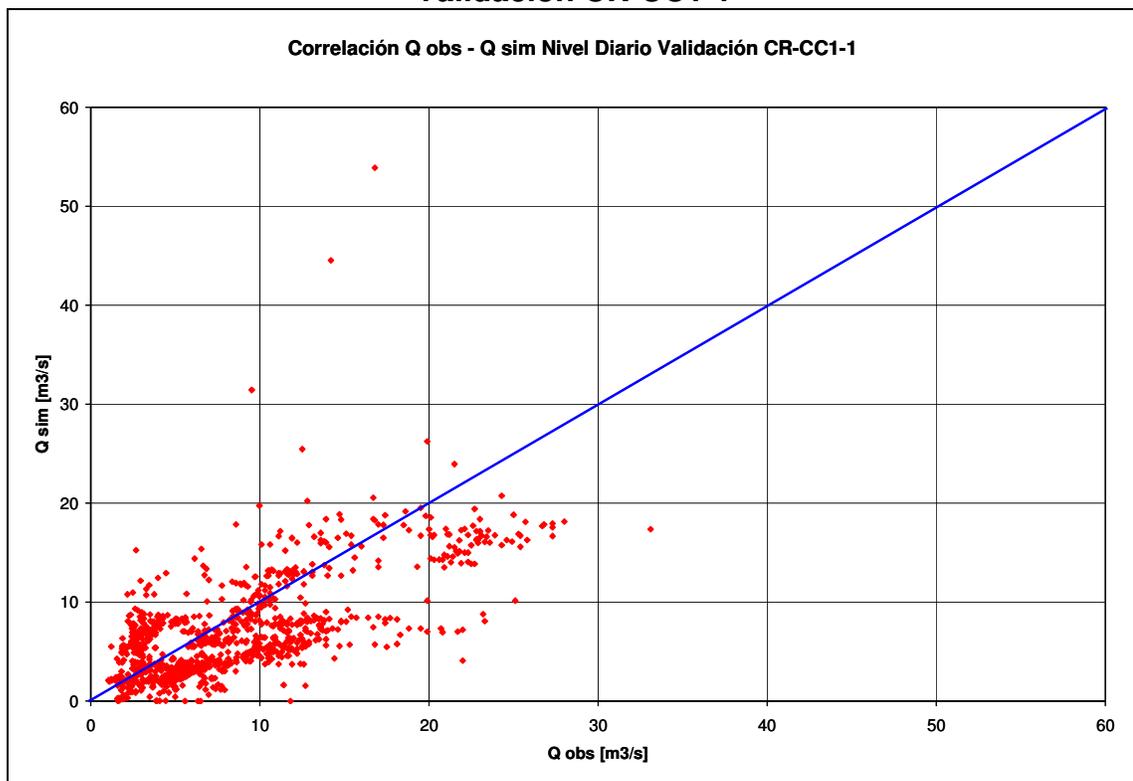
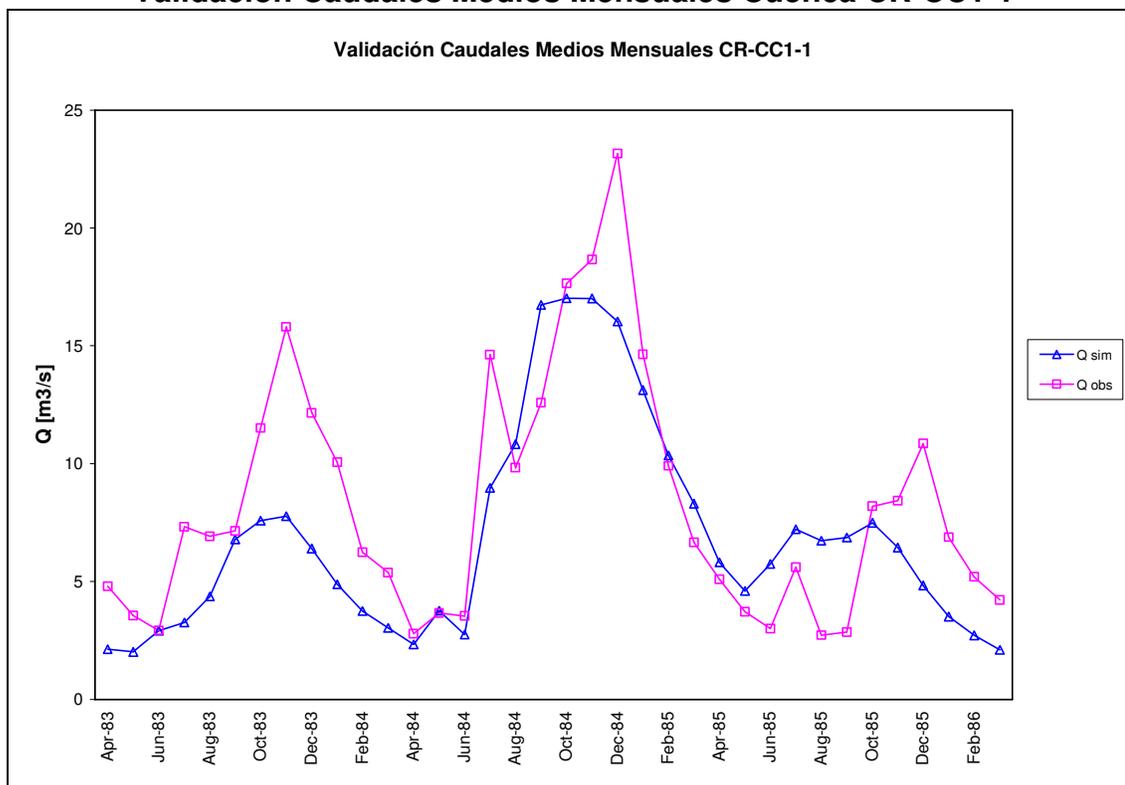


Figura 4.18
Validación Caudales Medios Mensuales Cuenca CR-CC1-1



En la Figura 4.19 se muestra la correlación entre los caudales observados y simulados, para la validación a nivel mensual. En dicha figura se observa que, a diferencia de los resultados a nivel diario, en este caso no hay puntos que se alejen demasiado de la recta de 45°, lo que indica que no hay diferencias tan grandes entre el modelo y lo observado. De todas maneras se aprecia que, la mayor cantidad de puntos se encuentra por debajo de la mencionada recta, lo que indica que el modelo subestima los caudales mensuales.

Por último, también es importante verificar si la correlación entre los caudales estacionales, es reproducida de buena manera por el modelo. En la Figura 4.20, se muestran las mencionadas correlaciones para los caudales estacionales acumulados, tanto para los valores observados como los simulados. Se aprecia que en el caso de la validación, la relación entre caudales invernales y de deshielo simulados, es distinta a la relación de los caudales estacionales observados, lo que indica que a nivel estacional, el modelo también subestima los caudales con respecto a los valores observados, en especial los valores altos.

Figura 4.19
Correlación Caudales Medios Mensuales Observados y Simulados
Validación CR-CC1-1

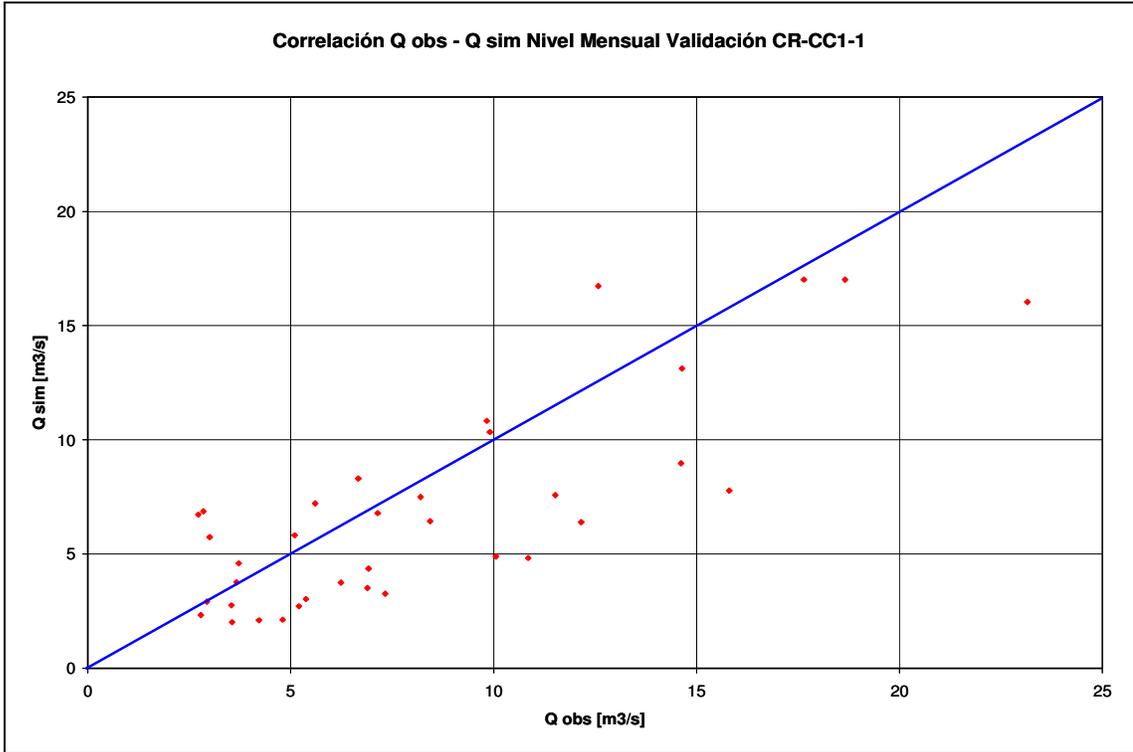
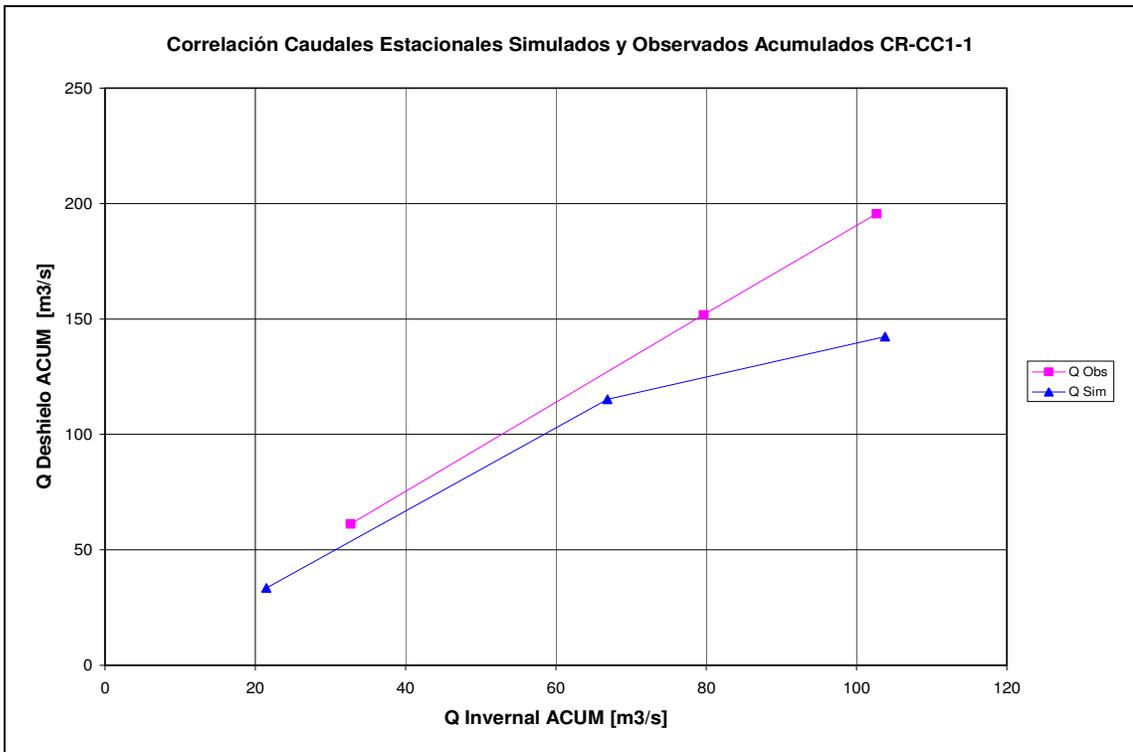


Figura 4.20
Comparación Correlación Caudales Estacionales Simulados y Observados
Validación CR-CC1-1



4.3.4.4 Cortaderal – Cachapoal (CA-CC1-1)

Para esta cuenca, tanto en la calibración como en la validación, no se entrega un análisis tan detallado como en el acápite 4.3.4.3, sólo se muestran los principales resultados. Para ver, para esta cuenca, el mismo estudio realizado para CR-CC1-1, referirse a Anexo C6.

a) Calibración CA-CC1-1

Para la calibración se utilizó información de caudales, precipitación, temperatura y evaporación para el período Abril 2000 – Marzo 2004 (4 años hidrológicos). Las estaciones para cada una de estas variables se detallaron en el acápite 4.3.2.

En la Figura 4.21 se muestran los caudales observados y simulados a nivel diario. El valor del coeficiente NS en este caso es 0.71, que constituye un resultado muy bueno, si se compara con el valor de CR-CC1-1.

En la Figura 4.22 se muestran los caudales observados y simulados a nivel mensual. El valor del coeficiente NS en este caso es 0.86, que constituye un resultado bastante bueno, mejor aún que el obtenido a nivel diario.

Figura 4.21
Calibración Caudales Medios Diarios Cuenca CA-CC1-1

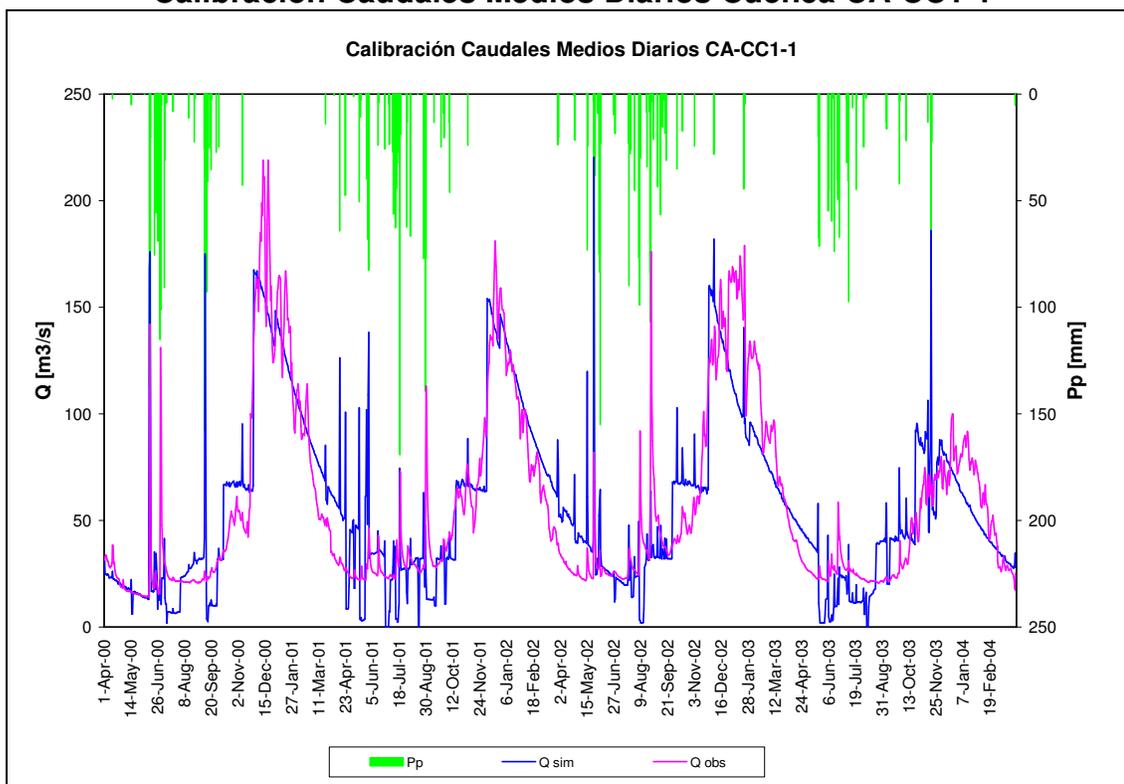
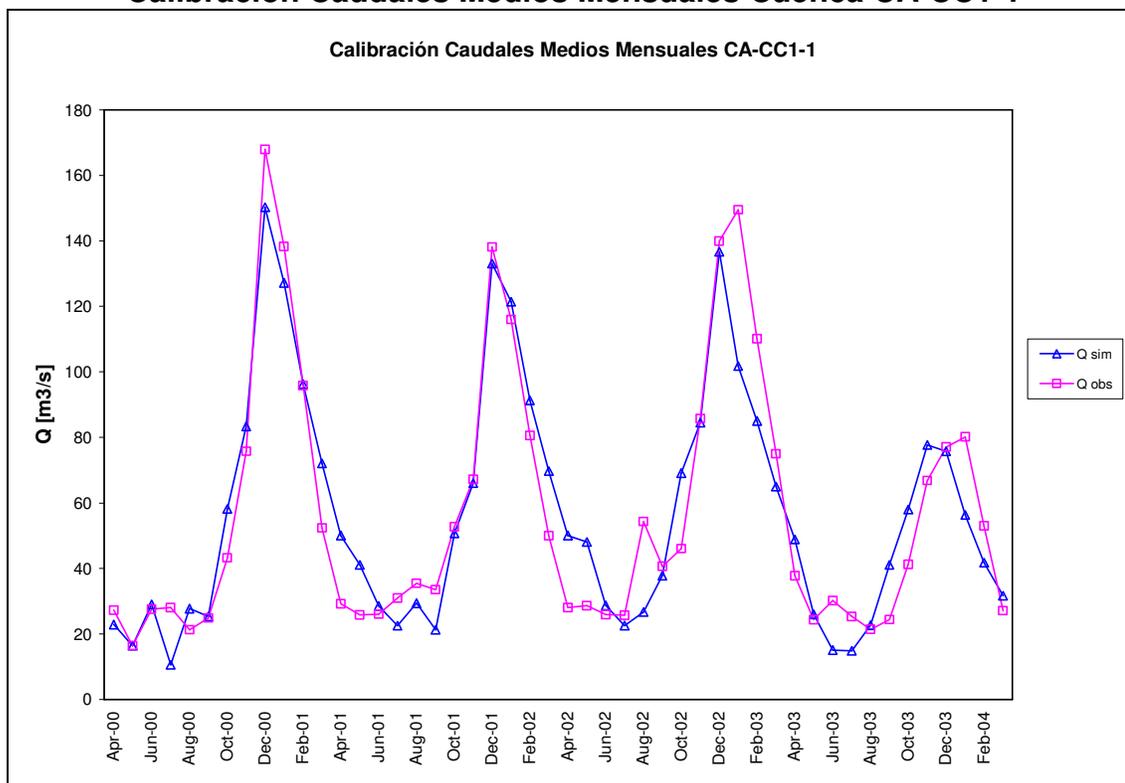


Figura 4.22
Calibración Caudales Medios Mensuales Cuenca CA-CC1-1



b) Validación CA-CC1-1

Para la validación se utilizó información de caudales, precipitación, temperatura y evaporación para el período Abril 1994 – Marzo 1996 (2 años hidrológicos). Para esta cuenca en particular, no se contaba con mucha información completa (más allá de la utilizada para la calibración), por lo que se utilizó el período antes indicado, pese a que en algunos meses no hay datos. Por esta razón, dichos días y meses no fueron considerados en el cálculo del coeficiente NS diario y mensual, así como tampoco en los respectivos gráficos.

En la Figura 4.23 se muestran los caudales observados y simulados a nivel diario. El valor del coeficiente NS en este caso es 0.63, que constituye un resultado aceptable, considerando que es levemente inferior al valor obtenido en la calibración.

En la Figura 4.24 se muestran los caudales observados y simulados a nivel mensual (la recta discontinua para el período observado, se debe a los meses sin información). El valor del coeficiente NS en este caso es 0.98, que constituye un resultado muy bueno, lo que tiene relación con la buena simulación del modelo, para la pequeña cantidad de datos que se están comparando.

Figura 4.23
Validación Caudales Medios Diarios Cuenca CA-CC1-1

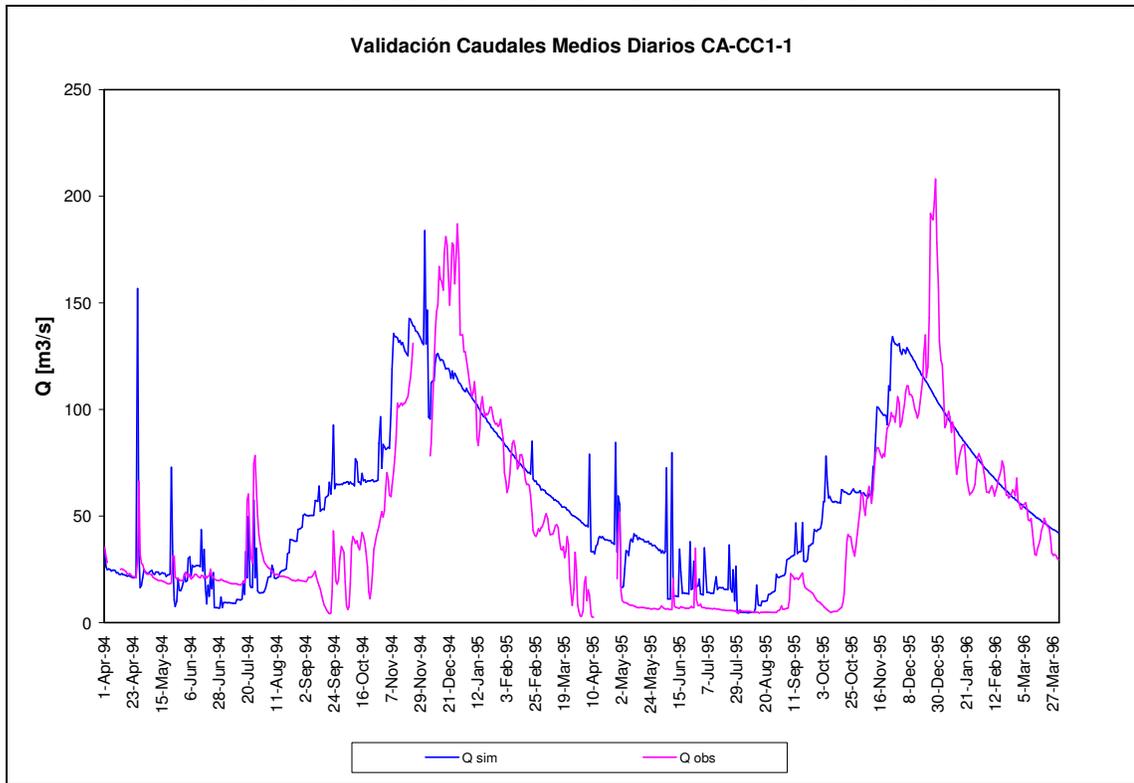
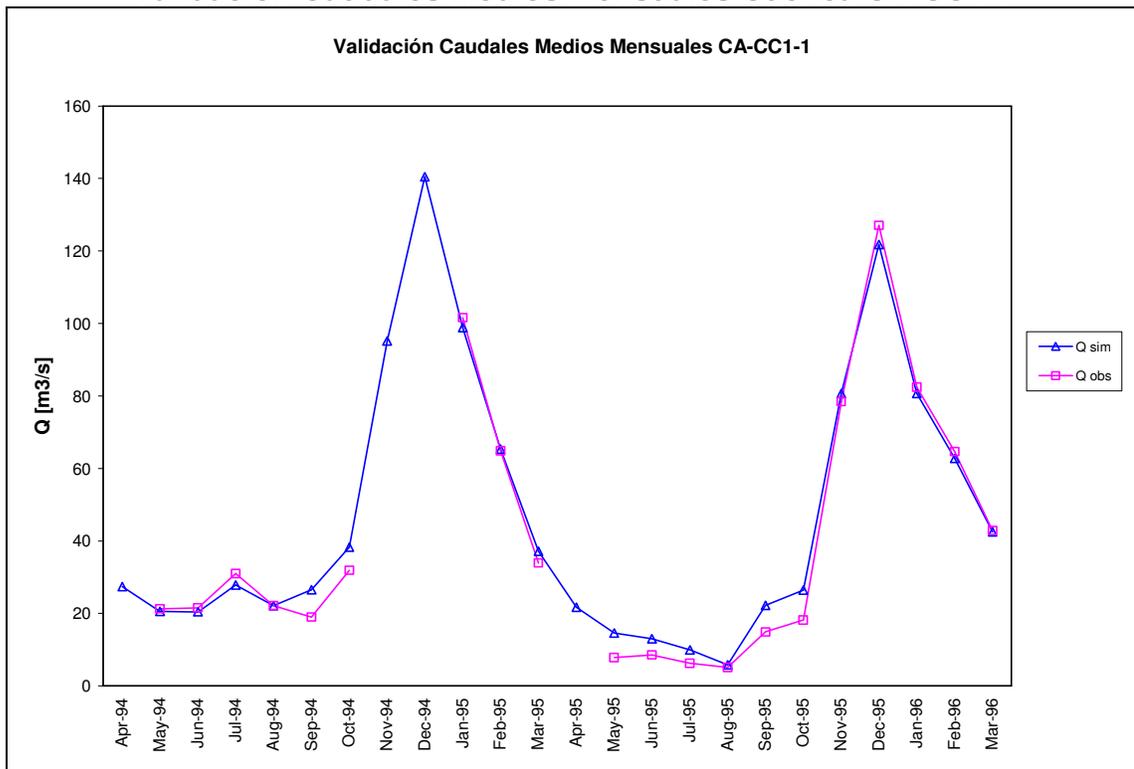


Figura 4.24
Validación Caudales Medios Mensuales Cuenca CA-CC1-1



4.3.4.5 Pangal – Blanco (PAN-CC1-1)

Para esta cuenca, tanto en la calibración como en la validación, no se entrega un análisis tan detallado como en el acápite 4.3.4.3, sólo se muestran los principales resultados. Para ver, para esta cuenca, el mismo estudio realizado para CR-CC1-1, referirse a Anexo C6.

Es importante mencionar que en la parte alta de esta cuenca, en su principal afluente, el río Blanco, existen extracciones desde la faena minera El Teniente, por ello los caudales observados fueron llevados a régimen natural, agregándole dicho caudal extraído.

a) Calibración PAN-CC1-1

Para la calibración se utilizó información de caudales, precipitación, temperatura y evaporación para el período Abril 2001 – Marzo 2005 (4 años hidrológicos). Las estaciones para cada una de estas variables se detallaron en el acápite 4.3.2.

En la Figura 4.25 se muestran los caudales observados y simulados a nivel diario. El valor del coeficiente NS en este caso es 0.71, que es similar a lo obtenido en CA-CC1-1 y obviamente mejor que en el caso de CR-CC1-1.

En la Figura 4.26 se muestran los caudales observados y simulados a nivel mensual. El valor del coeficiente NS en este caso es 0.82, que constituye un resultado bastante bueno, mejor aún que el obtenido a nivel diario.

Figura 4.25
Calibración Caudales Medios Diarios Cuenca PAN-CC1-1

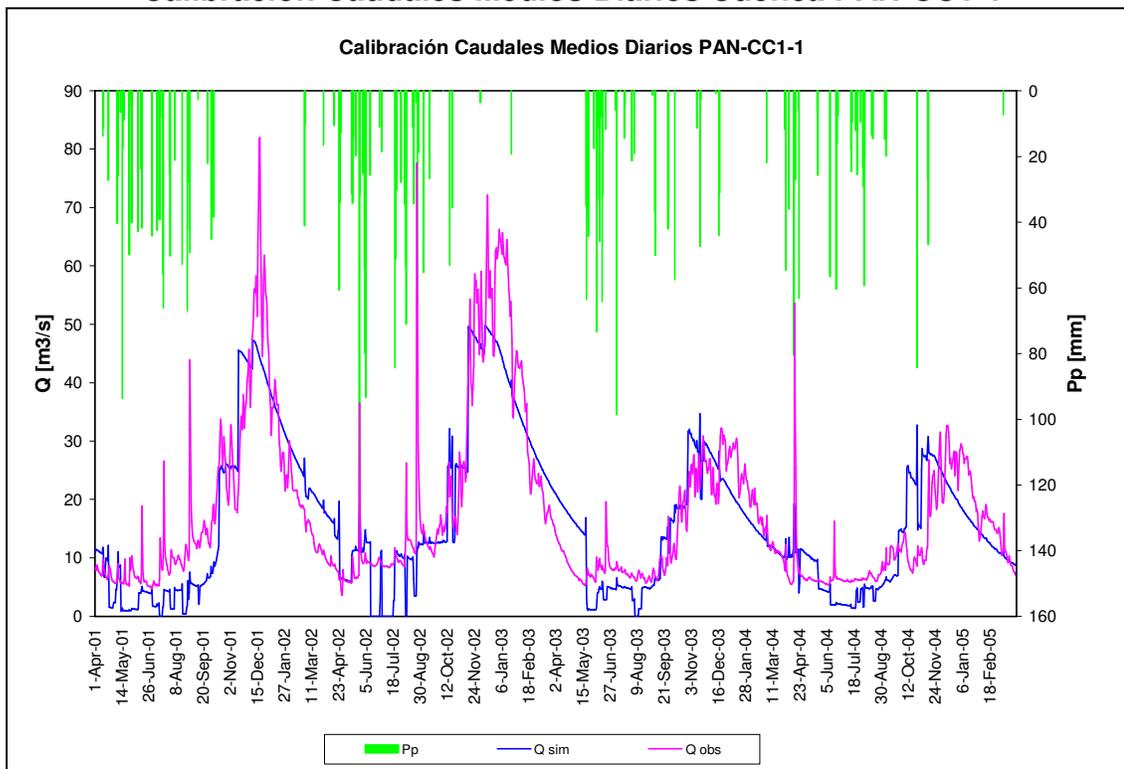
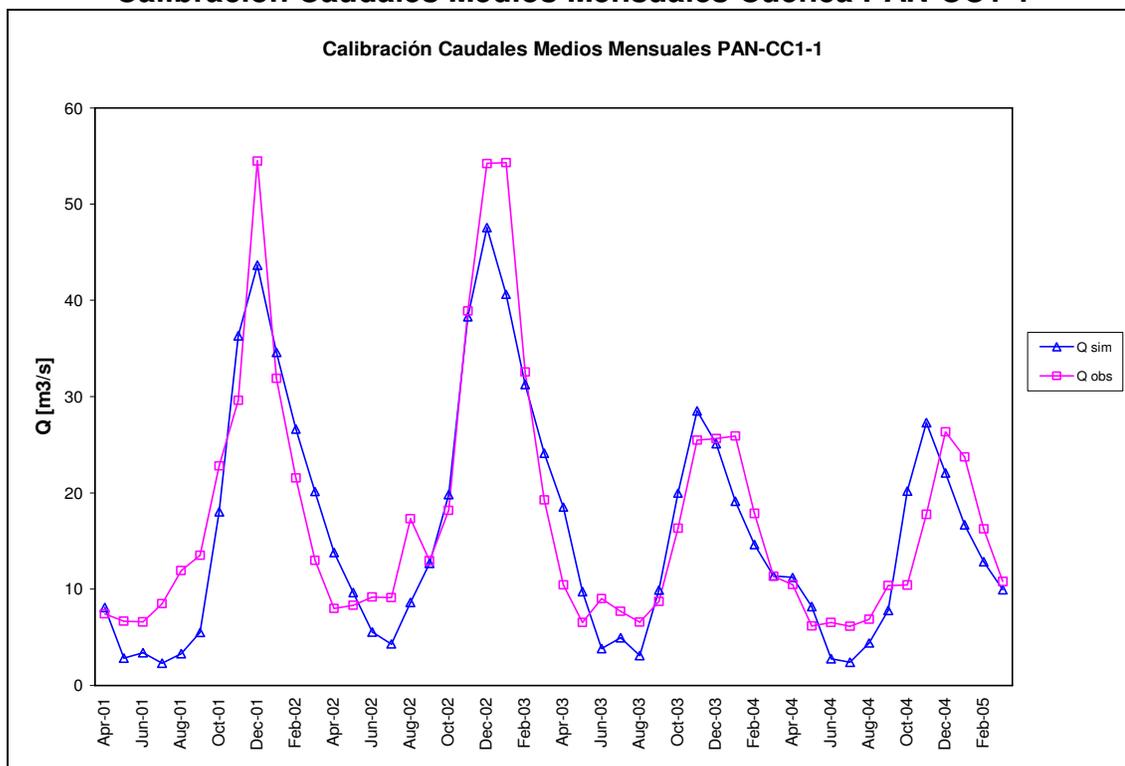


Figura 4.26
Calibración Caudales Medios Mensuales Cuenca PAN-CC1-1



b) Validación PAN-CC1-1

Para la validación se utilizó información de caudales, precipitación, temperatura y evaporación para el período Abril 1994 – Marzo 1997 (3 años hidrológicos).

En la Figura 4.27 se muestran los caudales observados y simulados a nivel diario. El valor del coeficiente NS en este caso es 0.69, que constituye un resultado aceptable, considerando que es levemente inferior al valor obtenido en la calibración.

En la Figura 4.28 se muestran los caudales observados y simulados a nivel mensual. El valor del coeficiente NS en este caso es 0.78, que constituye un resultado muy bueno, y que además, tiene muy poca diferencia con el valor de la calibración.

4.3.4.6 Resumen resultados Calibración Cuencas en Régimen Natural

En la Tabla 4.6 se muestra un resumen de los coeficientes NS para las calibraciones y validaciones en las tres cuencas estudiadas en el acápite 4.3.4.

Tabla 4.6
Coefficientes NS Calibración Cuencas en Régimen Natural

	CR-CC1-1	CA-CC1-1	PAN-CC1-1
NS Diario Calibración	0.34	0.71	0.71
NS Mensual Calibración	0.68	0.86	0.82
NS Diario Validación	0.34	0.63	0.69
NS Mensual Validación	0.57	0.98	0.78

Figura 4.27
Validación Caudales Medios Diarios Cuenca PAN-CC1-1

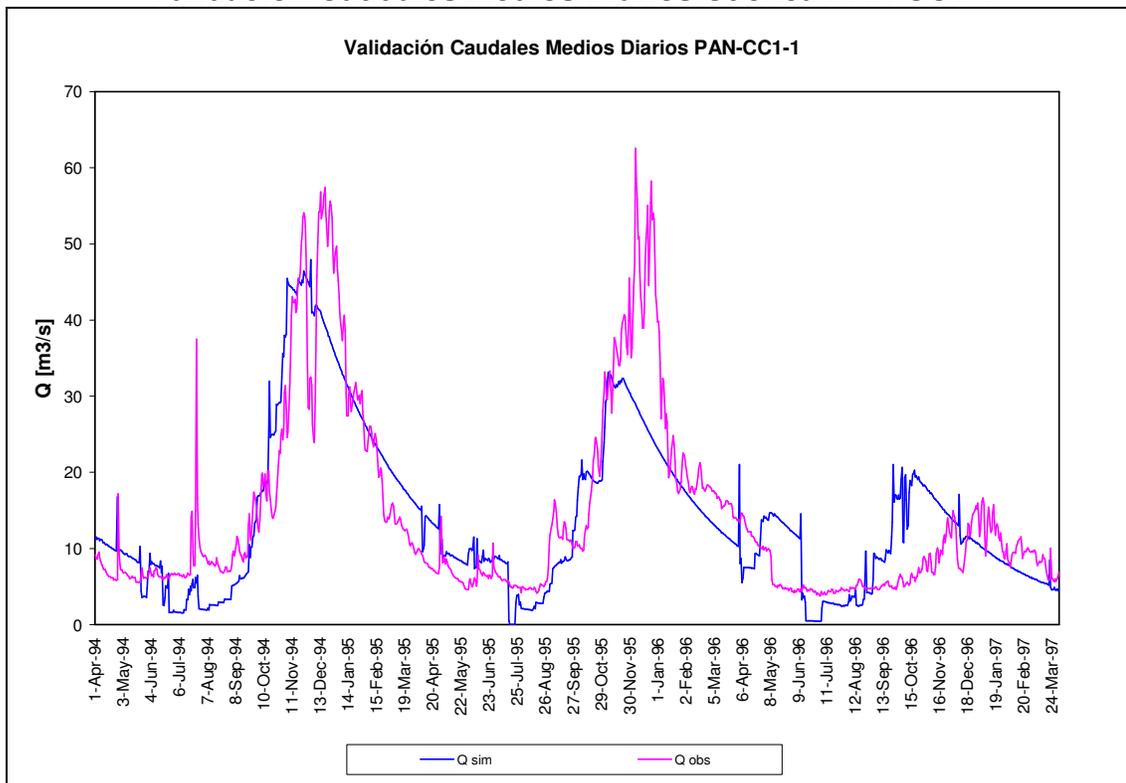
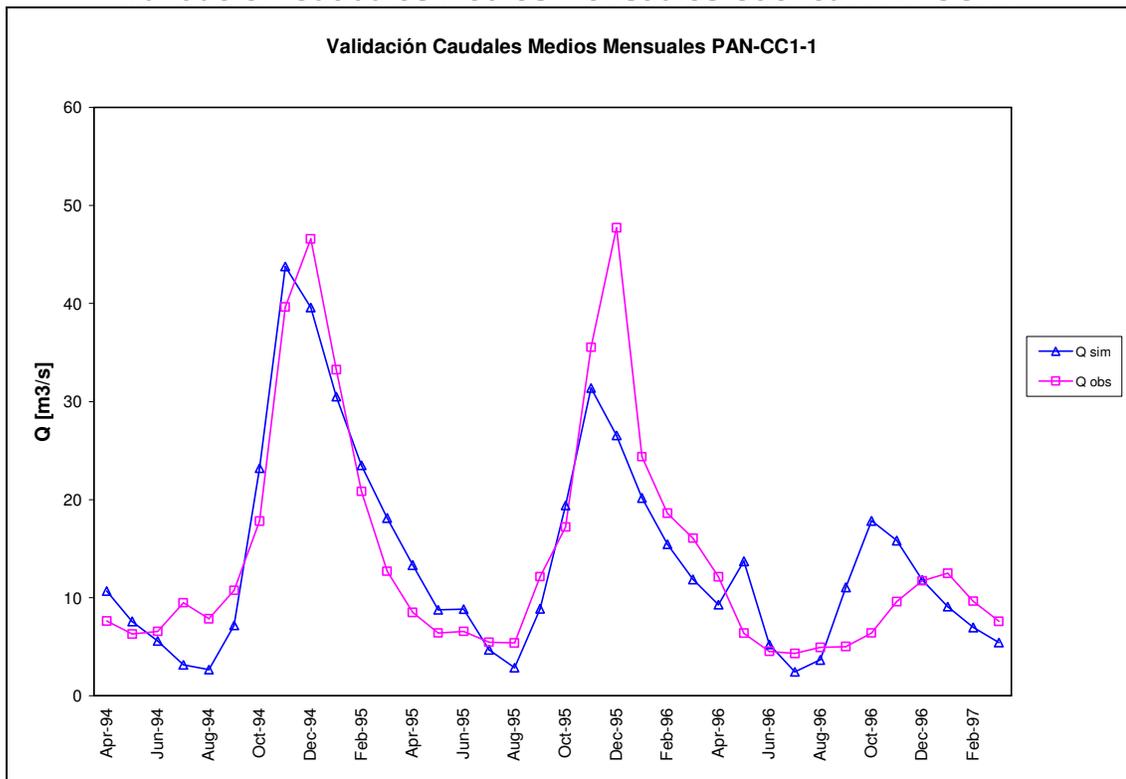


Figura 4.28
Validación Caudales Medios Mensuales Cuenca PAN-CC1-1



En la Tabla 4.7 se muestran los resultados para los parámetros calibrados del Modelo Sacramento en las tres cuencas estudiadas.

Tabla 4.7
Parámetros Calibrados Modelo Sacramento Cuencas en Régimen Natural

Parámetro	Unidad	CR-CC1-1	CA-CC1-1	PAN-CC1-1
UZTWM	[mm]	70	105	80
UZFWM	[mm]	240	270	540
LZTWM	[mm]	116	770	800
LZFPWM	[mm]	280	120	150
LZFSWM	[mm]	710	550	945
UZK	[mm/día]	0.11	0.5	0.192
LZPK	[mm/día]	0.05	0.28	0.06
LZSK	[mm/día]	0.0021	0.0027	0.00158
RSERV	---	0.65	0.1	0.11
SIDE	---	0	0	0
ZPERC	---	79	70	105
REXP	---	2.5	2	1.95
PFREE	---	0.8	0.48	0.47
PCTIM	---	0.03	0.1	0.01
ADIMP	---	0.31	0.3	0.06
RIVA	---	0	0	0
PX-ADJ	---	1.75	1.39	1.878
PE-ADJ	---	1.32	0.27	0.547
UZTWC	[mm]	2	0	50
UZFWC	[mm]	2	0	145
LZTWC	[mm]	2	0	510
LZPFWC	[mm]	2	21	0
LZPSWC	[mm]	30	21	6
ADIMC	---	0	0	0
TCR	[°C]	1.95	1.65	0.72
TBAS	[°C]	0.8	1.2	0.62
CMFMX	[mm/°C/día]	2.9	37	3.2
CMFMN	[mm/°C/día]	0.9	0.18	0.11
KV	[mm/mb/día]	0.5	0.48	0.7
KTS	[°C]	0.06	0.41	0.52
CNMF	[mm/°C/día]	0.43	7.9	0.11
CKWL	---	0.14	0.09	0.07
WE	[mm]	0	8	0
TSA	[mm]	0	0	0
SF	[mm]	0	0	0
WL	[mm]	0	0	0
Lactiva	[mm]	16	12.05	31

4.3.5 Parámetros de Sacramento en Cuencas no calibradas

Para el resto de las cuencas del modelo, inicialmente se trasladaron los parámetros de alguna de las tres cuencas de calibración, según criterios de cercanía principalmente, posteriormente dichos parámetros fueron modificados, según los requerimientos de la calibración del Modelo Integrado. En el Anexo C4 se entregan los parámetros finales para cada una de las cuencas del modelo.

El procedimiento para generar los archivos de escurrimiento para cada una de estas cuencas, es muy similar al indicado en el acápite 4.3.4.2. A excepción de que en este caso, no se lleva a cabo el proceso de calibración y validación, sino que simplemente se traspasan los parámetros.

Con respecto a los valores de los aleatorios, éstos fueron traspasados en conjunto con los parámetros de la calibración. Esto se hizo de dicha manera, ya que para las cuencas que no fueron calibradas, considerando la cantidad de ellas, resultaría demasiado engorroso determinar un grupo de aleatorios preciso para cada una.

Es importante mencionar que, pese a que muchas de las cuencas intermedias y de cabecera no están en régimen natural (existen usos del recurso, hay ciudades y poblados, etc.), de todas maneras se utiliza el modelo Sacramento para generar escurrimientos, teniendo la precaución de modificar parámetros como PCTIM, asociado a la impermeabilidad de la cuenca, que en estos casos es mayor.

Con respecto a la parte subterránea de todas las cuencas intermedias y de cabecera, para efectos de este trabajo se hicieron las siguientes consideraciones:

- Para aquellas cuencas, sobre todo en las partes altas de los módulos CA, CB y CR, en las cuales para efectos de modelación se considera que no hay acuífero; los parámetros asociados a los tamaños de los estanques que representan al suelo, fueron trasladados con los mismos valores determinados en las respectivas cuencas de calibración.

Para estas cuencas (incluyendo a las de calibración) que no recargan directamente al acuífero (bajo el supuesto de que no tienen una componente subterránea muy desarrollada), el agua que va hacia los estanques de la parte baja (que representan al acuífero), de todas maneras es ingresada al modelo de aguas subterráneas mediante una recarga subterránea (esto se analiza en detalle en el acápite 4.4.2.6).

- Para aquellas cuencas, en las que sí se considera existencia de acuífero, los parámetros calibrados, fueron ajustados según las características propias de los sectores acuíferos, en cuanto a las profundidades de los espesores secos y saturados (extraídas de los niveles observados en la versión preliminar del modelo de aguas subterráneas). Esto se hizo para representar de mejor manera los flujos que van hacia el acuífero, para la determinación de las recargas del modelo de aguas subterráneas (tal como se explica en el acápite 4.4.2.6).

4.4 MODELO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

4.4.1 Descripción Visual Modflow

Modflow es un modelo matemático, que se basa en el método de diferencias finitas, para resolver el problema de flujo de aguas subterráneas en tres dimensiones. Fue desarrollado en 1988 por McDonald y Harbaugh, pertenecientes al U.S. Geological Survey (Espinoza, 2006).

Este modelo permite la simulación de un sistema acuífero, resolviendo la ecuación de flujo impermanente en medios porosos saturados (ecuación 4.2), utilizando el método de diferencias finitas, que a través de un número discreto y finito de puntos en el espacio (celdas) y tiempo (períodos), da origen a un sistema de ecuaciones lineales, cuya solución entrega un valor de nivel piezométrico en cada celda y en cada período simulado. El sistema se resuelve mediante iteraciones sucesivas hasta que el valor de la cota piezométrica satisface el criterio de convergencia impuesto (Von Frey, 2004).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (4.2)$$

Donde:

K_x, K_y, K_z : conductividades hidráulicas en dirección “x”, “y” y “z”.
h : nivel piezométrico.
 S_s : almacenamiento específico.
t : tiempo.

La estructura modular de Modflow consiste en un programa principal y una serie de subrutinas independientes, llamadas módulos. Estos módulos son agrupados en paquetes, los cuales están asociados a una componente específica del sistema hidrológico simulado, tal como el afloramiento o la infiltración en los ríos, o con un método específico de solución de ecuaciones lineales que describe al sistema de flujos (SSG, 2008).

Visual Moflow es un producto comercial, desarrollado por Waterloo Hydrogeologic Inc., que permite resolver problemas de flujo en tres dimensiones, mediante la utilización de Modflow. El programa permite una interacción muy amigable con el usuario, mediante un sistema gráfico con diversas ventanas, donde el usuario puede ingresar gran parte de la información visualmente, asignando dentro del mismo modelo las propiedades del sistema que se requiere simular (Espinoza, 2006). Para este trabajo de tesis se utilizó Visual Modflow versión 4.0.

4.4.2 Construcción del Modelo

Para este trabajo de tesis, se utilizó como base el modelo de aguas subterráneas construido por el DICTUC, para el estudio encargado por la DGA (DGA, 2005 c). En dicho estudio se desarrolló un modelo numérico en Visual Modflow que permitió evaluar la demanda existente, en los acuíferos ya mencionados, a Junio del 2004.

Por ello, en el presente estudio, lo que se hizo fue modificar todos aquellos aspectos del modelo original, tales como recargas, condiciones de borde, parámetros hidrogeológicos, zonas de balance, demanda del sistema, etc.; que son requeridos para implementar el Modelo Integrado.

En el presente acápite se hace una breve descripción de la estructura del modelo base (basada en DGA (2005 c)), y se detallan las modificaciones hechas a éste.

4.4.2.1 Discretización Espacial

En términos de la discretización espacial, no se hicieron modificaciones con respecto al modelo original.

El modelo está definido en un rectángulo acotado por los siguientes límites, expresados en coordenadas planas, según el datum geodésico sudamericano 56 (todas las coordenadas que se muestran en el presente capítulo están referidas al datum geodésico Sudamericano 56).

Límite Norte : UTM N 6,250,000 [m]
Límite Sur : UTM N 6,178,000 [m]
Límite Oeste : UTM E 270,000 [m]
Límite Este : UTM E 354,000 [m]

El rectángulo definido por los límites anteriores, fue dividido en cuadrados (celdas) de 300 [m] de lado, dando paso a 67,200 celdas que constituyen 240 filas y 280 columnas.

Con respecto a la discretización en la vertical, en el estudio en el que se confeccionó el modelo, debido al tamaño de éste, a las características estratigráficas dominantes y los estratos explotados por los pozos; se consideró que el acuífero estaba formado por un solo estrato, con un funcionamiento del tipo libre, cuyas variaciones estratigráficas quedan representadas por la asignación de la conductividad promedio de este único estrato. Para este trabajo de tesis, no se contó con mayor información estratigráfica que permitiera hacer una definición más detallada en este sentido.

4.4.2.2 Bordas Laterales, Condiciones de Borde, Ríos y Esteros

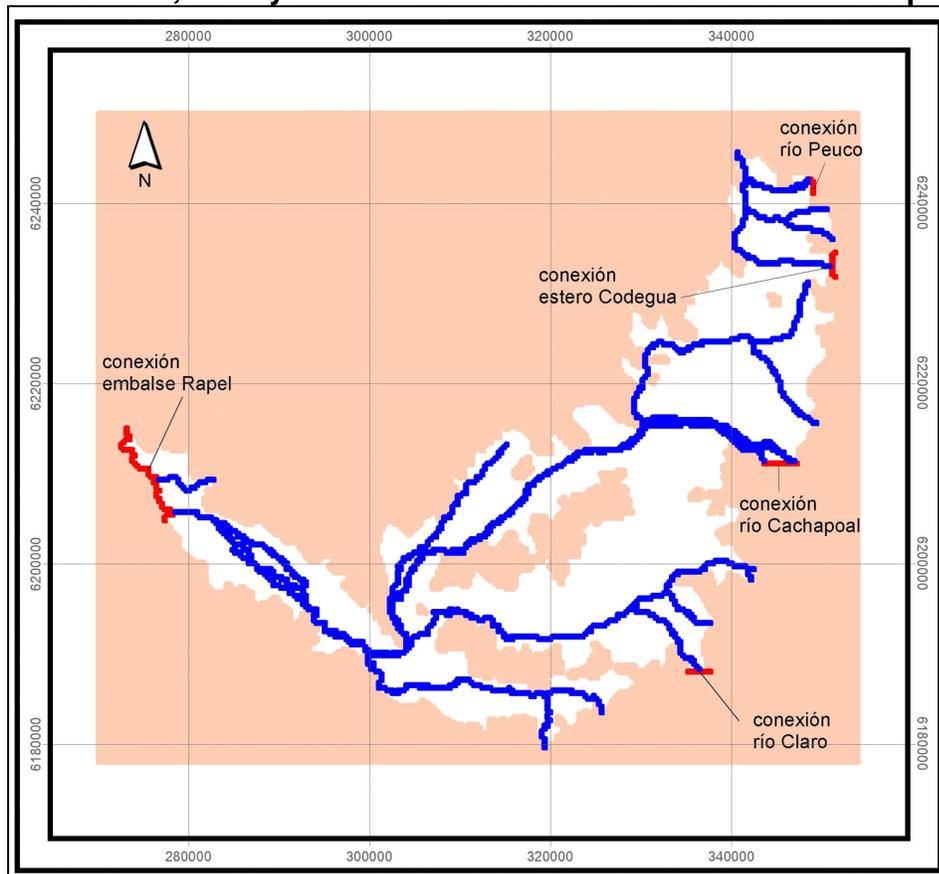
Para este modelo, los bordes laterales corresponden a los contactos roca – relleno que delimitan el acuífero (bordes de no flujo) y a los límites que separan la superficie modelada de los sectores no incluidos en el modelo. Esto permite clasificar las celdas del modelo en activas (pertenecen al acuífero, parte blanca de la Figura 4.29) e inactivas (no pertenecen al acuífero, parte rosada de la Figura 4.29).

El área activa del modelo aparece limitada por el norte por la cuenca del río Maipo, por el noroeste por la cuenca del estero Alhué, por el este por la Cordillera de Los Andes y por el sur – suroeste por la cuenca del río Tinguiririca.

Con respecto a los sectores no modelados, existen algunos que están conectados con el acuífero, y que por lo tanto deben ser incluidos en el modelo. Algunos de éstos se incluyen como bordes constantes, tales como las conexiones con el río Peuco y el

Estero Codegua, por el sector noreste del acuífero, y la conexión con el Embalse Rapel por el sector suroeste. En el modelo original, se consideraban las conexiones con los ríos Cachapoal y Claro de Rengo, como bordes constantes, lo que fue modificado para este trabajo, representando dichas conexiones por pozos de inyección, que permiten ingresar al acuífero el aporte de las cuencas asociadas a dichos ríos (más detalles en acápite 4.4.2.6). Dichas conexiones se observan en la Figura 4.29.

Figura 4.29
Conexiones, Ríos y Esteros modelados en el acuífero Cachapoal



Fuente: DGA (2005 c).

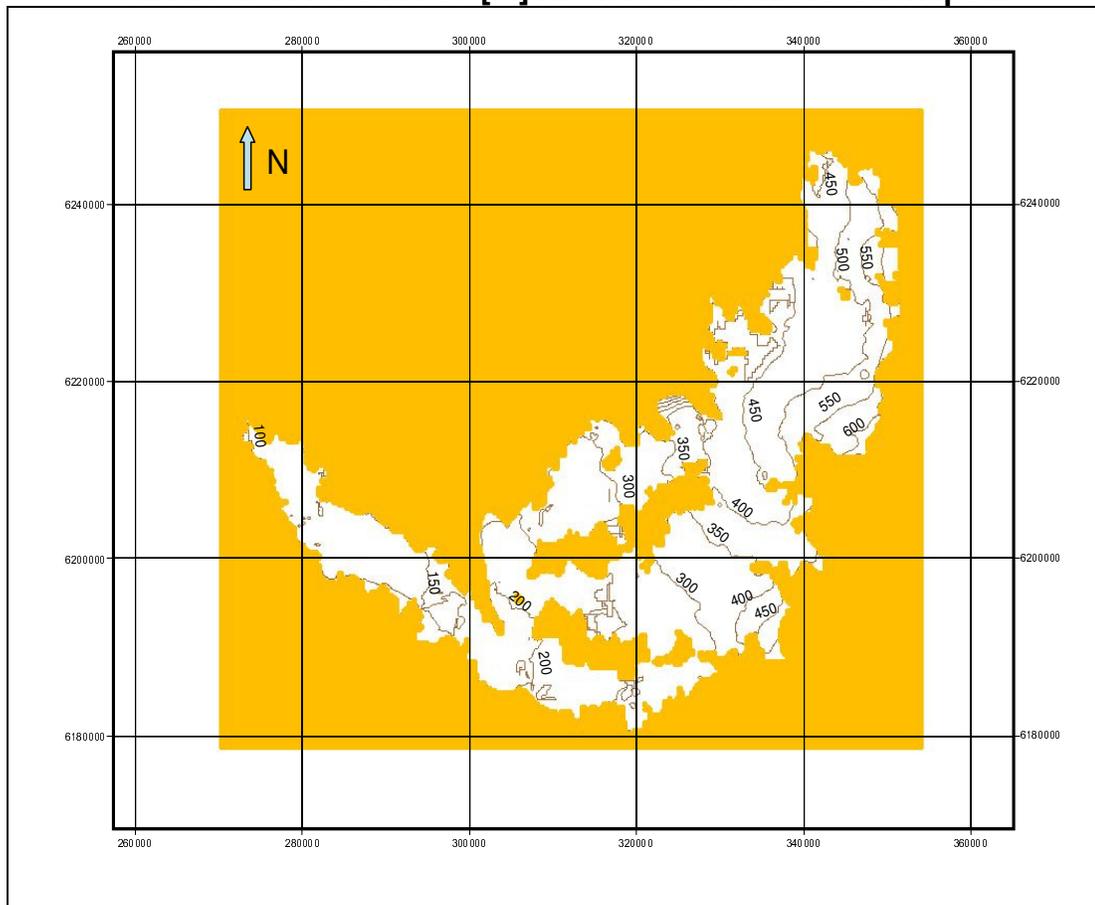
Con respecto a los ríos y esteros, en el modelo se incluyen los principales cauces de la cuenca, tales como los ríos Cachapoal y Claro de Rengo, y los Esteros Zamorano, La Cadena e Idahue. Además se incluyen una serie de esteros menores que ingresan a la cuenca desde el este principalmente, y el río Angostura, el cual sale de la cuenca por el norte. Las características de estos cauces superficiales, se mantienen iguales a las del modelo original, y su distribución se muestra en la Figura 4.29.

En este modelo, el sector de la Laguna San Vicente (parte sur de la cuenca EZ-CC1-1) no fue incluido. De todas maneras, se incorpora la demanda del sector, y la recarga al acuífero asociada a éste, mediante pozos de inyección (más detalles en acápite 4.4.2.6).

4.4.2.3 Nivel de Terreno y Límite Inferior del Acuífero

El modelo considera una distribución espacialmente variable, para la elevación del nivel de terreno y para la profundidad de fondo del acuífero (o borde impermeable inferior), este último constituye el límite inferior del acuífero (DGA, 2005 c). En la Figura 4.30 se muestran los valores de las curvas de nivel que representan la superficie del terreno. Estos valores son distintos a los del modelo original, ya que fueron actualizados de manera posterior, al término del estudio en que se generó dicho modelo.

Figura 4.30
Curvas de nivel cada 50 [m] modelo del acuífero Cachapoal



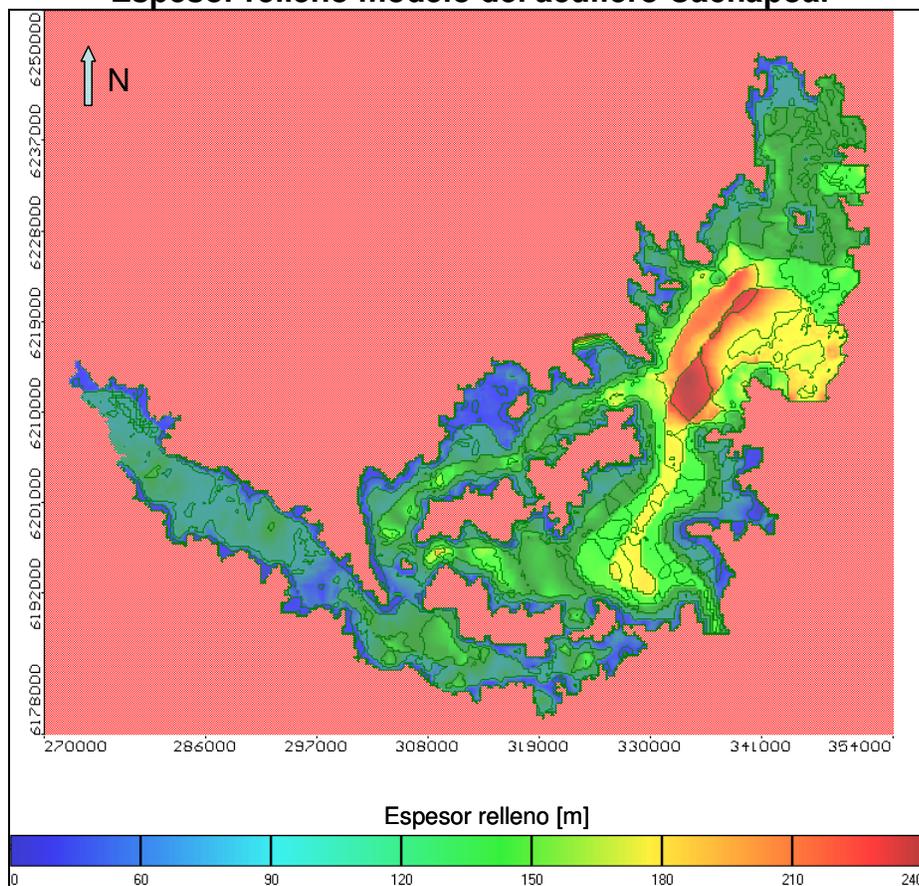
Fuente: Elaboración propia, basado en DGA (2005 c).

De las curvas de nivel se observa que el acuífero, como es de esperarse, tiene cotas más altas a medida que se acerca a la Cordillera de Los Andes (hacia el este) y tiene cotas más bajas a medida que se va acercando al Embalse Rapel.

En la Figura 4.31 se muestra el espesor del acuífero en toda su extensión.

Con respecto al espesor se observa que, en general el sistema acuífero alcanza valores bastante importantes para gran parte de su extensión, con profundidades de hasta 240 [m] en el sector de la confluencia del río Cachapoal con el Estero La Cadena. Los valores de espesor más bajos, se encuentran en todas las laderas, donde las formaciones rocosas comienzan a desarrollarse, y por lo tanto, el relleno es menor.

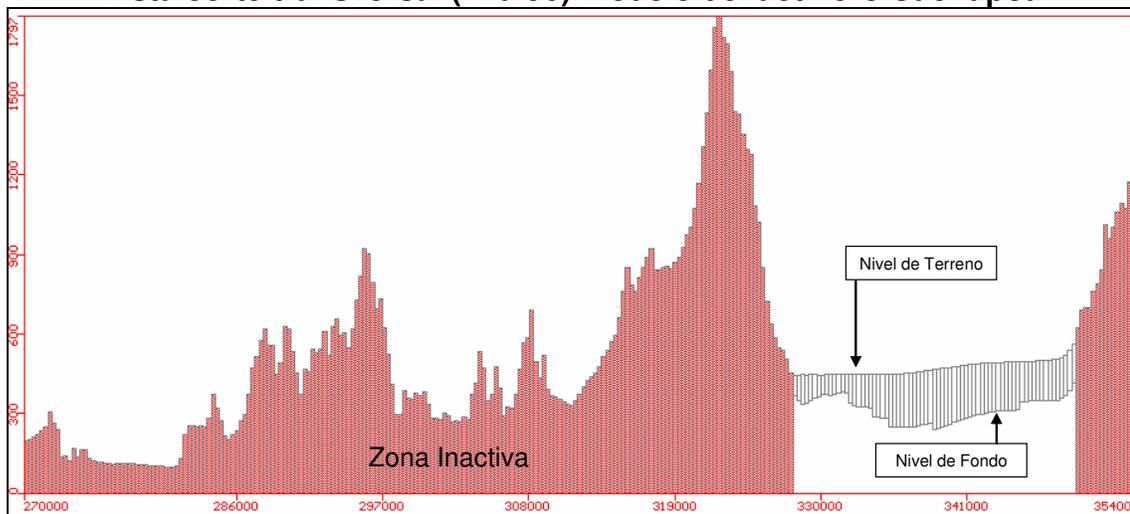
Figura 4.31
Espesor relleno modelo del acuífero Cachapoal



Fuente: Visual Modflow 4.0.

En la Figura 4.32 se muestra, a modo de ejemplo, un corte transversal del acuífero Cachapoal, donde se observan los niveles de fondo y de terreno del acuífero, además de la zona activa e inactiva.

Figura 4.32
Vista corte transversal (Fila 96) modelo del acuífero Cachapoal



Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

4.4.2.4 Parámetros hidrogeológicos

En este acápite se describe la manera en que se determinaron los valores iniciales de la conductividad hidráulica y el almacenamiento.

La porosidad sólo se requiere para el cálculo de transporte de partículas, siendo irrelevante para un modelo de flujo (Von Frey, 2004).

a) Conductividad Hidráulica

Para el modelo utilizado en esta tesis, la conductividad hidráulica fue modificada con respecto a la versión original. En este caso se tomaron inicialmente los valores de conductividad determinados en el estudio de la DGA (2005 c), los cuales fueron calculados a partir de información recolectada para distintos pozos ubicados en el acuífero Cachapoal. Dichos valores se muestran en la Tabla 4.8.

A partir de los valores de la Tabla 4.8, mediante la utilización del software Surfer versión 8.0, se determinó un mapa de conductividades para el acuífero Cachapoal, el cual fue importado a Visual Modflow (teniendo la precaución de que dicha distribución sea coherente con las características sedimentológicas entregadas en el Capítulo 3), derivando en la distribución de conductividades que se muestra en la Figura 4.33. Para la conductividad vertical, al igual que en el modelo original, se consideró que ésta es el 10% del valor de la conductividad horizontal.

Es importante mencionar que, en cada una de las zonas de conductividad se considera que K_x es igual a K_y . Además se considera que el sistema es homogéneo.

La distribución de conductividades de la Figura 4.33, es sólo inicial, ya que luego de las calibraciones en régimen permanente y transiente, dicha distribución fue modificada.

b) Coeficiente de Almacenamiento

Con respecto a este parámetro, en el estudio de la DGA (2005 c), se indica que las pruebas de bombeo no permitieron estimar en forma confiable, el coeficiente de almacenamiento del acuífero, debido básicamente a que sólo consideran mediciones de niveles en el pozo de producción. No obstante, sobre la base de las características granulométricas de los rellenos y la experiencia del DICTUC (realizadores de la versión original del modelo) en la zona, y en otros sectores de características similares, se optó por valores del coeficiente de almacenamiento que pueden variar entre 3 y 15%, adaptándose una distribución espacial similar a la conductividad hidráulica. Este rango de variación, según se indica en el estudio de la DGA (2005 c), se estimó representativo de los rellenos que conforman los acuíferos y de su funcionamiento. La Tabla 4.9 muestra la relación, definida en dicho estudio (que fue utilizada también en este caso), entre el coeficiente de almacenamiento y el valor de conductividad hidráulica del acuífero.

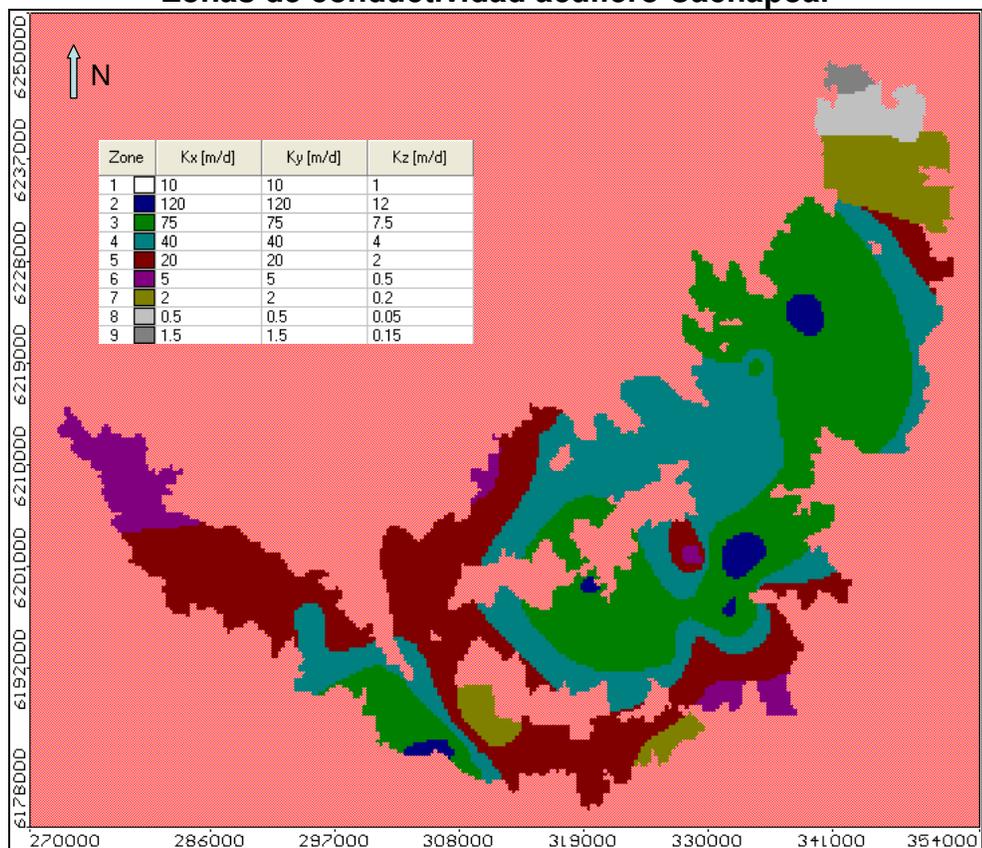
Para efectos de este estudio, se utilizó esta misma correlación entre Permeabilidad y Almacenamiento.

Tabla 4.8
Conductividad hidráulica estimada en pozos con información

Nombre Pozo	UTM E [m]	UTM N [m]	K [m/día]
Fundo Quimávida	315,918	6,212,642	31.48
Huerto Sta. Rosa	315,675	6,212,279	42.26
Fundo El Pidén, Higuera del Medio s/n	314,292	6,212,031	20.35
A.P.R. Rinconada de Parral	310,250	6,208,000	6.12
Fundo Parrales (sector Loreto)	309,800	6,208,950	2.76
José Jorquera Díaz	273,342	6,214,515	0.62
Fundo Quilicura	288,490	6,209,380	3.95
A.P. Pelequén	325,980	6,183,950	1.33
Fundo El Nogal, Carretera 5 Sur km. 122	325,540	6,184,350	1.26
Viña Sta. Natalia	326,700	6,192,850	55.45
Fundo La Granja s/n	300,509	6,191,300	62.50
Parcela el Molle Abajo. Sector La Esperanza	290,322	6,203,114	15.72
Viña Concha y Toro S.A.	297,070	6,194,780	20.38
Parcela nº43, parcelación Rosario de Codao	294,329	6,195,821	44.78
Sector Oficina	299,565	6,193,952	29.59
ESSEL S.A.	292,731	6,195,235	17.59
La Viña s/n	319,596	6,199,387	109.83
Parcela nº10, sector Camarico	326,050	6,196,200	58.80
Fundo El Nogal, sector Rinconada de Malambo	329,641	6,189,321	8.41
Fundo El Peñón	332,068	6,190,139	4.00
Vitivinícola del Maipo S.A.	328,725	6,191,392	16.81
San Rafael de Apalta	329,376	6,201,792	7.49
Fundo Pichiguao, sector Rosario	331,751	6,197,298	114.62
Gener S.A.	332,700	6,201,550	199.74
Parcela Los Carrizos	310,080	6,185,811	2.70
Fundo Reserva Los Maitenes	306,950	6,185,250	105.40
Fundo Rucahue	308,500	6,190,190	1.80
Fundo Rucahue	310,023	6,189,941	0.59
Reserva La Posada	308,038	6,187,248	10.40
Parcelas nº 69 y 70, sector El Tambo	317,900	6,184,250	24.27
Parcela nº60 y 61, sector El Tambo	318,350	6,185,000	23.67
Viña Gracia S.A.	334,755	6,199,323	14.54
Fundo San José Requinoa - Parcela 24	332,302	6,206,159	39.41
Higuera 4 el Crucero	338,200	6,223,176	114.53
Fundo La Primavera, camino a San Ramón	333,565	6,219,218	54.33
Fundo La Primavera, camino a San Ramón	333,786	6,219,148	8.34
Miraflores de Codegua	347,970	6,222,881	44.75
La Leonera - Alto Codegua	350,014	6,231,106	2.50
Baquedano	337,597	6,218,321	80.92
Rengo - Carretera (Las Rosas)	329,291	6,194,420	21.21
Rosario – Delicias	331,290	6,198,169	72.39

Fuente: DGA (2005 c).

Figura 4.33
Zonas de conductividad acuífero Cachapoal



Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

Tabla 4.9
Correlación entre Permeabilidad y Almacenamiento

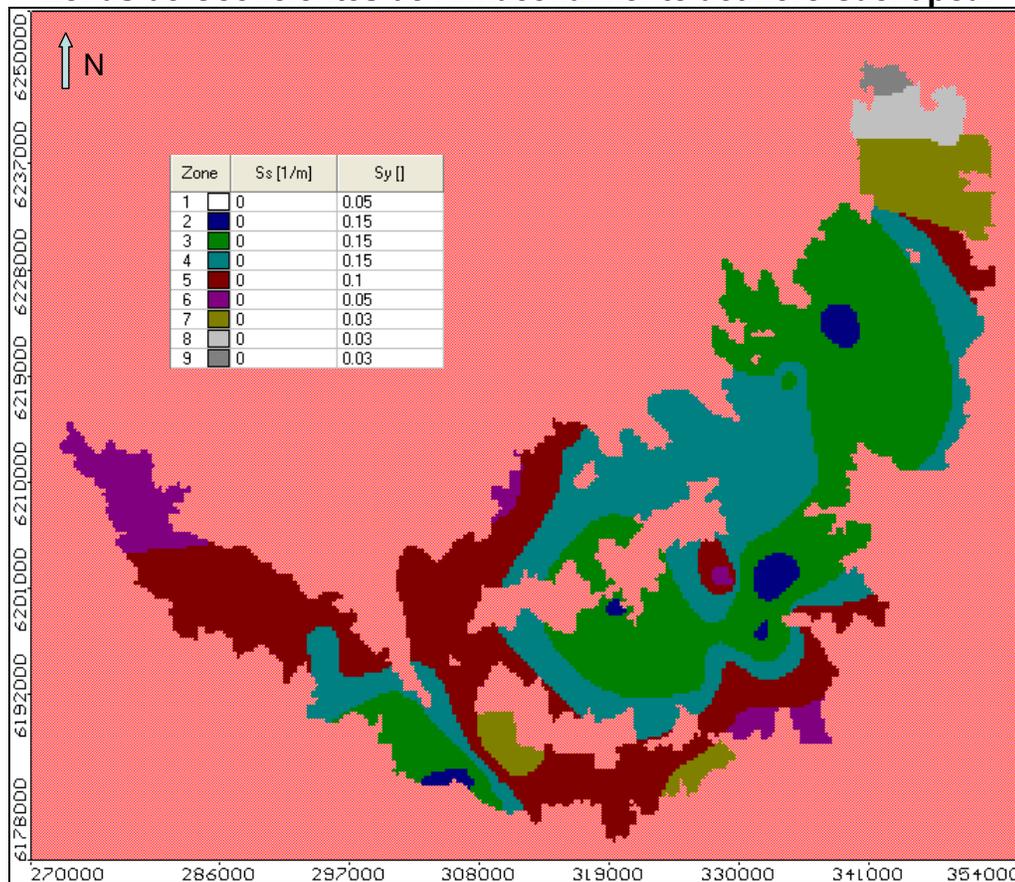
Conductividad Hidráulica	Coefficiente de Almacenamiento
$k \leq 5$ [m/día]	3 %
5 [m/día] $< k \leq 10$ [m/día]	5 %
10 [m/día] $< k \leq 15$ [m/día]	8 %
15 [m/día] $< k \leq 30$ [m/día]	10 %
$k > 30$ [m/día]	15 %

Fuente: DGA (2005 c).

Este acuífero fue modelado como no confinado (acuífero libre), y por ello el coeficiente de almacenamiento se aproxima a la capacidad específica (S_y), despreciándose el valor de almacenamiento específico (S_s). De esta manera, la configuración inicial de este parámetro en Visual Modflow se muestra en la Figura 4.34.

La distribución de almacenamientos de la Figura 4.34, es sólo inicial, ya que luego de las calibraciones en régimen permanente y transiente, dicha distribución fue modificada conforme a los cambios en la conductividad.

Figura 4.34
Zonas de Coeficientes de Almacenamiento acuífero Cachapoa



Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

4.4.2.5 Sectores de balance hídrico subterráneo

Para el modelo utilizado en este trabajo de tesis, los sectores de balance hídrico subterráneo, fueron redefinidos con respecto al modelo original, principalmente para permitir un mejor análisis de los afloramientos e infiltraciones (en los cauces superficiales), de tal manera de llevar a cabo una calibración más precisa del Modelo Integrado.

Estos sectores fueron agrupados en función de las cuencas superficiales (intermedias y de cabecera) mostradas en el acápite 4.3.1. Para no detallar cada una de las cuencas incluidas, en la Tabla 4.10 se indica entre qué nodos del modelo se encuentra cada sector (dichos nodos son especificados en el acápite 4.5.1.2).

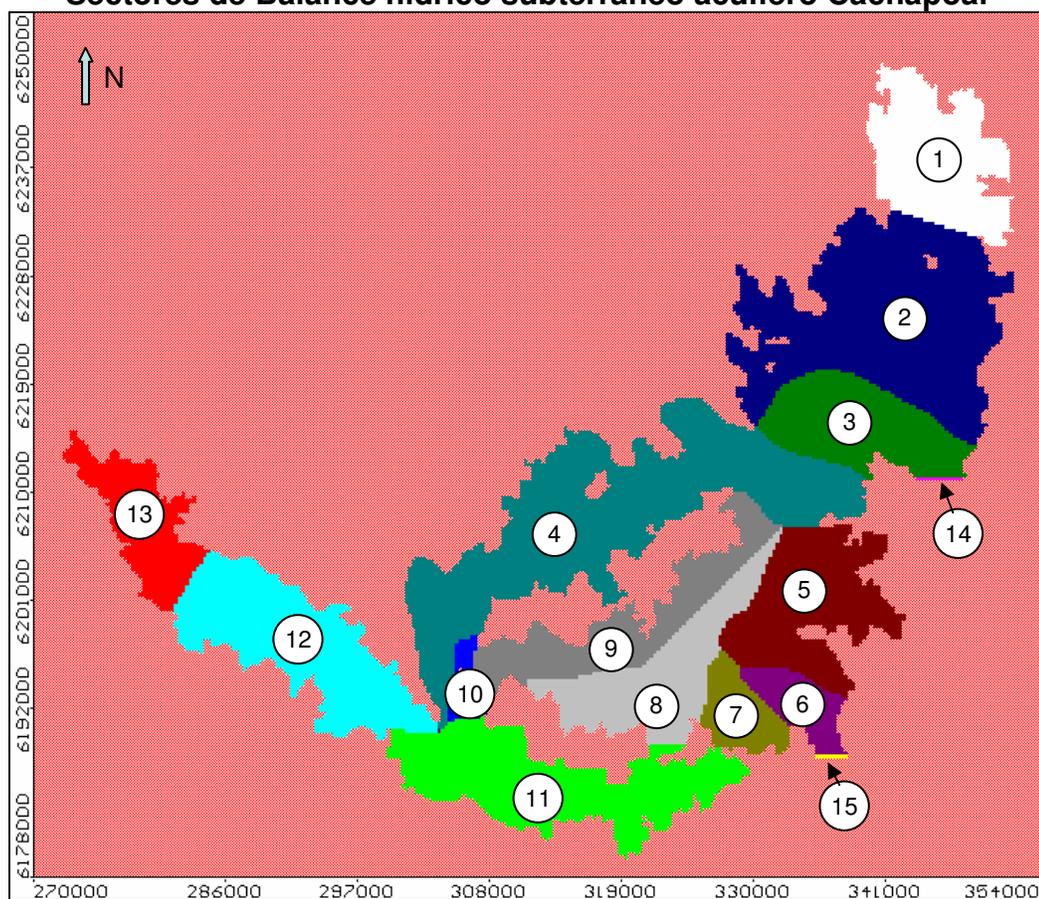
El sector de Codegua, si bien es modelado, no pertenece a la cuenca del río Cachapoa, por lo que no será incluido mayormente en el análisis. Los sectores 14 y 15, fueron definidos para diferenciar la recarga subterránea que ingresaba a los sectores 3 y 6, de la recarga lateral. Con respecto al sector 13, éste queda fuera de la cuenca del Cachapoa, debido a la manera que ésta fue definida en el modelo, pero en estricto rigor sí pertenece a dicha cuenca, ya que ésta es más extensa de lo que se definió en este caso para efectos de la modelación.

Tabla 4.10
Sectores de balance hídrico subterráneo acuífero Cachapoal

Sector acuífero	Ubicación
1	zona de Codegua
2	cuencas del módulo ELC
3	cuencas entre N3-CB y N4-CB
4	cuencas entre N4-CB y N5-CB
5	cuencas entre CR-CC5-1
6	cuencas entre N3-CR y N5-CR (sin incluir CR-CC5-1)
7	cuencas entre N5-CR y N6-CR
8	cuencas entre N6-CR y N7-CR
9	cuencas entre N7-CR y N8-CR
10	cuencas entre N8-CR y N9-CR
11	cuencas del módulo EZ
12	cuencas entre N5-CB y N7-CB
13	desde salida módulo CB hasta fin del acuífero
14	conexión río Cachapoal
15	conexión río Claro de Rengo

En la Figura 4.35 se muestra la distribución de los 15 sectores acuíferos.

Figura 4.35
Sectores de Balance hídrico subterráneo acuífero Cachapoal



Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

4.4.2.6 Recargas y Descargas

Al igual que en el modelo original, en este caso las recargas que ingresan al acuífero se clasifican de la siguiente manera: recarga superficial, recarga lateral, recarga subterránea y recarga desde ríos y esteros.

Para efectos del análisis de resultados, se considerará como recarga total a la suma de la superficial, lateral y subterránea, ya que la recarga desde ríos y esteros se analiza por separado.

a) Recarga Superficial

La recarga superficial fue modificada con respecto al modelo original, en este caso se definió como la suma de las mismas componentes que en el mencionado modelo, pero las formas de calcularlas en este caso son distintas, logrando una aproximación mucho más real que en el estudio de la DGA (2005 c). Las componentes de la recarga superficial son:

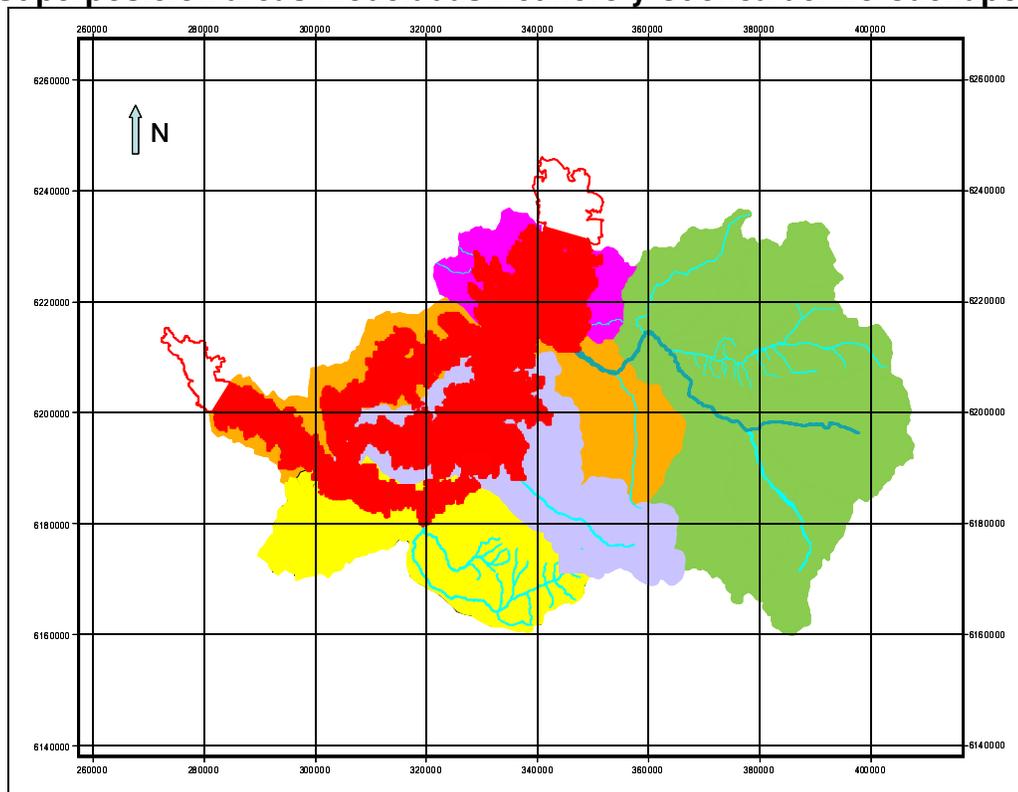
- La infiltración de precipitación directa sobre el acuífero (percolación profunda), obtenida a partir del parámetro PERCF del modelo Sacramento, el cual representa la percolación directa desde el estanque libre de la zona alta del suelo a los estanques libres de la zona baja (para más detalles referirse a Anexo C1), los cuales representan al acuífero.
- La infiltración del riego agrícola.
- Las pérdidas desde canales de riego.

Para el caso de la infiltración obtenida de Sacramento, estos valores se extrajeron de aquellas cuencas que estuvieran sobre el área en que se definió el acuífero. Para ejemplificar mejor esto, en la Figura 4.36 se muestra la superposición del área de modelación de la cuenca y del acuífero del río Cachapoal.

En dicha figura se observa que el área de modelación del acuífero (en rojo) está “contenida” en el área de la cuenca (en todos los módulos, excepto CA), por lo cual las zonas de recarga superficial fueron definidas en función de las cuencas intermedias y de cabecera descritas en el acápite 4.3.1. Con respecto a los Sectores acuíferos 1 y 13 (en la figura sólo con bordes rojos), se aprecia que éstos quedan fuera del área modelada para la parte superficial, por ello se tuvo que definir otras cuencas, que no pertenecen a la hoya del río Cachapoal, pero que son necesarias para determinar las recargas superficiales y recargas laterales. Dichas cuencas, para el Sector 1, se muestran en la Figura 4.37 y para el Sector 13 en la Figura 4.38.

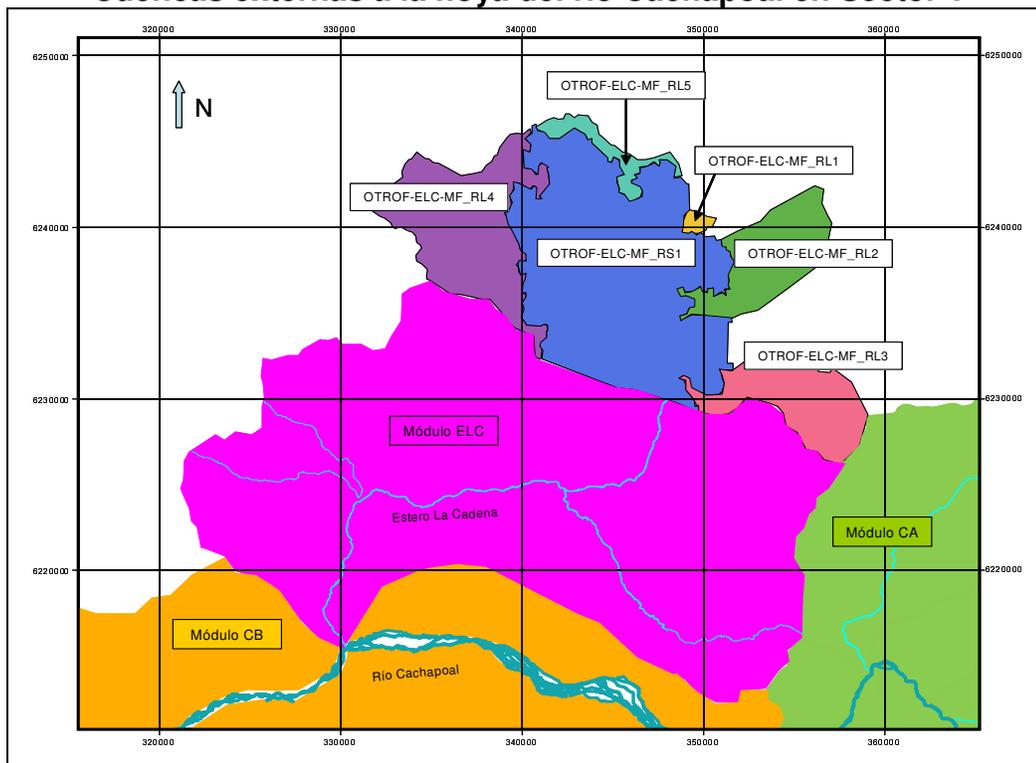
En las Figuras 4.37 y 4.38, las cuencas asociadas a la recarga superficial son: OTROF-ELC-MF_RS1, OTROF-RAPEL-MF_RS1 y OTROF-RAPEL-MF_RS2. El resto de las cuencas se utiliza para definir la recarga lateral.

Figura 4.36
Superposición áreas modeladas Acuífero y Cuenca del río Cachapoal



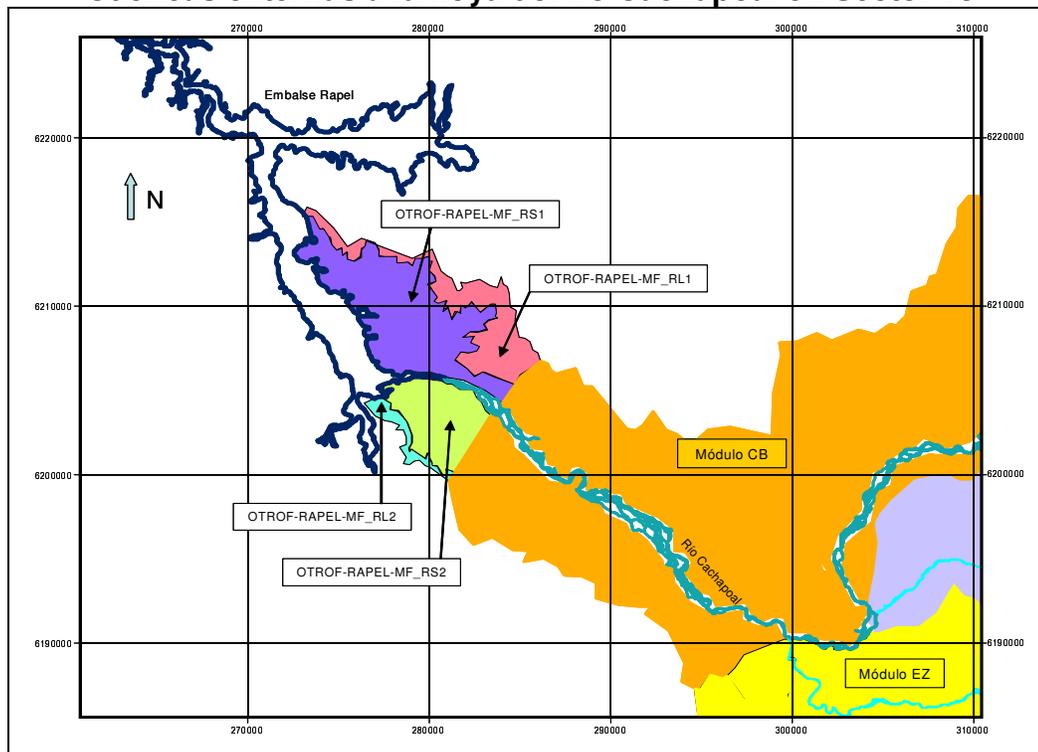
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.37
Cuencas externas a la hoya del río Cachapoal en Sector 1



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 4.38
Cuencas externas a la hoya del río Cachapoal en Sector 13



Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo a lo antes mencionado, agrupando cuencas por criterios de cercanía, las zonas de recarga quedan definidas de la manera que se muestra en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11
Zonas de recarga superficial acuífero Cachapoal

Zona de Recarga	Cuencas superficiales que la componen
2	OTROF-ELC_MF-RS1
3	ELC-ACUIF
4	CB-CI4-1, CB-CI4-2 (2) y CB-CI4-3 (2)
5	CB-CI5-1 (2) y CB-CI5-2 (2)
6	CB-CC5-1 (2)
7	CB-CI5-3 (2)
8	CR-CC5-1 (2)
9	CR-CI4-1 (2), CR-CI4-2 (2), CR-CI5-1 (2), CR-CI5-2, CR-CI6-1 y CR-CI6-2 (2)
10	CR-CI7-1, CR-CI7-2, CR-CI7-3 y CR-CI7-4 (2)
11	CR-CC8-1 (2) y CR-CI8-1 (2)
12	CB-CI5-4 y CR-CI9-1
13	CR-CI9-2 y EZ-CI3-1 (2)
14	EZ-ACUIF
15	EZ-CI3-2 (2) y CB-CI7-2
16	CB-CI7-1
17	OTROF-RAPEL-MF_RS1
18	OTROF-RAPEL-MF_RS2

La Zona 1 es la de recarga cero, que se deja así para no tener que definir recargas sobre las celdas de cuerpos de agua superficiales.

Es importante mencionar que todas las cuencas mostradas en el acápite 4.3.1, que tienen una porción que aporta recarga superficial y otra que aporta recarga lateral, fueron divididas en dos partes para efectos de la modelación en Sacramento, de tal manera de poder separar las componentes mencionadas de la recarga. Por ello en las cuencas asociadas a las zonas recién detalladas, en algunos casos aparece un 2 entre paréntesis, esto indica que es la parte de la cuenca que aporta a la recarga superficial; para la recarga lateral las cuencas van acompañadas con un 1 entre paréntesis (las cuencas que no tienen un 1 ó 2 entre paréntesis no fueron divididas, ya que aportan completamente a la recarga superficial).

Para el caso de EZ-CC1-1 el criterio no fue el mismo mencionado en el párrafo anterior, para dicha cuenca los valores de PERCF fueron divididos, en proporción a las áreas, de la siguiente manera:

- Recarga superficial asociada al sector Laguna San Vicente (EZ_SANVIC (Acuífero)), la cual fue incorporada en conjunto con la lateral, mediante pozos de inyección.
- Recarga lateral para el mismo sector (EZ_SANVIC (Cuen Lat)).
- Recarga superficial para la cuenca EZ-CC1-1 (EZ-ACUIF), descontando el sector de Laguna San Vicente.
- Recarga lateral para dicha porción de cuenca (EZ-Cuenca Lateral Total).

Para el caso de ELC-CC1-1 el criterio fue el mismo que para EZ-CC1-1.

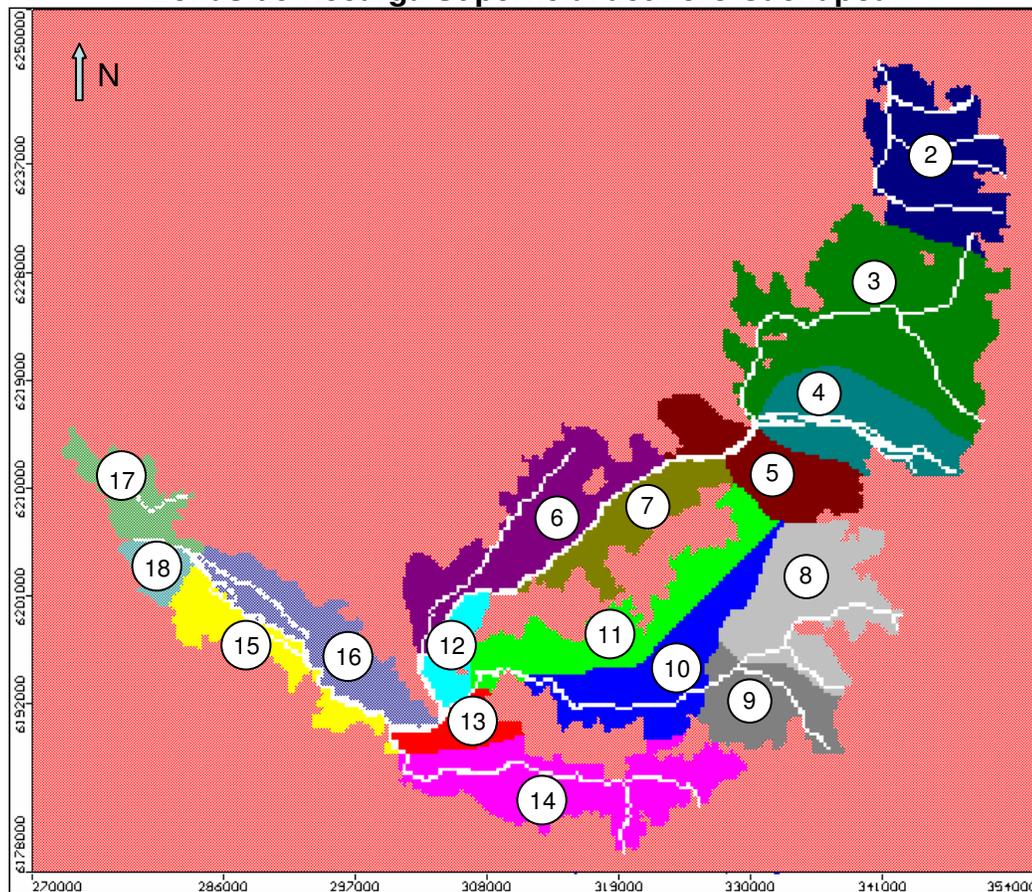
- Recarga superficial para la cuenca ELC-CC1-1 (ELC-ACUIF).
- Recarga lateral para dicha cuenca (ELC-Cuen Lat Este y ELC-Cuen Lat Oeste).

En la Figura 4.39 se muestra la distribución de las 18 zonas de recarga (las líneas blancas corresponden a la Zona 1 antes mencionada).

Con respecto a la infiltración del riego agrícola y las pérdidas desde canales de riego, éstas se determinaron mediante el modelo de simulación operacional, pero fueron agrupadas con respecto a las zonas de recarga ya indicadas. En el acápite 4.5.1.3 se detallan los cálculos asociados a estos ítems.

Una vez que se determinaron todos los valores que componen la recarga superficial, éstos fueron sumados y luego se creó una macro que permitió modificar el archivo asociado a esta recarga en Visual Modflow. En la Tabla 4.12 se muestra la tasa de recarga superficial de cada zona para el caso de régimen permanente (promedio de los valores en régimen transiente). El detalle de los valores asociados a la recarga superficial de cada zona, tanto para la calibración en régimen permanente como transiente, se entregan en el Anexo C7.

Figura 4.39
Zonas de Recarga Superficial acuífero Cachapoal



Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

Tabla 4.12
Recarga Superficial en régimen permanente

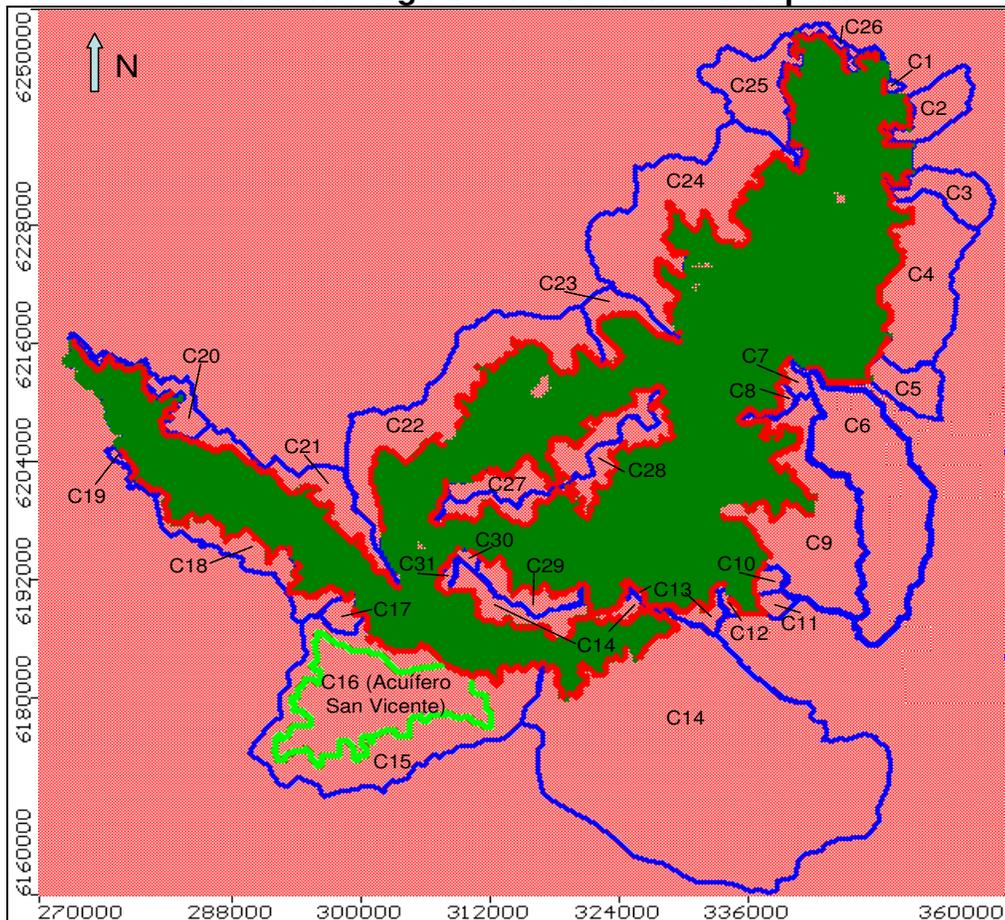
Zona Recarga	Tasa Recarga [mm/día]
2	318.79
3	395.47
4	93.10
5	294.87
6	299.78
7	369.58
8	307.29
9	321.63
10	316.22
11	345.16
12	271.78
13	381.45
14	321.96
15	298.94
16	349.41
17	220.11
18	370.18

b) Recarga Lateral

La recarga lateral o recarga de piedemonte, fue modificada con respecto al modelo original, en este caso los valores también fueron obtenidos a partir del parámetro PERCF del modelo Sacramento, pero en este caso asociado a las cuencas laterales que se muestran en la Figura 4.40 y que se detallan en la Tabla 4.13. Además, se tuvieron que definir cuencas (fuera de la hoya del Cachapoyal) para determinar la recarga lateral para los Sectores acuíferos 1 y 13 (ver Figuras 4.37 y 4.38).

La recarga lateral fue introducida al modelo mediante pozos de inyección, asociando cierta cantidad de éstos a una cuenca determinada (el número de pozos por cuenca que se entrega en la Tabla 4.13, está asociado al número de celdas que definen el contorno de cada cuenca). Dichos pozos se observan (en color rojo) en la Figura 4.40 en gran parte del borde del acuífero.

Figura 4.40
Cuencas Recarga Lateral acuífero Cachapoyal



Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

Con respecto al sector de Laguna San Vicente (no incluido en el modelo), como ya se dijo anteriormente, la recarga superficial y lateral fue incluida mediante pozos de inyección, asociados a una porción de la cuenca de cabecera EZ-CC1-1, que se observa en la Figura 4.40. A esta recarga le fue descontada la demanda existente en el mencionado sector, para así incorporar dicha demanda al modelo del acuífero.

Una vez que se determinaron los valores de la recarga lateral, éstos fueron distribuidos en los pozos de inyección respectivos, y mediante una macro se creó el archivo .VMW (archivo de Visual Modflow donde se guardan la información de pozos de bombeo e inyección), para introducir los mencionados pozos al modelo.

En la Tabla 4.13 también se muestra el caudal de recarga lateral por cuenca (el caudal de recarga por pozo corresponde al valor de recarga por cuenca dividido en el número de pozos) para el régimen permanente (promedio de los valores en régimen transiente). El detalle de los valores asociados a la recarga lateral por pozo de inyección, se entrega en el Anexo C7, tanto para la calibración en régimen permanente como transiente.

Tabla 4.13
Cuencas Recarga Lateral acuífero Cachapoal

Código Figura	Cuenca	N° Pozos Inyección	Recarga Lateral Cuenca [m³/día]
C1	OTROF-ELC-MF_RL1	5	62.76
C2	OTROF-ELC-MF_RL2	32	92.98
C3	OTROF-ELC-MF_RL3	20	111.00
C4	ELC-Cuen Lat Este	64	6,898.14
C5	CB-CI3-1	7	447.64
C6	CB-CI4-2 (1)	7	515.96
C7	CB-CI4-3 (1)	11	1,038.04
C8	CB-CI5-2 (1)	23	2,166.73
C9	CR-CC5-1 (1)	114	13,957.92
C10	CR-CI5-1 (1)	9	1,278.62
C11	CR-CI4-1 (1)	6	1,377.98
C12	CR-CI4-2 (1)	10	1,234.72
C13	CR-CI6-2 (1)	35	1,161.42
C14	EZ-Cuenca Lateral Total	221	47,336.23
C15	EZ_SANVIC (Cuen Lat)	4	15,277.12
C16	EZ_SANVIC (Acuífero)	4	749.98
C17	EZ-CI3-1 (1)	22	7,495.37
C18	CB-CI7-2 (1)	93	14,585.07
C19	OTROF-RAPEL-MF_RL2	17	2,109.01
C20	OTROF-RAPEL-MF_RL1	65	6,836.96
C21	CB-CI7-1 (1)	90	4,619.03
C22	CB-CC5-1 (1)	134	19,782.94
C23	CB-CI5-1 (1)	44	4,901.16
C24	ELC-Cuen Lat Oeste	139	9,831.03
C25	OTROF-ELC-MF_RL4	43	200.61
C26	OTROF-ELC-MF_RL5	35	570.38
C27	CB-CI5-3 (1)	105	34,945.82
C28	CR-CC8-1 (1)	141	7,180.82
C29	CR-CI7-4 (1)	52	9,343.30
C30	CR-CI8-1 (1)	8	2,387.66
C31	EZ-CI3-2 (1)	9	6,739.93

c) Recarga Subterránea

Las recargas subterráneas corresponden a los ingresos de los acuíferos asociados a las cuencas de los ríos Cachapoal, Claro de Rengo, Peuco y del Estero Codegua. Para los últimos dos casos se mantuvieron los bordes de altura constante con los que fueron definidos en el modelo original (ver acápite 4.4.2.2), mientras que para los dos primeros se reemplazaron dichos bordes por pozos de inyección (Sectores acuíferos 14 y 15), que permiten que al acuífero ingrese la percolación directa (parámetro PERCF del modelo Sacramento) de las cuencas de las partes altas (que para efectos del modelo no tienen acuífero) de los mencionados ríos (13 pozos de inyección para la conexión del río Cachapoal y 9 para la del río Claro de Rengo).

Las cuencas intermedias y de cabecera, asociadas a esta recarga subterránea en las conexiones con el río Cachapoal y Claro de Rengo, se muestran en la Tabla 4.14.

En la Tabla 4.14 también se muestra el caudal de recarga subterránea por conexión para el régimen permanente (promedio de los valores en régimen transiente). El detalle de los valores asociados a la recarga subterránea por pozo de inyección, se entrega en el Anexo C7, junto con los valores de la recarga lateral.

Tabla 4.14
Cuencas asociadas a la Recarga Subterránea en conexión con río Cachapoal y río Claro de Rengo

Conexión	Cuencas que aportan a la recarga	Recarga Subterránea [m³/día]
Río Cachapoal	CA-CC1-1, CA-CI2-1, CA-CI2-2, CA-CC2-1, CA-CI3-1, CA-CI3-2, CA-CC3-1, CA-CI4-1, CA-CI4-2, CA-CI4-3, CA-CC4-1, CA-CI5-1, CA-CI5-2, CB-CI2-1, CB-CI2-2, CB-CC2-1, CB-CI3-2	627,229.54
Río Claro de Rengo	CR-CC1-1, CR-CI2-1, CR-CI3-1, CR-CI3-2, CR-CI3-3, CR-CI3-4, CR-CI3-5	104,214.45

d) Recarga desde ríos y esteros

La recarga (infiltración) desde ríos y esteros es calculada automáticamente por el modelo, en función del nivel piezométrico, de la conductancia del lecho respectivo y de la altura de agua en el río (los dos últimos ítems se mantuvieron igual con respecto al modelo original).

En la Tabla 4.15 se muestran tasas de infiltración promedio (valor medio de los resultados de cada período del régimen transiente), para cada sector de balance indicado en la Tabla 4.10.

Más antecedentes con respecto a la recarga desde ríos y esteros, se entregan en el acápite 4.5.

e) Descargas

Con respecto a las descargas o salidas del acuífero se produce de tres maneras:

- *Salida subterránea hacia el Embalse Rapel:* como ya fue mencionado anteriormente, esta salida fue modelada originalmente como un borde de altura constante, y para este caso dicha definición se mantuvo igual.
- *Flujo acuífero – río y esteros (afloramiento):* al igual que para el caso de la infiltración, el afloramiento es calculado automáticamente por el modelo, según los mismos criterios indicados para dicho caso. En la Tabla 4.15 se muestran tasas de afloramiento promedio (valor medio del total de períodos del régimen transiente), para cada sector de balance indicado en la Tabla 4.10.

Tabla 4.15
Tasas de Infiltración y Afloramiento por Sector Acuífero

Sector Acuífero	Tasa Infiltración [mm/día]	Tasa Afloramiento [mm/día]
1	0.00	0.39
2	0.00	0.07
3	3.13	3.86
4	0.12	3.21
5	0.00	0.02
6	1.53	4.83
7	0.00	1.48
8	0.00	6.41
9	0.04	0.74
10	0.06	1.05
11	0.00	0.70
12	0.06	1.27
13	0.00	0.51

- *Bombeo de pozos:* el funcionamiento de los pozos de bombeo existentes en la cuenca, implican una salida de agua desde el acuífero.

4.4.3 Calibración del Modelo de Aguas Subterráneas

Es importante mencionar que para llevar a cabo esta calibración, fue necesario que el Modelo Integrado estuviera completamente implementado, ya que las recargas que ingresan al acuífero, dependen de la parte superficial del mencionado modelo. Por lo tanto, los resultados aquí expuestos, forman parte de la calibración simultánea de todas las componentes del Modelo Integrado.

4.4.3.1 Calibración Régimen Permanente

La calibración en régimen permanente tiene como propósito determinar de manera aproximada, la distribución adecuada de conductividades hidráulicas (K) en el modelo, para que la posterior calibración en régimen transiente no resulte tan complicada. En este caso el valor de la capacidad de almacenamiento (S), no es relevante para la

calibración, tal como se muestra en la ecuación de flujo para acuíferos no confinados, donde se observa que para el régimen permanente, la variación de la cota piezométrica con el tiempo tiende a cero, por lo cual el modelo se hace independiente de S.

$$\frac{\partial h}{\partial t} \rightarrow 0 \Rightarrow \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (4.3)$$

a) Propiedades Hidrogeológicas Iniciales

Las conductividades hidráulicas iniciales fueron las mostradas en el acápite 4.4.2.4.

b) Niveles piezométricos iniciales

Como nivel piezométrico inicial, fue utilizado el archivo .HDS (donde se almacenan los niveles para todas las celdas del modelo) de la calibración en régimen natural, del modelo original de la DGA.

c) Recargas

En esta calibración, para la recarga superficial, lateral y subterránea, se utilizó el promedio de los valores en régimen transiente del período Abril 1999 – Marzo 2005. Dichos valores se entregan en el acápite 4.4.2.6 y en el Anexo C7. Estos valores de recarga son bastante aproximados, ya que éstos están asociados a un período de tiempo distinto al de los niveles observados, pero como en este caso se busca ir ajustando el modelo para la posterior calibración en régimen transiente, se estimó que los valores promedio constituían una buena aproximación.

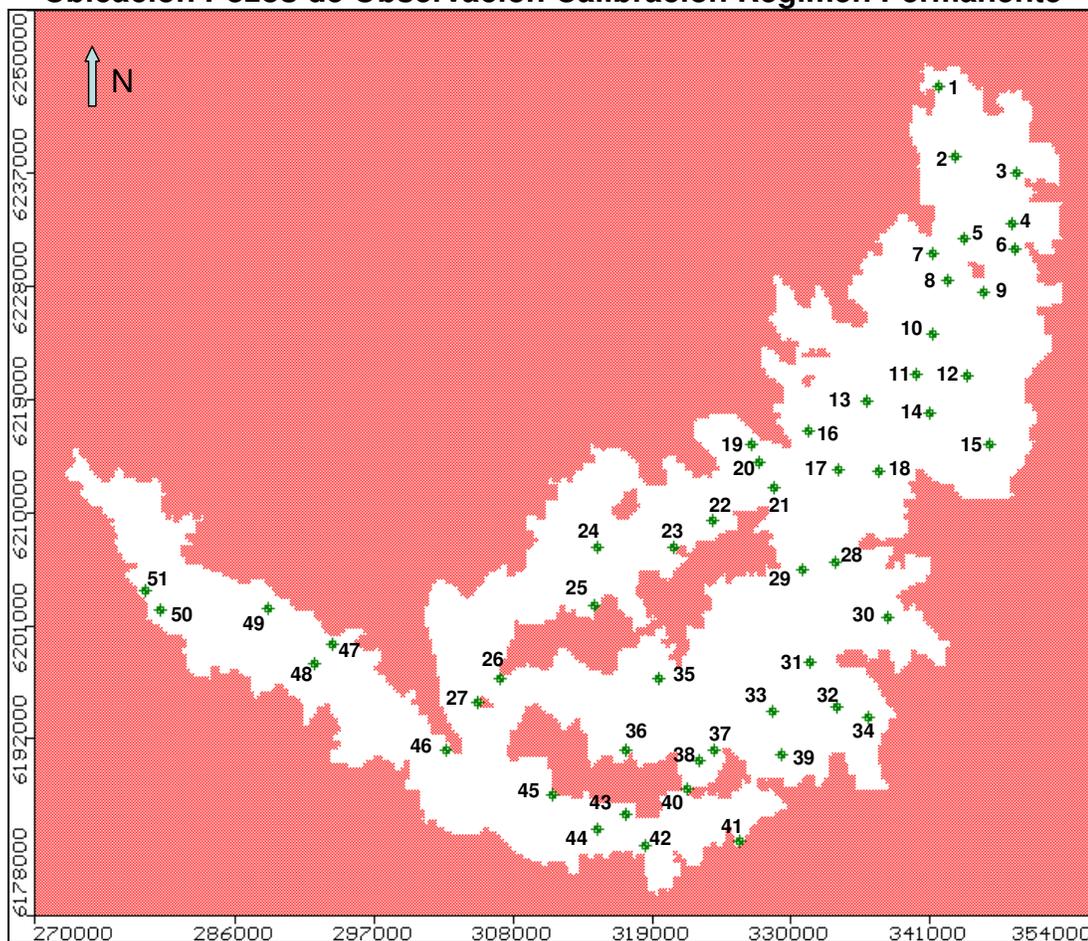
d) Pozos de Observación

Para este trabajo, la calibración en régimen permanente se refiere a una aproximación del sistema a su estado natural, es decir, se utilizan datos de niveles observados hasta el año 1985 (la mayoría de los datos son de la década de los 60), y se hace el supuesto que el número de pozos para la época era muy reducido y por lo tanto, la afección al acuífero era despreciable. Esta metodología es la misma utilizada para la calibración en régimen natural en el modelo original (DGA, 2005 c).

En la Figura 4.41 se muestra la ubicación de los pozos de observación usados para la calibración en régimen permanente; además, en la Tabla 4.16 se entregan las coordenadas UTM, cotas y niveles estáticos (NE) de dichos pozos, datos con que fueron introducidos dichos pozos al modelo.

Los datos de la Tabla 4.16 fueron extraídos del estudio de la DGA (2005 c), pero las coordenadas fueron verificadas en el modelo, de tal manera que ningún pozo quedara fuera del área activa, ni sobre algún otro elemento del modelo (ríos, bordes constantes, etc.). Además, los valores de cota de terreno son los que el modelo entrega a partir de las coordenadas de los pozos. También se incorporó un pozo más, Viña El Molino, cuya información fue extraída de los datos de niveles proporcionados por el CIRH (Centro de Información de Recursos Hídricos) de la DGA.

Figura 4.41
Ubicación Pozos de Observación Calibración Régimen Permanente



Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

Tabla 4.16
Datos Pozos de Observación Calibración Régimen Permanente

N°	Nombre	UTM E [m]	UTM E [m]	NE [m.s.n.m]	Cota Terreno [m.s.n.m]	Cota NE [m.s.n.m]	Fecha NE
1	APR Angostura	341,730	6,243,890	3.5	423.86	420.36	Ago-77
2	AP San Francisco de Mostazal	343,000	6,238,350	2.4	474.57	472.17	Mar-69
3	AP La Punta	347,850	6,237,000	3.4	521.15	517.75	Mar-67
4	AP Codegua	347,533	6,232,988	37.8	561.86	524.06	-
5	Parcela Las Dos Marías	343,719	6,231,790	23	500.81	477.81	Oct-69
6	Fundo Santa Filomena	347,700	6,231,013	14.5	546.3	531.8	Ago-68
7	AP Graneros Santa Ana	341,230	6,230,585	4.7	482.36	477.66	Sep-68
8	Indura Graneros	342,356	6,228,522	12.5	473.93	461.43	Ago-69
9	APR La Compañía	345,263	6,227,505	1.7	493.07	491.37	Mar-67
10	Fiat Chilena	341,197	6,224,250	20	465.47	445.47	Abr-69
11	Barrio Industrial Rancagua	339,922	6,221,037	39.6	479.09	439.49	May-69
12	APR Molinos Quemados	343,960	6,220,912	42.2	495.61	453.41	Mar-81
13	Fundo San Pedro	335,996	6,218,888	45.4	470.22	424.82	Jul-68
14	AP Rancagua Membrillar	340,967	6,217,970	69.5	506.18	436.68	-
15	AP Rancagua Sanchina	345,696	6,215,365	119.9	567.52	447.62	Sep-69
16	APR Punta de Cortés	331,332	6,216,514	33	441.37	408.37	Abr-82

Continuación Tabla 4.16
Datos Pozos de Observación Calibración Régimen Permanente

N°	Nombre	UTM E [m]	UTM E [m]	NE [m.s.n.m]	Cota Terreno [m.s.n.m]	Cota NE [m.s.n.m]	Fecha NE
17	AP El Olivar	333,755	6,213,435	71.3	469.36	398.06	Ene-70
18	Centro Frutícola O'Higgins	336,978	6,213,269	106	501.64	395.64	Nov-68
19	AP Lo Miranda	326,935	6,215,476	11.8	398.27	386.47	Ago-67
20	Fundo El Bosque	327,491	6,214,024	14.4	402.6	388.2	Nov-63
21	APR Olivar Bajo - Rincón del Abra	328,617	6,211,992	29.1	414.76	385.66	Mar-69
22	APR Copequén	323,778	6,209,386	6.3	367.41	361.11	Sep-66
23	AP Coinco	320,711	6,207,203	5.4	324.63	319.23	Ene-68
24	Viña El Molino	314,635	6,207,264	7.24	286.8	279.56	Jul-70
25	APR El Rulo	314,382	6,202,661	1.8	283.12	281.32	Sep-66
26	APR Zúñiga	306,971	6,196,788	4.2	224.04	219.84	Mar-68
27	APR Toquihua	305,201	6,194,848	4.3	207.24	202.94	May-68
28	AP Requínoa	333,485	6,206,005	61.7	424.59	362.89	-
29	APR El Abra	330,852	6,205,419	37.7	402.13	364.43	Ago-67
30	APR Los Boldos	337,655	6,201,681	20.3	377.91	357.61	Jul-83
31	AP Rosario	331,470	6,198,114	12.4	345.45	333.05	Oct-54
32	APR Lo de Lobos	333,654	6,194,541	6.4	351.89	345.49	Mar-71
33	APR Lo Cartagena	328,585	6,194,134	1.7	310.69	308.99	Sep-66
34	APR Huilquío de Cerrillos	336,157	6,193,759	2.2	387.11	384.91	Oct-68
35	AP Quinta de Tilcoco	319,525	6,196,810	8.7	273.46	264.76	Sep-70
36	APR Corcolén	316,902	6,191,129	1.5	249.14	247.64	Jul-79
37	APR Panquehue de Malloa	323,878	6,191,052	2.5	281.6	279.1	Ago-66
38	APR Caracoles	322,748	6,190,305	1.2	273.11	271.91	Sep-77
39	Fundo La Granja	329,197	6,190,757	5.7	318.54	312.84	Ene-58
40	AP Malloa	321,760	6,188,067	1.3	263.26	261.96	Jul-74
41	AP Pelequén	325,925	6,183,922	4.9	275.11	270.21	Mar-68
42	APR El Tambo	318,429	6,183,502	11	248.34	237.34	Ago-68
43	APR Requehua	316,872	6,186,033	1.7	235.35	233.65	Abr-67
44	APR Rastrojos	314,704	6,184,809	1.9	226.04	224.14	Sep-66
45	APR Pueblo de Indios	311,047	6,187,520	3.4	223.74	220.34	Ene-67
46	AP Peumo	302,677	6,191,152	5.1	177.92	172.82	Ago-66
47	La Rosa Sofrucó 1	293,650	6,199,550	0.7	145.68	144.98	Abr-69
48	La Rosa Sofrucó 2	292,192	6,197,982	3	144.93	141.93	Jun-69
49	AP Las Cabras	288,569	6,202,377	4	132.31	128.31	-
50	APR Cerro Pueblo Patagua	280,076	6,202,305	6.2	115.8	109.6	Ene-67
51	Fundo Las Juntas	278,865	6,203,756	2.3	110.54	108.24	Mar-66

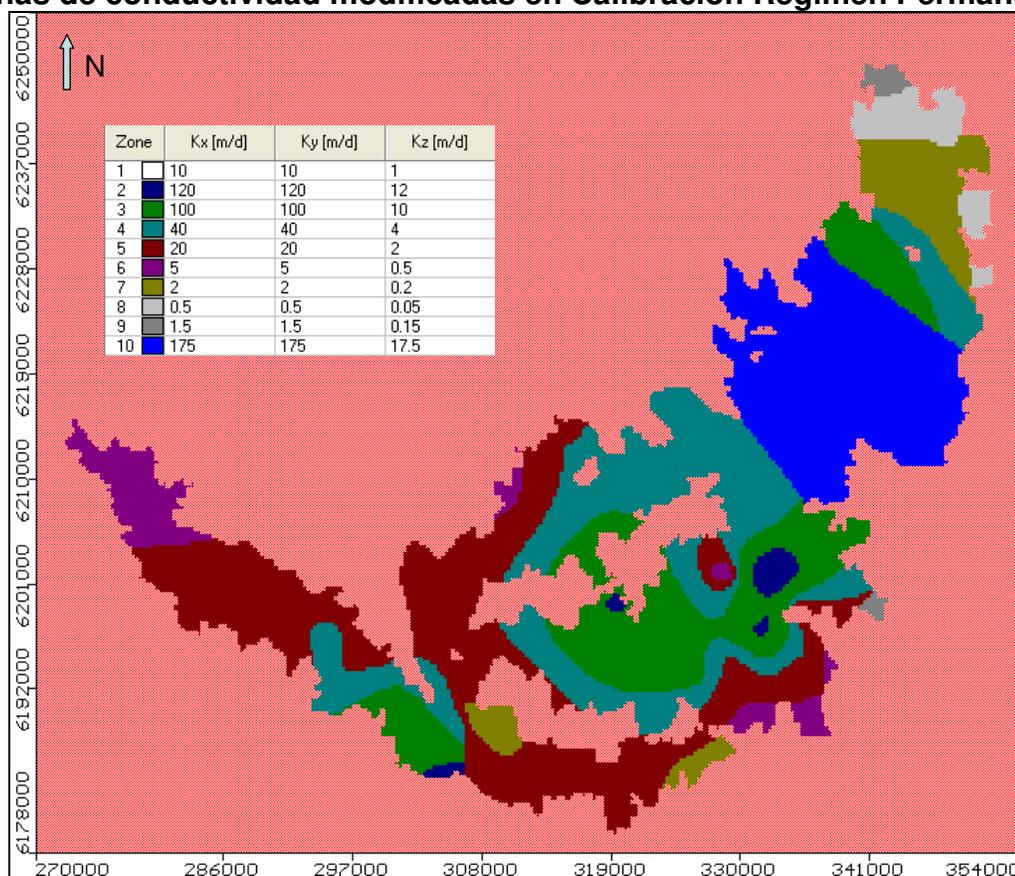
e) Resultados Calibración

Luego de terminado el proceso de calibración, la distribución de conductividades es la que se muestra en la Figura 4.42. Se observa que con respecto a la distribución inicial, hay una modificación en la parte baja del acuífero (confluencia Estero Zamorano con el río Cachapoal, Sectores acuíferos 11 y 12), la cual obedece a que al haber conductividades iniciales altas, se producía un secado de celdas importante, por ello se aumentó la extensión de la Zona 5, para que el flujo por dicha parte del acuífero fuera menos fuerte. También se hizo una modificación en la parte alta del acuífero (Sectores acuíferos 2 y 3), en la cual se agregó otra zona de conductividad (Zona 10), que

permitió que hubiera mayor flujo y los niveles piezométricos no fueran tan altos, y por lo tanto, mejorar los resultados de la calibración. Por último, también se observa que en la Zona 4 se aumentó la conductividad de 75 a 100 [m/día], esto con el mismo propósito de la creación de la Zona 10.

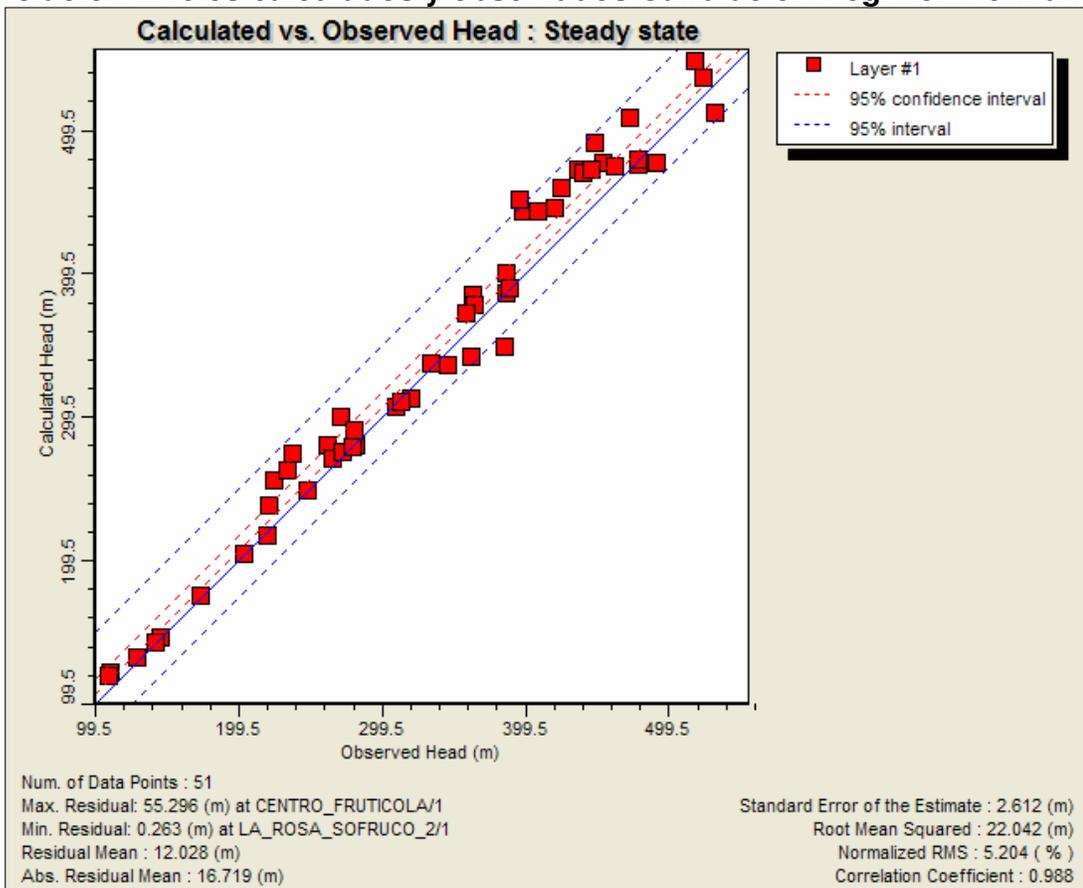
En la Figura 4.43 se muestra el ajuste entre los niveles observados y simulados. Se observa que en términos generales la correlación es satisfactoria, con un error promedio de 12.03 [m], un error promedio absoluto de 16.72 [m] y un error cuadrático medio normalizado de 5.2%; valores bajos teniendo en cuenta el tamaño del modelo y las aproximaciones hechas en la construcción de éste. También es importante mencionar que, los mayores errores en la calibración de niveles piezométricos (hasta 55 [m]), se constatan en aquellos sectores del acuífero, en que las profundidades de éste están en torno a los 200 [m], por lo que en este sentido, el error no constituye más del 25% del espesor total del acuífero; además, si se considera que el error promedio absoluto es de 16.72 [m], y que los pozos se ubican en sectores en que los espesores mínimos están en torno a los 100 [m] (ver Figuras 4.31 y 4.41), el error es menor al 20% de dicho espesor mínimo.

Figura 4.42
Zonas de conductividad modificadas en Calibración Régimen Permanente



Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

Figura 4.43
Correlación niveles calculados y observados Calibración Régimen Permanente

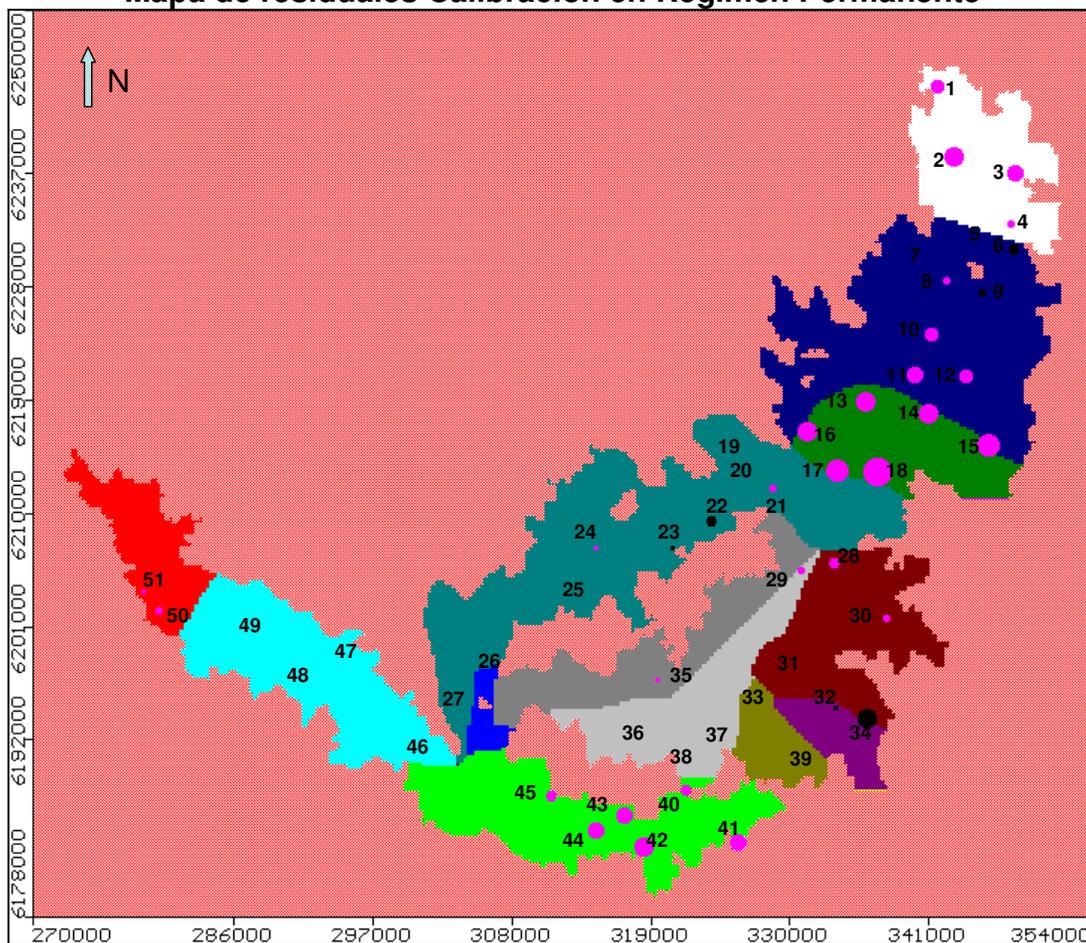


Fuente: Visual Modflow.

En la Figura 4.44 se muestra un mapa de residuales de la calibración en régimen permanente, en dicha figura los círculos fucsia representan aquellos pozos en que el modelo sobrestima el valor del nivel piezométrico (el tamaño está asociado a la magnitud del error), los círculos negros representan aquellos pozos en que el modelo subestima el mencionado nivel (donde no se observan puntos negros o fucsias, es porque el error es despreciable). Se observa que en los Sectores Acuíferos 1, 2, 3 y 11; el modelo sobrestima los niveles en gran parte de los pozos de observación, donde el mayor error está asociado al pozo 18 (el error es de 55.3 [m]), lo que coincide con la información proporcionada en la Figura 4.43. La mayor subestimación se observa en el pozo 34 (el error es de 36.6 [m]), y en los Sectores Acuíferos 8, 9 y 12 es donde se observa el menor error en la estimación.

En base a los resultados obtenidos, se estima que éstos son satisfactorios, considerando que la calibración en régimen permanente tiene por objeto determinar, de manera más precisa, la distribución de conductividades, para que el ajuste de niveles sea más fácil en la calibración en régimen transiente.

Figura 4.44
Mapa de residuales Calibración en Régimen Permanente



Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

4.4.3.2 Análisis de sensibilidad

Previo a la realización de la calibración en régimen transiente, se hizo un análisis de sensibilidad, con respecto a los niveles piezométricos iniciales utilizados y al esquema de solución usado en el modelo.

Con respecto a los niveles piezométricos iniciales, se observó que los resultados de la calibración en régimen permanente, no se ven afectados por los valores iniciales de dicha variable. Se probaron distintos valores, en un rango entre 450 y 625 [m], y en ningún caso hubo problemas, obviamente si se imponen valores demasiado pequeños o muy grandes (irreales), el modelo no converge.

Con respecto al esquema de solución utilizado, en los resultados mostrados para la calibración en régimen permanente, se utilizó el solver SIP, con los parámetros que se muestran en la Figura 4.45.

Dentro del mismo solver SIP, se probó modificando los parámetros de la Figura 4.45, pero a excepción de la variable de aceleración (ACCL) los resultados no se afectan mayormente, o si lo hacen éstos empeoran. En el caso de la variable de aceleración, se

probó con un valor de 0.1 y luego 0.01, y en ambos casos los resultados de la calibración mejoran, pero el modelo se demora más en converger, lo que puede ser perjudicial pensando en la calibración en régimen transiente (puede tomar mucho tiempo).

Figura 4.45
Parámetros del solver SIP utilizados en la Calibración en Régimen Permanente

Max. iterations (MXITER)	2000
# Iteration variables (NPARM)	9
Acceleration variable (ACCL)	0.3
Head change criterion (HCLOSE)	0.01

Fuente: Visual Modflow.

Luego se probaron los otros solver disponibles en Visual Modflow 4.0 (y para ellos se variaron los parámetros asociados), entre los que se cuentan PCG, SOR y WHS, y en el único caso que se obtuvieron mejores resultados fue en SOR, pero los resultados de este solver, dependen demasiado de los niveles piezométricos iniciales que se consideren, por lo tanto, se optó por seguir usando el solver SIP (que no se afecta por los niveles iniciales del acuífero) con los parámetros de la Figura 4.45.

4.4.3.3 Calibración Régimen Transiente

Para la calibración en régimen transiente, a diferencia del caso en régimen permanente, sí se considera al sistema en funcionamiento (pozos de bombeo operando) y el período asociado (de calibración) corresponde a Abril 1999 – Marzo 2005. El intervalo de tiempo de la simulación es mensual, por lo tanto se tienen 72 períodos.

a) Propiedades Hidrogeológicas Iniciales

La distribución de conductividades (K) inicial que se utilizó, fue la obtenida luego de realizada la calibración en régimen permanente, que se mostró en la Figura 4.42. Con respecto al coeficiente de almacenamiento (S), la distribución inicial está asociada a la de las conductividades, según lo expuesto en el acápite 4.4.2.4, de esta manera la configuración inicial de este parámetro se muestra en la Figura 4.46.

b) Niveles piezométricos iniciales

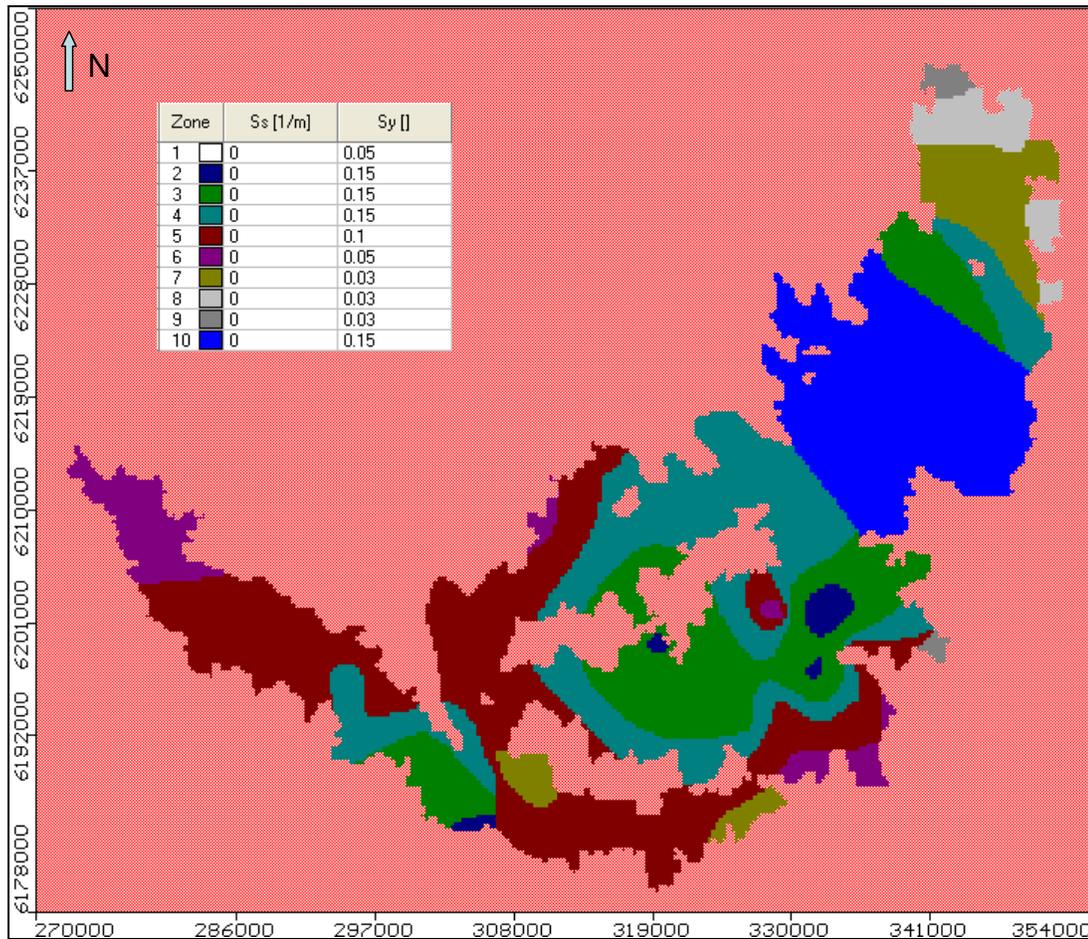
Los niveles piezométricos iniciales utilizados en este caso, corresponden al archivo .HDS de la calibración en régimen permanente.

c) Recargas

En esta calibración, para la recarga superficial, lateral y subterránea, se utilizaron los valores aportados por la operación del sistema superficial en el período Abril 1999 – Marzo 2005. Dichos valores se entregan en el Anexo C7.

Con respecto a la recarga y descarga en ríos y esteros, ésta se calcula de manera automática en el modelo, pero resulta un factor clave en la calibración del Modelo Integrado, ya que representa el nexo principal entre el modelo de simulación operacional y el modelo de aguas subterráneas (esto se analiza con más detalles en el acápite 4.5).

Figura 4.46
Zonas de Coeficientes de Almacenamiento previas a Calibración Régimen Transiente



Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

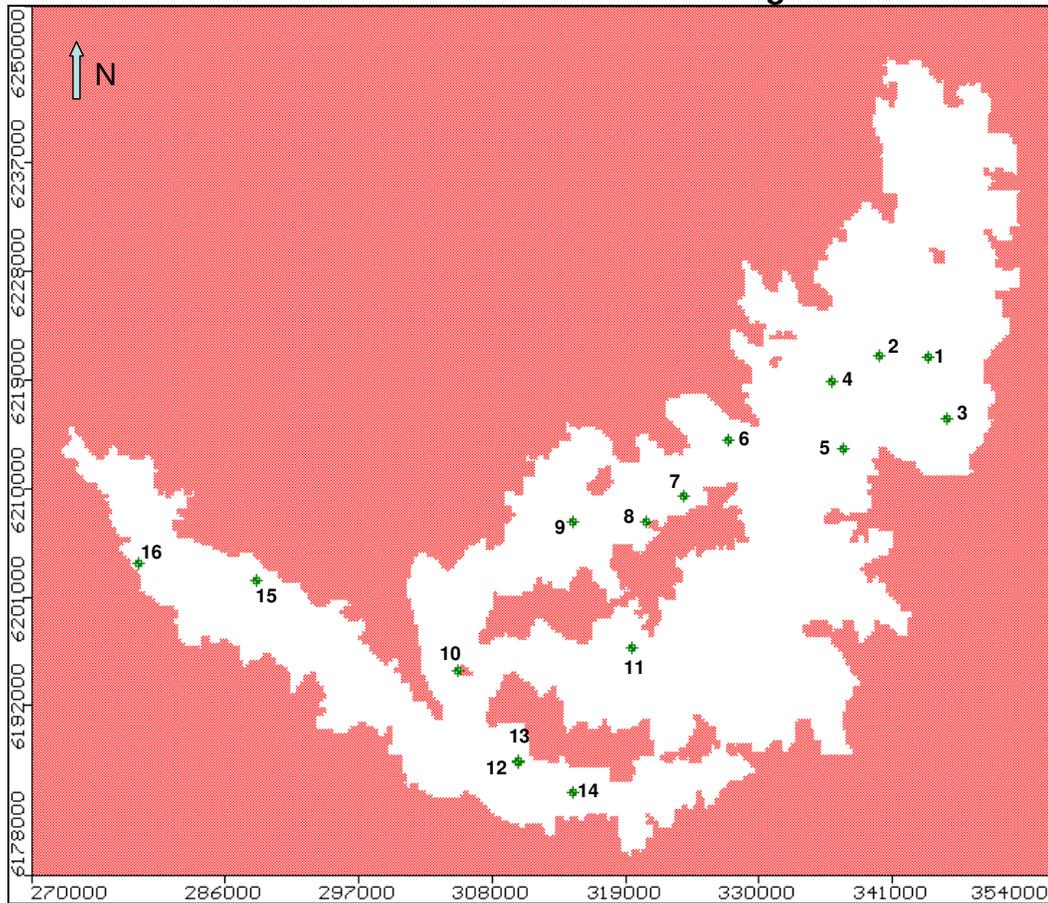
d) Pozos de Observación

Para esta calibración, la cantidad de pozos de observación es considerablemente menor, a la utilizada en la calibración en régimen permanente, lo cual se debe a que no son muchos los pozos que tienen un período de información suficiente.

En la Figura 4.47 se muestra la ubicación de los pozos de observación, usados para la calibración en régimen transiente. Además, en la Tabla 4.17 se entregan las coordenadas UTM, cota y niveles estáticos (NE) de dichos pozos, datos con que fueron introducidos dichos pozos al modelo.

Figura 4.47

Ubicación Pozos de Observación Calibración Régimen Transiente



Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

Tabla 4.17

Datos Pozos de Observación Calibración Régimen Transiente

N°	Nombre	UTM E [m]	UTM N [m]	Cota Terreno [m]
1	APR Molinos Quemados	343,960	6,220,912	495.61
2	Barrio Industrial Rancagua	339,922	6,221,037	479.09
3	AP Sauzal	345,440	6,215,750	560.23
4	Fundo San Pedro	335,996	6,218,888	470.22
5	Centro Frutícola O'Higgins	336,978	6,213,269	501.64
6	Fundo El Bosque	327,491	6,214,024	402.6
7	APR Copequén	323,778	6,209,386	367.41
8	AP Coinco	320,711	6,207,203	324.63
9	Viña El Molino	314,635	6,207,264	286.8
10	APR Toquihua	305,201	6,194,848	207.24
11	AP Quinta de Tilcoco	319,525	6,196,810	273.46
12	AP San Vicente	310,108	6,187,336	218.12
13	San Vicente AP 2	310,208	6,187,430	220.07
14	APR Rastrojos	314,704	6,184,809	226.04
15	AP Las Cabras	288,569	6,202,377	132.31
16	Fundo Las Juntas	278,865	6,203,756	110.54

Los datos de los pozos 1 a 6, fueron extraídos del estudio de ESSBIO (2005), la información del resto de los pozos, fue proporcionada por el CIRH de la DGA. Como la calibración se realiza a nivel mensual, para cada pozo se tomó un valor representativo de cada mes en que se tuviera información, y luego dichos valores fueron introducidos al modelo.

Los niveles piezométricos observados, utilizados en cada pozo, se muestran en el Anexo C9.

Es importante mencionar que para determinar de mejor manera los descensos de los niveles piezométricos en algunos sectores acuíferos, se agregaron algunos pozos de observación “ficticios” y se incluyeron algunos de la Tabla 4.16, que no se utilizaron en la calibración sino sólo en la etapa de análisis de resultados.

e) Pozos de Bombeo

La información de pozos de bombeo, fue extraída del catastro de pozos de la VI Región, actualizado al 2 de Mayo del 2007, proporcionado por la DGA.

A partir del catastro mencionado, se procedió a separar los pozos de bombeo según cuatro tipos de uso: Riego, Industrial, Agua Potable y Minería. Luego de esto se evaluó la situación de cada uno de los pozos, es decir, si su solicitud estaba aprobada o no; todas aquellas solicitudes que estuvieran denegadas o retiradas por el peticionario, no fueron consideradas en la modelación, sólo se consideraron aquellos pozos cuyas solicitudes aparecieran aprobadas o pendientes.

Posteriormente se introdujeron todos los pozos al modelo, y se verificó que éstos no quedaran ubicados fuera de la zona activa del modelo, o que no coincidieran en la misma celda que un pozo de inyección u otro elemento del modelo (ríos, esteros y bordes constantes). En todos aquellos pozos en que se detectó alguno de los problemas recién mencionados, se modificaron sus coordenadas para ubicarlos de manera adecuada dentro del modelo.

Con respecto al caudal de explotación de cada pozo, cabe mencionar que al igual que en el modelo original, se utilizaron los usos previsibles asociados a la clasificación de cada uno de los pozos (excepto para el riego).

Los usos previsibles se refieren a una hipótesis de uso de los derechos solicitados para cada pozo. Según la actividad asociada a cada uno de ellos, existen coeficientes técnicos que se muestran en la Tabla 4.18, los cuales ponderan a los caudales otorgados a cada peticionario, obteniéndose así el uso previsible de cada pozo. Dichos coeficientes son extraídos del estudio realizado por la DGA (2005 c).

Para el caso del riego, la explotación no fue planteada en términos del uso previsible, sino que en función de las necesidades “reales” de los sectores de riego definidos en el modelo superficial. Por lo tanto, para este uso, las extracciones van a depender de si los recursos hídricos superficiales son o no suficientes para abastecer la demanda, si no lo son se utilizan los pozos de bombeo, los cuales están sujetos a una extracción máxima, determinada por el derecho de explotación otorgado por la DGA.

Tabla 4.18
Coefficientes de uso previsible

Tipo de uso	Coefficiente
Agua Potable Ciudades	0.75
Agua Potable Balnearios	0.30
Riego	0.20
Industrial	0.30
Minero	0.75

Para el caso del Sector Codegua se hizo el mismo proceso explicado, excepto la clasificación según usos, ya que para este sector no se estudió la demanda asociada porque administrativamente no pertenece a la cuenca del río Cachapoal.

Para el sector de Laguna San Vicente, también se estudió la explotación subterránea, siguiendo el mismo procedimiento antes explicado, pero como este sector no forma parte del modelo, el valor de su demanda fue descontado a la recarga superficial que éste aporta al acuífero (esto ya fue explicado en el acápite 4.4.2.6), de tal manera la demanda de este sector también es incluida en el modelo.

También es importante mencionar que todos los pozos que ingresaron al sistema después de Marzo de 2005, no fueron incluidos en el modelo. Además, para los pozos que sí fueron incluidos, se hizo la distinción de aquellos cuya operación comenzó antes o después de Abril de 1999, esto permite determinar de manera precisa, el tiempo en el que el pozo comienza a operar en el modelo.

En la Tabla 4.19 se muestra la cantidad de pozos asociados a cada uso, así como la demanda nominal total, correspondiente a la suma de los derechos otorgados en cada pozo aceptado, y los derechos solicitados en cada pozo pendiente (no al uso previsible). También se muestra la misma información, de todos los usos, para los sectores de Codegua y Laguna San Vicente.

Tabla 4.19
Caudales Nominales de Explotación según uso

Uso	N° pozos	Caudal [l/s]
Riego	236	9,159.21
Agua Potable	104	3,123.01
Industria	79	2,810.75
Minería	1	50
Todos (Sector Codegua)	78	1,618.92
Todos (Sector Laguna San Vicente)	39	951.8

En el Anexo C8, se muestran los caudales de explotación que se introdujeron al modelo (para todo el período de calibración) y las principales características de todos los pozos de bombeo, incluidos los de los sectores Codegua y Laguna San Vicente.

f) Resultados Calibración

La calibración en régimen transiente que finalmente se escogió como la mejor, corresponde a aquélla que permitió obtener buenos resultados para las componentes superficial y subterránea del Modelo Integrado. En el acápite 4.2 se explicó el proceso seguido para llegar a la calibración definitiva.

Luego de culminado el proceso de calibración, la distribución y valores de los parámetros hidrogeológicos finales, se muestran en las Figuras 4.48 y 4.49. Con respecto a las configuraciones iniciales de estos parámetros, se puede comentar que:

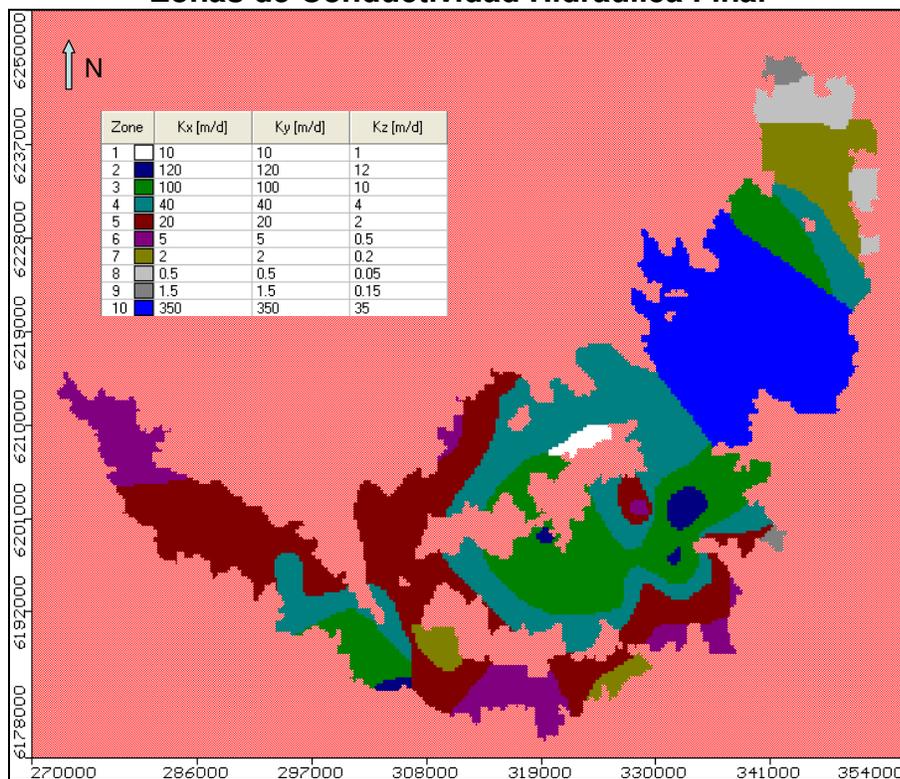
- Para la conductividad, se modificó el valor de la Zona 10, aumentándola a 350 [m/día], lo que se debe a problemas de sobrestimación de los niveles en la parte alta del acuífero (mismos problemas detectados en la calibración en régimen permanente). Además se hicieron algunas modificaciones en otras zonas (correspondientes a los Sectores acuíferos 4 y 11), en las que se redujo la conductividad para evitar problemas de secado de celdas.
- Para el coeficiente de almacenamiento las modificaciones están directamente asociadas a los cambios ya mencionados en la conductividad. Para este parámetro se intentó modificar valores y distribuciones, más allá de la correlación planteada en el acápite 4.4.2.4, pero los resultados de la calibración no se modificaban mayormente, por lo cual se optó por mantener la mencionada correlación.

En la Tabla 4.20 se muestran los valores iniciales, antes de la calibración en régimen permanente, y finales, después de la calibración en régimen transiente, de la conductividad hidráulica (no se analiza el coeficiente de almacenamiento, ya que sus variaciones se deben estrictamente a los cambios hechos en la conductividad).

De los valores iniciales y finales de la conductividad hidráulica, se observa que si bien se hicieron cambios en este parámetro, dichas modificaciones no significaron un cambio radical de la distribución inicialmente planteada. Esto indica que en términos generales la calibración hecha en el modelo de aguas subterráneas es adecuada, ya que éste no se tuvo que modificar drásticamente para obtener resultados satisfactorios.

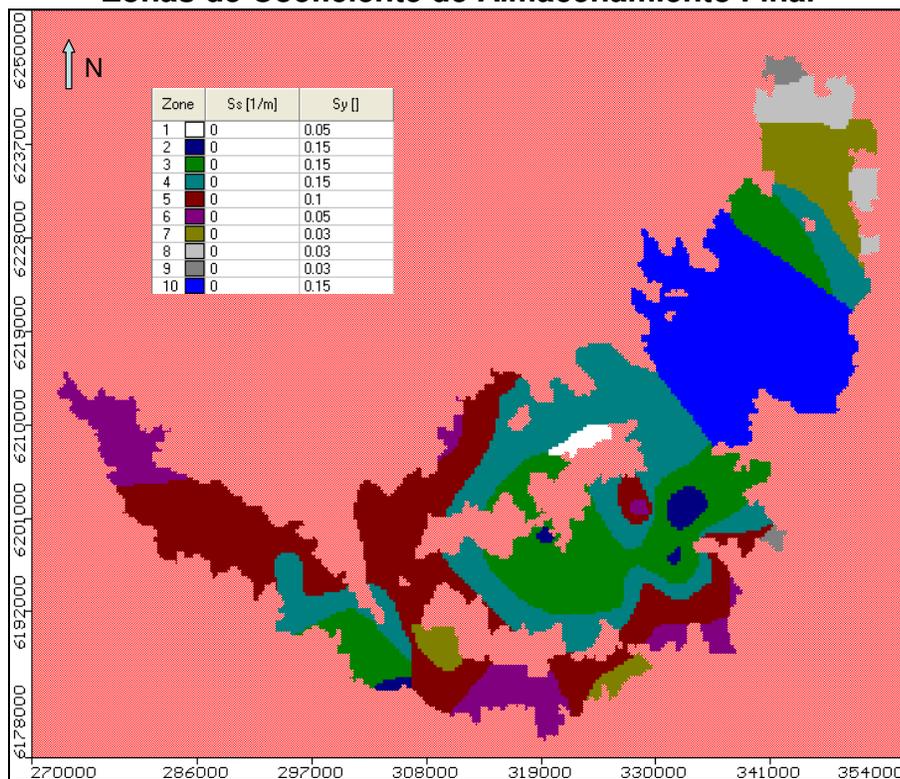
En la Figura 4.50 se muestra el ajuste entre los niveles observados y simulados, para todo los intervalos de tiempo considerados en la calibración (en el Anexo C9 se entregan los niveles para todos los pozos de calibración). Se observa que a nivel promedio la correlación es mejor que en el régimen permanente, con un error promedio de 10.80 [m], un error promedio absoluto de 14.59 [m] y un error cuadrático medio normalizado de 5.2%; valores bajos si se considera que en este caso se incluyó la componente transiente, a las entradas y salidas del modelo implementado para el acuífero.

Figura 4.48
Zonas de Conductividad Hidráulica Final



Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

Figura 4.49
Zonas de Coeficiente de Almacenamiento Final

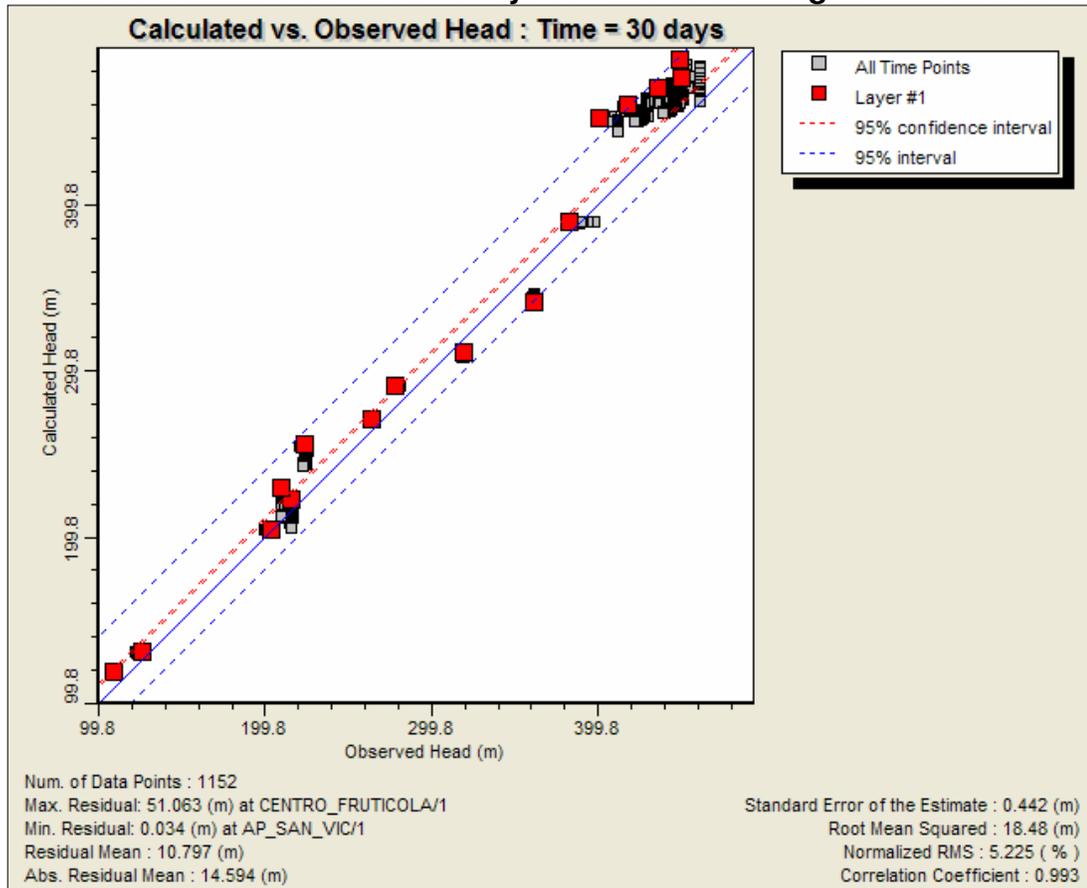


Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

Tabla 4.20
Comparación Zonas de Conductividad Iniciales y Finales

Zona	Color	Valores Iniciales			Valores Finales		
		Área [km ²]	K _x (K _y) [m/día]	K _z [m/día]	Área [km ²]	K _x (K _y) [m/día]	K _z [m/día]
1		0	10	1	9.5	10	1
2		29.5	120	12	18.9	120	12
3		494.1	75	7.5	264.1	100	10
4		415.8	40	4	334.1	40	4
5		414.4	20	2	364.9	20	2
6		80.7	5	0.5	125.6	5	0.5
7		103.4	2	0.2	104.1	2	0.2
8		37.0	0.5	0.05	50.9	0.5	0.05
9		9.1	1.5	0.15	13.0	1.5	0.15
10		0	---	---	299.0	350	35

Figura 4.50
Correlación niveles calculados y observados en Régimen Transiente

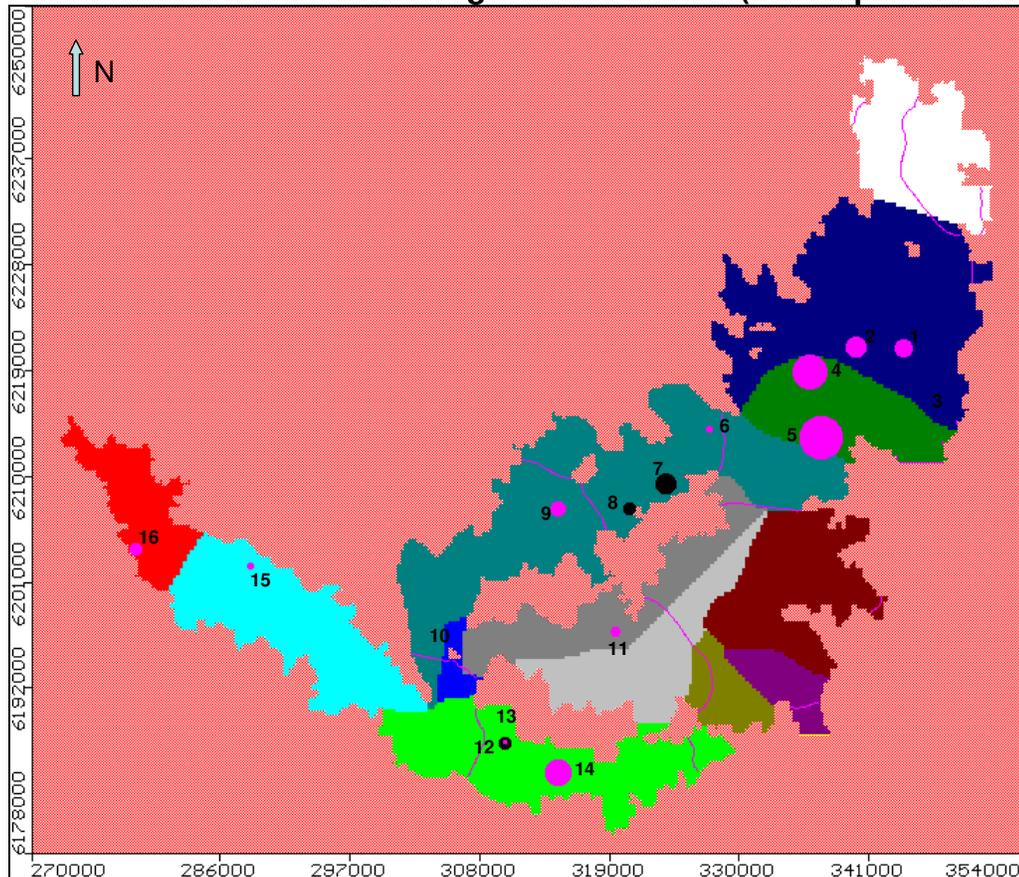


Fuente: Visual Modflow.

En la Figura 4.51 se muestra el mapa de residuales de la calibración en régimen transiente, para el último período simulado. Se observa que en los Sectores Acuíferos 2, 3 y 11; el modelo sobrestima los niveles en gran parte de los pozos de observación, donde el mayor error está asociado al pozo 5 (el error es de 51.1 [m]), lo que coincide

con la información proporcionada en la Figura 4.50, y además coincide con lo observado en el régimen permanente. La mayor subestimación se observa en el pozo 7 (el error es de 19.7 [m]), y en el Sector Acuífero 12 es donde se observa el menor error en la estimación.

Figura 4.51
Mapa de residuales Calibración en Régimen Transiente (último período de tiempo)



Fuente: Elaboración propia, a partir de Visual Modflow.

Si se comparan los resultados obtenidos con los del régimen permanente, se observa que los resultados son bastante similares, verificándose los mismos problemas de sobrestimación en la parte alta del acuífero, lo cual obviamente está ligado a que los valores de recarga probablemente son muy altos. Además, se aprecia que los mejores resultados también se dan en la parte baja del acuífero.

En las Figuras 4.52 a 4.54, se muestran los niveles calculados y observados para todos los pozos de calibración.

Figura 4.52
Niveles piezométricos observados y calculados Sectores 2 y 3

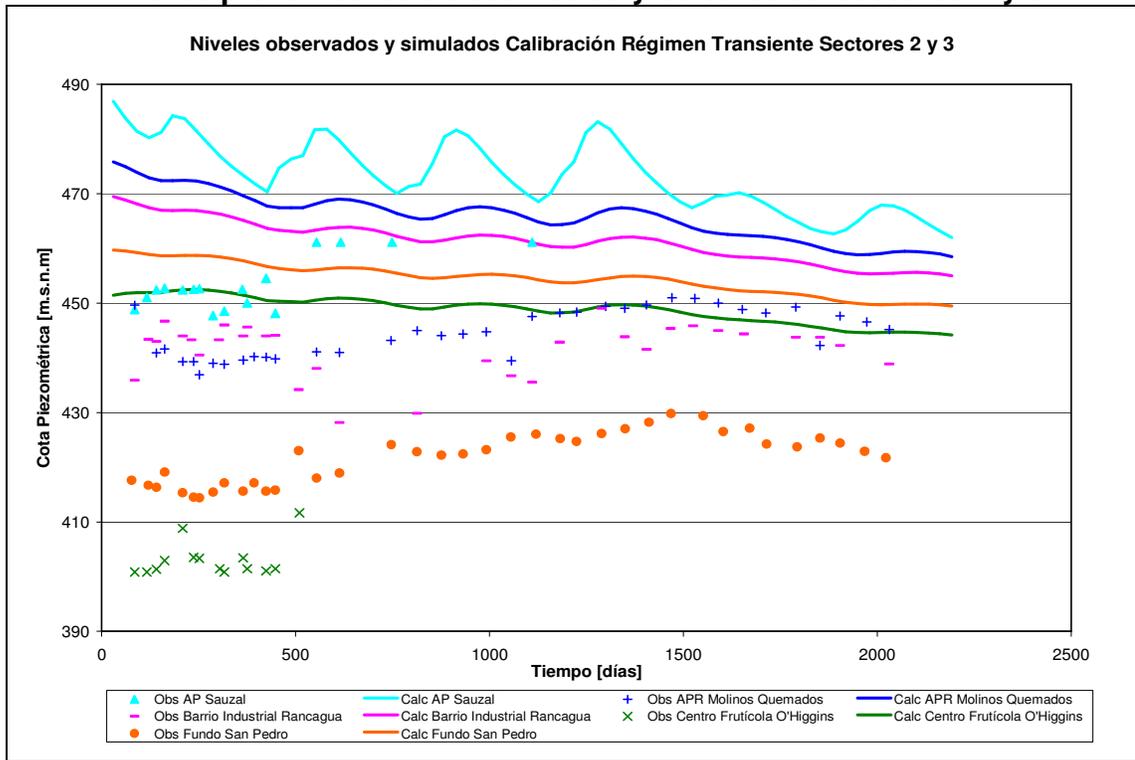


Figura 4.53
Niveles piezométricos observados y calculados Sectores 4 y 9

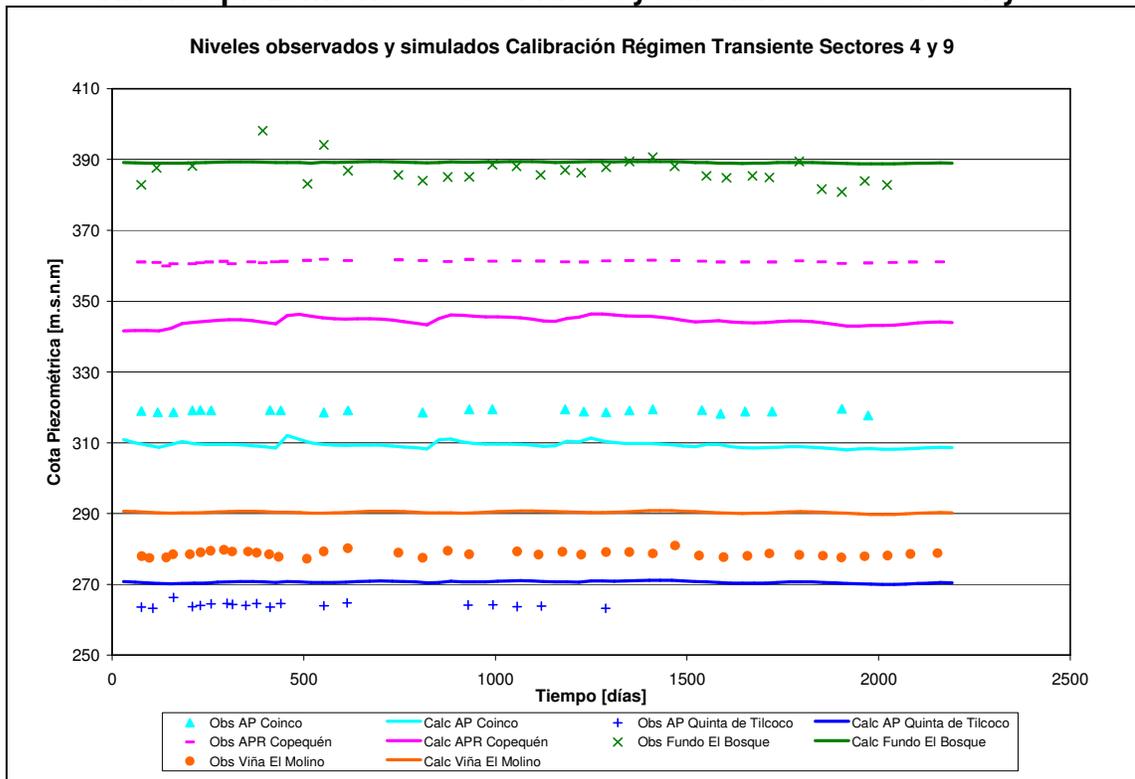
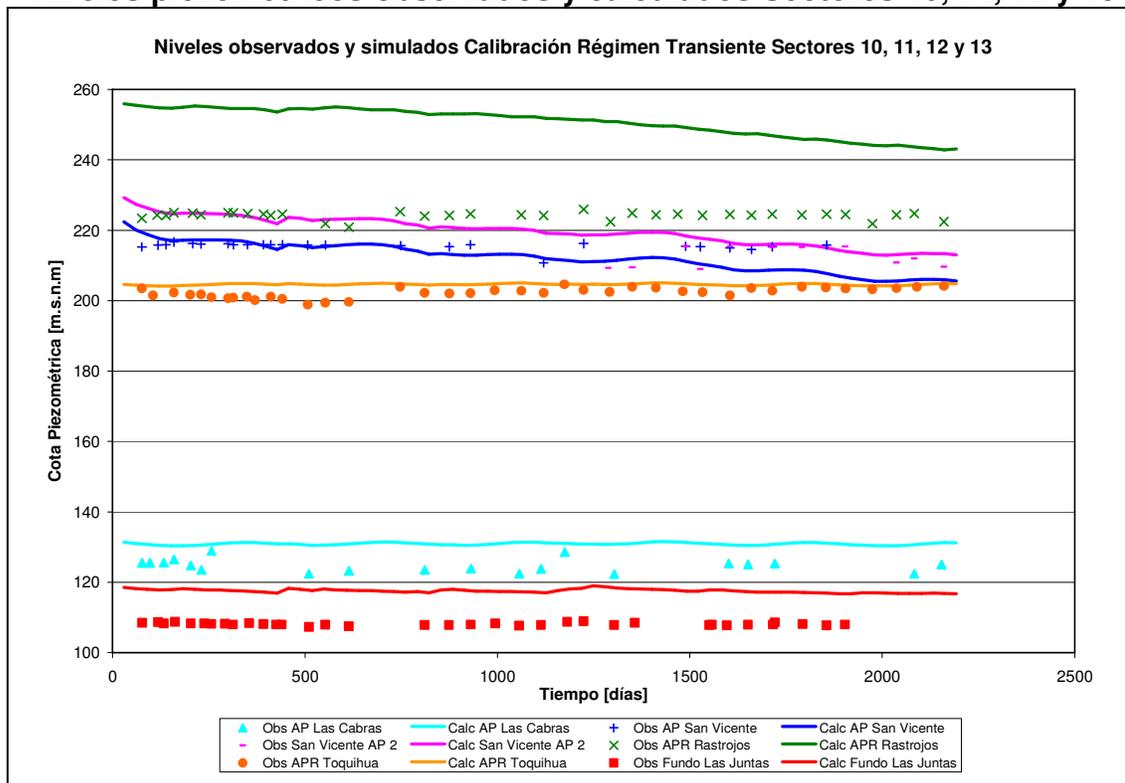


Figura 4.54

Niveles piezométricos observados y calculados Sectores 10, 11, 12 y 13



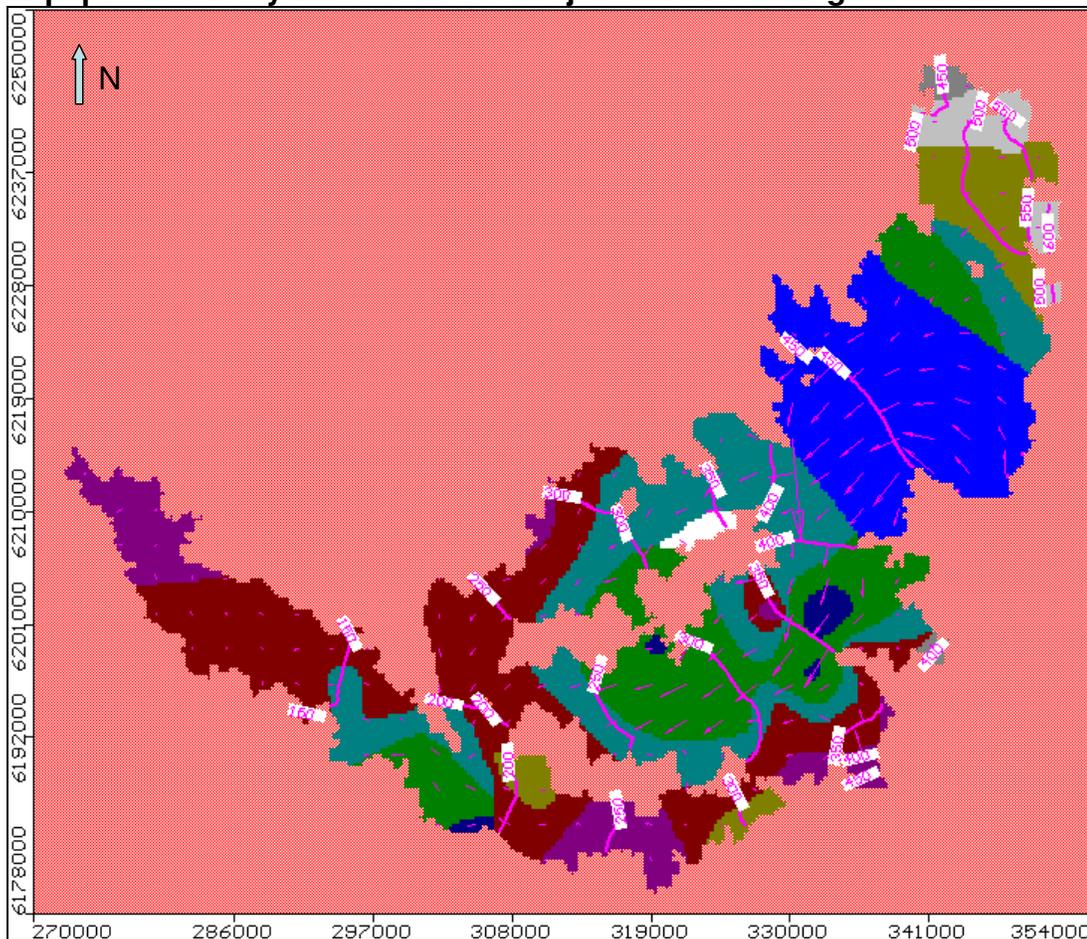
De las Figuras 4.52 a 4.54 se observa que:

- El ajuste de niveles tiene mejores resultados para la parte baja del acuífero (Sectores Acuíferos 10 a 13), ya que si bien hay pozos, como APR Rastrojos, que se alejan bastante de los niveles observados, al menos la tendencia de los valores simulados no es tan distinta.
- Para la parte media del acuífero (Sectores 4 y 9) el ajuste no es tan bueno, ya que la mayoría de los pozos tiene valores mayores o menores a los observados, pero al menos la tendencia es preservada en la simulación.
- Para la parte alta (Sectores 2 y 3) los resultados para todos los pozos son bastante malos, ya que ni siquiera en términos de tendencias los niveles son similares. Estas fuertes variaciones, que se observan principalmente en el pozo AP Sauzal, se deben fundamentalmente a los ingresos de la recarga subterránea, mediante la conexión con la parte alta del río Cachapoal; si bien se intentó disminuir el aporte de las cuencas asociadas a dicha conexión, no se pudo disminuir más, porque se comenzaba a afectar la calibración de la parte superficial del Modelo Integrado.

En la Figura 4.55 se muestran las equipotenciales y las líneas de flujo para el último intervalo de simulación. Se observa que en este sentido el modelo tiene un comportamiento adecuado, ya que el flujo se mueve preferentemente por las zonas de mayor conductividad (flechas más grandes), y las equipotenciales son coherentes con la dirección de dicho flujo. Además, se observa que la dirección del flujo es de noreste a

sureste (hasta la confluencia del Estero Zamorano con el río Cachapoal) y luego va hacia el noroeste, lo que es consistente con lo visto en las curvas de nivel de la Figura 4.30.

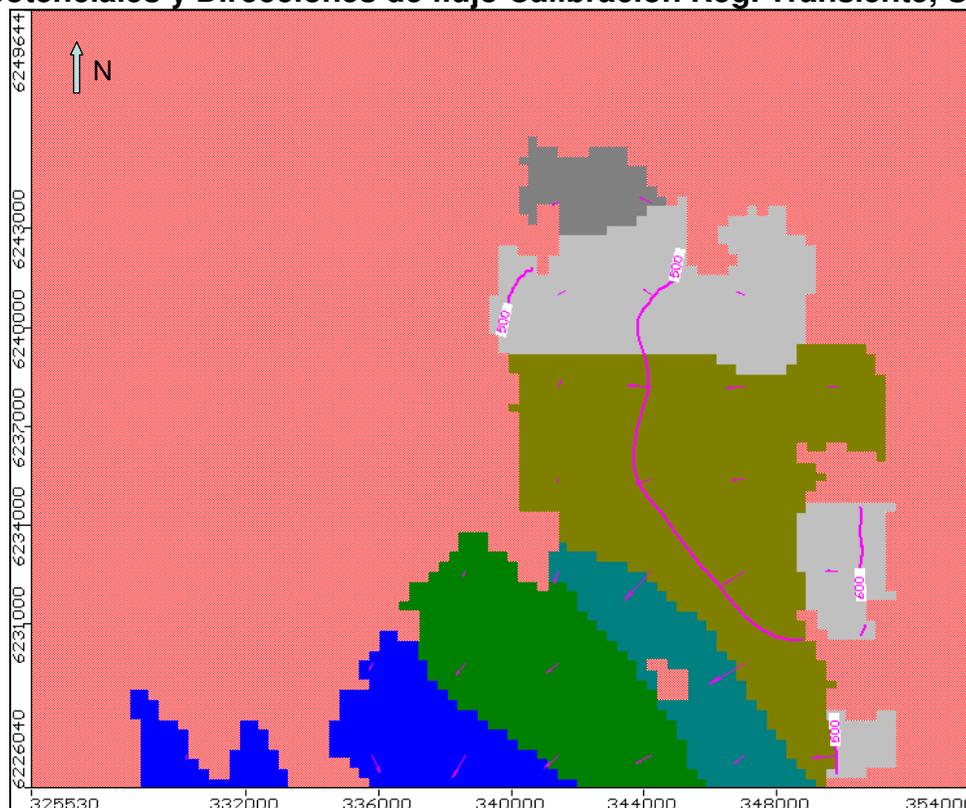
Figura 4.55
Equipotenciales y Direcciones de flujo Calibración Régimen Transiente



En la Figura 4.56 se muestra un acercamiento al sector de Codegua (Sector 1), en el que se observa que las líneas de flujo en este caso, se dirigen hacia el norte a través del estero Angostura, para drenar finalmente en la cuenca del río Maipo. Por esta razón, según lo antes mencionado en el acápite 4.4.2.5, el sector de Codegua no se incluye mayormente en el análisis, ya que la zona de estudio que interesa es la que forma parte de la cuenca del río Cachapoal.

En la Tabla 4.21 se muestra el balance hídrico subterráneo promedio de todos los intervalos de tiempo, para el acuífero Cachapoal (sin incluir el Sector Codegua); también se muestra el mismo balance para la calibración en régimen permanente. Se observa que en ambos casos, el porcentaje de diferencia entre los caudales de entrada y salida, es bastante bajo, por lo que el modelo también es consistente en lo que se refiere a los flujos que ingresan y salen del sistema acuífero.

Figura 4.56
Equipotenciales y Direcciones de flujo Calibración Rég. Transiente, Sector 1



Fuente: Visual Modflow.

Tabla 4.21
Balance Hídrico Subterráneo Calibración Régimen Permanente y Transiente

ENTRADAS [m³/s]		
Componente	Régimen Permanente	Régimen Transiente
Almacenamiento	0.00	12.93
Borde Constante	0.00	0.00
Recarga Lateral y Subterránea	11.23	11.06
Infiltración Ríos y Esteros	13.59	4.78
Recarga Superficial	4.72	13.49
Sector 1 a 2	0.37	0.34
TOTAL ENTRADAS	29.91	42.61
SALIDAS [m³/s]		
Componente	Régimen Permanente	Régimen Transiente
Almacenamiento	0.00	7.95
Borde Constante	0.00	0.00
Pozos Bombeo	0.00	3.25
Afloramiento Ríos y Esteros	29.46	31.14
Conexión Embalse Rapel	0.34	0.32
TOTAL SALIDAS	29.79	42.67
DIFERENCIA		
Componente	Régimen Permanente	Régimen Transiente
ENTRADA - SALIDA	0.12	-0.06
Porcentaje	0.39%	0.13%

En cuanto a la explotación de pozos, en la Tabla 4.22 se muestran las demandas nominales y simuladas, promediadas para todos los intervalos de tiempo, para cada uno de los sectores acuíferos. Además se entrega el porcentaje de satisfacción de la demanda nominal.

Tabla 4.22
Demanda de Pozos Nominal y Simulada (promedio de todo el período)

Sector	Demanda Nominal [m³/s]	Demanda Simulada [m³/s]	% Satisfacción
2	0.65	0.55	85.30%
3	0.51	0.47	92.35%
4	0.70	0.63	90.23%
5	0.41	0.34	82.95%
6	0.08	0.08	97.89%
7	0.24	0.21	88.86%
8	0.09	0.09	100%
9	0.12	0.09	81.37%
10	2E-06	1E-06	50.00%
11	0.81	0.53	64.82%
12	0.24	0.23	96.59%
13	0.02	0.02	100%

Se observa que para la mayoría de los sectores, el sistema no es capaz de cubrir la demanda de pozos impuesta, sin embargo, en este sentido no es posible definir, si el modelo simula de manera correcta o no el sistema acuífero, ya que los valores nominales introducidos no son observados sino que estimados.

De los resultados obtenidos, se estableció que éstos son satisfactorios, considerando que se realizaron bastantes calibraciones en régimen transiente, y no se logró obtener resultados mejores, sin tener que hacer cambios demasiado drásticos en la distribución de conductividades (tal que ya no sea representativa del acuífero modelado) o afectar fuertemente la calibración de la parte superficial del Modelo Integrado (para reducir la recarga subterránea). En consecuencia, se decidió no intentar mejorar la calibración del modelo de aguas subterráneas, en desmedro de los resultados de la calibración de los modelos superficiales.

Por todo esto, se concluye que de la calibración en régimen transiente (que constituye la calibración definitiva de la componente subterránea del Modelo Integrado), se obtuvo un modelo del acuífero del río Cachapoal, que representa de manera adecuada el funcionamiento del sistema, y por lo tanto, puede ser utilizado como parte del Modelo Integrado.

Con respecto a la versión original del modelo de la DGA, considerando que tanto los resultados de la calibración en régimen permanente, como los del caso transiente, fueron bastante satisfactorios (RMS normalizado de 5.2% en ambos casos), se concluye que se logró un modelo más representativo que dicha versión, ya que los valores de recarga superficial y lateral ahora son mucho más reales, lo mismo que la distribución de conductividades.

4.5 MODELO SIMULACIÓN OPERACIONAL

Debido a que todos los modelos de simulación operacional (MSO) estudiados, resultaban algo laboriosos y necesitan demasiada información de entrada, se optó por implementar un modelo propio (en MATLAB), mucho más simple que todos los modelos probados, y que permitió ligar las componentes del Modelo Integrado, realizar balances en los nodos del modelo superficial y determinar satisfacciones de demanda, de los distintos usos superficiales del recurso hídrico.

4.5.1 Construcción del Modelo

4.5.1.1 Procedimiento de Construcción y Calibración del Modelo

En el presente acápite se describe, de manera breve, el procedimiento seguido para llevar a cabo la construcción y calibración del modelo de simulación operacional.

1. Lo primero fue confeccionar la topología del modelo, basándose en características físicas y de funcionamiento de la cuenca, así como también de la información disponible. Esto llevó a definir nodos para cada uno de los módulos, ubicándolos en puntos de interés para la realización de los balances hídricos.
2. Luego, para cada una de las cuencas intermedias y de cabecera, se definieron zonas de cultivo, y se calcularon las tasas de riego asociadas. Así como también se identificaron, y asociaron a los nodos respectivos, gran parte de los canales de riego de cada módulo.
3. Posteriormente se procedió a caracterizar los demás usos del recurso hídrico en la cuenca, básicamente extracciones para agua potable, minería y centrales hidroeléctricas.
4. Una vez realizada la caracterización de la cuenca, se procedió a la programación del modelo, mediante la utilización de MATLAB versión 6.5.
5. Cuando la programación fue completada, en una primera etapa se realizó una calibración del MSO y el modelo de escorrentía superficial (sin considerar la fase subterránea). Esto permitió depurar el código del programa, en lo que se refiere a la operación superficial de éste.
6. Luego de construido el modelo de aguas subterráneas, se procedió a la integración de éste con la componente superficial; para ello se debieron introducir modificaciones en el MSO, que permitieron considerar los flujos que van hacia el acuífero (infiltración en el río y recarga asociada al riego) y que vienen desde éste (afloramiento en el río).
7. Finalmente, cuando el Modelo Integrado fue completado, se procedió a la calibración simultánea de cada una de sus componentes, considerando obviamente las conexiones entre ellas.

4.5.1.2 Topología y Usos del recurso hídrico a nivel superficial

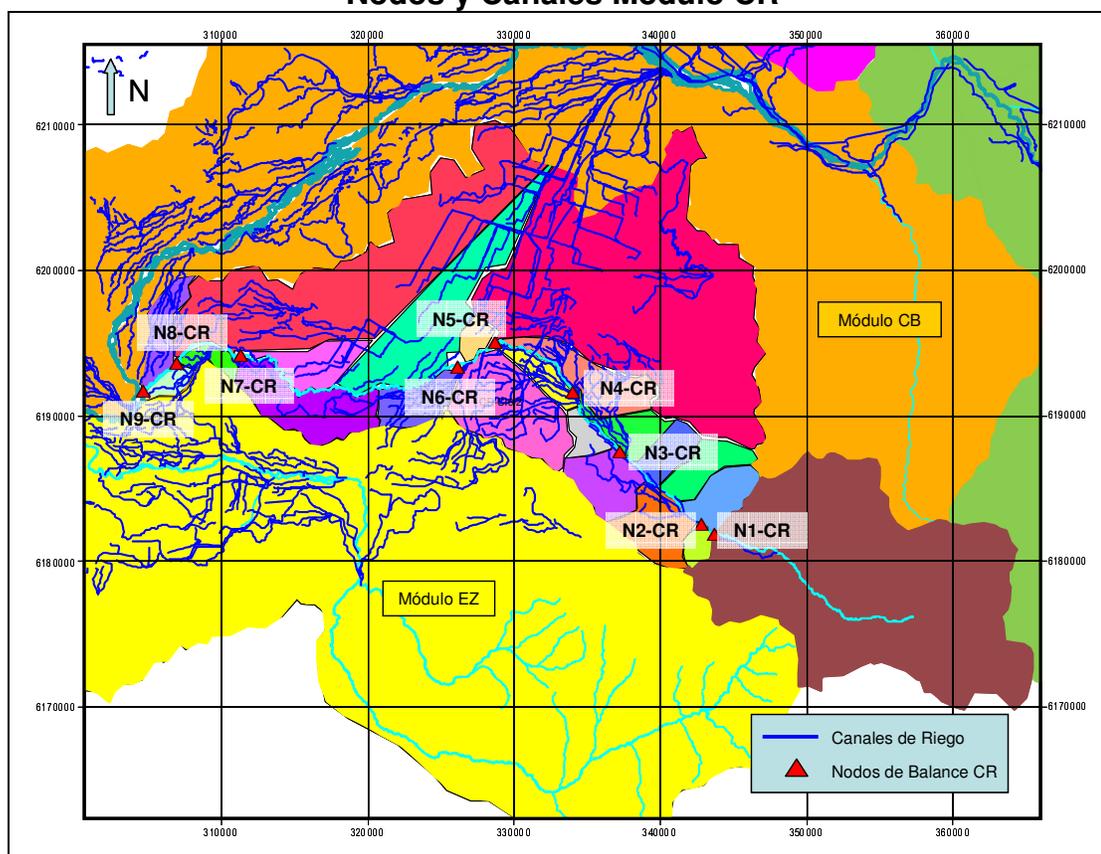
a) Topología del modelo

Como ya fue mencionado en el acápite anterior, la definición de la topología del sistema, se basó en las características físicas y de funcionamiento de la cuenca, así como también de la información disponible.

Los nodos fueron ubicados en aquellos puntos en que se consideró necesario realizar balances hídricos, como por ejemplo, la confluencia de una cuenca de cabecera con el cauce principal, el comienzo del acuífero (en el Módulo CR por ejemplo) y la cantidad de canales y cuencas (intermedias y de cabecera) que estarían asociados a un nodo.

A cada uno de los nodos definidos, se asociaron cuencas intermedias y de cabecera (origen de la nomenclatura indicada en la Figura 4.2), así como también todos los canales de riego que sacan agua del tramo entre el nodo anterior y el analizado. A modo de ejemplo, en la Figura 4.57, se muestran los nodos y canales para el módulo CR; para el resto de los módulos, en el Anexo C10 se muestran sus respectivas figuras, así como toda la información referida a los nodos y los canales asociados a cada uno de ellos. Es importante mencionar que toda la información de canales de riego, fue extraída del SIG (Sistema de Información Geográfica) facilitado por la Comisión Nacional de Riego (CNR) y del trabajo elaborado por CNR (2006).

Figura 4.57
Nodos y Canales Módulo CR



Fuente: Elaboración Propia.

b) Usos del recurso hídrico

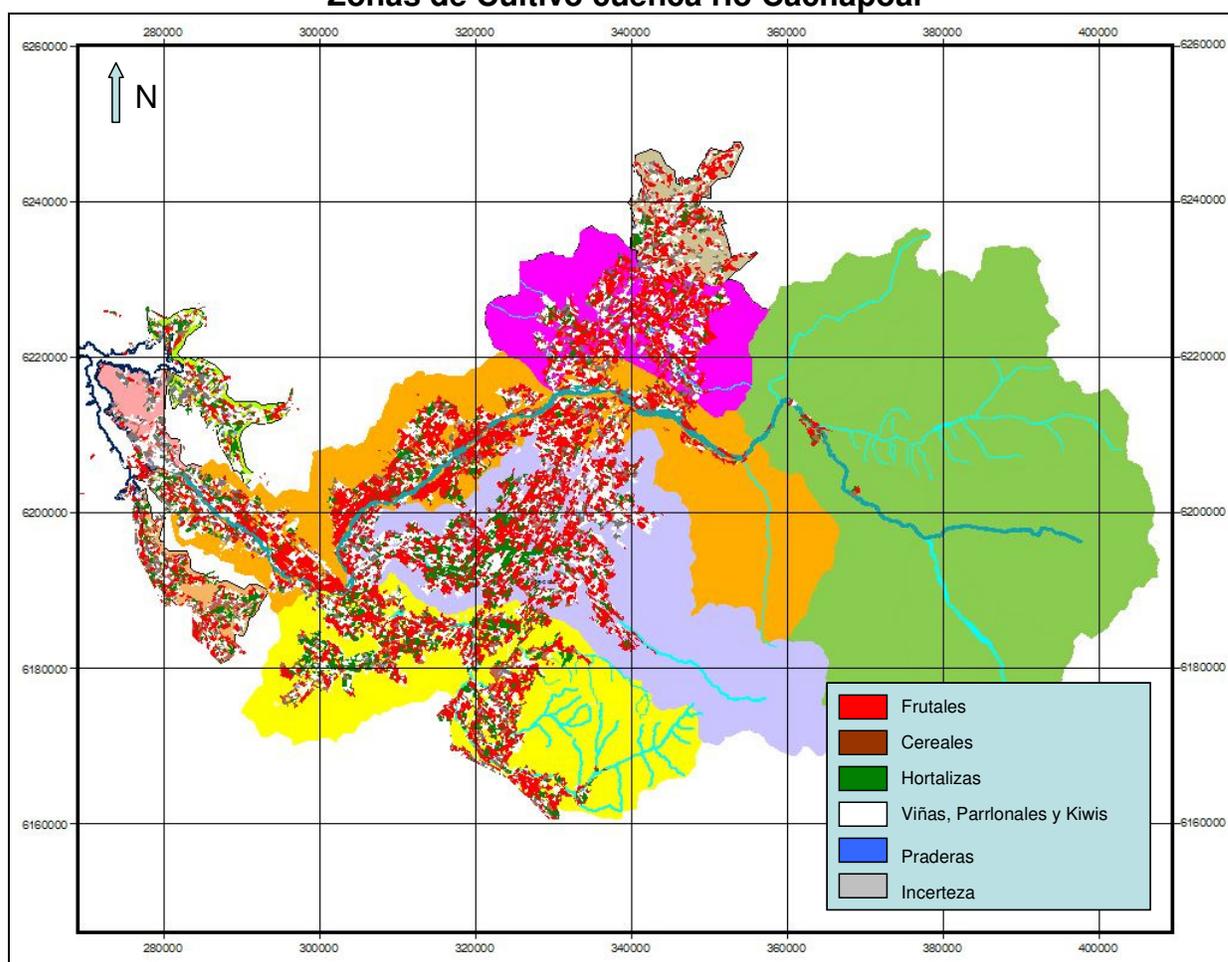
Dentro de la cuenca del río Cachapoal, se definieron 4 tipos de uso del recurso hídrico a nivel superficial: riego, agua potable, minería y centrales hidroeléctricas.

Riego

Para cada una de las cuencas intermedias y de cabecera, se definieron zonas de cultivo (o de riego, en el presente informe se usan ambas denominaciones indistintamente), para las cuales se hizo una clasificación (a grandes rasgos) de los tipos de cultivos: Frutales, Hortalizas, Cereales, Viñas (incluye Parronales y Kiwis) y Matorral (o Pradera, que no constituye un cultivo). La extensión de las zonas en las que hay cultivos, así como de la clasificación de éstos, se obtuvieron del trabajo realizado por la CNR (2004). Luego, se tomaron las especies más representativas para cada categoría de la clasificación recién mencionada, y se calcularon las tasas de riego asociadas.

En la Figura 4.58, se muestran las zonas de cultivo para toda la cuenca del río Cachapoal, con la respectiva clasificación de éstos.

Figura 4.58
Zonas de Cultivo cuenca río Cachapoal



Fuente: Elaboración Propia.

Se observa que la actividad agrícola se concentra mayoritariamente en la parte media y baja de la cuenca del río Cachapoal.

Los nombres de cada zona de riego, son los mismos de las cuencas intermedias o de cabecera en las que se encuentran contenidas.

Con respecto a las zonas de riego, es importante mencionar que, para efectos de la modelación se tuvo que definir una serie de zonas, que no pertenecen a la cuenca del río Cachapoal, pero que sin embargo son importantes en términos de determinar los usos del riego en la agricultura, ya que hay canales que extraen agua de la cuenca en estudio, pero abastecen zonas que no pertenecen a dicha cuenca. Estas zonas se encuentran más hacia el norte del módulo ELC y más hacia el oeste de la salida del módulo CB, y no son iguales a las indicadas para el modelo de aguas subterráneas, aunque sí están relacionadas, ya que la infiltración por riego y las pérdidas de canales que se generan en estas zonas de riego, ingresan al acuífero por las zonas de recarga definidas para dicho modelo. La ubicación de estas zonas se muestra en el Anexo C10.

También es importante destacar que, para efectos de la caracterización del riego, para los módulos EZ y ELC se definieron zonas, que dividen a las cuencas EZ-CC1-1 y ELC-CC1-1, respectivamente. Dichas zonas se muestran en el Anexo C10.

En la Tabla 4.23 se muestran las tasas de riego mensuales para algunas zonas de cultivo representativas de cada módulo. El método de cálculo de dichas tasas de riego y los valores asociados para todas las zonas de cultivo, se detallan en el Anexo C10.

Tabla 4.23
Tasas de riego de algunas zonas de cultivo representativas [l/s/há]

Zona Riego	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
CA-CC3-1	0.265	0.145	0.019	0.019	0.028	0.255	0.404	0.581	0.797	0.847	0.735	0.493
CA-CI4-3	0.251	0.137	0.017	0.017	0.025	0.238	0.422	0.613	0.830	0.834	0.712	0.475
ELC-Z1	0.264	0.141	0.014	0.014	0.032	0.254	0.549	0.788	1.029	0.948	0.781	0.519
ELC-Z2	0.278	0.150	0.017	0.016	0.029	0.251	0.490	0.707	0.948	0.949	0.807	0.538
CR-CI3-4	0.260	0.141	0.017	0.016	0.024	0.237	0.449	0.656	0.884	0.879	0.749	0.499
CR-CI9-1	0.206	0.108	0.008	0.008	0.018	0.146	0.432	0.626	0.821	0.770	0.639	0.419
EZ-Z1	0.263	0.140	0.015	0.015	0.032	0.283	0.577	0.837	1.087	0.945	0.763	0.508
EZ-Z6	0.234	0.122	0.009	0.009	0.053	0.286	0.636	0.871	1.077	0.893	0.690	0.458
CB-CI2-1	0.292	0.160	0.021	0.021	0.030	0.282	0.447	0.644	0.880	0.936	0.811	0.546
CB-CI7-2	0.217	0.114	0.009	0.009	0.021	0.166	0.455	0.657	0.858	0.802	0.664	0.437

Con respecto a los canales de riego, como ya se mencionó anteriormente, se determinaron los nodos a los que estaban asociados, es decir, desde donde extraían el agua en el modelo, pero también fue necesario determinar las zonas de riego a las que abastecían (ver Anexo C10), información que fue extraída del SIG de la CNR.

Con todo lo anterior, se tuvo la información suficiente para caracterizar de buena manera este uso en el MSO.

Agua Potable

Para la cuenca del río Cachapoal, la mayor parte del recurso hídrico utilizado para generar agua potable, proviene de pozos subterráneos, por lo tanto, en esta cuenca sólo existen 3 extracciones a nivel superficial (según la información recopilada), dos asociadas a la Planta Los Nogales y una a la Planta Coya, las cuales fueron consideradas en el modelo.

La información de las plantas de agua potable de la cuenca, fue obtenida de los planes de desarrollo de todas las localidades de la VI Región (ESSBIO, 2006), que se encuentran disponibles en la biblioteca de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS).

En la Tabla 4.24 se muestran los caudales medios mensuales promedio de extracción, en las dos aducciones de la Planta Los Nogales. Los detalles de las extracciones de agua potable, utilizadas en el modelo (caudales mensuales y ubicación), se entregan en el Anexo C10.

Tabla 4.24
Extracción Media Mensual Promedio Aducciones Planta Los Nogales

Aducción	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Río Cachapoal [m³/s]	0.51	0.53	0.52	0.50	0.51	0.50	0.53	0.55	0.58	0.63	0.63	0.56
Río Claro de Cauquenes [m³/s]	0.12	0.13	0.12	0.12	0.12	0.12	0.13	0.13	0.14	0.15	0.15	0.13

Es importante mencionar que también se consideraron las descargas desde las plantas de aguas servidas existentes en la cuenca, dicha información fue extraída del estudio de ESSBIO (2006) y de la SISS (2005), y los detalles se entregan en el Anexo C10.

Minería

Para la minería, se utilizó como faena más significativa a la mina El Teniente, ubicada en la parte alta de la cuenca del río Coya (CA-CC4-1).

Las extracciones de agua consideradas en este caso, fueron las siguientes: impulsión Coya – Embalse Sapos, extracciones desde la cuenca del río Coya y Extracciones desde el río Blanco.

Para efectos del modelo, también se consideraron las descargas de agua tratada (luego de ser utilizada en los procesos mineros) que se realizan a la cuenca del río Coya.

La información utilizada para caracterizar estas extracciones y descargas fue obtenida del trabajo realizado por Guzmán (2004), y proporcionada por la Unidad de Recursos Hídricos División El Teniente.

En la Tabla 4.25 se muestran los caudales medios mensuales promedio de extracción y descarga, relacionados con la operación de la mina El Teniente (las extracciones Colón – Caletones y Sewell son hechas en la cuenca del río Coya, la impulsión Coya – Sapos

en la cuenca del río Pangal). Los detalles de las extracciones y descargas de la actividad minera, utilizadas en el modelo (caudales y ubicación), se entregan en el Anexo C10.

Tabla 4.25
Extracción y Descarga Media Mensual Promedio Operación Mina El Teniente

Extracción o Descarga	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Extracción Colón - Caletones [m ³ /s]	0.00	0.04	0.11	0.23	0.28	0.23	0.11	0.13	0.18	0.04	0.01	0.00
Extracción Sewell [m ³ /s]	0.40	0.43	0.38	0.38	0.39	0.48	0.47	0.45	0.47	0.59	0.57	0.36
Impulsión Coya - Sapos [m ³ /s]	0.05	0.05	0.03	0.04	0.04	0.06	0.05	0.04	0.01	0.05	0.04	0.07
Extracción Río Blanco [m ³ /s]	0.65	0.73	0.63	0.62	0.57	0.64	0.62	0.64	0.70	0.69	0.43	0.73
Descargas a Cuenca Coya [m ³ /s]	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57	0.57

Centrales Hidroeléctricas

Para el estudio de las centrales hidroeléctricas se consideraron las dos más importantes de la cuenca, las Centrales Sauzal y Sauzalito. La información de caudales, utilizada en este modelo, fue proporcionada por Endesa, empresa propietaria de dichas centrales.

Es importante mencionar que existen otras dos centrales, Pangal y Coya, que no pudieron ser consideradas, ya que no se pudo obtener información referente a ellas.

En la Tabla 4.26 se muestran los caudales medios mensuales promedio de extracción, en las aducciones de las centrales hidroeléctricas Sauzal y Sauzalito. Los detalles de las extracciones para generación hidroeléctrica, utilizadas en el modelo (caudales y ubicación), se entregan en el Anexo C10.

Tabla 4.26
Extracción Media Mensual Promedio Aducciones Centrales Sauzal y Sauzalito

Central	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Sauzal [m ³ /s]	61.65	39.44	32.71	42.45	43.19	48.08	60.00	66.91	71.44	71.71	70.97	69.94
Sauzalito [m ³ /s]	54.09	36.60	28.43	33.79	39.63	43.62	52.11	55.47	57.73	56.96	57.35	57.54

4.5.1.3 Estructura del modelo

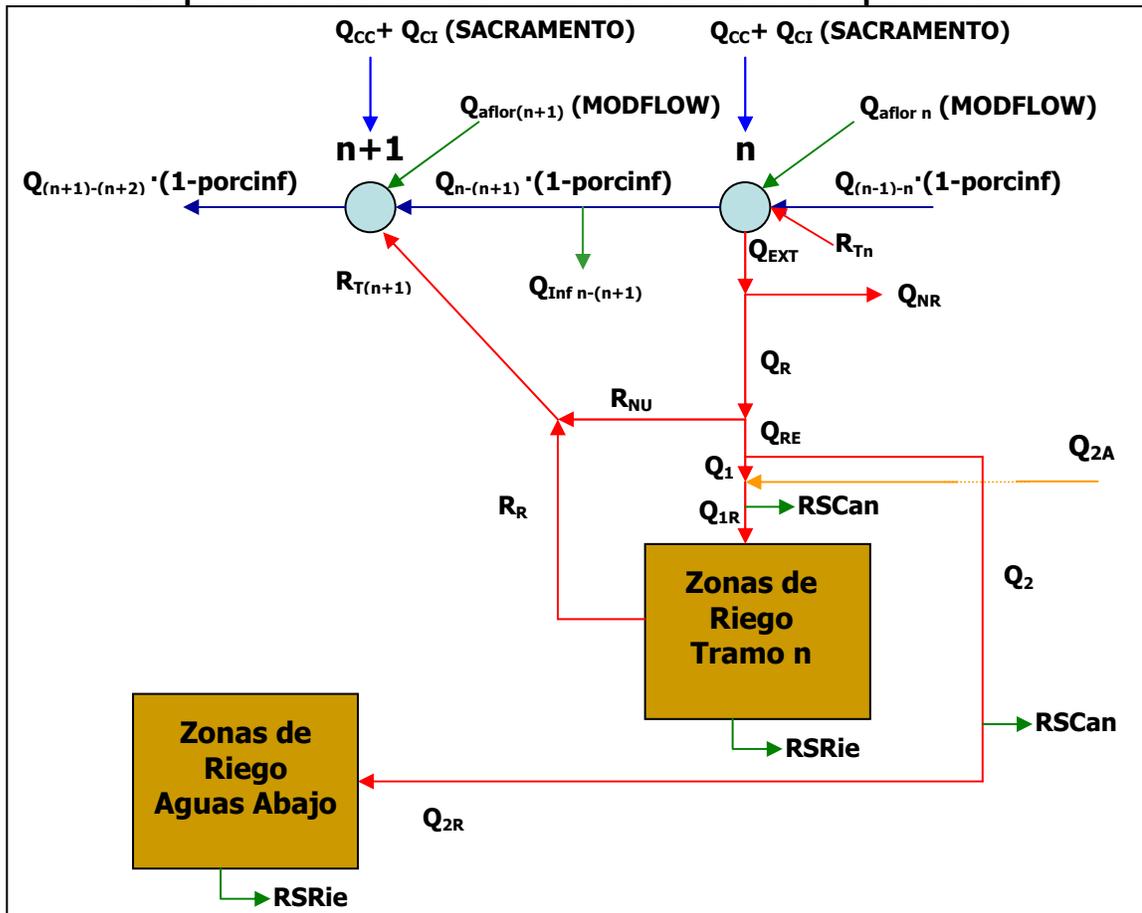
Con respecto a la estructura del modelo, éste consta de 5 paquetes de rutinas, cada uno de los cuales está asociado a los módulos en los que se separó la cuenca. Dichos paquetes, constan a su vez de 5 rutinas, las cuales básicamente consisten en lo siguiente:

- *Rutina Principal*: desde esta rutina se llama a las demás, para ir ejecutando el modelo paso a paso.

- *Rutina Ingreso de Datos:* mediante esta rutina se ingresan todos los datos necesarios para el modelo, y además se crean todas las matrices necesarias, para ir almacenando los resultados que se requieran posteriormente.
- *Rutina Cálculos:* en esta rutina se hacen los balances en todos los nodos de cada módulo, desde ésta se llama a las dos rutinas de demanda, para ir extrayendo el agua que corresponda en cada nodo.
- *Rutina Demandas CI:* en esta rutina se ejecuta lo referente a todas las demandas que existen en cada cuenca de cabecera o intermedia, si es que las extracciones se producen directamente desde éstas y no del cauce principal de cada módulo.
- *Rutina Demandas:* en esta rutina se ejecuta lo referente a todas las demandas que existen en cada cuenca de cabecera o intermedia, si es que las extracciones se producen desde el cauce principal de cada módulo.

Todas las rutinas de los 5 módulos, se ejecutan de una sola vez, es decir, se van llamando entre ellas, para ir generando la información necesaria, que permita simular el funcionamiento simultáneo de toda la cuenca. Para cada uno de los módulos, el esquema de funcionamiento del modelo es el que se muestra en la Figura 4.59.

Figura 4.59
Esquema Funcionamiento Modelo Simulación Operacional



Fuente: Elaboración Propia.

Según lo visto en el esquema de funcionamiento del MSO, se observa que dicho modelo es básicamente el integrador de las componentes superficial y subterránea del Modelo Integrado, ya que recibe y entrega información para ambas fases. La única conexión que no pasa por este modelo, es la percolación profunda, que se genera con el modelo Sacramento, en las cuencas intermedias y de cabecera; esta información es ingresada directamente al modelo de aguas subterráneas (como parte de la recarga superficial, ver acápite 4.4.2.6), sin necesidad de pasar por el MSO.

Para explicar el funcionamiento del modelo, se analizará el balance entre los nodos genéricos n y $n+1$ (de la Figura 4.59), siguiendo el algoritmo programado en el MSO.

1. En el nodo n se cuantifican todos los ingresos, que en este caso corresponden a:
 - La escorrentía superficial desde las cuencas de cabecera en intermedias ($Q_{CC} + Q_{CI}$).
 - El caudal que viene desde el nodo aguas arriba ($Q_{(n-1) - n} \cdot (1 - \text{porcinf})$), al cual le fue descontado la infiltración hacia el río, si es que corresponde (ya que hay módulos, o sectores para los que no se modeló un acuífero).
 - El caudal de afloramiento desde el acuífero al río ($Q_{\text{aflor } n}$), si es que corresponde (valor obtenido del modelo de aguas subterráneas).
 - El retorno de las extracciones hechas en el nodo anterior (R_{Tn} , se explicará más adelante).
2. Una vez que se conoce la cantidad de agua disponible en el nodo, ésta se compara con el caudal de extracción (Q_{EXT}), que nominalmente se pretende sacar en dicho nodo (este caudal corresponde a los derechos de todos los canales que extraen en dicho nodo, es decir, lo máximo que se pueda sacar, aunque no sea necesario; a lo que se suma la demanda nominal de los otros usos que puedan existir). Si el caudal disponible en el nodo es mayor, se puede extraer todo lo requerido, si es menor, se extrae todo lo que se tenga en el nodo.
3. Si del balance en el nodo existe un remanente, éste pasa al nodo $n+1$ ($Q_{n - (n+1)}$), y en el tramo de río entre ambos nodos se producen, si es que corresponde, pérdidas asociadas a la infiltración hacia el acuífero ($Q_{\text{Inf } n - (n+1)} = Q_{n - (n+1)} \cdot \text{porcinf}$), el caudal que no infiltra llega al siguiente nodo.
4. Con respecto al caudal de extracción (Q_{EXT}), éste es separado en un caudal asociado al riego (Q_R) y en otro asociado a las demás actividades (Q_{NR}) que pueden existir en cada módulo.
 - Si $Q_{EXT} < Q_R + Q_{NR}$, ya que en el nodo no había suficiente caudal para satisfacer el valor nominal de extracción, se hace una distribución proporcional.

$$Q_{NR} = \frac{Q_R}{Q_R + Q_{NR}} \cdot Q_{EXT} \quad Q_{NR} = \frac{Q_{NR}}{Q_R + Q_{NR}} \cdot Q_{EXT} \quad (4.4)$$

- Por otro lado, si $Q_{EXT} = Q_R + Q_{NR}$, se satisfacen ambos caudales.
5. Luego, el caudal disponible para el riego, Q_R , es comparado con el caudal que efectivamente requieren las zonas de cultivo, asociadas a los canales que extraen de dicho nodo (Q_{RE} , que en estricto rigor corresponde a las tasas de riego de las mencionadas zonas, valores entregados en el Anexo C10).
 - Si $Q_R > Q_{RE}$, es decir, si el agua que transportan los canales, es mayor a lo que requieren las zonas de riego asociadas, entonces Q_{RE} queda completamente satisfecho.
 - Si $Q_R < Q_{RE}$, es decir, si el agua que transportan los canales, es menor a lo que requieren las zonas de riego asociadas, entonces $Q_{RE} = Q_R$ (se utiliza todo lo que viene en los canales).
 6. En el caso de que $Q_R > Q_{RE}$, entonces el remanente $R_{NU} = Q_R - Q_{RE}$ (retorno por no uso), vuelve al río en el nodo $n+1$, como parte del retorno total $R_{T(n+1)}$. Es importante destacar que esta variable, no representa algo que sucede realmente en el sistema, sino que fue creada para simplificar la programación del modelo, ya que resultaba más simple, sacar todo lo que los derechos de los canales les permitieran en el nodo n y después ver si efectivamente se usa todo dicho caudal; lo cual no afecta a lo que sucede más abajo, porque ese caudal que no se usa en riego, vuelve al nodo siguiente.
 7. Con respecto a Q_{RE} , éste es separado en Q_1 , caudal destinado a las zonas de riego asociadas al tramo del nodo n , y en Q_2 , caudal destinado a las zonas de riego ubicadas aguas abajo del mencionado tramo (recordar que los canales extraen desde un nodo determinado, pero pueden regar zonas que no necesariamente pertenecen al tramo del mismo nodo, e incluso hay canales que sacan agua en un módulo y riegan en zonas de otro).
 8. Luego, al caudal Q_1 se le suma el caudal de riego asociado a los canales que extraen de algún nodo aguas arriba (Q_{2A} , que corresponde al Q_2 calculado en un nodo aguas arriba).
 9. Finalmente, descontando las pérdidas en los canales ($RSCan$), se obtiene el caudal disponible para las zonas de riego del tramo n , Q_{1R} (caudal necesario para satisfacer la demanda evapotranspirativa, teniendo en consideración las pérdidas asociadas a la eficiencia de aplicación de los sistemas de riego).

$$RSCan = (Q_1 + Q_{2A}) - Q_{1R} \quad \text{y} \quad Q_{1R} = (Q_1 + Q_{2A}) \cdot E_c \cdot E_d$$

$$\Rightarrow RSCan = (Q_1 + Q_{2A}) \cdot (1 - E_c \cdot E_d) \quad \text{(4.5)}$$

Donde E_c y E_d son las eficiencias de conducción y de distribución asociadas a los canales de riego. En la Tabla 4.27 se muestran los valores de E_c y E_d utilizado en cada módulo (el método de cálculo de dichas eficiencias se detalla en el Anexo C10).

Tabla 4.27
Eficiencia de conducción y distribución para cada módulo

Módulo	Ec	Eb
CA	0.965	0.800
ELC	0.913	0.800
CR	0.967	0.800
EZ	0.917	0.800
CB	0.954	0.800

10. Luego de aplicado el riego, puede existir un retorno hacia el nodo n+1, R_R , el cual se define de la siguiente manera.

$$R_R = Q_{IR} \cdot (1 - E_{ap}) \cdot (1 - pRU) \cdot pR \quad (4.6)$$

Donde E_{ap} corresponde a la eficiencia de aplicación ponderada de cada zona de riego (en la Tabla 4.28 se muestran las eficiencias de aplicación ponderadas para algunas zonas de cultivo representativas de cada módulo, el método de cálculo y los valores de dichas eficiencias para todas las zonas, se detallan en el Anexo C10); pRU (porcentaje de reutilización) corresponde a una variable de calibración del modelo, que se refiere al reuso que podría existir en las distintas zonas de riego; pR (porcentaje de retorno) también es una variable de calibración, que se refiere al porcentaje del derrame de riego que vuelve al nodo siguiente.

Tabla 4.28
Eficiencia de aplicación ponderada para zonas de cultivo representativas

Zona Riego	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
CA-CC3-1	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
CA-CI4-3	0.850	0.851	0.850	0.850	0.850	0.831	0.823	0.821	0.824	0.843	0.849	0.849
ELC-Z1	0.778	0.779	0.784	0.784	0.607	0.674	0.694	0.701	0.716	0.762	0.781	0.780
ELC-Z2	0.853	0.854	0.860	0.860	0.775	0.809	0.808	0.812	0.820	0.844	0.853	0.853
CR-CI3-4	0.841	0.842	0.837	0.837	0.837	0.814	0.811	0.809	0.813	0.834	0.840	0.840
CR-CI9-1	0.788	0.786	0.739	0.739	0.567	0.629	0.719	0.726	0.738	0.779	0.795	0.794
EZ-Z1	0.709	0.710	0.710	0.710	0.586	0.625	0.633	0.637	0.648	0.692	0.711	0.710
EZ-Z6	0.697	0.700	0.765	0.765	0.418	0.510	0.549	0.567	0.592	0.664	0.705	0.704
CB-CI2-1	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900	0.900
CB-CI7-2	0.787	0.786	0.758	0.758	0.570	0.640	0.711	0.719	0.733	0.776	0.794	0.792

Este retorno de riego (R_R), se suma al retorno por no uso (R_{NU}) para obtener el retorno total al nodo n+1 ($R_{T(n+1)}$).

11. De las zonas de riego también existe una infiltración al acuífero, y para calcularla, se supuso que todo lo que no retornaba al nodo siguiente, infiltra al acuífero.

$$RSRie = R_R \cdot \frac{(1 - pR)}{pR} \quad (4.7)$$

Los valores obtenidos para RSRie como para RSCan, son ingresados al modelo de aguas subterráneas, como parte de la recarga superficial.

Es importante mencionar que para efectos del modelo, la infiltración en las zonas de riego (RSRie) y las pérdidas de canales (RSCan), desde aquellas cuencas en que no había modelo de aguas subterráneas (módulo CA y las partes altas de los módulos CB y CR), se consideraron despreciables, ya que en dichas cuencas las zonas de riego son pequeñas, y por lo tanto, los valores de las mencionadas recargas son despreciables frente a la recarga subterránea.

Con respecto a los caudales de infiltración y afloramiento en el río, la manera de calcularlos en el MSO, fue la siguiente.

- Los caudales de infiltración desde los cauces superficiales (Q_{inf}), son calculados de manera automática en Visual Modflow, por lo tanto, en el MSO el porcentaje de infiltración (porcinf), que determina al mencionado caudal, se convirtió en una variable de calibración, ya que debía ser ajustada según los valores obtenidos en el modelo de aguas subterráneas, de manera tal que los valores de infiltración en ambos modelos fueran coherentes.
- Los caudales de afloramiento del acuífero a los cauces superficiales (Q_{aflor}), también son calculados automáticamente en Visual Modflow. Esta variable no se considera de calibración, ya que no debe ser ajustada en ambos modelos, sino que se traspaasa directamente desde el subterráneo al MSO.

4.5.2 Calibración del MSO

Previo a mostrar los resultados de la calibración del MSO, es necesario hacer algunas consideraciones con respecto al proceso:

- El período de calibración corresponde a Abril 1999 – Marzo 2005, con un intervalo de tiempo mensual, por lo que se tienen 72 períodos.
- Las estaciones fluviométricas utilizadas en la calibración de cada módulo, son las que se muestran en la Tabla 4.29.

Tabla 4.29
Estaciones Fluviométricas utilizadas para la Calibración MSO

Módulo	Estación Fluviométrica
CA	Río Cachapoal en Puente Termas de Cauquenes
ELC	Estero de La Cadena antes junta Río Cachapoal
CR	Río Claro en Tunca
EZ	Estero Zamorano en Puente el Niche
CB	Río Cachapoal en Puente Arqueado

- Para la calibración del módulo CB, en las conexiones con los otros módulos, se utilizaron los caudales observados de éstos.

- Para el módulo EZ la estación de calibración no coincide con el nodo de salida, sino que se encuentra en la salida de la cuenca EZ-CC1-1, por lo tanto la calibración se realiza en dicho punto. Las escorrentías de las cuencas intermedias EZ-CI3-1 y EZ-CI3-2, se suman a los valores observados en el punto de calibración, y son calibrados en conjunto con las cuencas del módulo CB.
- Para el módulo CR ocurre lo mismo que en EZ, la estación de calibración se encuentra en el nodo 8 (el de salida es el 9), por lo tanto, se aplicó igual criterio para las cuencas intermedias CR-CI9-1 y CR-CI9-2.
- Para los módulos CA y CR, en la salida de las cuencas en régimen natural, se utilizaron los datos de caudales observados. En las cuencas de calibración CA-CC1-1 y PAN-CC1-1, como se describió en los acápites 4.3.4.4 y 4.3.4.5, no se tienen datos completos de caudales para el período de calibración, por lo que los datos faltantes, fueron generados con los respectivos modelos de escorrentía.
- Como ya se mencionó en el acápite anterior, las variables de calibración del MSO son pR, pRU y porcinf. Luego de llevada a cabo la calibración del modelo, se detectó que la variable más importante es porcinf, ya que cualquier modificación de ésta, afecta de manera considerable a los resultados de la calibración del MSO; con respecto a las otras variables, se probaron distintos valores para ellas (valores muy bajos y muy altos, entre 0 y 1, ya que son porcentajes), pero se observó que en términos prácticos no afectaban en nada los resultados obtenidos, por lo que se utilizó el mismo valor para todos los nodos y todos los módulos, 0.9 para pR y 0.8 para pRU.
- La calibración del MSO implicó la realización del mismo proceso, de manera simultánea, para las otras componentes del modelo. De hecho, para obtener la calibración considerada como adecuada para todo el Modelo Integrado, los parámetros del modelo Sacramento, para todas aquellas cuencas no calibradas, debieron ser modificados, de tal manera de permitir un buen ajuste en el modelo de aguas subterráneas y en el MSO.

En las Figuras 4.60 a 4.69 se muestran los resultados de la calibración, en cuanto a los caudales mensuales en los puntos de salida de cada módulo. Los coeficientes de Nash – Sutcliffe (NS) asociados a cada calibración, se muestran en la Tabla 4.30. Para los módulos CA, EZ y CR, se tienen algunos meses con días sin información, por esta razón, dichos meses no fueron considerados en el cálculo del coeficiente NS, así como tampoco en los respectivos gráficos. Los caudales observados y simulados se muestran en el Anexo C11.

Además, para determinar las diferencias en cuanto a la cantidad de agua que simula el modelo, versus lo observado, se calculó el volumen total producido en ambos casos (en el período de calibración), obteniéndose los resultados que se muestran en la Tabla 4.31.

Figura 4.60
Caudales Observados y Simulados salida Módulo CA

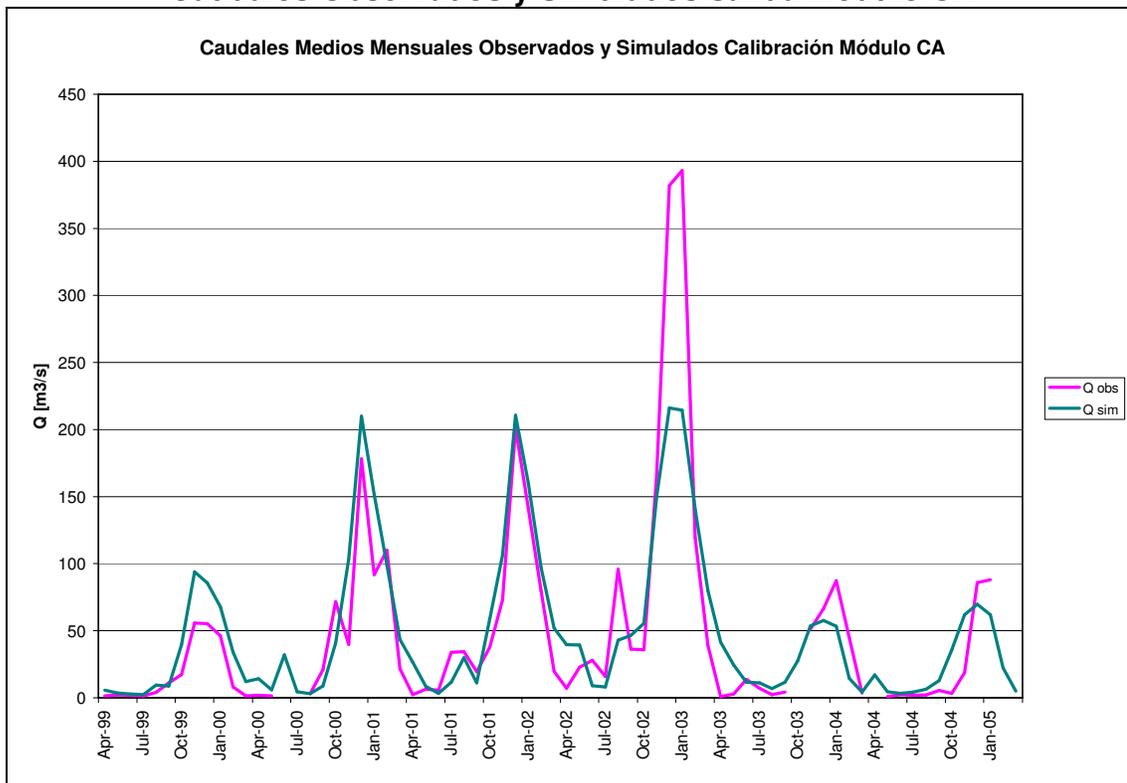


Figura 4.61
Correlación Caudales Medios Mensuales Observados y Simulados Módulo CA

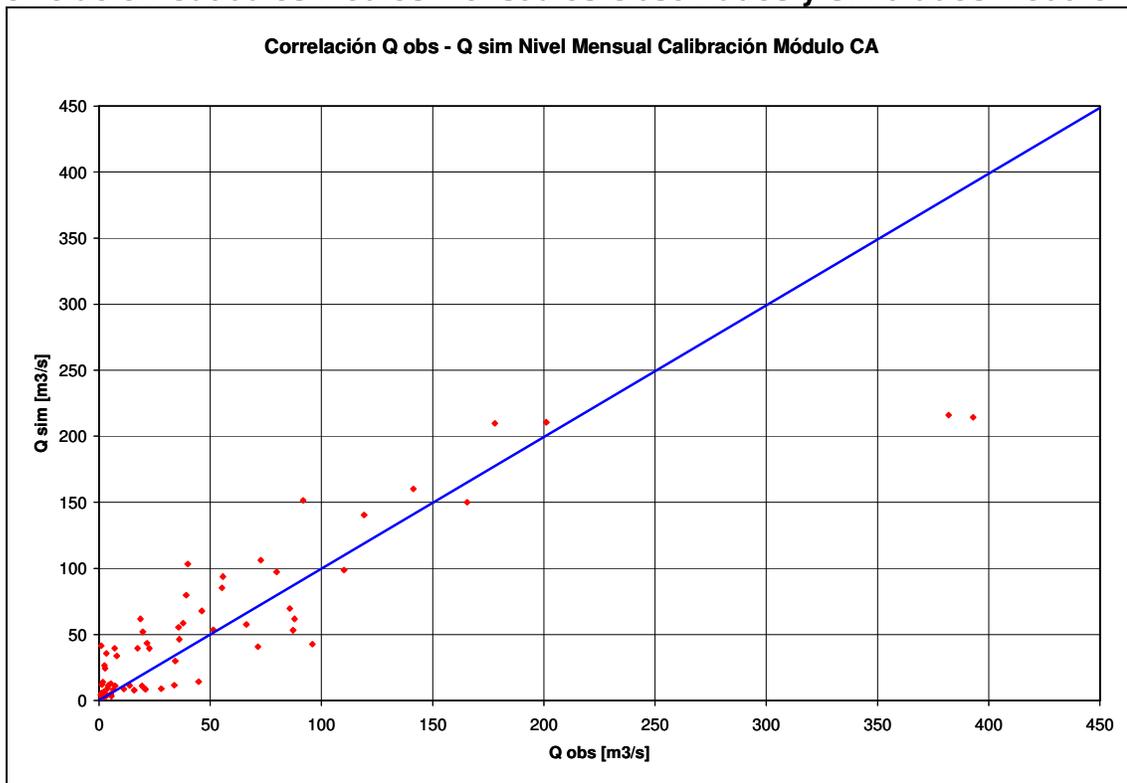


Figura 4.62
Caudales Observados y Simulados salida Módulo ELC

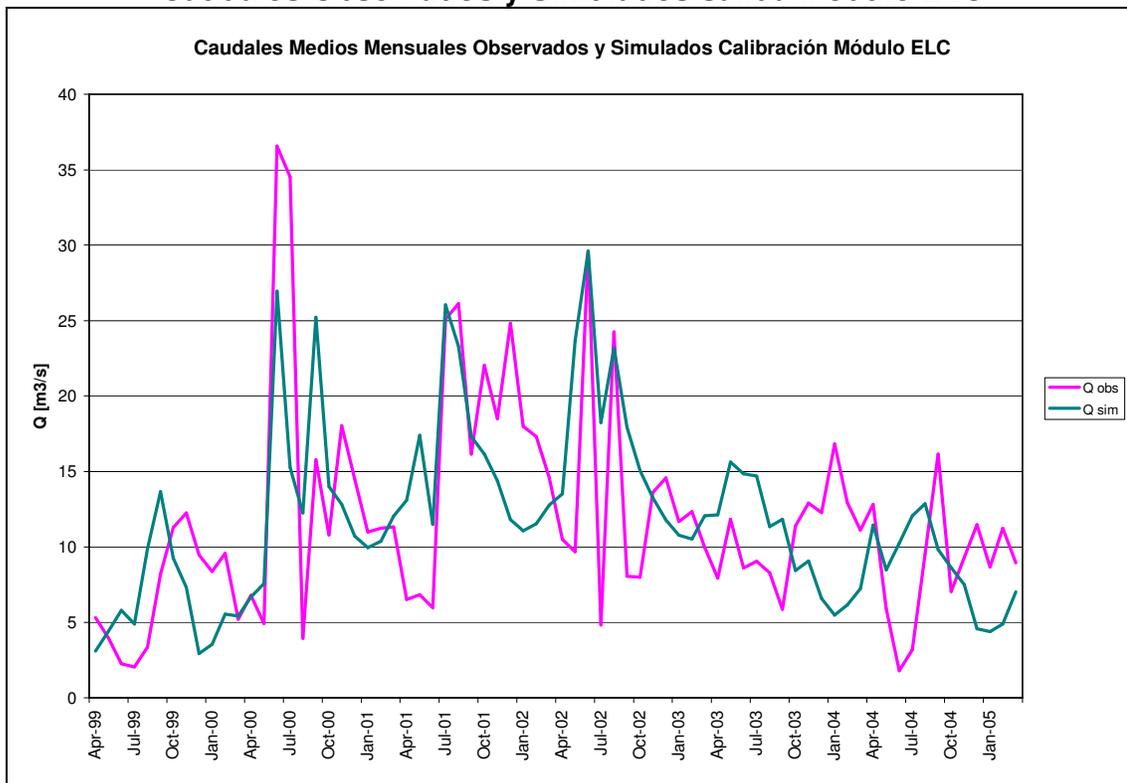


Figura 4.63
Correlación Caudales Medios Mensuales Observados y Simulados Módulo ELC

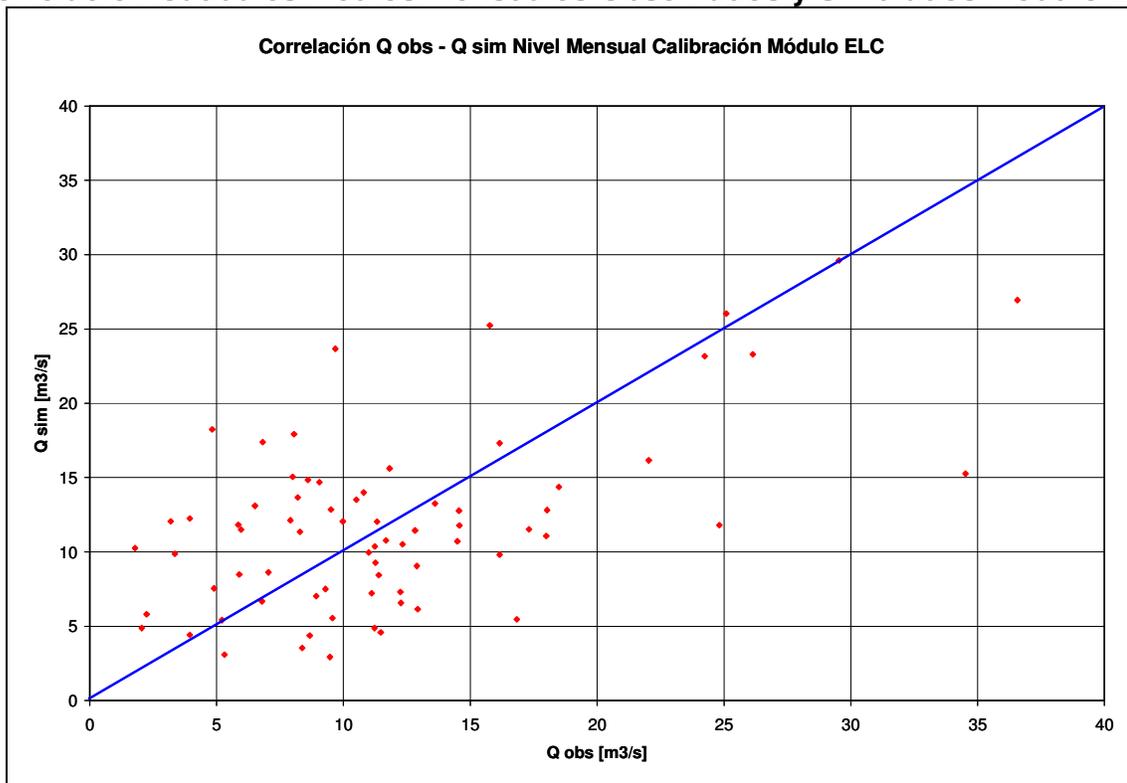


Figura 4.64
Caudales Observados y Simulados salida Módulo CR

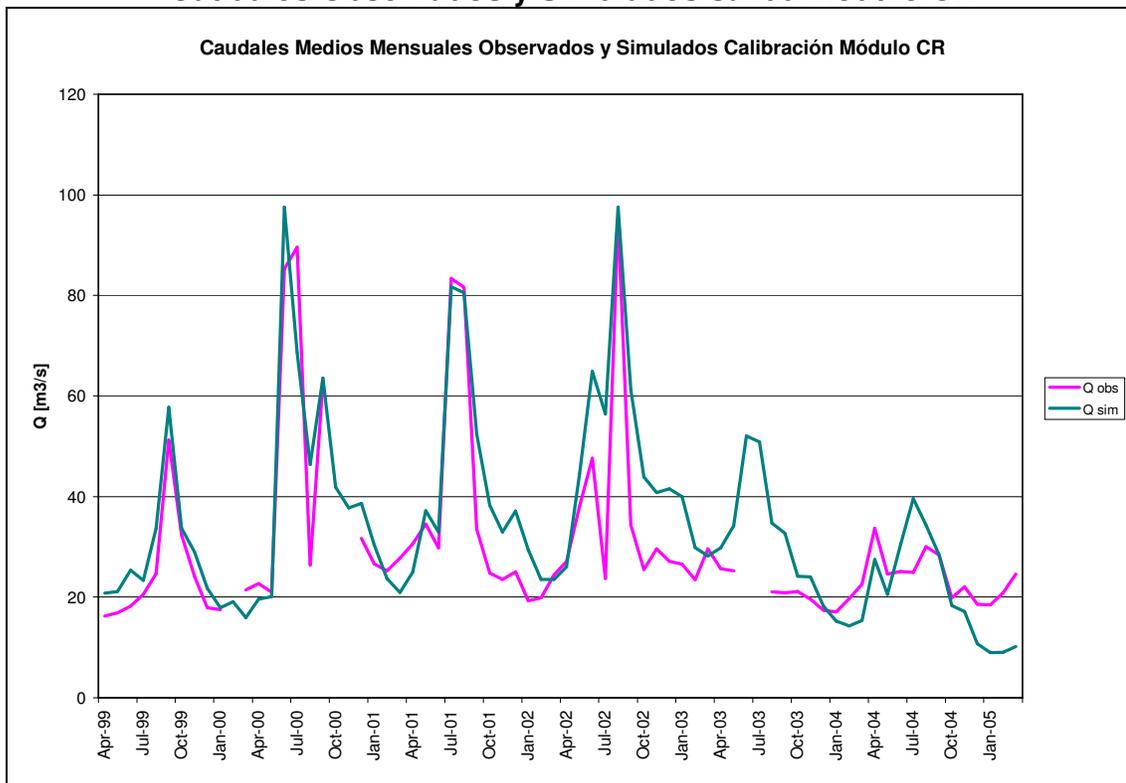


Figura 4.65
Correlación Caudales Medios Mensuales Observados y Simulados Módulo CR

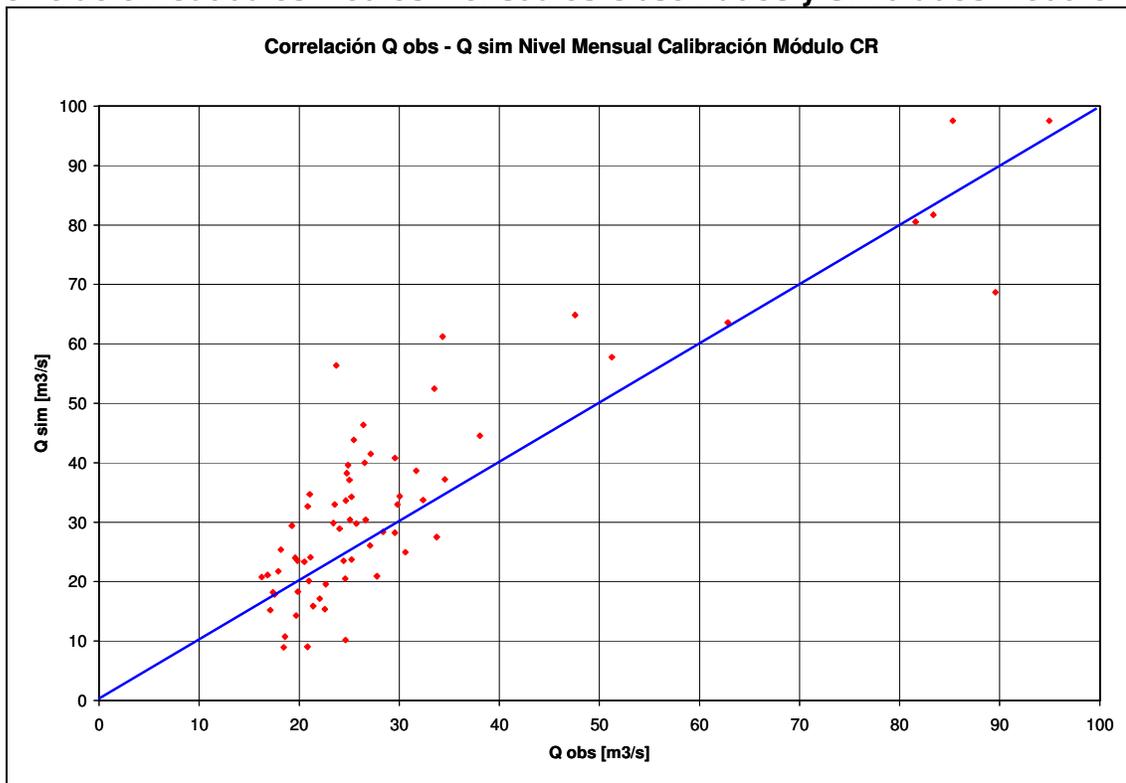


Figura 4.66
Caudales Observados y Simulados salida Módulo EZ

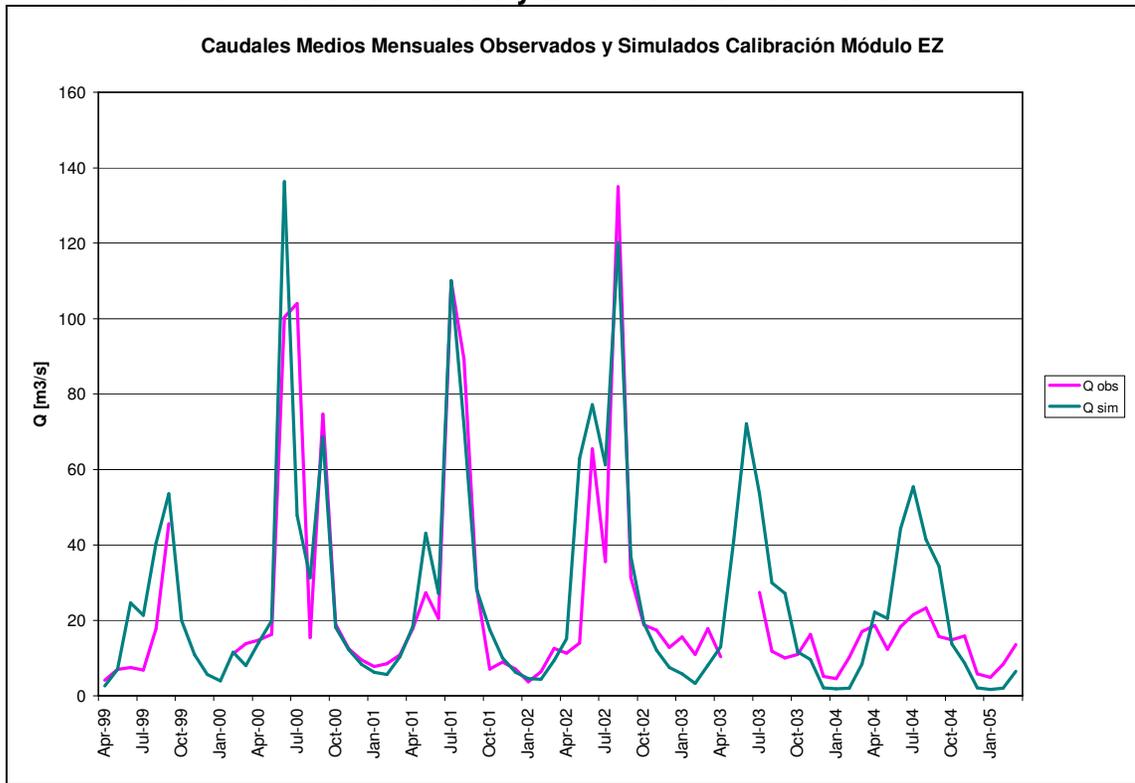


Figura 4.67
Correlación Caudales Medios Mensuales Observados y Simulados Módulo EZ

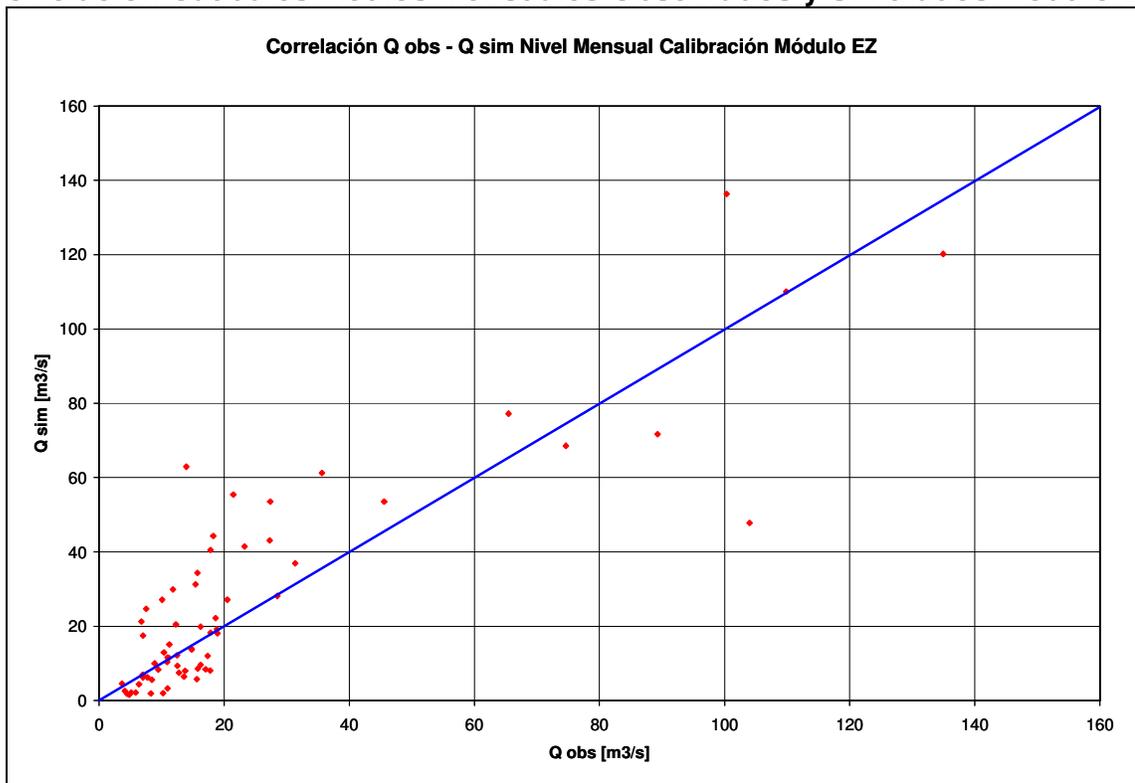


Figura 4.68
Caudales Observados y Simulados salida Módulo CB

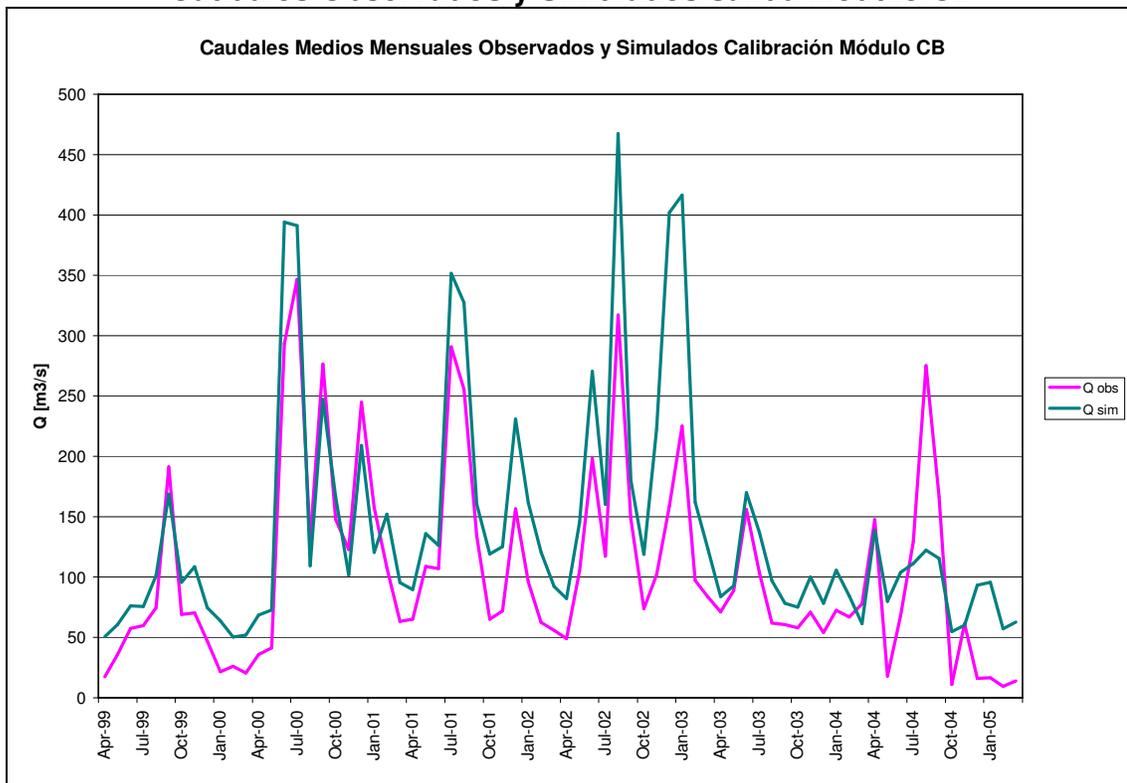


Figura 4.69
Correlación Caudales Medios Mensuales Observados y Simulados Módulo CB

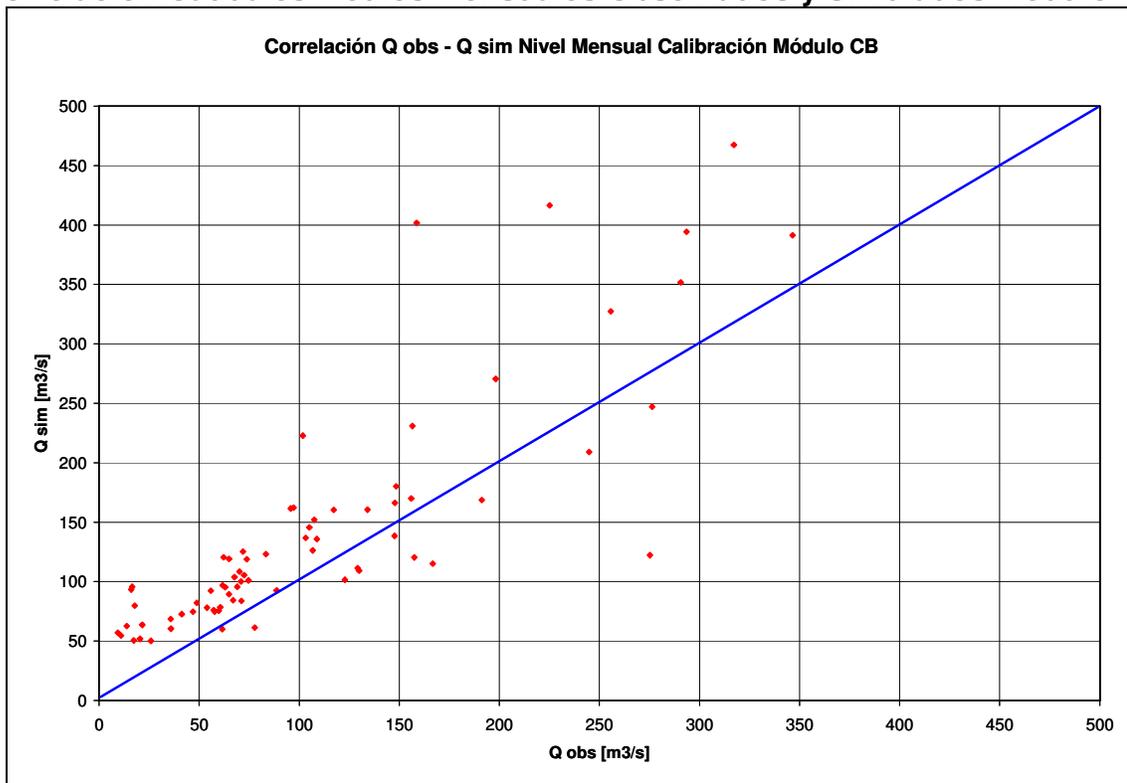


Tabla 4.30
Coefficiente de NS calibración MSO en cada Módulo

Módulo	NS
CA	0.75
ELC	0.28
CR	0.69
EZ	0.71
CB	0.47

Tabla 4.31
Volumen de agua Observado y Simulado Módulos

Módulo	VOL TOTAL OBS [10 ⁶ m ³]	VOL TOTAL SIM [10 ⁶ m ³]
CA	8,530	8,980
	% Volumen Exceso (+) o Defecto (-)	5.28%
ELC	2,246	2,239
	% Volumen Exceso (+) o Defecto (-)	-0.31%
CR	5,373	6,054
	% Volumen Exceso (+) o Defecto (-)	12.66%
EZ	4,031	4,592
	% Volumen Exceso (+) o Defecto (-)	13.91%
CB	20,230	26,758
	% Volumen Exceso (+) o Defecto (-)	32.27%

Con respecto a los resultados obtenidos para cada módulo, se aprecia lo siguiente:

- Para el módulo CA, se tiene un alto valor de NS, y a nivel gráfico (Figura 4.60) se observa que salvo los meses de Diciembre-02 y Enero-03, en que los valores observados no pudieron ser bien reproducidos, el resto de los caudales presentan un buen ajuste. Lo mismo se confirma en la Figura 4.61, en la que salvo los puntos mencionados, que se alejan marcadamente por debajo de la recta (son subestimados por el modelo), el resto de los puntos indica que existe una buena correlación entre los caudales observados y simulados.

Con respecto al volumen que se produce en el módulo CA, se observa que el modelo lo sobrestima en un 5.28%, lo que constituye un porcentaje aceptable considerando el tamaño del Modelo Integrado y todos los supuestos hechos en su construcción.

- Para el módulo ELC, se tiene un bajo valor de NS, y a nivel gráfico (Figura 4.62) se observa que los valores observados no pudieron ser bien reproducidos. Lo mismo se confirma en la Figura 4.63, en la cual la mayoría de los puntos se encuentra alejada de la recta, lo que implica una mala correlación de los caudales observados y simulados. Esto probablemente se debe a que no se tuvo información suficiente para calibrar de buena manera las escorrentías que se producen en ELC-CC1-1, lo que produce una mala simulación de la operación del sistema en este módulo.

Con respecto al volumen que se produce en el módulo ELC, se observa que el modelo lo subestima en un 0.31%, lo que constituye un porcentaje bastante bueno, en relación a lo malo que resultó el ajuste.

- Para el módulo CR, se tiene un alto valor de NS, y a nivel gráfico (Figura 4.64) se observa que los valores observados, pudieron ser bien reproducidos hasta el período invernal del año 2002, desde ahí en adelante el modelo sobrestima de manera importante los caudales de salida del módulo. Lo mismo se confirma en la Figura 4.65, en la cual se observa un grupo de puntos bastante cercanos a la recta (buena correlación) y otro que se aleja más, lo que indica una mala correlación para ellos.

Con respecto al volumen que se produce en el módulo CR, se observa que el modelo lo sobrestima en un 12.66%, lo que constituye un porcentaje bastante alto, que indica que el modelo está generando más agua de lo que realmente se produce, tal como se observa en las Figuras 4.64 y 4.65.

- Para el módulo EZ, se tiene un alto valor de NS, y a nivel gráfico (Figura 4.66) se observa que los valores observados, pudieron ser bien reproducidos hasta el período de deshielo del año 2002, desde ahí en adelante el modelo sobrestima de manera importante los caudales de salida del módulo. Lo mismo se confirma en la Figura 4.67, en la cual se observa un grupo de puntos bastante cercanos (buena correlación) y otro que se aleja más, lo que indica una mala correlación para ellos.

Con respecto al volumen que se produce en el módulo EZ, se observa que el modelo lo sobrestima en un 13.91%, lo que constituye un porcentaje bastante alto, que indica que el modelo está generando más agua de lo que realmente se produce, tal como se observa en las Figuras 4.66 y 4.67.

- Para el módulo CB, se tiene un valor no muy alto de NS, y a nivel gráfico (Figura 4.68) se observa que excepto algunos casos, el modelo sobrestima de manera importante los caudales de salida del módulo. Lo mismo se confirma en la Figura 4.69, en la cual se observa que la mayoría de los puntos están por sobre la recta, lo que indica una sobrestimación de los caudales por parte del modelo, de magnitudes importantes, ya que hay algunos puntos que se alejan bastante.

Con respecto al volumen que se produce en el módulo CB, se observa que el modelo lo sobrestima en un 32.27%, lo que constituye un porcentaje muy alto, que indica que el modelo está generando mucha más agua de lo que realmente se produce, tal como se observa en las Figuras 4.68 y 4.69.

Del cálculo de los volúmenes de agua simulados y observados, se observa que en términos generales (excepto para el módulo ELC) los caudales de salida fueron sobrestimados por el modelo de simulación operacional, lo que puede estar relacionado con las siguientes causas: una sobrestimación de los caudales que aportan las cuencas de cabecera e intermedias que no fueron calibradas en el modelo Sacramento (ya que no se contaba con información de caudales de salida); una subestimación de los usos que se tienen en cada módulo, lo que implica una sobrestimación de los caudales en los ríos, y por lo tanto, en la salida de cada módulo.

Con respecto al porcentaje de infiltración, que constituye la variable de calibración más influyente en los resultados del modelo, en la Tabla 4.32 se muestran los valores que automáticamente generó el modelo de aguas subterráneas y los que fueron

introducidos en el MSO. Se observa que los valores son bastante similares en ambos casos, por lo que existe coherencia, y por lo tanto, la integración entre los modelos es adecuada.

Tabla 4.32
Porcentajes de Infiltración Modelo de Aguas Subterráneas y MSO

Módulo	Tramo	porcinf Modelo Aguas Subterráneas	porcinf MSO
CA	N1-N2	0%	0%
	N2-N3	0%	0%
	N3-N4	0%	0%
	N4-N5	0%	0%
ELC	N0-N1	0.031%	0.032%
CR	N1-N2	0%	0%
	N2-N3	0%	0%
	N3-N4	2.637%	2.637%
	N4-N5	2.637%	2.637%
	N5-N6	0%	0%
	N6-N7	0%	0%
	N7-N8	0.141%	0.141%
	N8-N9	0.029%	0.028%
EZ	N0-N1	0.004%	0.005%
	N1-N2	0.001%	0.001%
CB	N1-N2	0%	0%
	N2-N3	0%	0%
	N3-N4	4.100%	4.099%
	N4-N5	0.915%	0.915%
	N5-N6	0.044%	0.044%
	N6-N7	0.044%	0.044%

Con respecto a los valores de satisfacción de la demanda, en el Anexo C11 se muestran los resultados de las zonas de riego, y para los otros usos del recurso hídrico superficial (agua potable, minería y centrales hidroeléctricas). De estos resultados se rescata lo siguiente:

- En todos los módulos, en el período de deshielo, el sistema es incapaz de satisfacer la demanda de riego, aunque en algunos casos (ELC y CR) el porcentaje de insatisfacción es mínimo. Para el período invernal hay una satisfacción completa de la demanda.

De acuerdo a esto, para dicho uso se podría decir que el modelo no es capaz de realizar una buena simulación, lo que podría atribuirse a que se subestimaron los valores de tasas de riego, o bien, los caudales de deshielo generados en las cuencas de cabecera e intermedias (no sólo las calibradas) fueron subestimados.

- Con respecto a la satisfacción de la demanda de agua para la Planta Los Nogales, se aprecia que el modelo no es capaz de simular de manera correcta, los valores observados del caso más representativo de las plantas de agua potable (para la

Planta Coya la satisfacción es 100% para todo el período de simulación), ya que salvo algunos meses, no se llega a los valores nominales ingresados al modelo.

Por lo tanto, en cuanto a este uso, el modelo no es capaz de realizar una buena simulación, lo que no implica que el MSO tenga un error asociado, sino que también podría estar relacionado con que la disponibilidad de recursos hídricos (generados mediante Sacramento), no es suficiente para cubrir la demanda satisfecha en el funcionamiento real del sistema (en una de las cuencas que abastecen la Planta Los Nogales, CB-CC2-1, los caudales simulados son bastante bajos, pero no se pudo comprobar si fueron subestimados ya que no se contaba con caudales observados).

- En el caso del uso minero del recurso hídrico, para las 3 extracciones impuestas al sistema, se abastece el 100% de la demanda. Por lo tanto, claramente el modelo es capaz de simular de buena manera este uso.
- Con respecto a la satisfacción de la demanda de agua para las Centrales Sauzal y Sauzalito, se aprecia que para algunos meses el modelo no es capaz de simular de manera correcta los valores observados (sobre todo en el caso de Sauzal), sin embargo, en términos generales se observa que la simulación es al menos adecuada.

Por lo tanto, en cuanto a este uso, se concluye que el modelo es capaz de realizar una simulación aceptable.

De todos los resultados obtenidos para la calibración del MSO, se estableció que éstos son satisfactorios, considerando que se trata de un modelo que incorpora varios supuestos en cuanto al funcionamiento del sistema, y que además incluye bastante información desde el modelo de aguas subterráneas, de escorrentía superficial y de los usos superficiales, la cual podría llevar a acumular un error importante en la calibración, lo que no se observó en este caso, demostrando la calidad del modelo. Por todo esto, se concluye que se obtuvo un modelo de simulación operacional del río Cachapoal, que representa de manera adecuada el funcionamiento del sistema y por lo tanto, puede ser utilizado como parte del Modelo Integrado.

Por último, con respecto al Modelo Integrado, se puede concluir que cada una de sus componentes fue calibrada de manera satisfactoria, y que además fueron relacionadas adecuadamente, por lo tanto, se cuenta con una herramienta apropiada para caracterizar la cuenca del río Cachapoal y para realizar el análisis del efecto del cambio climático, en los recursos hídricos de dicha cuenca.

Capítulo 5

Generación de Escenarios de Cambio Climático

5.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describe el proceso de generación de los escenarios de cambio climático, que fueron evaluados en el Modelo Integrado descrito en el Capítulo 4, para determinar los efectos de dicho cambio en los recursos hídricos de la cuenca del río Cachapoal.

Dichos escenarios fueron generados mediante la utilización del programa SDSM, que permitió hacer el escalamiento (downscaling) de los resultados disponibles de los escenarios de cambio climático del IPCC (descritos en el Capítulo 2), para el modelo de circulación general de la atmósfera HadCM3.

5.2 TÉCNICA DE ESCALAMIENTO DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS

Como fue indicado en el Capítulo 2, los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (General Circulation Model, GCM), poseen un nivel de resolución que excede por mucho, al nivel requerido para el Modelo Integrado, desarrollado para la cuenca en estudio. Para subsanar esta incompatibilidad (a nivel espacial), entre las salidas de los GCM y los datos requeridos para el estudio de los efectos del cambio climático, se utiliza la técnica de escalamiento (downscaling) de las variables meteorológicas requeridas.

Se escogió esta técnica ya que es fácil para trabajar y no requiere computadores con grandes capacidades para llevarla a cabo. El programa escogido para realizar el escalamiento fue SDSM versión 4.2 (Statistical Downscaling Model), dicha elección se basó en los buenos resultados que arrojó el programa en los trabajos realizados por Osses (2006) y Zeray (2006).

a) Descripción del programa Statistical Downscaling Model (SDSM)

El programa SDSM versión 4.2, fue desarrollado por Robert Wilby y Christian Dawson el año 2007, y puede ser descargado de manera gratuita desde la página web del programa (<https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM>), junto con el manual para el usuario (Wilby et al, 2007). Según la clasificación hecha en el acápite 2.2.1.2, la técnica de escalamiento que utiliza este programa, es un híbrido entre generación climática estocástica y función de transferencia.

El programa requiere la siguiente información de entrada:

- Datos diarios de las variables meteorológicas analizadas en la zona de estudio.
- Datos del GCM (en este caso el modelo HadCM3) para la grilla que incluye a la zona de estudio.

- Datos del re-análisis del National Center for Environmental Prediction (NCEP) en la grilla asociada al GCM.

Los datos del GCM y del NCEP están disponibles en la página web (<http://www.cics.uvic.ca/scenarios/index.cgi?Scenarios>) del Canadian Climate Impacts Scenarios (CCIS).

Los datos del re-análisis del NCEP son el resultado del proyecto NCEP/NCAR (Nacional Center for Atmospheric Research), cuyo propósito fue crear una base de datos retroactiva (de 51 años, entre 1948 y 1998), del análisis global de las variables atmosféricas, lo que permitiría apoyar las necesidades de las comunidades de investigación y monitoreo del clima. Dicho proyecto implicó la recolección de datos medidos a nivel superficial (terrestre), en barcos, sondas meteorológicas, aviones y satélites; los cuales fueron analizados con un sistema de asimilación que se mantuvo invariable en el período de re-análisis (Kistler et al, 1999).

El programa SDSM 4.2 utiliza una función de transformación para desagregar los datos de la grilla del GCM, para llevarlos a la zona de estudio. Esta función es calibrada con los datos de la estaciones meteorológicas de dicha zona, y con los datos del re-análisis del NCEP (Osses, 2006).

Para llevar a cabo el escalamiento estadístico, en el programa se deben realizar una serie de pasos, que a continuación se explican brevemente.

- ***Control de calidad y transformación de datos:***

Dentro del programa, existe la opción de chequear la calidad de los datos observados que se ingresan, para así comprobar que no existan datos incoherentes (demasiado grandes o demasiado pequeños), especificar el código para datos incompletos y determinar algunos valores estadísticos (máximo, mínimo y promedio).

Además, en esta etapa se permite la transformación de los datos de entrada, para así lograr una mejor correlación de éstos con los predictores del NCEP; algunas de las transformaciones que se pueden aplicar son: logarítmica, exponencial, logaritmo natural, etc.

- ***Determinación de las variables predictoras:***

Los métodos de escalamiento estadístico (statistical downscaling) se basan en identificar las relaciones empíricas entre los predictores (en este caso del NCEP) y los predictandos (por ejemplo la precipitación en una estación de la zona de estudio).

Los predictores que se utilizan en el modelo SDSM 4.2 se muestran en la Tabla 5.1.

El principal propósito de esta etapa es determinar las variables predictoras que mejor representan a la variable que se busca calibrar (predictando). El programa entrega la opción de realizar un análisis de la variación temporal y la correlación entre los predictores y el predictando, a un nivel anual, estacional o mensual.

Tabla 5.1
Predictores utilizados en el programa SDSM 4.2

N°	Predictor	Descripción	N°	Predictor	Descripción
1	mslp	Presión media al nivel del mar	14	p5zh	Divergencia a 500 [hPa]
2	p_f	Fuerza del flujo de aire superficial	15	p8_f	Fuerza del flujo de aire a 850 [hPa]
3	p_u	Velocidad zonal superficial	16	p8_u	Velocidad zonal a 850 [hPa]
4	p_v	Velocidad meridional superficial	17	p8_v	Velocidad meridional a 850 [hPa]
5	p_z	Vorticidad superficial	18	p8_z	Vorticidad a 850 [hPa]
6	p_th	Dirección del viento superficial	19	p850	Altura neopotencial a 850 [hPa]
7	p_zh	Divergencia superficial	20	p8th	Dirección del viento a 850 [hPa]
8	p5_f	Fuerza del flujo de aire a 500 [hPa]	21	p8zh	Divergencia a 850 [hPa]
9	p5_u	Velocidad zonal a 500 [hPa]	22	r500	Humedad relativa a 500 [hPa]
10	p5_v	Velocidad meridional a 500 [hPa]	23	r850	Humedad relativa a 850 [hPa]
11	p5_z	Vorticidad a 500 [hPa]	24	rhum	Humedad relativa cercana a la superficie
12	p500	Altura neopotencial a 500 [hPa]	25	shum	Humedad específica superficial
13	p5th	Dirección del viento a 500 [hPa]	26	temp	Temperatura media a 2 [m]

Nota: 1 hPa = 1 mbar = 100 Pa

De esta manera se determinan los mejores predictores, para la posterior calibración del modelo, esta determinación se basa en cuatro aspectos: *la varianza mensual* (para un nivel de significancia dado) asociada a los distintos pares predictor-predictando, lo cual permite analizar la representatividad de los predictores para cada mes; *la correlación inter-variables* permite determinar la representatividad de cada predictor con respecto al predictando, considerando la influencia de todos los otros predictores; *la correlación parcial* permite determinar la representatividad de cada predictor con respecto al predictando, una vez que la influencia de todos los otros predictores ha sido removida; el *valor p* indica el nivel de significancia de la relación predictor-predictando, valores grandes indican que el valor de correlación es sólo casual.

- **Calibración del modelo:**

En esta etapa se determina la relación matemática, entre un determinado predictando y el grupo de predictores seleccionado en la etapa anterior, con lo cual el programa construye, mediante un algoritmo de optimización, un modelo de escalamiento basado en una ecuación de regresión lineal múltiple.

La calibración se puede hacer a nivel mensual, estacional o anual. Además se debe especificar si el proceso asociado al predictando es no-condicional o condicional; en el primer caso se considera que existe una relación directa entre el predictor y el predictando, en el segundo existe un proceso intermedio entre el forzamiento regional y el clima local.

- **Validación del modelo:**

Mediante la herramienta Weather Generator (Generador climático), el programa permite generar series sintéticas para un período distinto al de calibración, utilizando datos observados para el mencionado período y las ecuaciones de regresión lineal múltiple determinadas en la etapa anterior. De esta manera se puede validar el modelo calibrado, usando datos diferentes a los del período de calibración.

- **Generación de escenarios de cambio climático:**

La opción de generación de escenarios, permite generar para la variable climática en estudio (predictando), mediante la utilización de los predictores del GCM (para la celda de la grilla asociada a la zona de estudio se tienen los mismos predictores indicados en la Tabla 5.1) y los parámetros del proceso de calibración, series climáticas sintéticas susceptibles de suceder a futuro. Es posible generar de 1 a 100 series diarias de datos.

Es importante mencionar que, en esta etapa, al utilizar los parámetros del proceso de calibración para la generación de escenarios, se supone que la correlación predictor – predictando (variables de escala global – variables de escala local) se mantiene igual a futuro.

5.3 PROCESO DE ESCALAMIENTO DE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS

5.3.1 Datos de entrada

El primer paso consiste en descargar desde la página web de la CCIS (indicada en el acápite 5.2.1), los archivos de datos a utilizar en el programa. Como fue indicado en el Capítulo 2, para Sudamérica sólo se encuentran disponibles los datos para el GCM HadCM3.

En la Figura 5.1 y en la Tabla 5.2 se observa que la Sexta Región de Chile, y por lo tanto la cuenca del río Cachapoal, quedan contenidas en la celda 78X – 49Y.

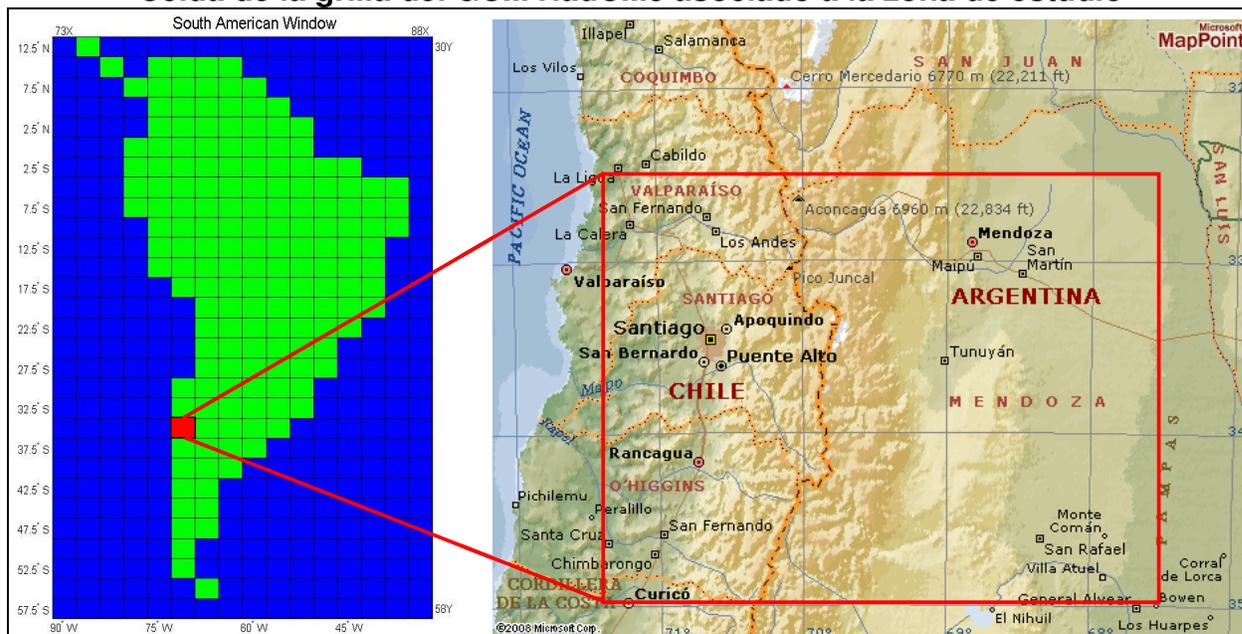
Los datos descargados de la celda contienen tres directorios:

- **NCEP_1961-2001:** este directorio contiene 41 años de datos diarios observados de los predictores, derivados del re-análisis del NCEP, normalizados con respecto al período 1961-1990. Estos datos están interpolados para la misma grilla que HadCM3 antes de realizar la normalización.
- **H3A2a_1961-2099:** este directorio contiene 139 años de datos diarios de los predictores del escenario A2a del IPCC, corrido en el GCM HadCM3, normalizados con respecto al período 1961-1990.
- **H3B2a_1961-2099:** este directorio contiene 139 años de datos diarios de los predictores del escenario B2a del IPCC, corrido en el GCM HadCM3, normalizados con respecto al período 1961-1990.

Tabla 5.2
Coordenadas Sexta Región y BOX 78X-49Y

	SEXTA REGIÓN	BOX 78X-49Y
LATITUD	33° 51' - 35° 01' S	32° 30' - 35° 00' S
LONGITUD	72° 02' - 70° 02' W	71° 15' - 67° 30' W

Figura 5.1
Celda de la grilla del GCM HadCM3 asociado a la zona de estudio



Fuente: <http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi>
<http://encarta.msn.com/encnet/features/mapcenter/map.aspx>

Para efectos del informe, los escenarios A2a y B2a serán llamados como escenarios A2 y B2. En los tres directorios, los predictores son los indicados en la Tabla 5.1.

Con respecto a los datos diarios medidos, de las variables meteorológicas analizadas en la zona de estudio, en este caso se optó por llevar a cabo el proceso de escalamiento con una sola estación meteorológica dentro de dicha zona (utilizando la misma metodología empleada por Zeray (2006)), que corresponde a la estación Rengo, que tiene información de temperatura, evaporación y precipitación. Para el caso de la temperatura y precipitación, para determinar los valores en los escenarios de cambio climático, de las demás estaciones de la cuenca que se utilizan en el Modelo Integrado (ver acápite 4.3.2), se establecieron correlaciones entre los valores diarios de los datos observados en dichas estaciones, con respecto a Rengo. Para el caso de la evaporación no fue necesario establecer correlaciones, ya que la estación Rengo se utiliza para toda la cuenca del río Cachapoal.

Esta metodología permite asegurar la coherencia, entre los valores de las variables meteorológicas, en las estaciones de la cuenca, para los distintos escenarios planteados, ya que si se realizara el proceso de escalamiento para todas las estaciones requeridas, las tendencias generadas no necesariamente serían coherentes, por ejemplo, en dos estaciones muy cercanas, podría observarse un marcado aumento de

precipitación y en otra una marcada disminución. Para esta metodología, también se requiere hacer el supuesto de que las correlaciones entre estaciones, se mantienen iguales a futuro.

En la Tabla 5.3 se muestran los coeficientes R^2 entre las estaciones pluviométricas de la cuenca.

Tabla 5.3
Coeficiente R^2 Estaciones Pluviométricas Cuenca río Cachapoal

Estaciones Pluviométricas	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Rancagua Endesa (1)	1	0.78	0.76	0.74	0.70	0.59	0.61	0.82
Popeta (2)	---	1	0.87	0.80	0.77	0.69	0.64	0.91
Central Las Nieves (3)	---	---	1	0.82	0.78	0.71	0.64	0.89
San Fernando (4)	---	---	---	1	0.87	0.75	0.74	0.87
Coltauco (5)	---	---	---	---	1	0.73	0.71	0.83
Millaje (6)	---	---	---	---	---	1	0.73	0.75
Pichidegua (7)	---	---	---	---	---	---	1	0.73
Rengo (8)	---	---	---	---	---	---	---	1

Se observa que para la mayoría de los casos, los mayores valores de R^2 se dan con respecto a la estación Rengo, y dichos valores indican que existe una buena correlación, por lo tanto, la metodología antes mencionada es aplicable.

Con respecto a las estaciones de temperatura media diaria, como se indicó en el acápite 4.3.2, para toda la cuenca se utilizaron los datos de la estación Convento Viejo, y el valor del coeficiente R^2 , entre dicha estación y Rengo, es 0.91.

En el Anexo D1 se muestran los gráficos y las ecuaciones respectivas, para las correlaciones de los valores diarios de temperatura y precipitación, entre la estación Rengo y las demás estaciones utilizadas.

5.3.2 Parámetros del modelo

Dentro del programa fue necesario definir una serie de parámetros que permitieron llevar a cabo de buena manera los procesos indicados en el acápite 5.2.

- **Largo del año:** para los datos observados y los del NCEP (calibración y validación del modelo), se definió un largo de 366 días, lo que permite tener 29 días en Febrero para los años bisiestos. Por otra parte, para la generación de escenarios y para el modelo HadCM3, el año consta de 360 días, por lo que el largo en este caso fue definido con dicho valor.
- **Fecha de inicio y término:** los datos de los predictores, tanto del NCEP como del HadCM3, comienzan en 1961, por lo tanto, cuando no existían datos observados disponibles a partir de dicho año, se rellenaron los datos con el identificador de datos faltantes. Para la calibración, el año final fue el 2001 y para la generación de escenarios el año 2099.

- **Permitir valores negativos:** para el caso de la evaporación y precipitación no se marcó esta opción, sólo se hizo para la temperatura.
- **Valor umbral (Threshold value):** este valor sólo fue definido para el caso de la precipitación, para indicar el valor a partir del cual un día es seco (es decir, la precipitación es prácticamente cero). Dicho valor fue fijado en 0.3 [mm/día], que corresponde al valor por definición (valor default) del programa.
- **Identificador de datos faltantes:** para que el programa pueda identificar aquellos días en que no hay datos observados, se debe definir un identificador para dichos casos. Dicho identificador fue fijado como -999 (valor default).
- **Transformación del modelo:** para el caso de la temperatura y la evaporación no se hicieron transformaciones, ya que ninguna de ellas permitió obtener mejores resultados. Sólo se aplicó transformación para el caso de la precipitación, variable para la cual Wilby et al (2007) recomiendan utilizar una transformación de la raíz cuarta (fourth root), la cual efectivamente permitió obtener mejores resultados que no aplicar transformación alguna o aplicar cualquiera de las otras disponibles.
- **Inflación de la varianza:** para la temperatura y la evaporación se utilizó un valor de 12 y para la precipitación 18, en los tres casos el valor corresponde a aquel que viene por definición en el programa.
- **Corrección Bias:** para la temperatura y la evaporación se utilizó un valor de 1 y para la precipitación 0.8, en los tres casos el valor corresponde a aquel que viene por definición en el programa.

5.3.3 Determinación variables predictoras

En esta etapa se determinaron los predictores que presentaron los valores más altos, de correlación inter-variables y correlación parcial, y los valores p más bajos. Es importante mencionar que para todas las variables, se probaron muchas combinaciones de predictores, siendo los mejores resultados los que se muestran en este acápite.

Los datos observados (de temperatura, evaporación y precipitación) que se utilizaron, fueron los mismos asociados a la calibración, es decir, datos medios diarios para el período 1971-1991 en la estación Rengo. Para los tres casos la modelación es a nivel mensual. Para la temperatura y evaporación el proceso es no-condicional, mientras que para la precipitación es condicional. Para el nivel de significancia se utilizó el valor que viene por definición (valor default) en el programa, es decir, 0.05 (valores bajo este límite indican que la correlación obtenida no se debe a un hecho fortuito).

En las Tablas 5.4 a 5.6 se muestran los resultados asociados a la temperatura, evaporación y precipitación respectivamente. Para el caso de la temperatura y la evaporación se agregó un término auto-regresivo (aut), que permitió mejorar los resultados en esta etapa y en la calibración y validación.

Tabla 5.4
Variables Predictoras para la Temperatura

Predictor	Correlación inter-variables	Correlación parcial	Valor p
mssl	-0.56	0.10	0
p_zh	0.38	0.15	0
p500	0.65	-0.06	0
r850	-0.41	0.06	0
rhum	-0.54	-0.05	0
temp	0.88	0.41	0
aut	0.92	0.58	0

Tabla 5.5
Variables Predictoras para la Evaporación

Predictor	Correlación inter-variables	Correlación parcial	Valor p
p_zh	0.43	0.21	0
p5_v	0.12	0.14	0
p500	0.51	-0.10	0
p8_u	-0.37	-0.11	0
shum	0.13	-0.10	0
temp	0.71	0.27	0
aut	0.85	0.59	0

Tabla 5.6
Variables Predictoras para la Precipitación

Predictor	Correlación inter-variables	Correlación parcial	Valor p
mssl	-0.46	-0.25	0
p_u	0.42	0.17	0
p500	-0.26	-0.14	0
r500	0.34	0.16	0

De las Tablas 5.4 y 5.5 se observa que la temperatura media diaria y la evaporación media diaria, están fuertemente correlacionadas con la temperatura media a 2 [m], que indica que estas variables son influenciadas de manera importante por las temperaturas regionales.

De la Tabla 5.6 se observa que la precipitación media diaria tiene la correlación más fuerte con la presión a nivel del mar, que indica que esta variable es influenciada de manera importante por la presión a nivel del mar a escala regional.

5.3.4 Calibración del modelo

Para llevar a cabo la calibración del modelo, se utilizaron datos observados diarios en el período 1971-1991 (para efectos de ingresar los datos al programa, para el período 1961-1970, y para los datos faltantes hasta el año 1991, se rellenó con -999). Los datos observados para la temperatura, evaporación y precipitación, de la estación Rengo en el período de calibración, se entregan en el Anexo D2.

En base a los predictores seleccionados en el acápite 5.3.3, para cada variable meteorológica (predictandos) se generaron 20 series distintas a nivel mensual, de las cuales se tomó el valor promedio, el que se consideró como el resultado para cada una de dichas variables.

En la Tabla 5.7 a 5.9 se muestran los coeficientes R^2 y el error estándar (EE), del ajuste de los datos observados y simulados a nivel mensual, para las calibraciones de las tres variables estudiadas en este caso.

Tabla 5.7
Coeficiente R^2 y Error Estándar Calibración Temperatura

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PROM
R^2	0.47	0.47	0.72	0.48	0.57	0.58	0.55	0.51	0.56	0.64	0.63	0.54	0.56
EE	1.25	1.28	1.74	1.72	1.70	1.63	1.72	1.57	1.65	1.56	1.54	1.42	1.57

Tabla 5.8
Coeficiente R^2 y Error Estándar Calibración Evaporación

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PROM
R^2	0.50	0.40	0.30	0.30	0.27	0.28	0.06	0.08	0.22	0.29	0.46	0.23	0.28
EE	1.22	1.27	1.31	1.02	0.89	0.42	0.48	0.64	0.90	1.20	1.29	1.46	1.01

Tabla 5.9
Coeficiente R^2 y Error Estándar Calibración Precipitación

	Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	PROM
No – Cond	R^2	0.04	0.00	0.10	0.19	0.28	0.37	0.35	0.33	0.25	0.18	0.20	0.09	0.20
	EE	0.09	0.06	0.15	0.27	0.37	0.37	0.38	0.35	0.35	0.30	0.24	0.18	0.26
Cond	R^2	1.00	1.00	0.00	0.31	0.37	0.27	0.43	0.26	0.28	0.27	0.48	0.22	0.41
	EE	0.01	0.01	0.55	0.37	0.44	0.50	0.43	0.44	0.38	0.37	0.37	0.45	0.36

Nota: No-Cond, indica No-Condicional; Cond, indica Condicional.

Se observa que los mejores resultados para el coeficiente R^2 , a nivel promedio, se obtienen para la temperatura, luego la precipitación y la evaporación tienen valores menores de este coeficiente, pero a su vez el error estándar es menor que para la temperatura. Es importante notar que el caso de la precipitación y la evaporación, existen algunos meses en que la correlación es cercana a cero, lo que no se da en la temperatura, en que todos los meses tiene valores superiores a 0.45; estos malos resultados, están directamente relacionados con la poca información que se tiene en aquellos meses, para algunos años del período de calibración. De todas maneras, dichos resultados se dan en los meses en que la precipitación (Diciembre a Marzo) y la evaporación son menos importantes (Julio y Agosto).

Los resultados obtenidos para las tres variables son aceptables si se comparan con lo obtenidos en los trabajos de Osses (2006) y Zeray (2006). En el trabajo de Zeray (2006), se indica que los procesos no-condicionales no dependen de procesos intermedios, por lo tanto, es posible obtener resultados de ajuste mejores que en los casos condicionales (como la precipitación), ya que éstos sí dependen de procesos

intermedios, que pueden afectar los resultados de la calibración. En este caso se observa que la evaporación, proceso no-condicional, no tiene mejores resultados que la precipitación, lo que puede estar relacionado con la pobre calidad (datos faltantes), de los datos de evaporación utilizados en el período de calibración.

En este caso no se hace un análisis más detallado, como sí se hace en la validación, ya que el programa no entrega los valores de las 20 series, que genera para la calibración de cada variable meteorológica, sólo entrega los resultados mostrados en las Tablas 5.7 a 5.9.

5.3.5 Validación del modelo

Para llevar a cabo la validación del modelo, se utilizaron datos observados diarios en el período 1992-2001. Dichos datos para la temperatura, evaporación y precipitación, de la estación Rengo en el período de validación, se entregan en el Anexo D2.

Mediante la herramienta Weather Generator (Generador Climático), para cada variable meteorológica, se generan 20 series distintas a nivel mensual, de las cuales se tomó el valor promedio, el que se consideró como el resultado para cada una de dichas variables. En este caso, el programa sí entrega los valores de las mencionadas series, por lo tanto, se hace un análisis un poco más detallado que para la calibración.

En las Tablas 5.10 a 5.13 se muestran los coeficientes R^2 a nivel mensual, del ajuste de los datos observados y simulados, también se muestran los valores medios y la desviación estándar de dichos datos, para las calibraciones de las tres variables estudiadas en este caso. En las Figuras 5.2 a 5.4 se muestran las correlaciones de los datos generados y observados para las mencionadas variables.

Tabla 5.10
Estadísticos resultados Validación Temperatura media mensual

Mes	R^2	DATOS OBSERVADOS		DATOS GENERADOS	
		Valor Medio	Desviación Estándar	Valor Medio	Desviación Estándar
Enero	0.06	21.35	0.29	20.49	0.33
Febrero	0.87	20.36	0.81	19.56	0.60
Marzo	0.12	18.76	0.92	17.36	0.70
Abril	0.00	14.64	0.55	13.87	0.45
Mayo	0.63	11.71	0.80	11.12	0.97
Junio	0.53	9.72	0.83	9.13	0.47
Julio	0.73	8.51	1.10	8.11	0.90
Agosto	0.61	10.02	0.68	9.29	0.59
Septiembre	0.78	12.15	0.76	11.10	0.74
Octubre	0.04	14.77	0.83	13.54	0.65
Noviembre	0.16	17.67	0.92	16.38	0.76
Diciembre	0.01	19.86	0.66	19.18	0.69
PROM	0.38	14.96	0.76	14.09	0.66

Figura 5.2
Correlación Mensual Validación Temperatura media mensual

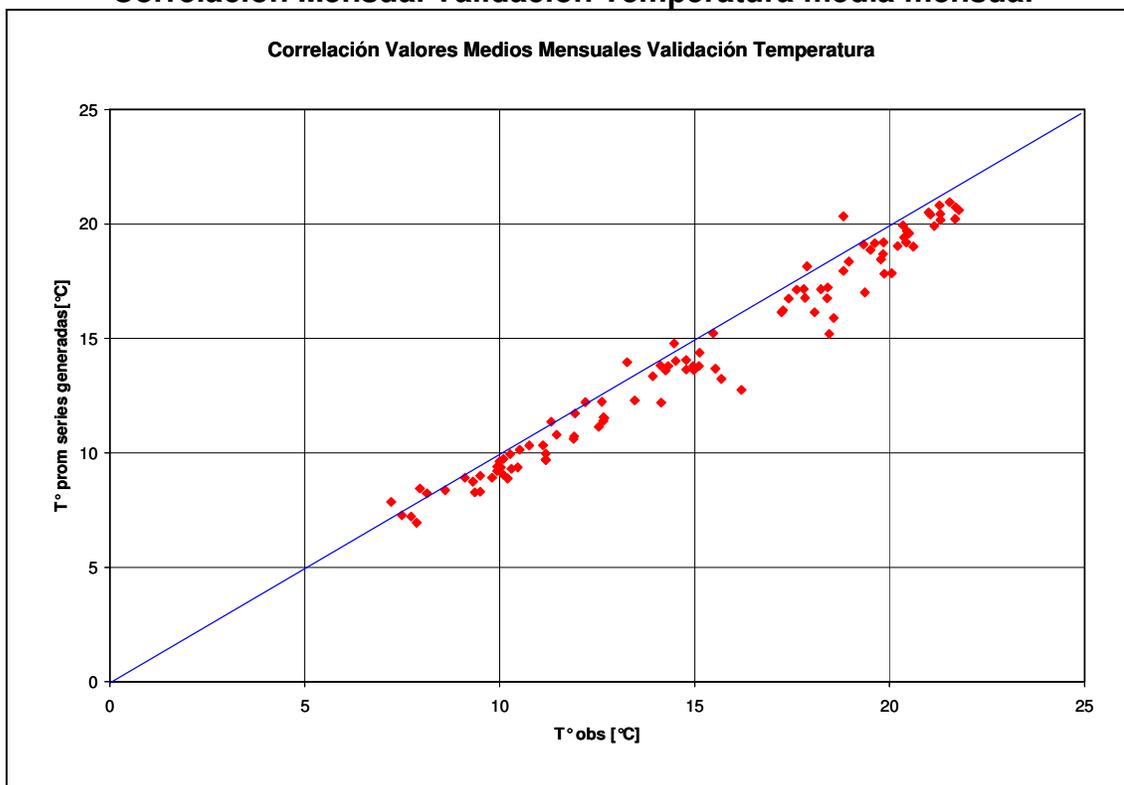


Tabla 5.11
Estadísticos resultados Validación Evaporación total mensual

Mes	R ²	DATOS OBSERVADOS		DATOS GENERADOS	
		Valor Medio	Desviación Estándar	Valor Medio	Desviación Estándar
Enero	0.12	209.53	19.60	191.50	7.31
Febrero	0.08	148.61	14.85	149.22	8.68
Marzo	0.11	124.81	14.37	121.36	6.49
Abril	0.09	59.89	13.08	67.38	3.87
Mayo	0.28	34.59	3.83	40.80	3.91
Junio	0.70	20.99	6.02	20.64	2.27
Julio	0.07	19.48	6.07	21.58	1.45
Agosto	0.65	33.79	7.41	33.18	3.42
Septiembre	0.62	56.79	14.00	53.78	6.76
Octubre	0.42	98.89	21.09	89.69	8.04
Noviembre	0.02	137.69	38.17	124.01	9.32
Diciembre	0.12	201.49	38.30	186.90	14.14
PROM	0.27	95.54	16.40	91.67	6.31

Figura 5.3
Correlación Mensual Validación Evaporación total mensual

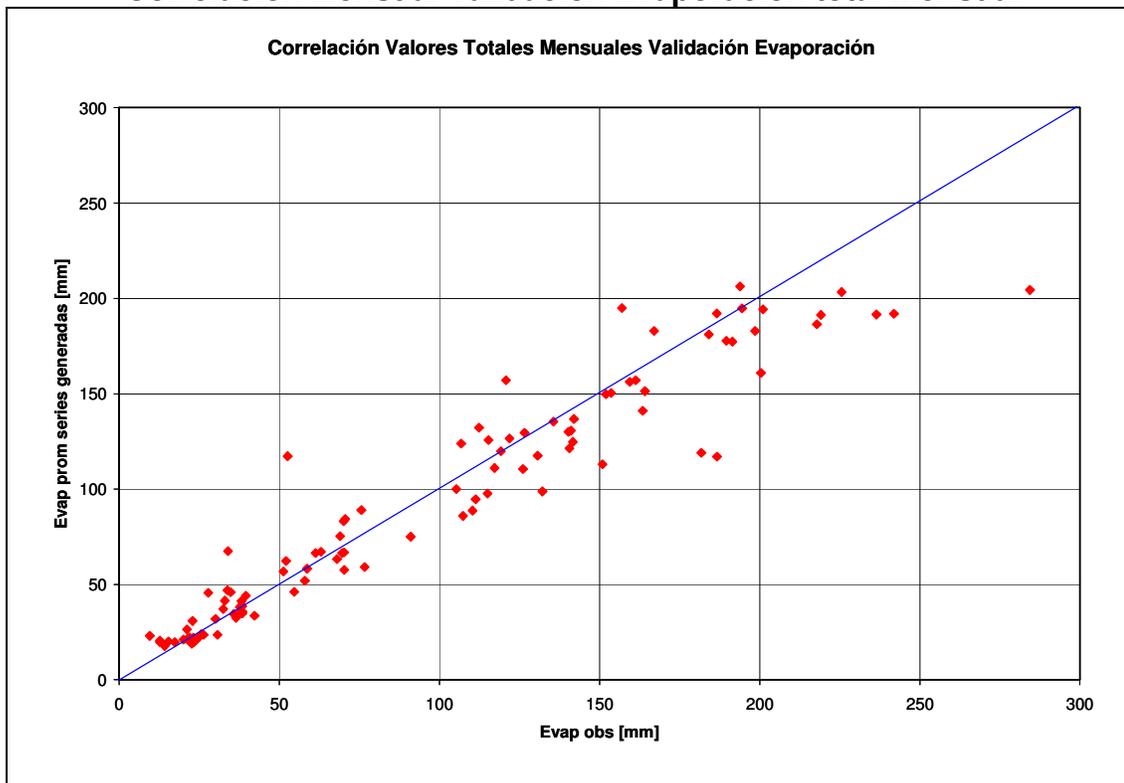
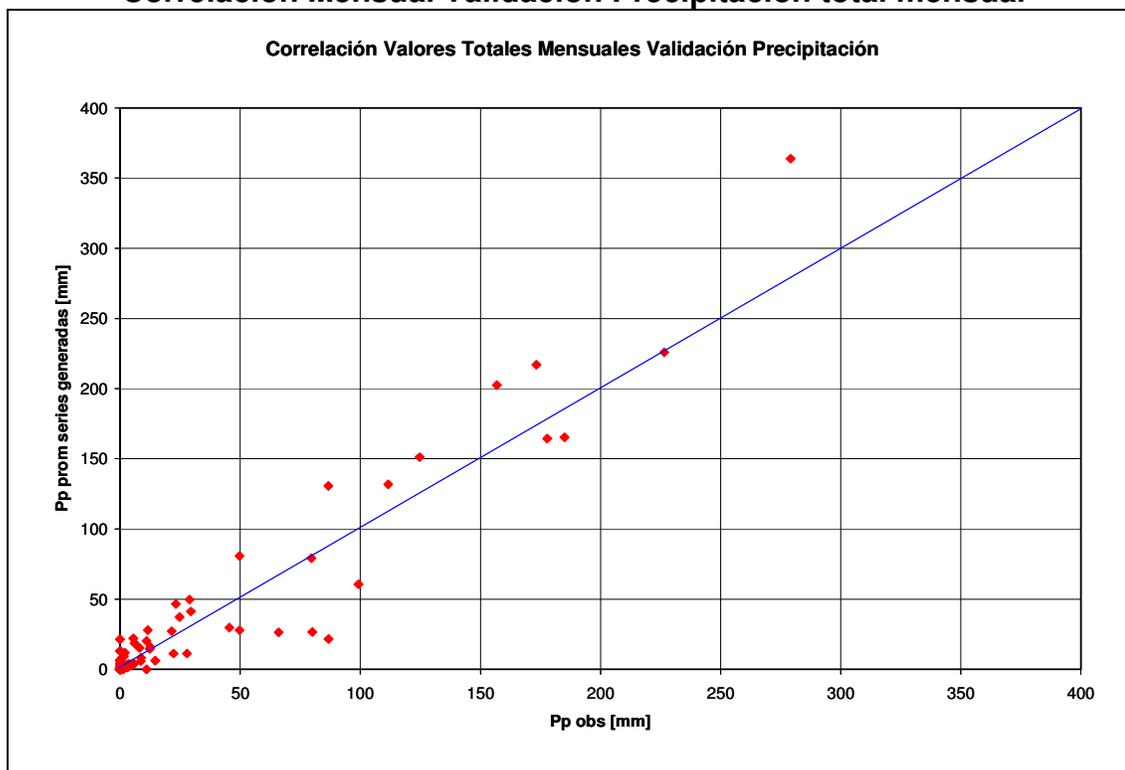


Tabla 5.12
Estadísticos resultados Validación Precipitación total mensual

Mes	R ²	DATOS OBSERVADOS		DATOS GENERADOS	
		Valor Medio	Desviación Estándar	Valor Medio	Desviación Estándar
Enero	---	0.00	0.00	0.21	0.30
Febrero	0.06	1.64	3.81	2.28	3.36
Marzo	0.30	0.74	1.93	8.83	9.72
Abril	0.77	40.07	38.97	15.17	13.83
Mayo	0.96	72.05	97.23	76.81	95.05
Junio	1.00	93.53	103.74	118.90	133.75
Julio	0.92	48.59	67.43	48.79	65.54
Agosto	0.90	20.05	27.81	27.02	33.83
Septiembre	0.62	13.95	17.23	15.96	17.22
Octubre	0.47	6.17	10.03	7.24	9.63
Noviembre	0.53	3.15	7.14	3.81	5.46
Diciembre	0.77	2.60	5.32	1.82	2.58
PROM	0.66	25.21	31.72	27.24	32.52

Figura 5.4
Correlación Mensual Validación Precipitación total mensual



De los resultados obtenidos se observa que:

- Para el caso de la temperatura, los resultados del coeficiente R^2 promedio, son peores que en el caso de la calibración, ya que hay meses en que los valores de dicho coeficiente son inferiores a 0.3.

Con respecto a los valores medios observados y simulados, se aprecia que para todos los meses el modelo subestima los valores observados, lo que se verifica en la Figura 5.2, en que la mayoría de los puntos está por debajo de la recta de 45°. Para la desviación estándar sucede lo mismo, se tiene un resultado promedio menor en el caso de los valores generados.

- Para el caso de la evaporación, los resultados del coeficiente R^2 promedio, son bastante similares a los obtenidos para la calibración, aunque para este caso, hay más meses con valores del coeficiente inferiores a 0.3.

Con respecto a los valores medios observados y simulados, se aprecia que para gran parte de los meses, el modelo subestima los valores observados, lo que se verifica en la Figura 5.3, en que la mayoría de los puntos está por debajo de la recta de 45°. Igualmente, para la desviación estándar se aprecia que los valores generados son inferiores a los observados.

- Para el caso de la precipitación, los resultados del coeficiente R^2 , son bastante mejores a los obtenidos para la calibración, observándose solamente un mes con un coeficiente bajo 0.3, aunque dicho mes (Febrero) no tiene mucha importancia desde

el punto de vista de la precipitación. De todas maneras se debe tener precaución con los valores de los coeficientes en este caso, ya que en algunos meses éstos son altos (cercanos a 1), lo que no se condice con los valores medios observados y generados.

Con respecto a los valores medios observados y simulados, se aprecia que para gran parte de los meses, el modelo sobrestima los valores observados (a nivel promedio también), lo que se verifica en la Figura 5.4, en que la mayoría de los puntos está por sobre la recta de 45°. Para la desviación estándar sucede lo mismo, se tiene un resultado promedio mayor en el caso de los valores generados.

Según los resultados presentados para la calibración y la validación, se concluye que los modelos de escalamiento obtenidos, pueden usarse para los fines perseguidos en este estudio.

5.3.6 Generación de Escenarios de Cambio Climático

En esta etapa se llevó a cabo el escalamiento (downscaling) de los resultados de los escenarios A2 y B2 del IPCC (generados a partir del modelo HadCM3), que como se ha dicho son los únicos disponibles para Sudamérica. Dicho escalamiento fue realizado con el Generador de Escenarios (Scenario generation) del programa SDSM 4.2.

Para la generación de escenarios, se utilizó la relación predictor – predictando, establecida en la etapa de calibración, aunque en este caso los predictores son los del modelo HadCM3. De esta manera se obtuvieron 20 series (equiprobables) de datos diarios, para cada una de las variables estudiadas, para el período 1961 – 2099.

En base a estas series generadas para cada variable meteorológica, se plantearon los 6 escenarios señalados en la Tabla 5.13, que fueron evaluados en el Modelo Integrado, para determinar los efectos del cambio climático en los recursos hídricos en la cuenca del río Cachapoal.

Tabla 5.13
Escenarios de cambio climático a evaluar en Modelo Integrado

Escenario Modelo Integrado	Escenario IPCC	Serie Precipitación	Serie Temperatura	Serie Evaporación
Escenario 1	A2	Serie 1 A2	Serie Promedio A2	Serie Promedio A2
Escenario 2	B2	Serie 1 B2	Serie Promedio B2	Serie Promedio B2
Escenario 3	A2	Serie 10 A2	Serie Promedio A2	Serie Promedio A2
Escenario 4	B2	Serie 10 B2	Serie Promedio B2	Serie Promedio B2
Escenario 5	A2	Serie 20 A2	Serie Promedio A2	Serie Promedio A2
Escenario 6	B2	Serie 20 B2	Serie Promedio B2	Serie Promedio B2

Es importante mencionar que estos escenarios se definieron en el período Abril 2005 – Marzo 2035, y se plantearon en años hidrológicos para ser consecuentes con el Modelo Integrado. Se decidió utilizar escenarios de 30 años, ya que de hacerlos más extensos, habría sido imposible su evaluación en el Modelo Integrado (principalmente por el tamaño que éste tendría).

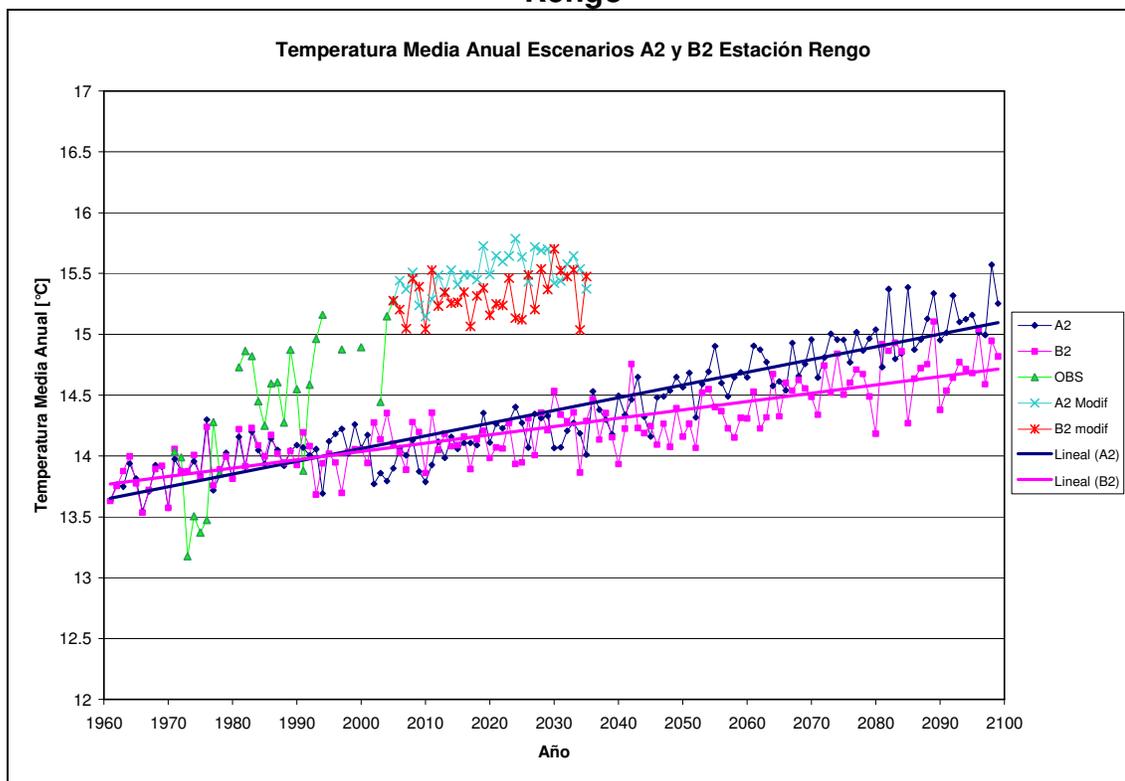
Estos escenarios fueron definidos, en base a los resultados del trabajo de Osses et al. (2007), en el cual se concluyó que para la generación de caudales, debe usarse el mayor número posible de series de precipitación diaria; para la temperatura y la evaporación, no hay mayores diferencias entre usar las series individuales y la promedio. Por ello se optó por escoger, para el escenario A2 y B2, tres series aleatorias de precipitación, y para la temperatura y evaporación las series promedio (valor medio de las 20 series del escenario A2 y B2 respectivamente).

5.3.6.1 Escenarios Temperatura

Para esta variable se muestran los resultados obtenidos en la estación Rengo, en la cual se realizó el proceso de escalamiento, y en la estación Convento Viejo, la cual fue utilizada en toda la cuenca del río Cachapoal, como base para la determinación de la temperatura en todas las cuencas intermedias y de cabecera; ver acápite 4.3.

En la Figura 5.5 se muestran las temperaturas medias anuales (valor promedio para cada año) observadas para el período 1971 – 2005 (puntos verdes; aquellos puntos que no están conectados por líneas se debe a que existen años con información incompleta y que no fueron incluidos en el gráfico), además se muestran las tendencias de las series promedio (valor medio de las 20 series generadas) de temperatura para los Escenarios A2 y B2, para el período 1961-2099 (puntos azules y fucsias respectivamente) en la estación Rengo.

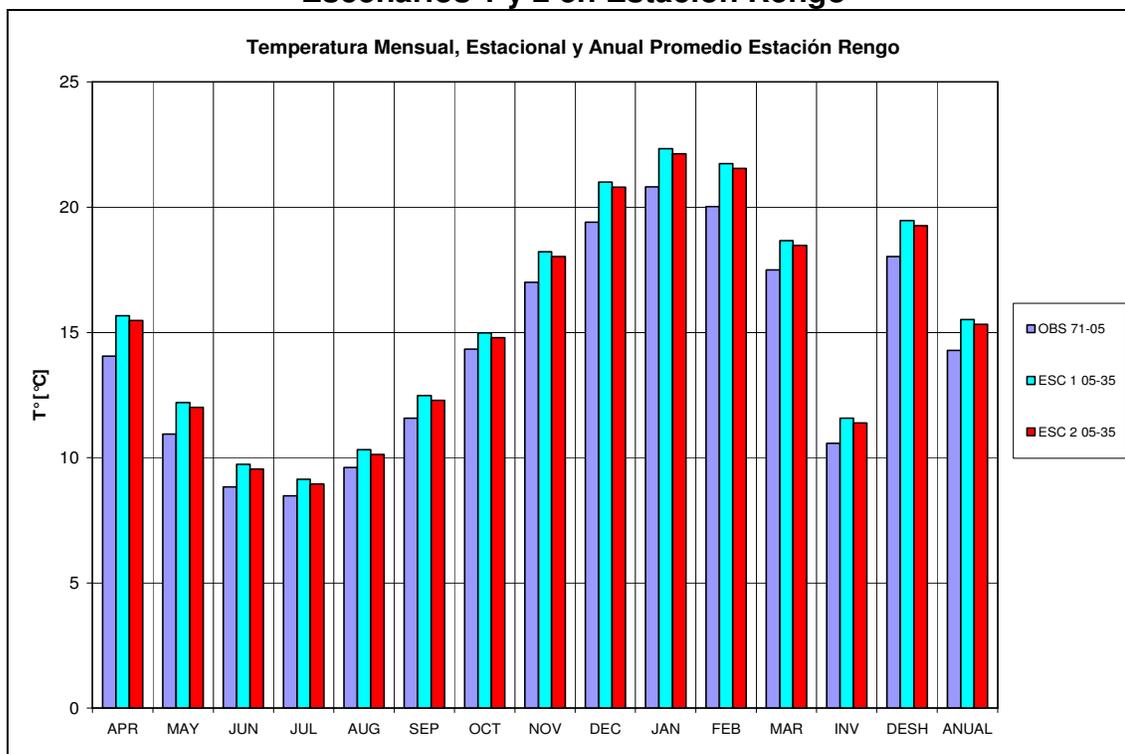
Figura 5.5
Series Promedio Escenarios A2 y B2 de Temperatura Media Anual en Estación Rengo



De las líneas de tendencia, tanto para el Escenario A2 como el B2, se aprecia que para el año 2035 (fin del período de evaluación contemplado en este trabajo), las temperaturas medias anuales (en torno a 14 [°C]) son inferiores al valor observado en el año 2005 (15.3 [°C]), lo que se debe a que los valores simulados por el programa, desde 1960 presentan una tendencia al aumento que es menor que la observada. Por lo tanto, para corregir dicha diferencia, para el año 2005 se ajustó el valor medio anual simulado al valor observado en dicho año; para los años siguientes se aumentó en la misma magnitud que para el 2005, para así mantener la tendencia original de los Escenarios A2 y B2, los valores modificados se observan también en la Figura 5.5.

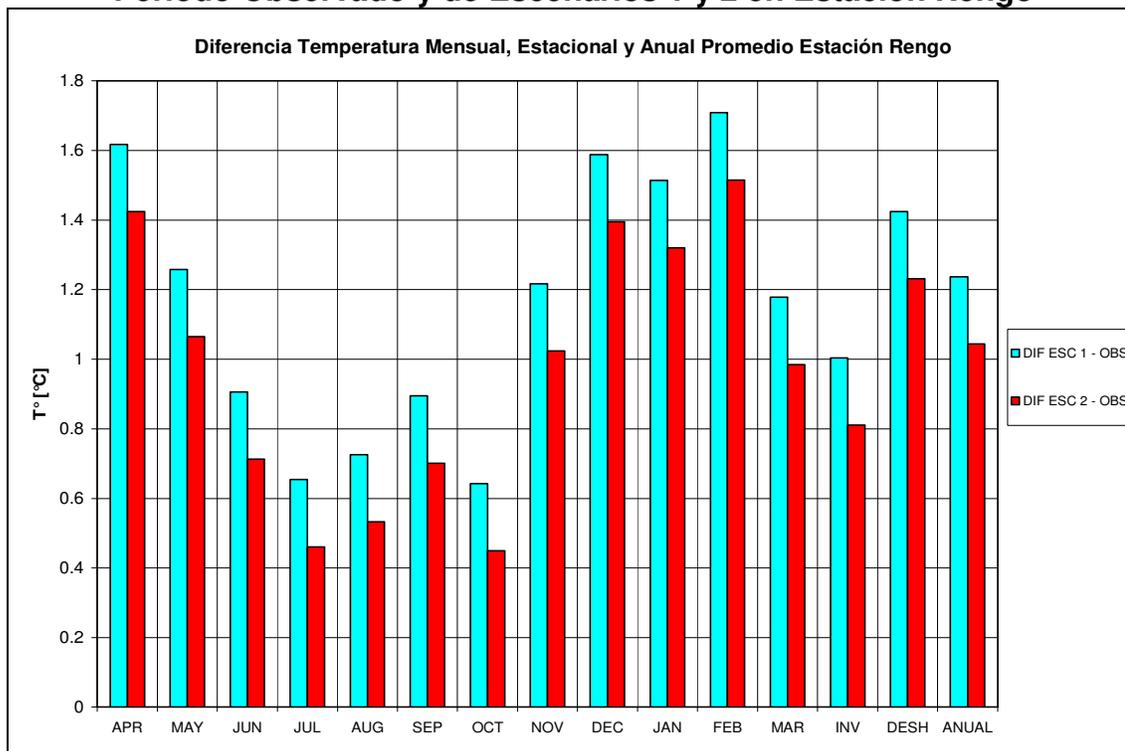
En la Figura 5.6 se muestran los valores de temperatura media mensual promedio en la estación Rengo, para el período observado (Abril 1971 – Marzo 2005) y para los Escenarios 1 y 2 en el período de evaluación (Abril 2005 – Marzo 2035). También se muestran las temperaturas medias estacionales (invernal, INV, y deshielo, DESH) y medias anuales promedio. Sólo se entregan los resultados para los Escenarios 1 y 2, ya que el resto de los escenarios son iguales (ver Tabla 5.13).

Figura 5.6
Temperatura Media Mensual, Estacional y Anual Promedio Observada y de Escenarios 1 y 2 en Estación Rengo



Como era de esperar, según lo visto en la Figura 5.5, tanto a nivel mensual, estacional y anual, la temperatura aumenta para ambos escenarios, en el período de evaluación. Esto se observa más claramente en la Figura 5.7, en la que se muestran las diferencias, entre los valores del período asociado a los escenarios de cambio climático y el período de observación, de los resultados mostrados en la Figura 5.6.

Figura 5.7
Diferencia Temperatura Media Mensual, Estacional y Anual Promedio entre
Período Observado y de Escenarios 1 y 2 en Estación Rengo



En la Tabla 5.14 se muestran los valores promedio de las temperaturas medias mensuales y el promedio anual, para el período de datos observados y el período de datos generados, para los Escenarios 1 y 2 en la Estación Rengo.

Tabla 5.14
Temperaturas Medias Mensuales Promedio Observadas y Generadas Escenarios
1 y 2 Estación Rengo

MES	TEMPERATURA [°C]		
	OBSERVADOS	ESCENARIO 1 (A2)	ESCENARIO 2 (B2)
	1971-2005	2005-2035	2005-2035
Enero	20.82	22.33	22.14
Febrero	20.02	21.73	21.54
Marzo	17.49	18.67	18.48
Abril	14.06	15.67	15.48
Mayo	10.94	12.20	12.01
Junio	8.83	9.74	9.55
Julio	8.48	9.14	8.94
Agosto	9.60	10.33	10.13
Septiembre	11.58	12.48	12.28
Octubre	14.34	14.98	14.79
Noviembre	17.00	18.22	18.03
Diciembre	19.41	21.00	20.80
PROM ANUAL	14.38	15.54	15.35

Se observa que para el Escenario 1 se tiene un mayor aumento de temperatura que para el caso del Escenario 2, tanto a nivel mensual, estacional y anual, esto es consecuente con las definiciones de los Escenarios A2 y B2 del IPCC, vistas en el acápite 2.2.1.3, en las que se indica que el Escenario A2 es más severo que el B2, en cuanto a los cambios climáticos esperados.

Para la estación Convento Viejo, los valores de temperatura en el período de evaluación (Abril 2005 – Marzo 2035), fueron obtenidos mediante la correlación establecida entre los valores diarios de esta estación con Rengo (ver Anexo D1), los cuales fueron posteriormente corregidos, al igual que en el caso de la estación Rengo. Para dicha estación, en la Figura 5.8 se muestran las diferencias, entre los valores del período de observación (Abril 1980 – Marzo 2005) y el período asociado a los escenarios de cambio climático.

En la Tabla 5.15 se muestran los valores promedio mensuales y el promedio anual, para el período de datos observados y el período de datos generados, para los Escenarios 1 y 2 en la estación Convento Viejo.

Figura 5.8
Diferencia Temperatura Media Mensual, Estacional y Anual Promedio entre Período Observado y de Escenarios 1 y 2 en Estación Convento Viejo

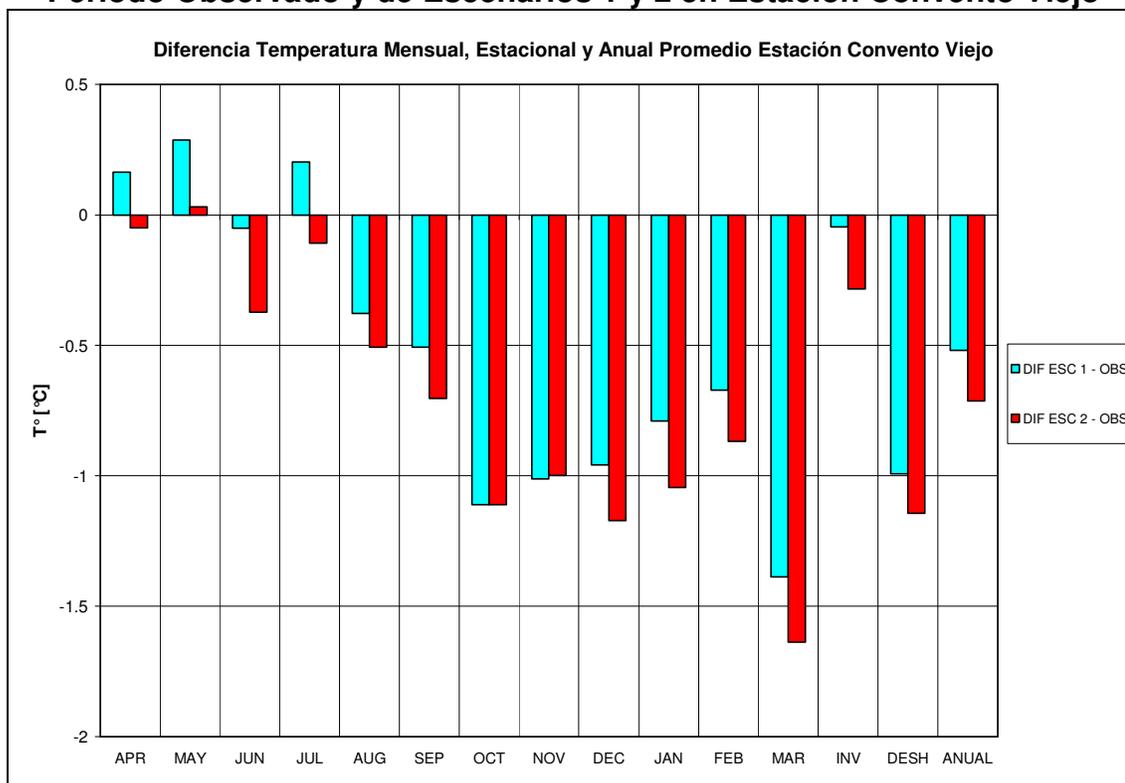


Tabla 5.15
Temperaturas Medias Mensuales Promedio Observadas y Generadas Escenarios
1 y 2 Estación Convento Viejo

MES	TEMPERATURA [°C]		
	OBSERVADOS	ESCENARIO 1 (A2)	ESCENARIO 2 (B2)
	1980-2005	2005-2035	2005-2035
Enero	22.80	22.01	21.75
Febrero	22.09	21.42	21.22
Marzo	19.76	18.37	18.12
Abril	15.22	15.38	15.17
Mayo	11.64	11.93	11.67
Junio	9.53	9.48	9.16
Julio	8.68	8.88	8.57
Agosto	10.44	10.06	9.93
Septiembre	12.71	12.20	12.01
Octubre	15.81	14.70	14.70
Noviembre	18.93	17.92	17.93
Diciembre	21.64	20.68	20.47
PROM ANUAL	15.77	15.25	15.06

De la Figura 5.8 y la Tabla 5.15, se aprecia que para esta estación, en el Escenario 1 sólo en los meses de Abril, Mayo y Julio se verifican aumentos de las temperaturas medias mensuales con respecto al período de observación, por otro lado, para el Escenario 2 sólo en Mayo se observa un leve aumento con respecto a dicho período. En términos estacionales y anuales, para ambos escenarios se observan disminuciones con respecto a los datos observados.

Los valores de temperatura diaria para la estación Rengo, tanto los originales obtenidos de SDSM como los corregidos, se entregan en el Anexo D2, al igual que los valores derivados para la estación Convento Viejo.

De los resultados obtenidos para ambas estaciones, se puede concluir lo siguiente:

- Para las dos estaciones estudiadas, se observaron distintas tendencias en cuanto a los escenarios de cambio climático, ya que para Rengo se verificaron aumentos para los dos escenarios planteados, de los valores a nivel mensual, estacional y anual promedio; por otro lado, para Convento Viejo, en términos generales se observaron disminuciones de las temperaturas con respecto al período observado (las excepciones son para algunos valores mensuales).
- Para ambas estaciones las mayores variaciones se dan en el período de deshielo.
- Al menos para el sector bajo – medio (240 – 310 [m.s.n.m.], rango de altura en que se encuentran ambas estaciones) de la cuenca del río Cachapoal, se constata que los escenarios planteados, en los 30 años del horizonte de evaluación, introducen un cambio climático que no muestra una tendencia única en las dos estaciones estudiadas. Por lo tanto, los resultados obtenidos para ambas estaciones, no son representativos para toda la cuenca del río Cachapoal, teniendo en cuenta que para

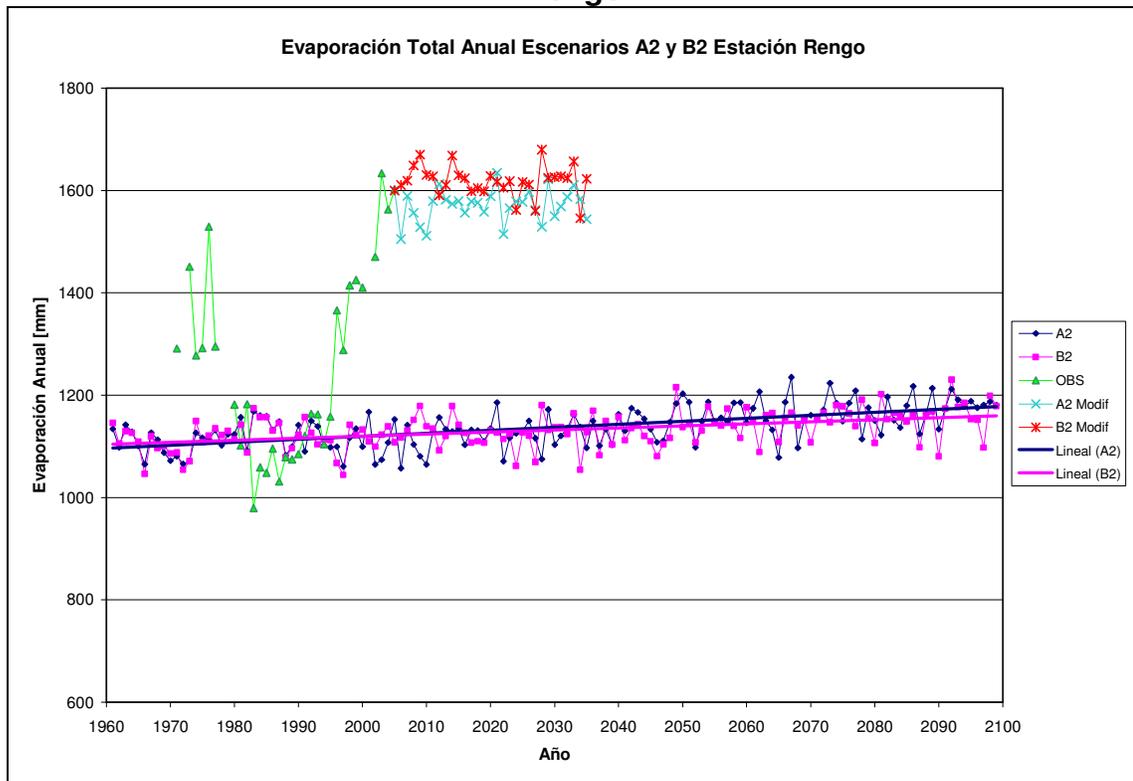
cada una de las cuencas intermedias y de cabecera, en las cuales se genera escorrentía con el modelo Sacramento, los datos de temperatura media diaria de la estación Convento Viejo son sólo una entrada al modelo, dicha estadística es modificada de acuerdo a los gradientes de temperatura y los aleatorios utilizados (explicado con más detalle en el acápite 4.3), por lo cual, en cuencas más altas (módulo CA) o más bajas (módulo EZ), no necesariamente pueden mantenerse estas tendencias a la disminución o al aumento de la temperatura.

5.3.6.2 Escenarios Evaporación

Para esta variable se muestran los resultados obtenidos en la estación Rengo, en la cual se realizó el proceso de escalamiento. Esta misma estación se utilizó como base, para todas las cuencas intermedias y de cabecera de la cuenca del río Cachapoal, por lo tanto, para esta variable sólo se muestran los resultados de dicha estación.

En la Figura 5.9 se muestran las evaporaciones totales anuales observadas para el período 1971 – 2005 (puntos verdes), además se muestran las tendencias de las series promedio (valor medio de las 20 series generadas) de evaporación para los Escenarios A2 y B2, para el período 1961-2099 (puntos azules y fucsias respectivamente) en la estación Rengo.

Figura 5.9
Series Promedio Escenarios A2 y B2 de Evaporación Total Anual en Estación Rengo



En este caso, al igual que para la temperatura, se hizo un ajuste a los valores de los escenarios, para que los valores observados y generados del año 2005 coincidieran; los valores modificados se observan también en la Figura 5.9.

En la Figura 5.10 se muestran los valores de evaporación total mensual promedio en la estación Rengo, para el período observado (Abril 1971 – Marzo 2005) y para los Escenarios 1 y 2 en el período de evaluación (Abril 2005 – Marzo 2035). También se muestran las evaporaciones estacionales promedio (invernal, INV, y deshielo, DESH) y anuales promedio. Sólo se entregan los resultados para los Escenarios 1 y 2, ya que el resto de los escenarios son iguales (ver Tabla 5.13).

Como era de esperar, según lo visto en la Figura 5.9, tanto a nivel mensual, estacional y anual, la evaporación aumenta, para ambos escenarios, en el período de evaluación. Esto se observa también en la Figura 5.11, en la que se muestran las diferencias, entre los valores del período asociado a los escenarios de cambio climático y el período de observación, de los resultados mostrados en la Figura 5.10.

Figura 5.10
Evaporación Total Mensual, Estacional y Anual Promedio Observada y de Escenarios 1 y 2 en Estación Rengo

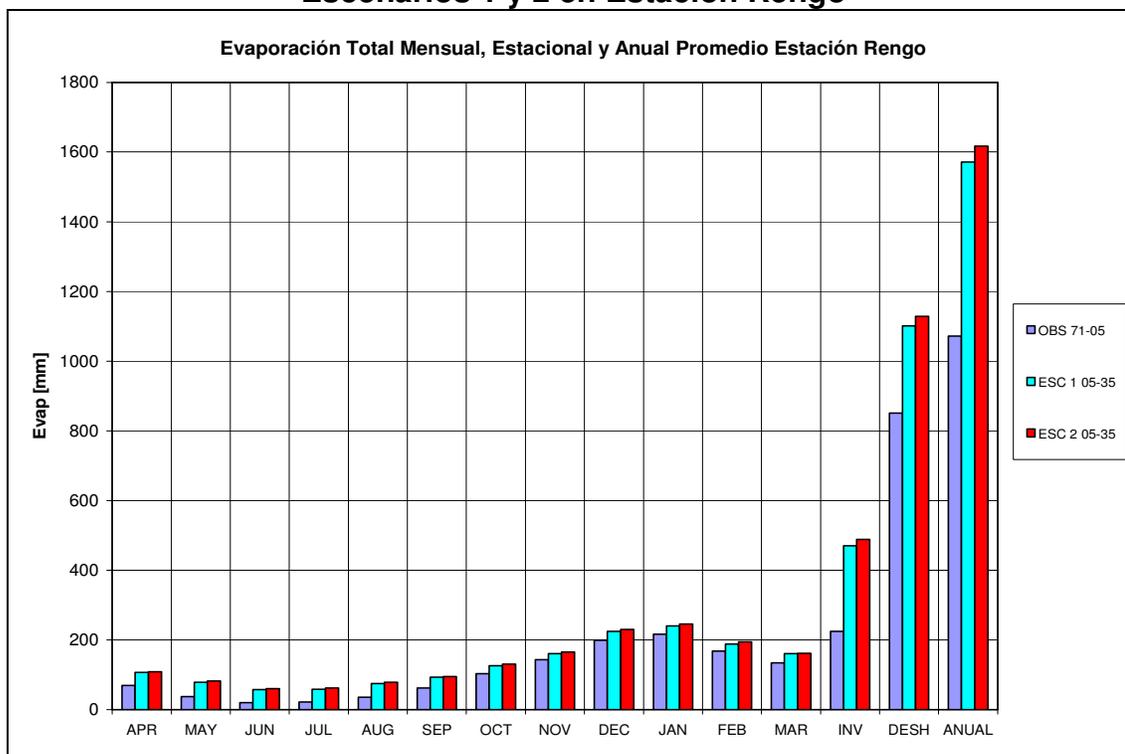
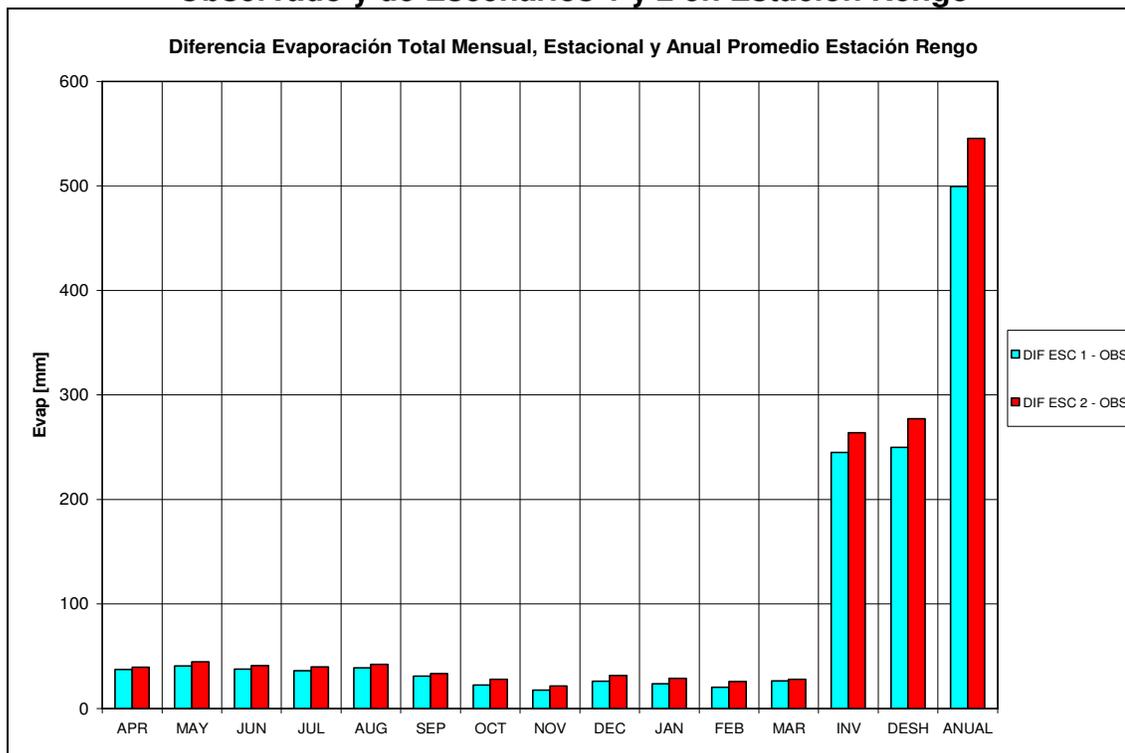


Figura 5.11
Diferencia Evaporación Total Mensual, Estacional y Anual Promedio entre Período
Observado y de Escenarios 1 y 2 en Estación Rengo



En la Tabla 5.16 se muestran los valores promedio de las evaporaciones totales mensuales y anuales, para el período de datos observados y el período de datos generados, para los Escenarios 1 y 2 en la estación Rengo.

Tabla 5.16
Evaporaciones Totales Mensuales Promedio Observadas y Generadas Escenarios
1 y 2 Estación Rengo

MES	EVAPORACIÓN [mm]		
	OBSERVADOS	ESCENARIO 1 (A2)	ESCENARIO 2 (B2)
	1971-2005	2005-2035	2005-2035
Enero	216.74	240.43	245.64
Febrero	168.15	188.53	194.01
Marzo	134.06	160.54	162.12
Abril	69.62	107.10	109.28
Mayo	37.79	78.62	82.58
Junio	19.85	57.76	60.96
Julio	22.30	58.72	62.23
Agosto	35.76	74.79	78.17
Septiembre	62.15	93.15	95.71
Octubre	102.94	125.59	130.87
Noviembre	143.51	161.18	165.19
Diciembre	199.01	225.13	230.77
TOTAL ANUAL	1,211.87	1,571.51	1,617.53

De la Figura 5.11 y la Tabla 5.16 se aprecia que para la evaporación, en el Escenario 1 se tienen menores aumentos que en el Escenario 2, es decir, en este caso el Escenario B2 del IPCC, es más extremo que el A2, al contrario de lo observado para el caso de la temperatura.

Los valores de evaporación diaria para la estación Rengo, tanto los originales obtenidos de SDSM como los corregidos, se entregan en el Anexo D2.

De los resultados obtenidos para esta variable, se puede concluir lo siguiente:

- Al menos para la estación estudiada, se determinó que en relación a la evaporación, en el Escenario 2 (por lo tanto, los Escenarios 4 y 6 también) se experimentan mayores aumentos de ésta que en el Escenario 1 (por lo tanto, los Escenarios 3 y 5 también), lo que no está de acuerdo con las definiciones de los Escenarios A2 y B2 del IPCC, a partir de los cuales fueron obtenidos. Este resultado se podría contradecir también, con lo obtenido para el caso de la temperatura, ya que si ésta aumenta, es esperable un incremento proporcional de la evaporación, y por lo tanto, en dicho caso la evaporación en el Escenario 1 debería ser mayor que en el Escenario 2, aunque en esta relación también podrían afectar otros factores ambientales y meteorológicos, que no fueron estudiados en este caso.
- Para todos los escenarios, los aumentos en el período invernal y de deshielo son prácticamente iguales, aunque más marcados en el de deshielo.
- Al menos para el sector bajo – medio (en torno a 310 [m.s.n.m.], altura de la estación Rengo) de la cuenca del río Cachapoal, se constata que los escenarios planteados, en los 30 años del horizonte de evaluación, introducen un cambio climático, asociado principalmente, a una tendencia al aumento de la evaporación a nivel mensual, estacional y anual.
- Los resultados obtenidos (aumento de la evaporación), no son representativos para toda la cuenca del río Cachapoal, por las mismas razones esgrimidas en el caso de la temperatura.

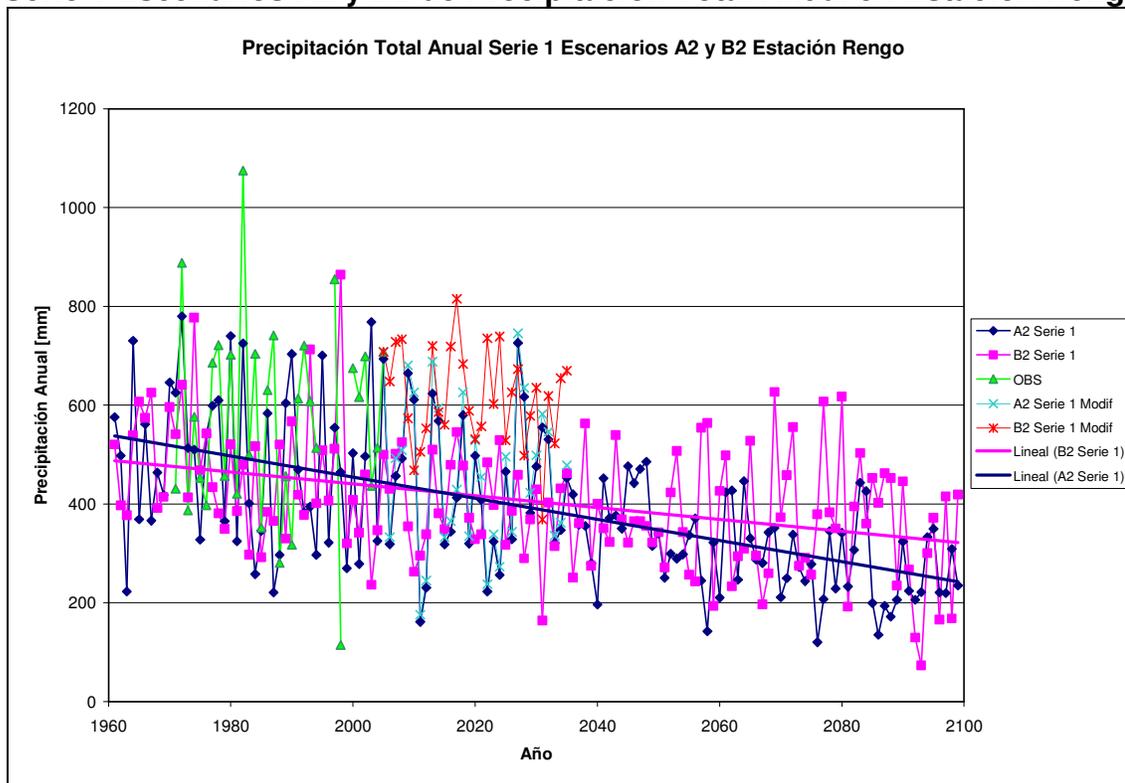
5.3.6.3 Escenarios Precipitación

Para esta variable se muestran los resultados obtenidos en la estación Rengo, en la cual se realizó el proceso de escalamiento, y en todas las estaciones pluviométricas, utilizadas como base para la determinación de la precipitación, en todas las cuencas intermedias y de cabecera; ver acápite 4.3.

- **Escenarios 1 y 2 (serie 1 A2 y B2):**

En las Figura 5.12 se muestran las precipitaciones totales anuales observadas para el período 1971 – 2005 (puntos verdes), además se muestran las tendencias de la serie 1 (de las 20 series generadas) de precipitación para los Escenarios A2 y B2 del IPCC, para el período 1961-2099 (puntos azules y fucsias respectivamente) en la estación Rengo.

Figura 5.12
Serie 1 Escenarios A2 y B2 de Precipitación Total Anual en Estación Rengo



En este caso, al igual que para la temperatura, se hizo un ajuste a los valores de los escenarios, para que los valores observados y generados del año 2005 coincidieran, los valores modificados se observan también en la Figura 5.12.

En la Figura 5.13 se muestran los valores de precipitación total mensual promedio en la estación Rengo, para el período observado (Abril 1971 – Marzo 2005) y para los Escenarios 1 y 2 en el período de evaluación (Abril 2005 – Marzo 2035). También se muestran las precipitaciones estacionales (invernal, INV, y deshielo, DESH) y anuales promedio.

En la Figura 5.14 se muestran las diferencias, entre los valores del período asociado a los escenarios de cambio climático y el período de observación, de los resultados mostrados en la Figura 5.13.

En las Figuras 5.13 y 5.14 se observa que existen claras variaciones de la precipitación mensual, estacional y anual promedio para la estación Rengo. A nivel mensual no existe una misma tendencia para todos los meses, pero a nivel estacional se observa que, en el período invernal, para el Escenario 1 hay un marcada disminución de la precipitación, mientras que para el Escenario 2 hay un aumento; en el período de deshielo, para el Escenario 1 hay un aumento leve (1.3 [mm]), mientras que para el Escenario 2 el aumento es mayor (23 [mm]). A nivel anual se tiene que en el Escenario 1 hay una disminución importante (85 [mm]) y para el Escenario 2 un aumento considerable (66.2 [mm]).

En la Tabla 5.17 se muestran los valores promedio de la precipitación total mensual y anual promedio, para el período de datos observados y el período de datos generados, para los Escenarios 1 y 2 en la estación Rengo.

Tabla 5.17
Precipitaciones Mensuales Promedio Observadas y Generadas Escenarios 1 y 2
Estación Rengo

MES	PRECIPITACIÓN [mm]		
	OBSERVADOS	ESCENARIO 1 (A2)	ESCENARIO 2 (B2)
	1971-2005	2005-2035	2005-2035
Enero	0.95	0.26	1.81
Febrero	1.57	2.82	2.29
Marzo	6.05	7.25	4.60
Abril	25.82	15.88	24.53
Mayo	96.64	74.39	86.11
Junio	143.88	121.96	150.49
Julio	125.79	85.33	88.78
Agosto	67.68	64.39	111.92
Septiembre	46.09	52.62	82.28
Octubre	20.65	21.46	41.03
Noviembre	13.91	10.76	14.82
Diciembre	5.84	7.29	6.93
TOTAL ANUAL	554.86	464.40	615.58

Figura 5.13
Precipitación Total Mensual, Estacional y Anual Promedio Observada y de
Escenarios 1 y 2 en Estación Rengo

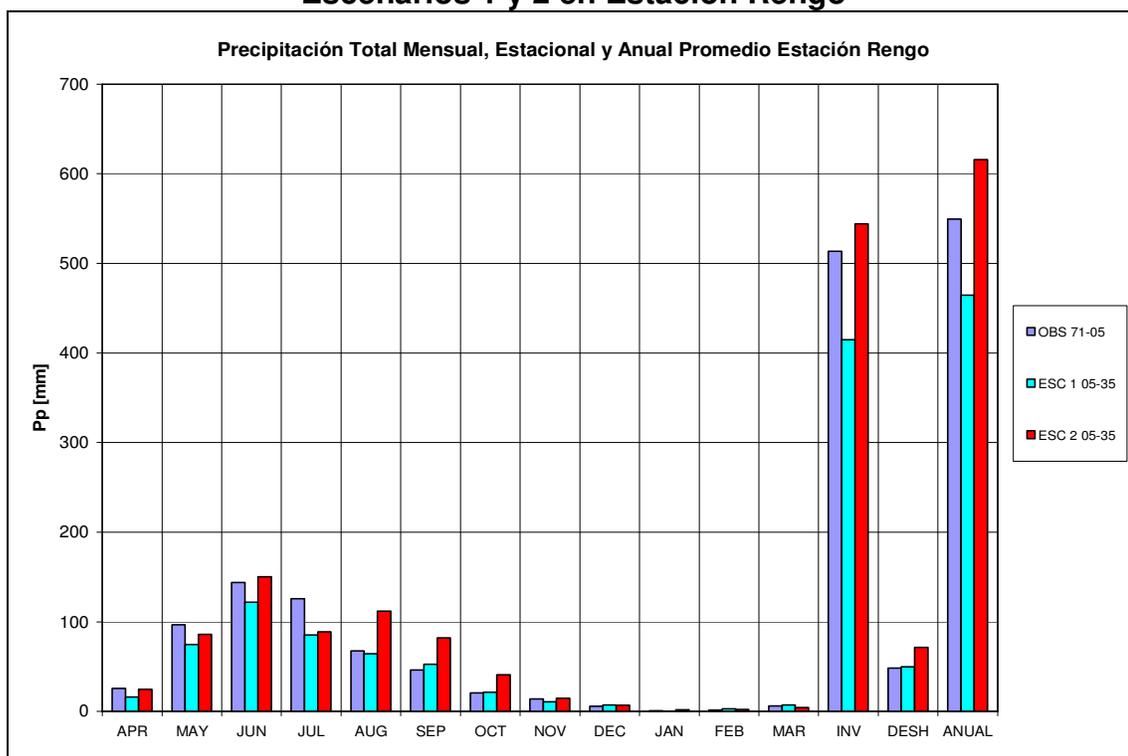
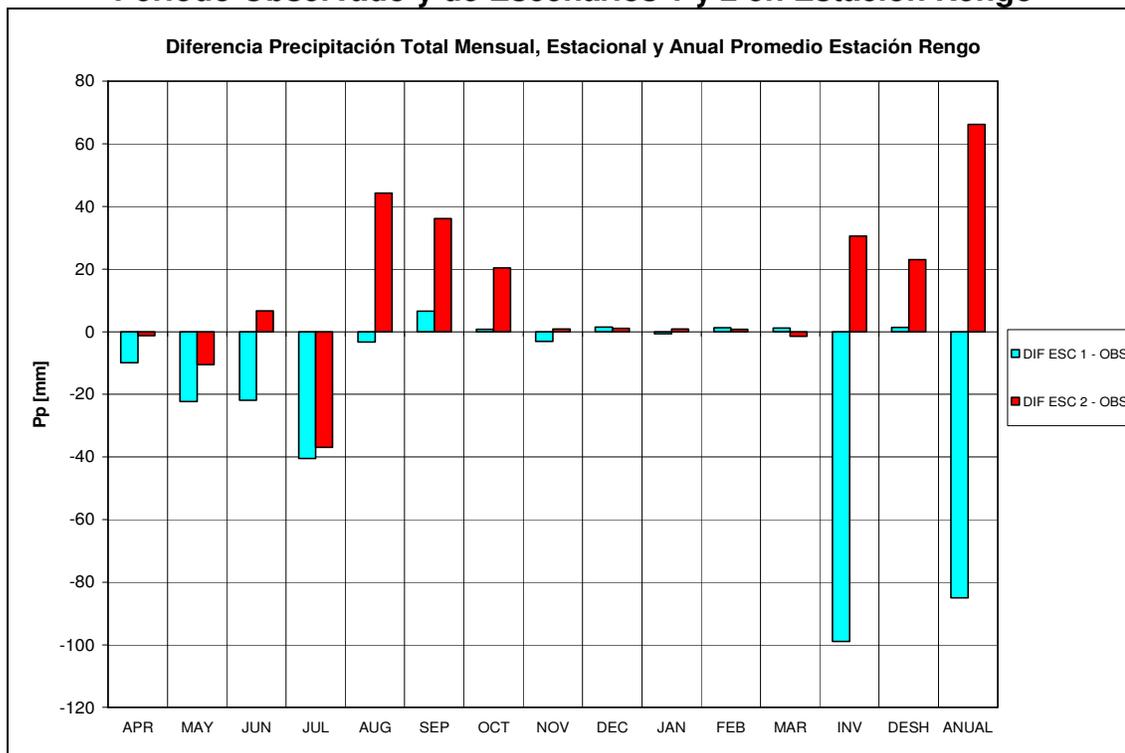


Figura 5.14
Diferencia Precipitación Total Mensual, Estacional y Anual Promedio entre
Período Observado y de Escenarios 1 y 2 en Estación Rengo



Pese a que las tendencias que se observan en la Figura 5.12, son a la disminución de la precipitación (a nivel anual), en la Tabla 5.17 se aprecia que para el Escenario 2 no se verifica esto, sino que hay un aumento en el período 2005-2035 a nivel promedio con respecto al período 1999-2005 al mismo nivel, lo que se debe al ajuste hecho a los valores originales del SDSM. Sin embargo, si en la mencionada figura se observan las tendencias de las series de precipitación, con respecto al valor del año 2005 se verifica que para ambos escenarios, existe claramente una tendencia a la disminución.

De la Figura 5.14 y la Tabla 5.17 se aprecia que para la precipitación estacional y anual promedio, en el Escenario 1 se tiene una clara tendencia a la disminución, en cambio en el Escenario 2 se constata una tendencia al aumento, es decir, en este caso el Escenario A2 del IPCC, se podría considerar más desfavorable que el B2, ya que desde el punto de vista de los recursos hídricos, habría menor precipitación y por lo tanto, menor disponibilidad de agua que escurre superficialmente y que recarga a la napa.

Para el resto de las estaciones pluviométricas, los valores de precipitación en el período de evaluación (Abril 2005 – Marzo 2035), fueron obtenidos mediante la correlación establecida entre los valores diarios de dichas estaciones con Rengo (ver Anexo D1), los cuales fueron posteriormente corregidos, al igual que en el caso de la estación Rengo. Para dichas estaciones, en las Figura 5.15 a 5.21 se muestran las diferencias, entre los valores del período de observación (Abril 1980 – Marzo 2005) y el período asociado a los escenarios de cambio climático.

Figura 5.15

Diferencia Precipitación Escenarios 1 y 2 en Estación Rancagua Endesa

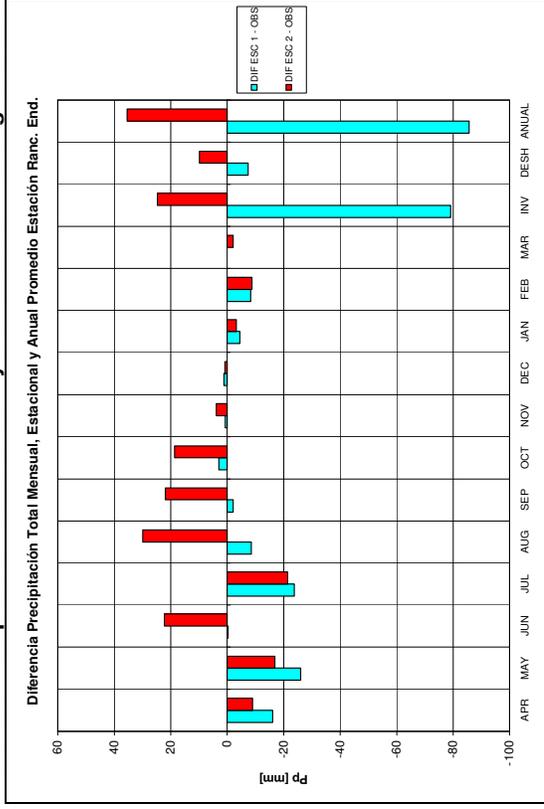


Figura 5.16

Diferencia Precipitación Escenarios 1 y 2 en Estación Popeta

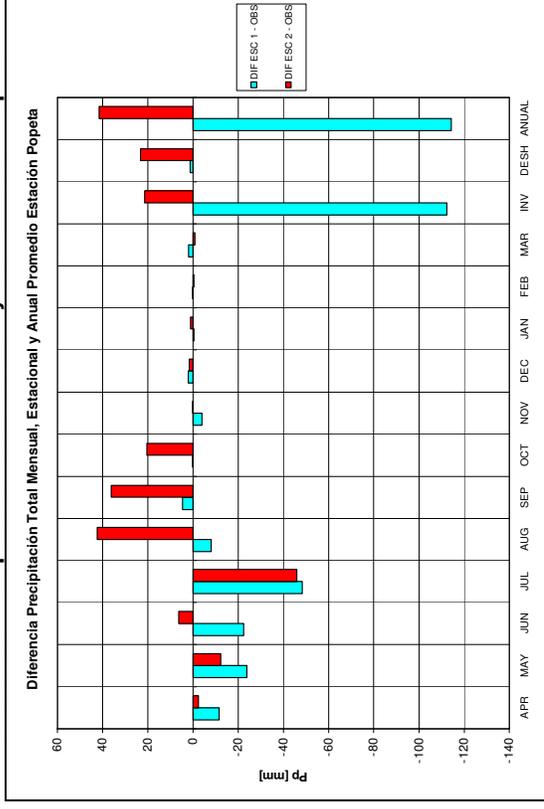


Figura 5.17

Diferencia Precipitación Escenarios 1 y 2 en Estación Las Nieves Central

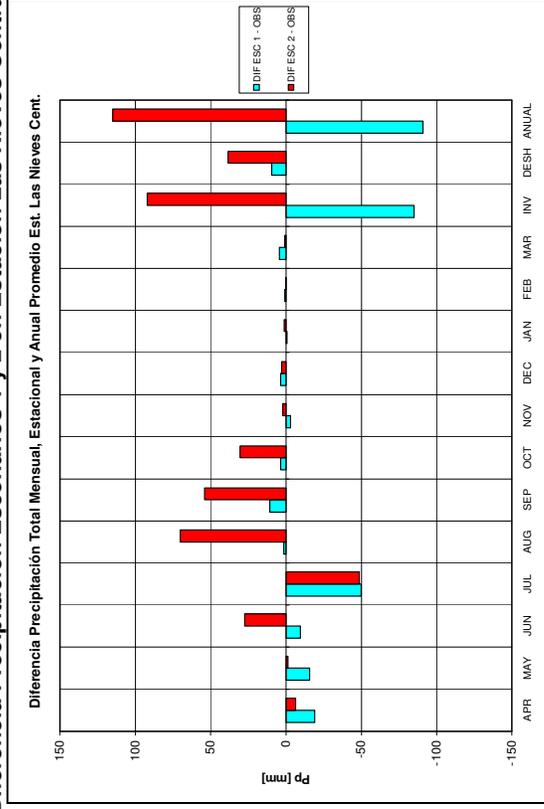


Figura 5.18

Diferencia Precipitación Escenarios 1 y 2 en Estación San Fernando

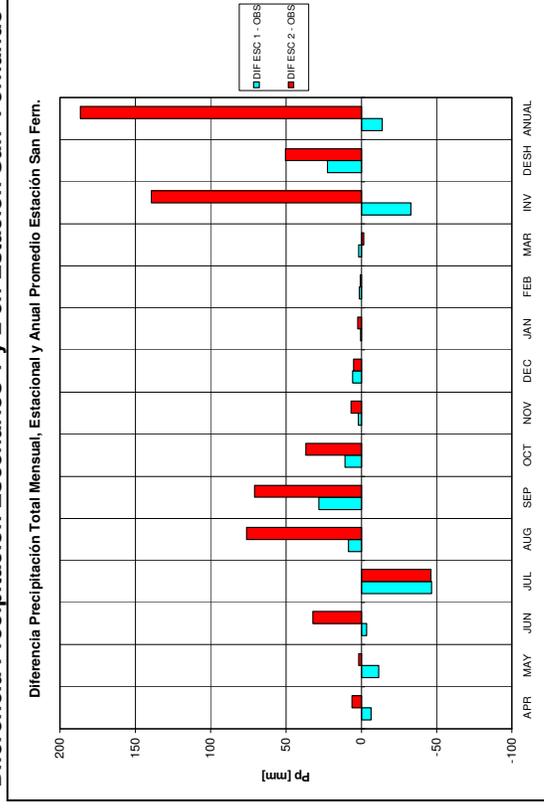


Figura 5.19

Diferencia Precipitación Escenarios 1 y 2 en Estación Coltauco

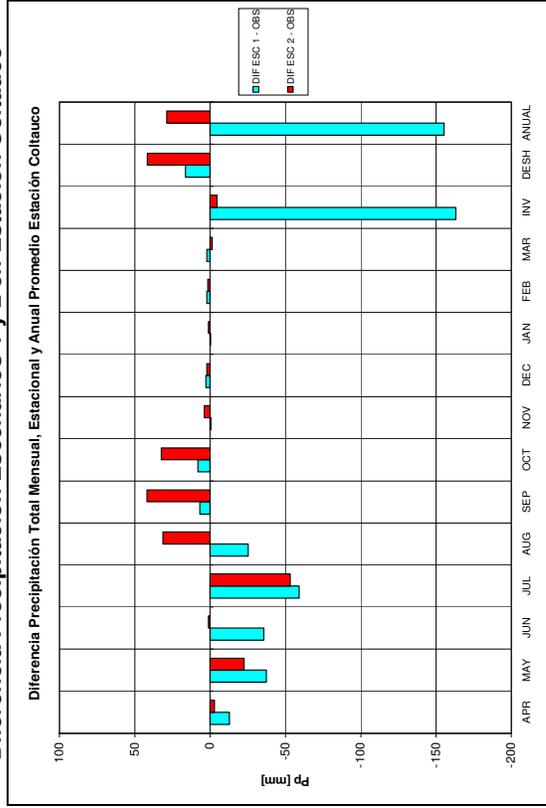


Figura 5.20

Diferencia Precipitación Escenarios 1 y 2 en Estación Millahue

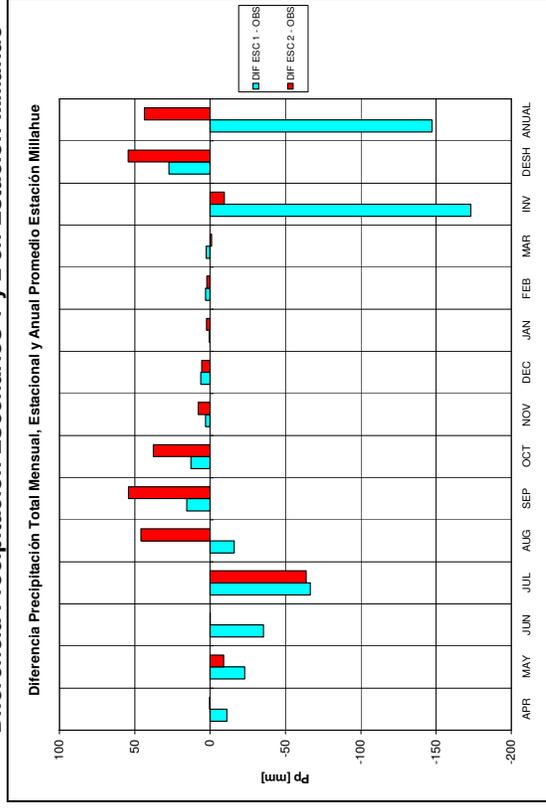
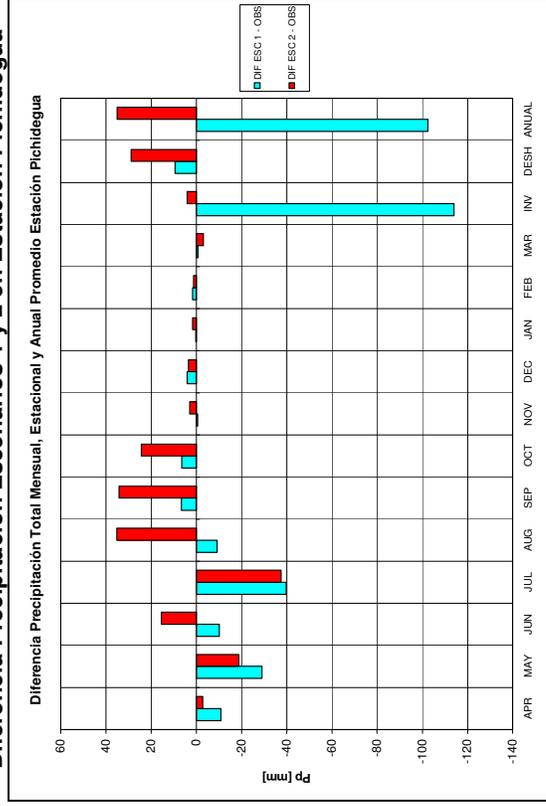


Figura 5.21

Diferencia Precipitación Escenarios 1 y 2 en Estación Pichidegua



Para todas las estaciones pluviométricas de las Figuras 5.15 a 5.21, se observan resultados muy similares a los de la estación Rengo. A nivel mensual no existe una misma tendencia para todos los meses, pero a nivel estacional se observa que, en el período invernal, para el Escenario 1 hay un marcada disminución de la precipitación (no tanto en San Fernando), mientras que para el Escenario 2 hay un aumento (excepto en Coltauco y Millahue); en el período de deshielo, para el Escenario 1 hay un aumento leve (excepto en Rancagua), mientras que para el Escenario 2 el aumento es mayor. A nivel anual se tiene que en el Escenario 1 hay disminuciones importantes (valor máximo de 155.3 [mm] en Millahue) y para el Escenario 2 unos aumentos considerables (valor máximo de 186.5 [mm] en San Fernando).

En el Anexo D2 se entregan las tablas en que se muestran los valores promedio de la precipitación total mensual y anual, para el período de datos observados y el período de datos generados, para los Escenarios 1 y 2, en las estaciones pluviométricas utilizadas en el proceso de generación de escorrentías.

Los valores de precipitación diaria para la estación Rengo, tanto los originales obtenidos de SDSM como los corregidos, se entregan en el Anexo D2. En dicho anexo también se entregan los valores derivados para el resto de las estaciones pluviométricas utilizadas en el Modelo Integrado.

- **Escenarios 3 y 4 (serie 10 A2 y B2):**

Los resultados para estos escenarios, se entregan en el Anexo D2.

Para la estación Rengo, se observa que existen claras variaciones de la precipitación mensual, estacional y anual promedio. A nivel mensual no existe una misma tendencia para todos los meses, pero a nivel estacional se observa que, tanto en el período invernal como en el de deshielo, para los Escenario 3 y 4 hay un aumento de la precipitación. A nivel anual se tiene que en el Escenario 3 hay un aumento importante (96.2 [mm]) y para el Escenario 4 dicho aumento es aún más marcado (178 [mm]).

Además, para la estación Rengo se aprecia que para la precipitación estacional y anual, en los Escenarios 3 y 4 se tiene una clara tendencia al aumento, pero dichos aumentos son más claros en el Escenario 4 que en el 3, es decir, en este caso el Escenario A2 del IPCC, se podría considerar menos favorable que el B2, ya que desde el punto de vista de los recursos hídricos, habría menor precipitación y por lo tanto, menor disponibilidad de agua que escurre superficialmente y que recarga a la napa.

Para las otras estaciones pluviométricas, las que se utilizaron en el proceso de generación de escorrentías, se observan resultados similares a los de la estación Rengo. A nivel mensual no existe una misma tendencia para todos los meses, aunque predominan los aumentos, pero a nivel estacional se observa que, en el período invernal y de deshielo, para los Escenarios 3 y 4 hay un aumento; a nivel anual se tiene que en el Escenario 3 hay un aumento importante (valor máximo de 226.5 [mm] en San Fernando) y para el Escenario 4 dicho aumento es aún más marcado (valor máximo de 334.7 [mm] en San Fernando).

Es importante destacar que en la estación Rengo, pese a que a nivel promedio se registran aumentos en el período 2005-2035 con respecto al período 1999-2005, en el Escenario 4, si se observan las tendencias de las series de precipitación, con respecto al valor del año 2005 se verifica claramente una tendencia a la disminución; para el Escenario 3 la tendencia con respecto a dicho año es consecuente (aumento) con lo observado a nivel promedio en los períodos de evaluación.

- **Escenarios 5 y 6 (serie 20 A2 y B2):**

Los resultados para estos escenarios, se entregan en el Anexo D2.

Para la estación Rengo se observa que existen claras variaciones de la precipitación mensual, estacional y anual promedio para la estación Rengo. A nivel mensual no existe una misma tendencia para todos los meses, pero a nivel estacional se observa que, tanto en el período invernal como en el de deshielo, para los Escenario 5 y 6 hay un aumento de la precipitación. A nivel anual se tiene que en el Escenario 6 hay un aumento importante (69.8 [mm]) y para el Escenario 5 dicho aumento es aún más marcado (133 [mm]).

Además, para la estación Rengo se aprecia que, para la precipitación estacional y anual promedio, en los Escenarios 5 y 6 se tiene una clara tendencia al aumento, pero dichos aumentos son más claros en el Escenario 5 que en el 6, es decir, en este caso el Escenario A2 del IPCC, se podría considerar más favorable que el B2 (lo cual se contrapone a lo analizado para los Escenarios 1 a 4, en los cuales B2 es el más favorable), ya que desde el punto de vista de los recursos hídricos, habría más precipitación y por lo tanto, más disponibilidad de agua que escurre superficialmente y que recarga a la napa.

Para las otras estaciones pluviométricas, las que se utilizaron en el proceso de generación de escorrentías, se observan resultados similares a los de la estación Rengo. A nivel mensual no existe una misma tendencia para todos los meses, aunque predominan los aumentos, pero a nivel estacional se observa que, en el período invernal y de deshielo, para los Escenarios 5 y 6 hay un aumento (excepto para el Escenario 6 en el período invernal de las Estaciones Coltauco y Millahue); a nivel anual se tiene que en el Escenario 6 hay un aumento importante (valor máximo de 191.3 [mm] en San Fernando) y para el Escenario 5 dicho aumento es aún más marcado (valor máximo de 275.5 [mm] en San Fernando).

Es importante destacar que en la estación Rengo, pese a que a nivel promedio se registran aumentos en el período 2005-2035 con respecto al período 1999-2005, en los Escenarios 5 y 6, si se observan las tendencias de las series de precipitación, con respecto al valor del año 2005 se verifica claramente una tendencia a la disminución.

En la Tabla 5.18, se muestran las diferencias a nivel anual (promedio de todos los años considerados en cada período de evaluación), entre la precipitación en el período asociado a los escenarios (Abril 2005 – Marzo 2035) y el período observado de cada estación pluviométrica.

Tabla 5.18
Promedio Anual de la diferencia entre Precipitación Escenarios c/r a Período
Observado [mm]

ESTACIÓN	ESC 1	ESC 2	ESC 3	ESC 4	ESC 5	ESC 6
Rengo	-7.54	5.06	7.56	14.38	10.63	5.36
Rancagua Endesa	-7.05	3.04	5.08	10.51	7.55	3.29
Popeta	-9.13	3.85	6.57	13.48	9.78	4.20
Las Nieves Central	-6.11	11.06	14.63	23.79	18.87	11.51
San Fernando	-0.76	15.93	19.27	28.29	23.36	16.34
Coltauco	-12.41	2.93	6.17	15.01	10.15	3.32
Millahue	-9.03	6.87	10.30	18.70	14.25	7.33
Pichidegua	-6.74	4.72	7.23	13.25	10.08	5.06
PROMEDIO	-7.35	6.68	9.60	17.17	13.08	7.05

Se observa claramente, que en términos de precipitación, el más favorable es el Escenario 4, ya que desde el punto de vista de los recursos hídricos, habría más precipitación y por lo tanto, más disponibilidad de agua que escurre superficialmente y que recarga a la napa. Por otro lado, el más desfavorable es el Escenario 1.

Si para la precipitación, se establece un ordenamiento del escenario más a menos favorable, éste sería el siguiente: 4, 5, 3, 6, 2, 1.

De los resultados obtenidos para esta variable, considerando los seis escenarios, se puede concluir lo siguiente:

- Para todas las estaciones estudiadas, se determinó que en relación a la precipitación, a nivel anual, en el Escenario 4 se experimentan mayores aumentos de ésta que en los demás escenarios.
- Con respecto a los períodos invernal y de deshielo, los resultados son bastante distintos entre las estaciones pluviométricas y entre los escenarios de cambio climático, por lo que no se puede establecer una tendencia a nivel estacional.
- Al menos para el sector bajo – medio (entre 280 y 720 [m.s.n.m.], rango de alturas de las estaciones pluviométricas utilizadas) de la cuenca del río Cachapoal, se constata que los escenarios planteados, en los 30 años del horizonte de evaluación, introducen un cambio climático, asociado principalmente a una tendencia al aumento de la precipitación a nivel mensual, estacional y anual promedio, excepto para el Escenario 1.
- Para este caso, al contar con más estaciones distribuidas en distintos sectores de la cuenca del río Cachapoal, los resultados obtenidos (en cuanto al aumento o disminución de la precipitación, según cada escenario) pueden ser más representativos que en el caso de la temperatura y la evaporación, por lo que en las cuencas en que se estudie esta variable, es esperable obtener tendencias que vayan en el mismo sentido a las verificadas en las estaciones base.

5.3.6.4 Análisis de los Escenarios de Cambio Climático

En la Tabla 5.19 se muestra un ordenamiento de los escenarios de cambio climático (que se evalúan en el Modelo Integrado), éste se refiere a establecer los escenarios más y menos favorables para cada variable meteorológica, y de esta manera determinar aquel escenario en el que se deberían esperar más cambios y aquel en el que se deberían esperar menos.

Para la temperatura, el ordenamiento se basa en que los mayores aumentos son menos favorables (considerando principalmente los resultados de la estación Rengo, en la cual se observaron aumentos), sobre todo si dichos incrementos se dan en el período invernal, lo que podría implicar una menor acumulación de nieve en dicho período, y por lo tanto, menos agua disponible en el período de deshielo, donde ésta podría ser más necesaria, particularmente para las actividades agrícolas. Con respecto a las disminuciones registradas en la estación Convento Viejo, éstas también son importantes, sobre todo considerando que las mayores disminuciones se dan el período de deshielo, lo que puede producir menos derretimiento de la nieve acumulada; pero como los aumentos en Rengo son mayores que las disminuciones en Convento Viejo, se optó por utilizar el criterio general antes mencionado.

Para la evaporación, el ordenamiento se hace igual que para la temperatura.

Para la precipitación, el ordenamiento se basa en que los menores aumentos son menos favorables, ya que tener menos precipitación implicaría menos disponibilidad de agua que escurre superficialmente y que recarga a la napa.

Para las tres variables el número 1 se asocia al más favorable y el 6 al menos favorable. Para la temperatura y evaporación sólo hay 1 y 2, ya que los Escenarios 1, 3 y 5 son iguales, lo mismo que para los Escenarios 2, 4 y 6.

Tabla 5.19
Ordenamiento variables meteorológicas para cada escenario de cambio climático

Escenario Modelo Integrado	Escenario IPCC	Serie Temperatura	Serie Evaporación	Serie Precipitación
Escenario 1	A2	2	1	6
Escenario 2	B2	1	2	5
Escenario 3	A2	2	1	3
Escenario 4	B2	1	2	1
Escenario 5	A2	2	1	2
Escenario 6	B2	1	2	4

De lo mostrado en la Tabla 5.19, se establece un ordenamiento del escenario más favorable al menos favorable, desde el punto de vista de los efectos que puedan observarse en la disponibilidad de los recursos hídricos; dicho orden se basa mayoritariamente en la precipitación, ya que las diferencias entre escenarios para dicho caso es más marcada que para las otras variables, en las cuales se tienen sólo dos escenarios. De esta manera se determina que el ordenamiento de más a menos

favorable es el siguiente: Escenario 4, Escenario 5, Escenario 3, Escenario 6, Escenario 2 y Escenario 1.

5.4 EVALUACIÓN DE ESCENARIOS EN EL MODELO INTEGRADO

Una vez definidos los escenarios de cambio climático a ser evaluados en el Modelo Integrado, se debieron realizar algunas modificaciones a dicho modelo, con respecto a la versión utilizada en el período de calibración, dichos cambios se refieren principalmente a la información que se incorpora al modelo, y al período de simulación que se utiliza para evaluar los escenarios, el cual es de 30 años, versus 6 años del período de calibración.

5.4.1 Modificaciones al Modelo Sacramento

En este caso, para cada cuenca intermedia y de cabecera, se hicieron 6 archivos de escorrentía, cada uno de los cuales cubre 5 años del período de simulación (Abril 2005 – Marzo 2010, Abril 2010 – Marzo 2015, Abril 2015 – Marzo 2020, Abril 2020 – Marzo 2025, Abril 2025 – Marzo 2030, Abril 2030 – Marzo 2035). Esta separación se hizo para poder tener archivos manejables, ya que juntar todo el período de simulación resultaba impracticable.

Para preservar la continuidad en la generación de caudales, cada uno de los archivos mencionados se ligó con el anterior; para el primer período (Abril 2005 – Marzo 2010) la ligazón se hizo con los archivos del período de calibración (Abril 1999 – Marzo 2005).

Con respecto a los valores de los gradientes, se mantuvieron los mismos del período de calibración, y con respecto a los aleatorios, se repitieron, en cada uno de los seis archivos mencionados, los mismos valores de los primeros cinco años del período de calibración.

5.4.2 Modificaciones al Modelo de Simulación Operacional

Para el caso del modelo de simulación operacional, las modificaciones realizadas corresponden principalmente, a adecuar el modelo al período de evaluación de los escenarios, y a definir los usos de los recursos hídricos superficiales para dicho período.

En cuanto a los usos de los recursos hídricos, es importante destacar que se consideró que el funcionamiento del sistema, se mantendría igual a lo registrado en el período de calibración, con extracciones que no superan los valores máximos de dicho período.

En el uso agrícola del recurso hídrico (riego), se mantuvieron los valores de demanda evapotranspirativa determinados para el período de calibración (detalles en el Anexo C10). Pese a que dichos valores podrían haber sido actualizados luego de la generación de escenarios de temperatura y evaporación, se optó por ser consecuente con el resto de los usos del recurso hídrico y mantener las demandas evapotranspirativas utilizadas en el período de calibración.

En los usos de agua potable, minería y generación hidroeléctrica, se supuso que la demanda de extracción correspondía al máximo caudal extraído en el período de calibración (valor menor o igual al derecho de extracción).

En cuanto a las descargas de aguas servidas se supuso que se mantenía descargando el valor observado en el año 2005.

Para las descargas de agua de los procesos de la minería, se supuso que se descargaba el máximo valor del período observado.

5.4.3 Modificaciones al Modelo de Aguas Subterráneas

En este caso, las modificaciones realizadas se refieren a adecuar el modelo al período de evaluación de los escenarios, y a definir los usos de los recursos hídricos subterráneos (operación de los pozos de bombeo) para dicho período.

Para los pozos de bombeo utilizados en el riego, al igual que en el período de calibración, las extracciones estuvieron reguladas por la capacidad del sistema de riego de abastecerse con los recursos superficiales, es decir, si la demanda de riego no podía ser cubierta con dichos recursos, los pozos operaban.

Para los usos de agua potable, industrial y minero, se utilizaron los mismos valores del período de calibración, es decir, el uso previsible (para más detalles referirse al acápite 4.4).

Capítulo 6

Análisis de Resultados

6.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se muestran y analizan los resultados obtenidos en la evaluación de los Escenarios de Cambio Climático (2005-2035) con el Modelo Integrado, y su comparación con los resultados de dicho modelo para el Período Base de calibración (1999-2005).

6.2 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CUENCAS EN RÉGIMEN NATURAL

En este acápite se analizan los efectos de los cambios en la temperatura, precipitación y evaporación, (que se plantearon en el Capítulo 5) en la disponibilidad de recursos hídricos para dos cuencas en régimen natural: Cortaderal – Cachapoal (CA-CC1-1) y Pangal – Blanco (PAN-CC1-1). Se decidió no estudiar la cuenca Claro de Rengo Alto (CR-CC1-1), debido a que en su etapa de calibración, el ajuste no fue lo suficientemente bueno, y en sus resultados se puede incorporar una incertidumbre importante, asociada al error de cierre del modelo, lo que dificultaría analizar aisladamente los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de esta cuenca.

Este análisis no implica solamente estudiar, si para cada Escenario planteado existe más o menos agua que en el Período Base, sino que también analizar, si existen modificaciones en las recargas al acuífero, más o menos acumulación de nieve, y por supuesto, relacionar todo esto con los cambios en las variables meteorológicas.

6.2.1 Cuenca Cortaderal – Cachapoal (CA-CC1-1)

6.2.1.1 Caudales de salida

En la Figura 6.1, se muestran las curvas de duración (CD) de los caudales de salida de esta cuenca (caudal medio diario), para los 6 escenarios de cambio climático y para el Período Base de estudio (2000–2004). Es importante mencionar que tanto para este caso, como para el siguiente, los caudales son mostrados en curvas de duración, para así facilitar la comparación de los escenarios con el Período Base, los cuales tienen distintas longitudes de tiempo.

En las Figuras 6.2 a 6.4 se muestran las curvas de variación estacional (CVE) para esta cuenca, para 3 probabilidades de excedencia: 25%, 50% y 75%.

En la Figura 6.5 se muestra un gráfico de barras, con los caudales de salida estacionales promedio para CA-CC1-1 (el promedio, en el período de estudio, del valor medio de los caudales diarios para el período invernal, Abril a Septiembre, y para el período de deshielo, Octubre a Marzo).

Figura 6.1
Curvas de Duración Cuenca Cortaderal – Cachapoal

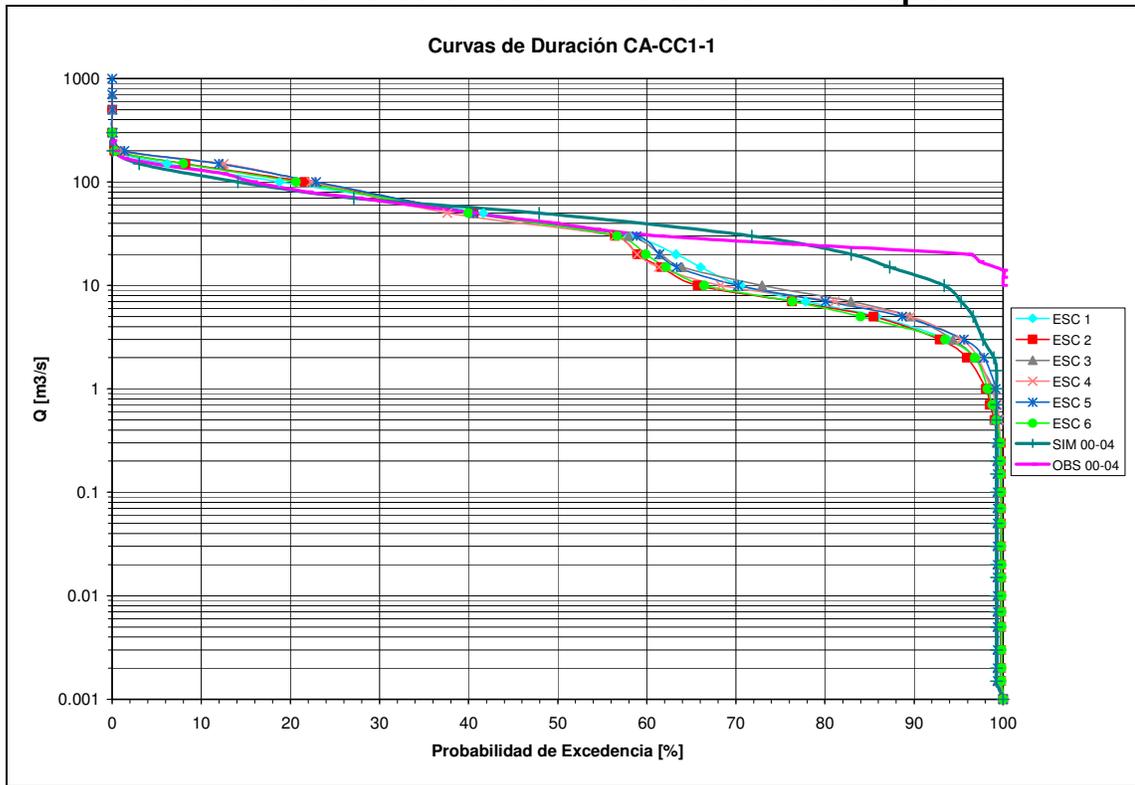


Figura 6.2
Curvas de Variación Estacional 25% Cuenca Cortaderal – Cachapoal

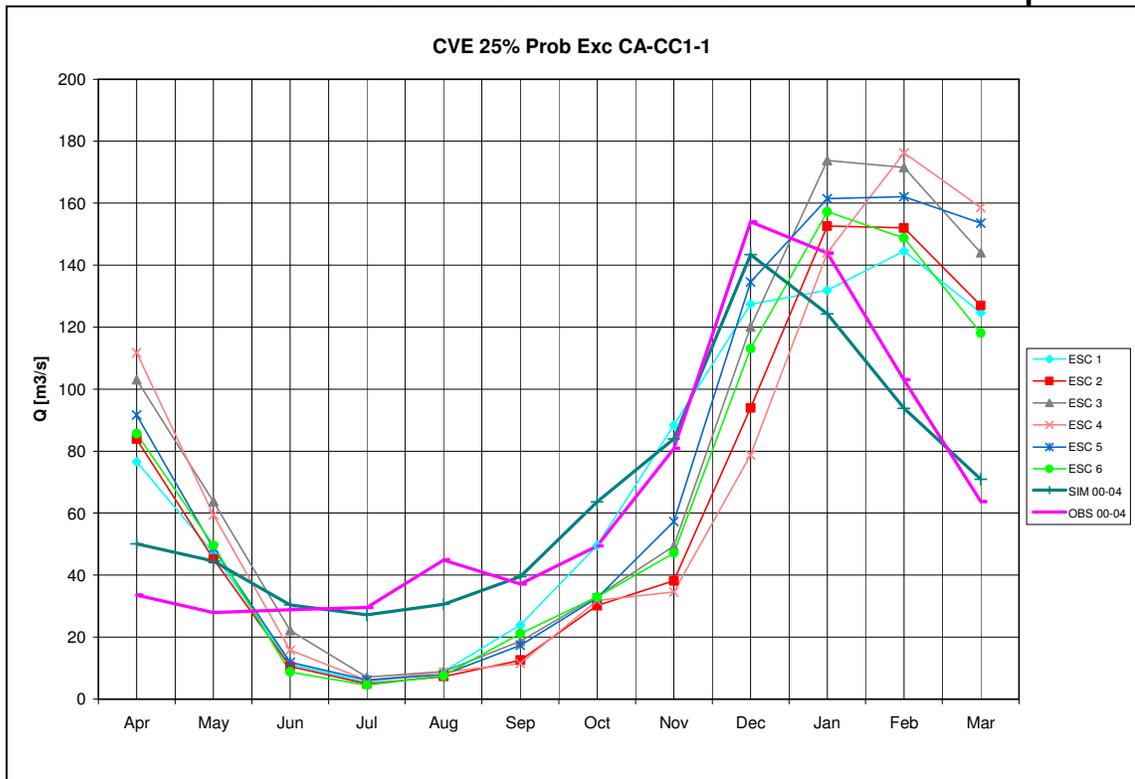


Figura 6.3
Curvas de Variación Estacional 50% Cuenca Cortaderal – Cachapoal

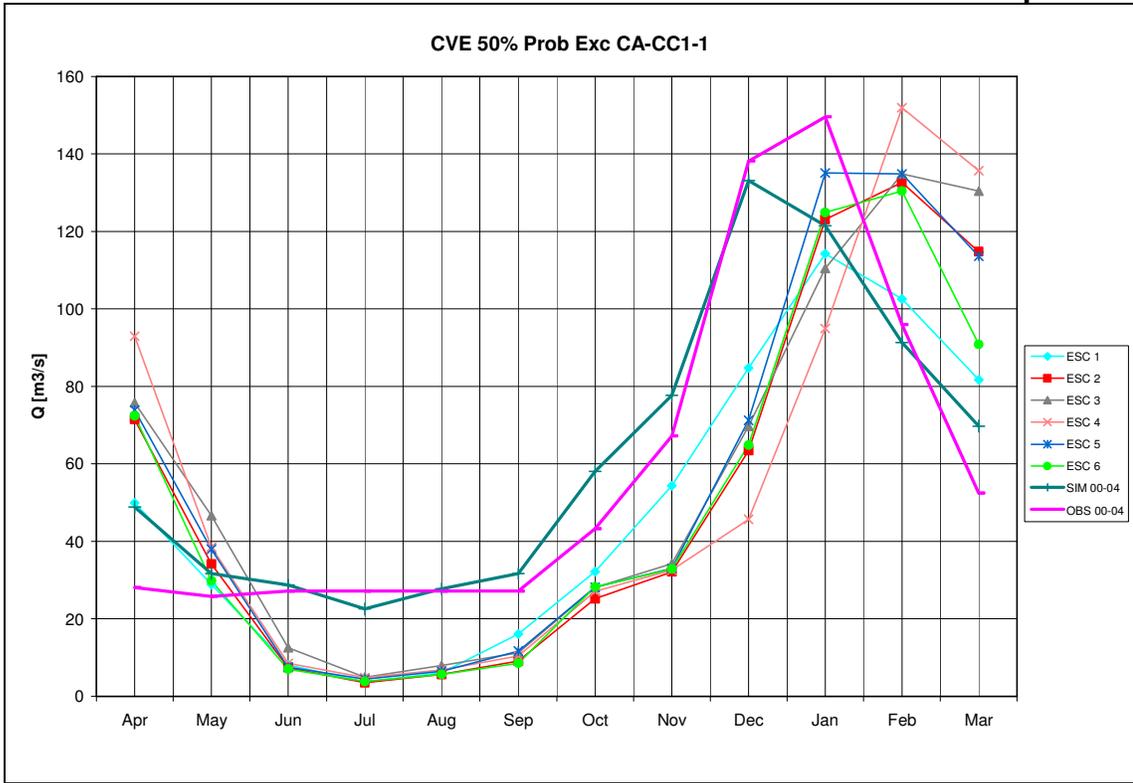


Figura 6.4
Curvas de Variación Estacional 75% Cuenca Cortaderal – Cachapoal

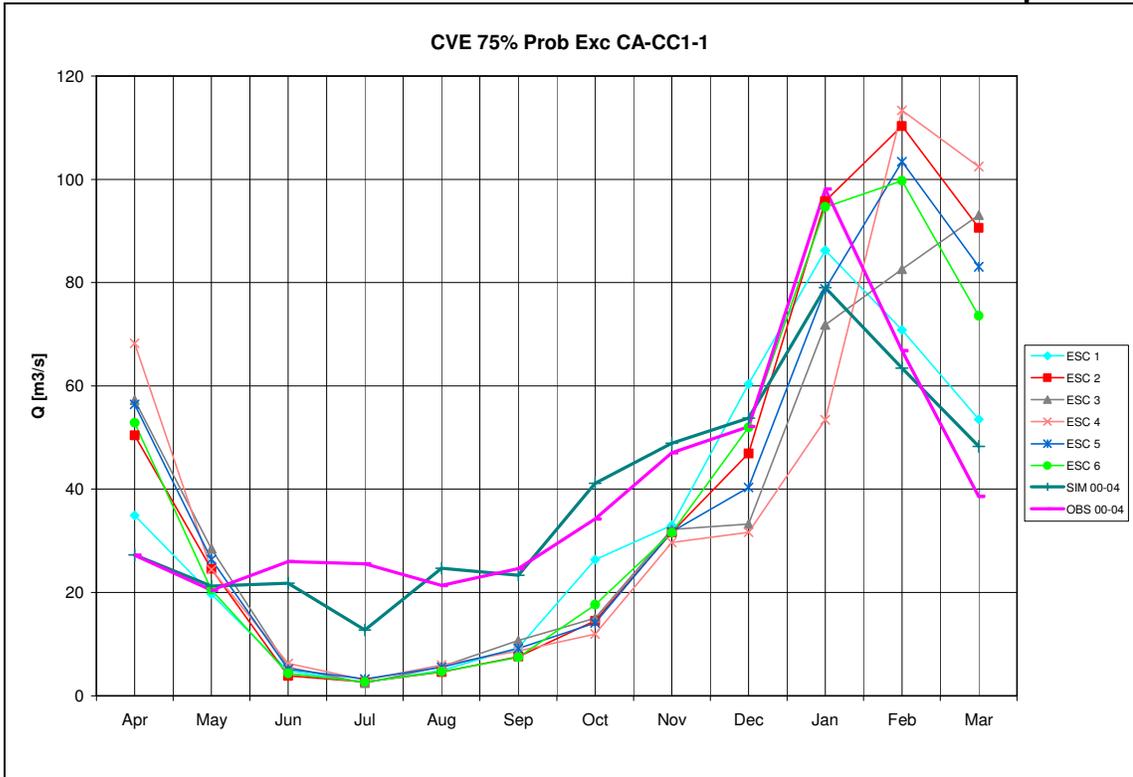
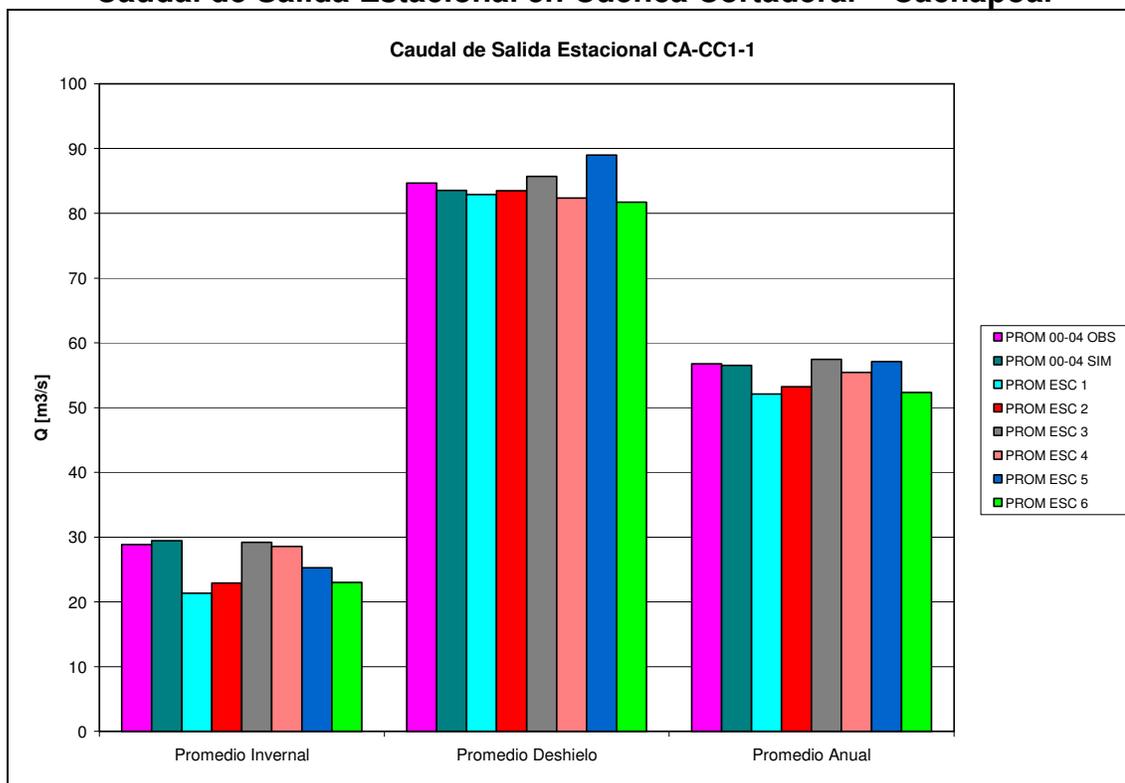


Figura 6.5
Caudal de Salida Estacional en Cuenca Cortaderal – Cachapoal



En las Figuras 6.1 a la 6.5 se observa que en esta cuenca, para algunos escenarios, no existen diferencias tan marcadas entre los caudales de salida del Período Base y de los escenarios. Según la Figura 6.5, en el período invernal todos los escenarios tienen caudales estacionales menores que el Período Base (sobre todo el Escenario 1), excepto el Escenario 3. En el período de deshielo, los Escenarios 3 y 5 tienen caudales mayores que el Período Base, y el resto de los escenarios disminuye su escorrentía, pero no de manera tan marcada como en el período invernal. A nivel anual, se observa que las disminuciones son bastante menores, e incluso en los Escenarios 3 y 5 se tienen valores mayores que en el Período Base.

Es importante mencionar que para esta cuenca, el ajuste de los caudales simulados y observados (en el período de calibración) es bastante bueno (coeficiente NS = 0.86 a nivel mensual, ver Capítulo 4). Esto se verifica en la Figura 6.5, en la que se observa que tanto para el período invernal y de deshielo, los caudales simulados son bastante cercanos a los observados (1% de diferencia aproximadamente). Por lo anterior, para esta cuenca, cualquier variación en la disponibilidad del recurso, es atribuible con mayor certeza a los efectos del cambio climático, y de menor manera al error propio del modelo.

Según las CD, los resultados son bastante similares para los seis escenarios, los cuales a su vez no se alejan demasiado de los valores del Período Base. Incluso para caudales mayores a 70 [m³/s] aproximadamente, las curvas para los escenarios están por sobre las de dicho período. Para caudales por debajo de los 30 [m³/s] la situación se invierte.

Lo indicado anteriormente para las CD, se observa también en las tres CVE, en las que se aprecia que para el período entre Junio y Noviembre aproximadamente, las curvas de los escenarios están por debajo de las del Período Base, es decir, los caudales más bajos de los escenarios son menores que los del mencionado período. Para el resto de los meses, existen diferencias según las magnitudes de los caudales, que se aprecian claramente en las CVE, y no vale la pena detallar por escrito.

Lo que si resulta muy interesante destacar, es el desplazamiento del valor peak, ya que para el Período Base éste se produce aproximadamente a mediados de Diciembre, y para los escenarios se desplaza (en términos promedio) a mediados de Enero, teniéndose para algunos de éstos, valores mayores que para dicho período, lo que se observa claramente en la CVE 25% (Figura 6.2).

Con respecto al régimen de esta cuenca, pese al desplazamiento del valor peak, dicho régimen sigue siendo claramente nival (al igual que lo analizado en el Capítulo 3).

6.2.1.2 Variables meteorológicas

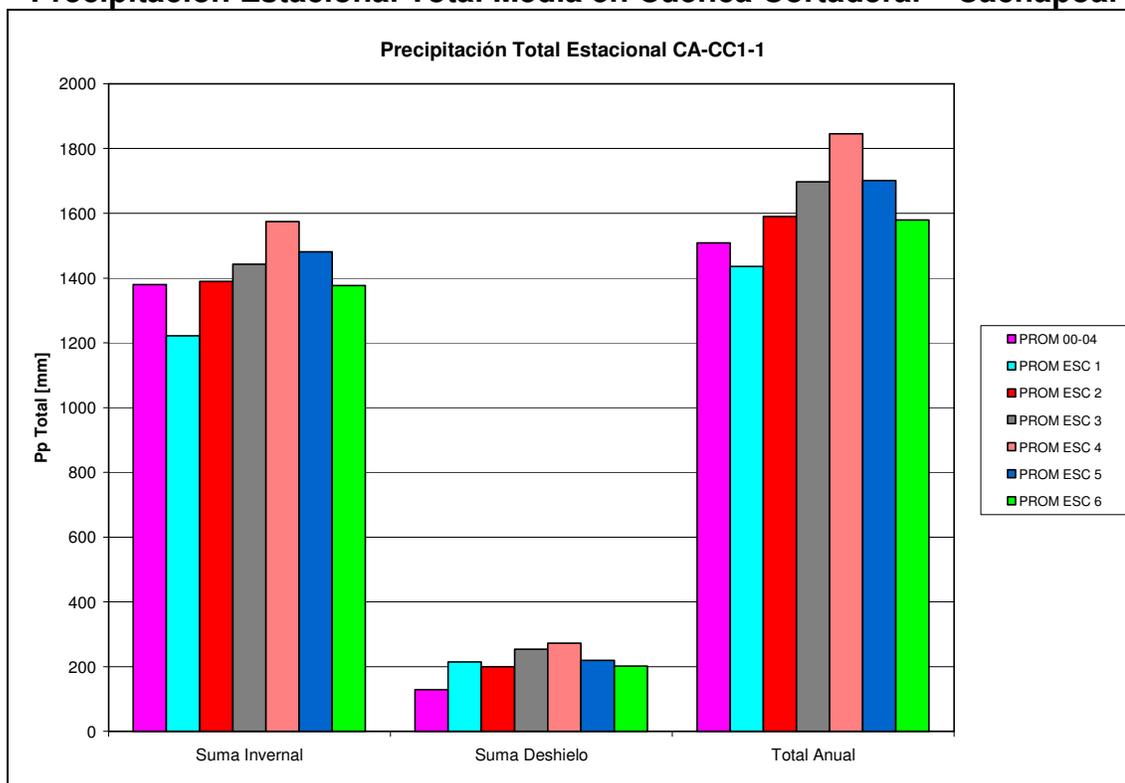
Para entender mejor las variaciones experimentadas por los caudales de salida, también se analizan los cambios asociados a las variables meteorológicas. Para éstas se estudian las variaciones estacionales, comparando los seis escenarios con el Período Base.

Es importante aclarar que las estadísticas meteorológicas que se muestran, corresponden al promedio ponderado, por el área de cada banda, de los valores escalonados, mediante Sacramento, asociados a cada banda en la que se subdivide la cuenca (tema explicado en el Capítulo 4). Por lo mismo, para estos gráficos no existen datos observados para el Período Base, ya que dichos datos de las estaciones meteorológicas, son transformados por el mencionado modelo. Se utilizan estos valores, para analizar de manera más precisa, las relaciones entre los distintos elementos que definen la escorrentía en la cuenca.

En la Figura 6.6 se muestra la precipitación estacional total promedio (el promedio, en el período de estudio, de la suma de los valores diarios totales para el período invernal, Abril a Septiembre, y para el período de deshielo, Octubre a Marzo), de la estadística escalonada, mencionada en el párrafo anterior. Con valores totales, se quiere decir que se incluye la precipitación líquida y nival.

En dicha figura se observa que para el período invernal, en todos los escenarios, excepto el Escenario 1, se tienen más precipitaciones que en el Período Base, alcanzando en casos como el del Escenario 4, aproximadamente 200 [mm] más de precipitación. Para el período de deshielo, también hay aumento de la precipitación (en este caso para todos los escenarios), aunque no tan marcado como en el período invernal. Estos resultados son coincidentes con los observados en la estación pluviométrica base, Las Nieves Central, en la cual se observan las mismas tendencias que las de la Figura 6.6 (para más detalles ver acápite 5.3.6.3).

Figura 6.6
Precipitación Estacional Total Media en Cuenca Cortaderal – Cachapoal



En las Figuras 6.7 y 6.8 se muestran la precipitación en forma líquida y en forma de nieve respectivamente. De estas figuras se observa que, el tipo de precipitación que cae sobre la cuenca, se modifica de manera importante con respecto al Período Base. Esto se debe a que la precipitación líquida, disminuye considerablemente para el período invernal, aumentando en dicho caso la nival (esto ocurre para todos los escenarios). Para el período de deshielo, la precipitación líquida disminuye para los Escenarios 2 y 6, aumentando para el resto, y la nival aumenta para todos los escenarios.

Como claramente las variaciones de caudal, no se justifican solamente desde el punto de vista de la precipitación, y se necesita buscar una justificación a los cambios en el tipo de precipitación (agua o nieve) que cae sobre la cuenca, se estudian además la temperatura y la evaporación.

En la Figura 6.9 se muestran las temperaturas estacionales promedio (que se calcula de igual forma que el caudal estacional), de la estadística escalonada, mencionada anteriormente en el caso de la precipitación.

Se observa que las temperaturas estacionales promedio de los escenarios, son considerablemente menores que las del Período Base. Estas diferencias son de aproximadamente 2 [°C] menos para el período invernal y de aproximadamente 6 [°C] menos para el período de deshielo. Obviamente, a nivel de promedio anual también la temperatura disminuye.

Figura 6.7
Precipitación Estacional Líquida Media en Cuenca Cortaderal – Cachapoal

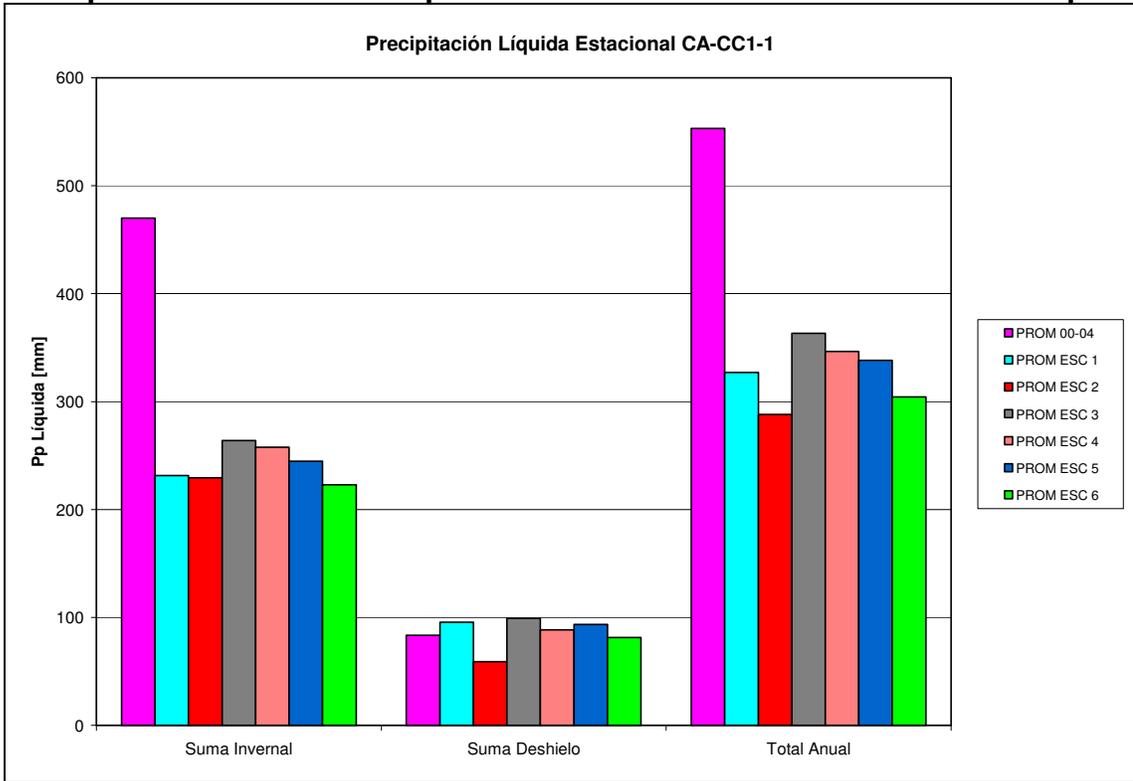


Figura 6.8
Precipitación Estacional Nival Media en Cuenca Cortaderal – Cachapoal

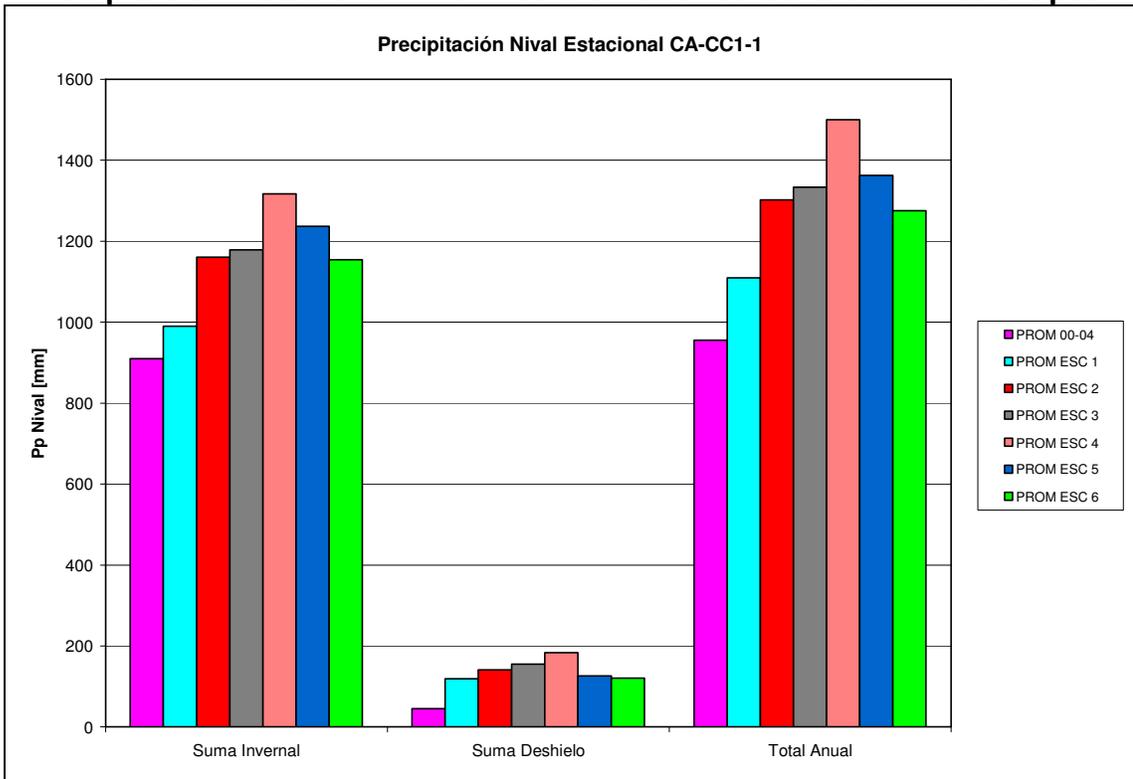
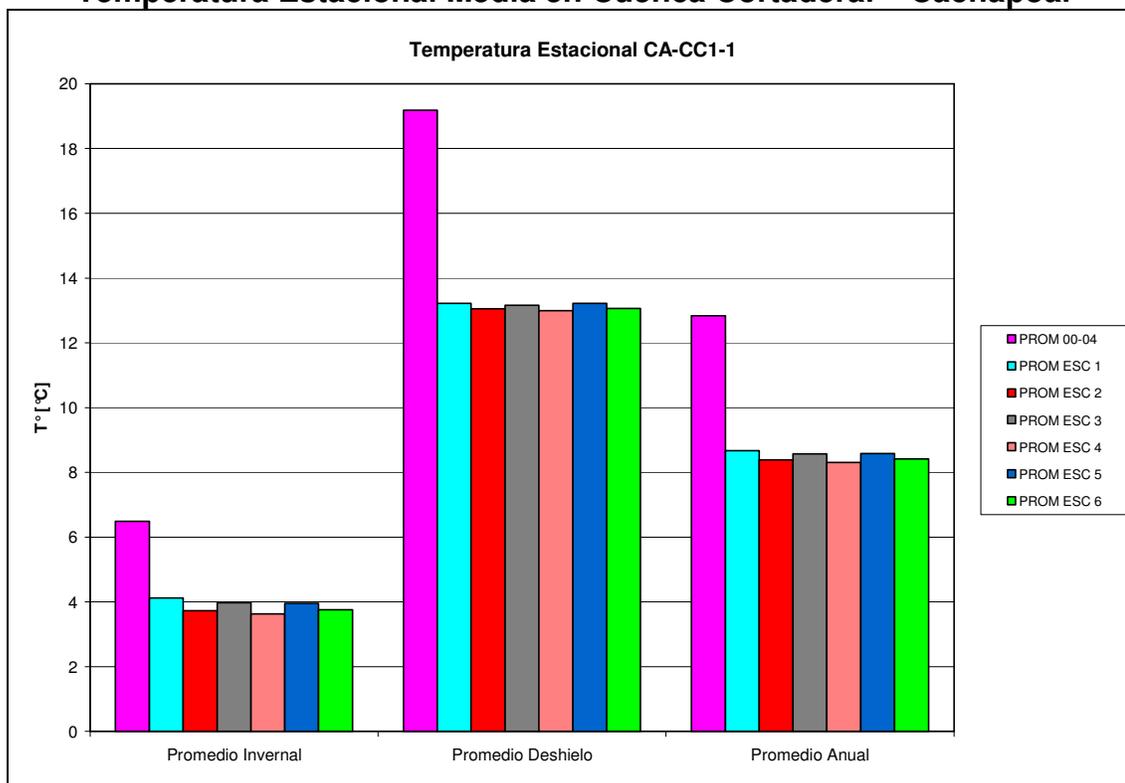


Figura 6.9
Temperatura Estacional Media en Cuenca Cortaderal – Cachapoal



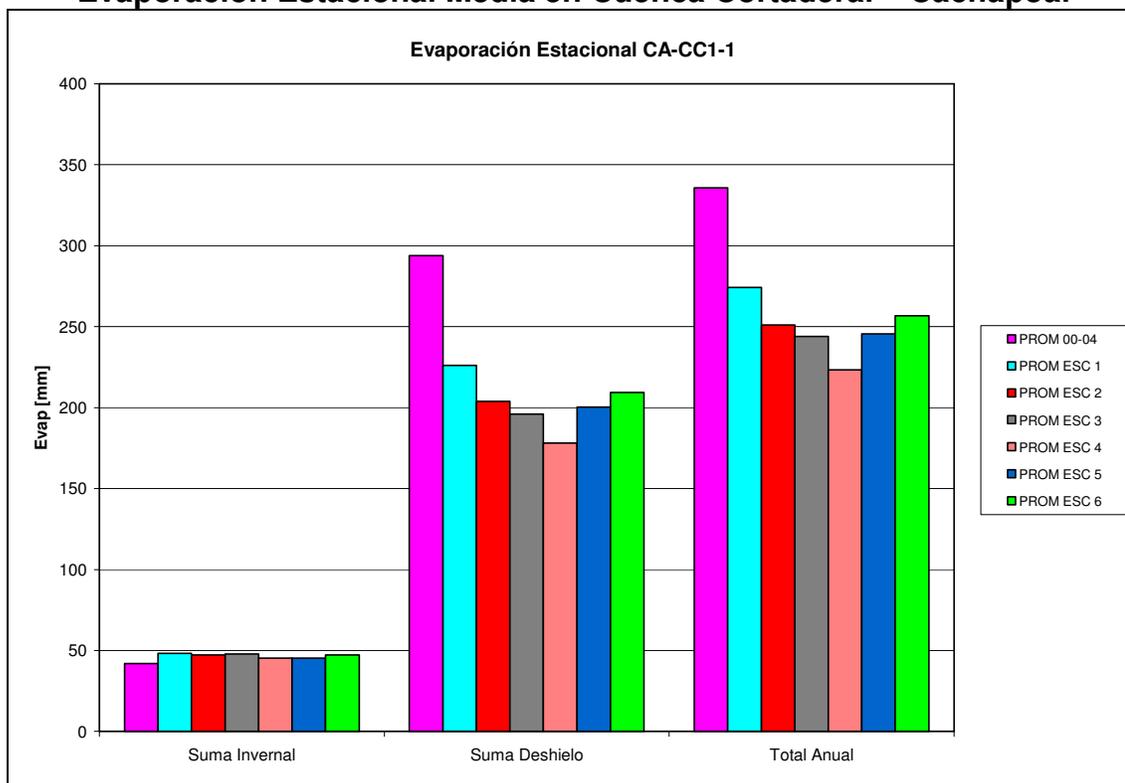
Las variaciones observadas para la temperatura, son coincidentes con las registradas en la estación base, Convento Viejo, en la cual a nivel estacional y anual se observaron disminuciones para todos los escenarios.

En la Figura 6.10 se muestran las evaporaciones estacionales promedio (se calcula de igual manera que la precipitación estacional), de dicha estadística escalonada.

Para el caso de la evaporación, se observa que existe un leve aumento para el período invernal y una disminución bastante marcada en el período de deshielo (la mayor diferencia corresponde aproximadamente a 120 [mm], entre el Escenario 4 y el Período Base), lo que implica que a nivel anual, la evaporación disminuya con respecto al Período Base.

Las variaciones observadas para la evaporación, no son coincidentes con las registradas en la estación base, Rengo, en la cual, a nivel invernal y anual se observaron aumentos para todos los escenarios. Las mencionadas diferencias están asociadas principalmente a los cambios que introducen los gradientes de evaporación, que permiten obtener disminuciones significativas con respecto al Período Base en CA-CC1-1.

Figura 6.10
Evaporación Estacional Media en Cuenca Cortaderal – Cachapoal



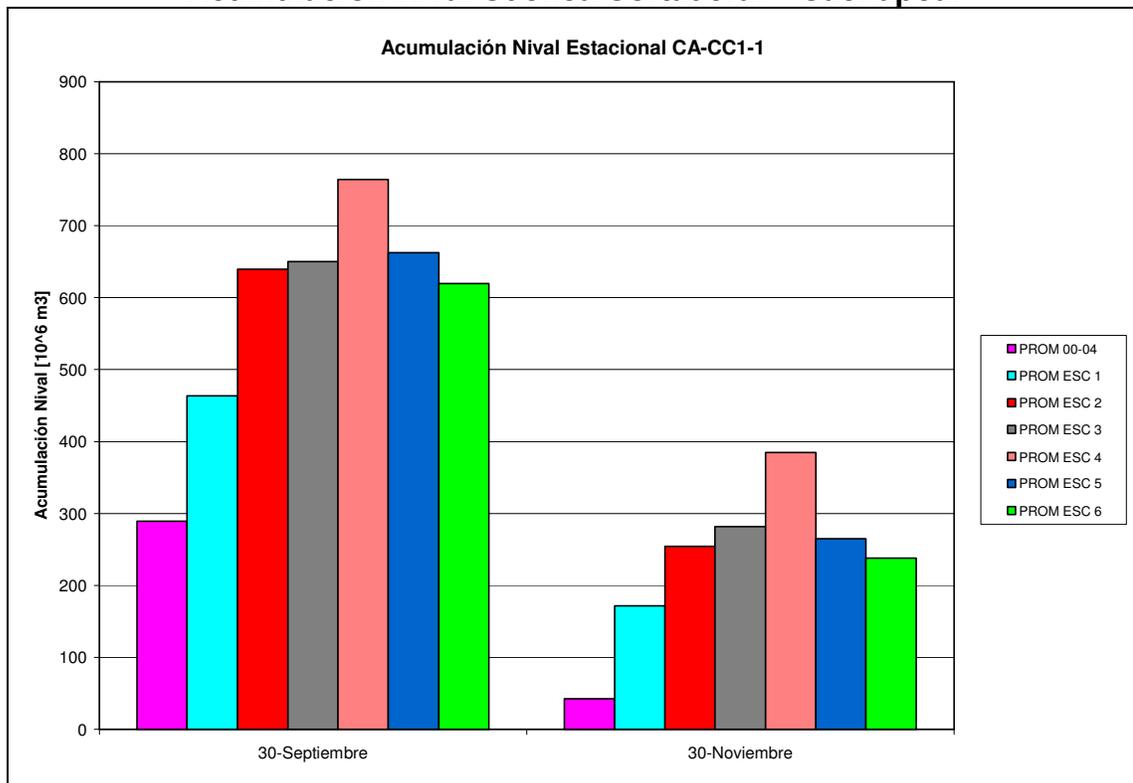
6.2.1.3 Acumulación nival y recarga al acuífero

Para complementar el análisis de las variaciones en los caudales de salida de la cuenca, también se muestran los resultados de acumulación nival. Éstos se extraen desde los archivos de Sacramento asociados a la cuenca, en particular, los valores que se muestran en la Figura 6.11, corresponden a dos fechas representativas, para el período invernal se utiliza el 30 de Septiembre y para el período de deshielo el 30 de Noviembre, esta última fecha se utiliza ya que posteriormente (de Diciembre en adelante), los valores de acumulación son muy cercanos a cero.

En la Figura 6.11 se observa que para todos los escenarios, la acumulación nival aumenta considerablemente con respecto al Período Base. Este aumento se da tanto para el período invernal, como para el período de deshielo, lo cual obviamente está ligado al claro aumento de la precipitación nival y reducción de la temperatura (ver Figuras 6.8 y 6.9).

Resulta interesante destacar, que si se observan las Figuras 6.8 y 6.11, se verifica que para esta cuenca, existe una relación prácticamente directa, entre la precipitación nival y la acumulación de nieve. Exceptuando los Escenarios 2 y 5 (para el período de deshielo), si se ordena de mayor a menor la precipitación nival para ambos períodos, este ordenamiento coincide con el de la acumulación nival. Esto es posible debido a que las temperaturas de todos los escenarios son bastante parecidas.

Figura 6.11
Acumulación Nival Cuenca Cortaderal – Cachapoal



Para completar el análisis, a continuación se analizan los valores de recarga subterránea en esta cuenca. Es importante recordar, que tal como se mencionó en el Capítulo 4, para las cuencas en que no hay acuífero propiamente tal, todas dichas recargas fueron definidas como recargas subterráneas, que ingresan al acuífero a través de pozos de inyección, en este caso en el borde de conexión con el río Cachapoal. Los valores se entregan en $[m^3/día]$ (tal como se introducen en Visual Modflow) ya que para este caso no interesa estudiar la tasa de recarga.

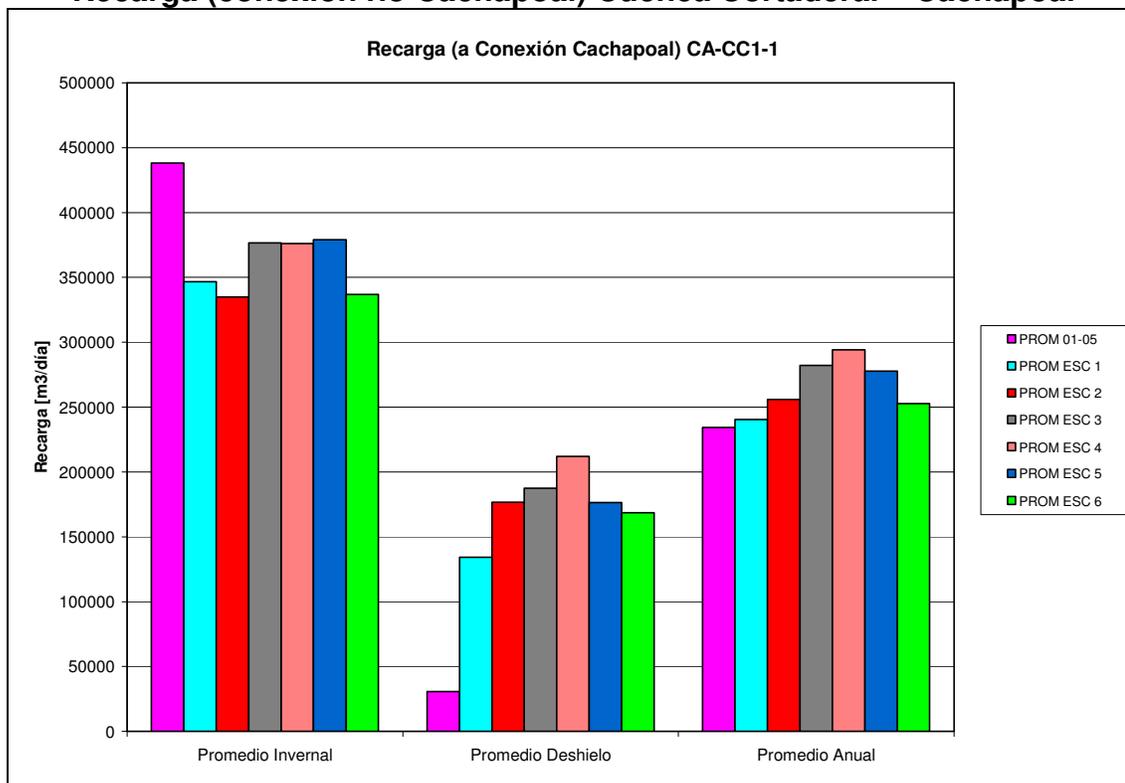
Los valores de recarga al acuífero que se muestran en la Figura 6.12, corresponden a la suma de ésta para las 6 bandas en que se discretizó esta cuenca. Al igual que para la temperatura, se grafica la recarga promedio.

Se observa que los valores de recarga subterránea de los escenarios en el período invernal, son menores que para el Período Base. Esto se explica por el menor aporte de la precipitación líquida, debido a la disminución de ésta y al aumento de la de tipo nival, con el consiguiente incremento en la acumulación de nieve, lo cual implica que existe menos agua susceptible de recargar el acuífero.

Para el período de deshielo existe un aumento de la recarga subterránea, que está asociado a que la precipitación líquida aumenta (excepto para los Escenarios 2 y 6), lo cual sumado a que en este período existen más posibilidades de derretimiento, debido a las temperaturas más altas (aunque las temperaturas disminuyen con respecto al Período Base esto no implica que no haya derretimiento) con respecto al período invernal, se tiene que existe más agua disponible para recargar el acuífero. Para los

Escenarios 2 y 6, pese a que la precipitación líquida disminuye con respecto al Período Base, las recargas aumentan, lo cual puede estar asociado a un mayor nivel de derretimiento, que permite “cubrir” el déficit asociado a la menor precipitación líquida.

Figura 6.12
Recarga (conexión río Cachapoal) Cuenca Cortaderal – Cachapoal



Es importante notar de estos resultados, que el aumento de la precipitación líquida no implica de manera directa tener mayores niveles de recarga. Un ejemplo claro de esto es el Escenario 1 para el período de deshielo, que pese a tener el segundo lugar en la cantidad de precipitación líquida, en la recarga es superado por todos los escenarios. Lo cual puede estar ligado a que la precipitación nival de este escenario es la más baja, lo que implica una menor disponibilidad de nieve para el derretimiento, y por lo tanto, menos agua para recarga.

No hay que olvidar que si bien la recarga es agua que va al acuífero, ésta puede estar incluida en el caudal de salida como flujo base que viene de la napa, cuando los estanques que la representan en Sacramento, colman su capacidad de almacenamiento. Por lo tanto, que los niveles de recarga aumenten, no necesariamente implica que los niveles de escorrentía superficial (en la salida de la cuenca), tienen que bajar en la misma magnitud, aunque obviamente pueden disminuir.

6.2.1.4 Análisis de resultados para CA-CC1-1

Según los resultados analizados en los acápites 6.2.1.1 a 6.2.1.3, se concluye que las disminuciones de caudal del *período invernal* (excepto para el Escenario 3), están directamente relacionadas con la marcada disminución de la temperatura. Pese al

aumento de precipitaciones totales (excepto para el Escenario 1), al disminuir la temperatura, la precipitación líquida disminuye y aumenta la nival, ésta se comienza a acumular no pudiendo derretirse buena parte de ella, ya que la temperatura es más baja. Por lo tanto, hay una merma en el escurrimiento y un consiguiente aumento en la acumulación nival.

Para el Escenario 3 hay un aumento de caudal con respecto al Período Base (aunque el aumento es mínimo), lo cual probablemente se debe a que si bien la precipitación líquida disminuye, la total aumenta (el resto de precipitación cae en forma de nieve) y como la temperatura es mayor con respecto a los otros escenarios (excepto el 1), quizás el derretimiento en este caso también lo es. Por lo tanto, el déficit de precipitación líquida es cubierto y la esorrentía logra ser prácticamente igual a la del Período Base. Además, hay que considerar que en este caso el nivel de recarga subterránea es menor, por lo tanto, hay una mayor proporción de agua que escurre superficialmente, en relación a lo que se tiene en el Período Base (en que la proporción es menor, porque frente a valores similares de caudal de salida, hay más recarga).

Para el Escenario 4, pese a que presenta el mayor aumento de precipitación total para el período invernal, la precipitación líquida es algo menor a la del Escenario 3 y a la del Período Base, y como en este escenario (el 4) se produce el mayor descenso de temperatura, probablemente el derretimiento no alcanza para que el caudal de salida sea mayor al del Período Base. Además, en este escenario los niveles de recarga al acuífero son similares a los del Escenario 3.

Para los Escenarios 2, 5 y 6 la explicación es la misma expuesta para el Escenario 4, pero obviamente con diferencias en las relaciones de precipitación, temperatura y caudal.

En el Escenario 1 se tiene que la precipitación total es menor que en el Período Base y por lo tanto, la esorrentía también es menor.

Para el *período de deshielo* se observa que, las disminuciones de caudal son bastante pequeñas (excepto para los Escenarios 3 y 5 en que se observan aumentos), lo cual tiene relación con que la precipitación líquida para este período, se mantiene relativamente similar al Período Base, excepto para el Escenario 2, en que hay una disminución mayor, pero que no implica menor disponibilidad de agua, ya que la precipitación total sí aumenta en dicho caso. Además, hay que considerar que para este período, la recarga subterránea aumenta para todos los escenarios, lo cual obviamente también incide en los valores de los caudales de salida de la cuenca.

Para el Escenario 5 se observa un aumento de caudal con respecto al Período Base, lo cual está asociado a que en este caso se tiene un incremento de la precipitación líquida y nival. Además, el nivel de recarga a la napa no aumenta tanto como en los Escenarios 2, 3 y 4, y por lo tanto, si bien se tienen niveles de precipitación líquida similares, para este escenario el caudal de salida es mayor.

Para el Escenario 4 no se tiene un escurrimiento mayor al del Período Base, pese a que se tiene el mayor aumento de precipitación total. Esto se debe a que dicho incremento está relacionado con un alza en la precipitación nival, mientras que la líquida sube muy

poco, lo que implica menos agua disponible para la escorrentía. Además, para este escenario se dan los mayores niveles de recarga subterránea, lo que obviamente posibilita la merma en el caudal de salida.

Para el Escenario 3 sucede algo similar al 5, pero en este caso los niveles de recarga al acuífero son mayores, por lo que el caudal de salida es menor.

Para los Escenarios 1 y 6 sucede algo muy similar al Escenario 4, obviamente que con diferentes magnitudes.

Para el Escenario 2, pese a que se tiene una precipitación líquida mucho menor que en el Escenario 1, por ejemplo, la escorrentía es mayor en el 2 que en el 1. Esto se podría explicar por un mayor nivel de derretimiento (en el Escenario 2 hay más precipitación nival), que permite alcanzar niveles de caudal algo mayores que en el Escenario 1.

Resulta interesante que para el período de deshielo, pese a que hay un aumento considerable en los niveles de recarga subterránea, el caudal de salida se mantiene relativamente estable para todos los escenarios, lo cual indica que existe un importante aporte del acuífero a la escorrentía superficial, mediante el flujo base.

Con respecto a la evaporación, de los resultados analizados se desprende que ésta no debería afectar de manera tan importante a la disminución de la escorrentía. Por el contrario, como el aumento es pequeño y se produce en el período invernal (donde los caudales son menores), el volumen evaporado no aumenta demasiado. Además, la disminución que se produce en el período de deshielo, implica menos pérdidas por evaporación en dicho período, lo que ayuda a que la merma en la escorrentía no se incremente.

De los resultados obtenidos y analizados para esta cuenca, se concluye que para los escenarios planteados, sí existen efectos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos, que son muchos más claros para el período invernal, en el que para algunos escenarios se aprecian fuertes disminuciones de caudal y de recarga con respecto al Período Base. Estos efectos no son tan marcados en el período de deshielo, en el que hay disminuciones menores e incluso aumentos de caudal para algunos escenarios y hay aumentos de recarga subterránea para todos ellos. Todo lo anterior está ligado principalmente a la variación en el tipo de precipitación, la cual se produce por la disminución de la temperatura, la que a su vez también influye en que haya más acumulación de nieve, lo que afecta a los niveles de derretimiento y consecuentemente a la escorrentía y la recarga al acuífero.

Para esta cuenca también es importante mencionar, que si bien en la etapa de calibración del modelo Sacramento, se obtuvieron resultados bastante satisfactorios (ver Capítulo 4), no se puede atribuir toda la diferencia entre los escenarios y los valores observados, a los efectos del cambio climático, sino que también existe un error asociado a la calibración del modelo. Este error puede ser especialmente importante, para caudales de alta probabilidad de excedencia (a partir de 85% aproximadamente), es decir, caudales bajos, donde la diferencia entre los valores simulados y los observados comienza a ser de magnitud similar (aunque siempre menor), a la diferencia entre los valores de los escenarios y los observados (ver Figura 6.1).

Con respecto a los resultados a nivel estacional, en la Figura 6.5 se observa que el modelo sobrestima los caudales estacionales promedio del período observado y subestima los del período de deshielo, lo que lleva a pensar que los caudales que se obtienen, para todos los escenarios, están sobrestimados a nivel invernal y subestimados a nivel de deshielo y, por lo tanto, los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de esta cuenca, podrían ser mayores de lo que se obtuvo a nivel invernal (mayor disminución o menor aumento con respecto al Período Base) y podrían ser menores a nivel de deshielo (menor disminución o mayor aumento con respecto al Período Base).

Para determinar de manera cuantitativa, cuánto de la variación de los caudales de los escenarios con respecto al Período Base, corresponde al error del modelo y cuánto al cambio climático, a continuación se muestra un cálculo bastante simple, hecho en base a los resultados estacionales de los caudales de salida. Se supuso que la diferencia porcentual que existe entre los caudales estacionales, observados y simulados para el Período Base, se mantiene para cada uno de los escenarios. Lo que en estricto rigor no es así, porque el error que puede incorporar el modelo a los resultados no es lineal, pero para tener una aproximación se calculó de esta forma. Dichos valores se muestran en la Tabla 6.1.

Tabla 6.1
Diferencia porcentual valores SIM-OBS Período Base CA-CC1-1

Período Invernal	Período Deshielo	Anual
1.24%	-0.94%	-0.18%

Según los valores de diferencia porcentual, el modelo sobrestima en 1.24% los caudales en el período invernal, por lo tanto, los caudales de los escenarios también están sobre valorados en el mismo porcentaje, lo que implicaría que para este período, en ninguno de los escenarios se sobrepase el valor observado del Período Base (28.9 [m³/s]). Esto se observa en la Tabla 6.2, en la que se muestra el valor original (segunda columna) y el “valor corregido” según el 1.24% de exceso (tercera columna).

Tabla 6.2
Valores corregidos período invernal CA-CC-1

	Q_{inv} prom orig [m³/s]	Q_{inv} prom correg [m³/s]
Escenario 1	21.3	21.0
Escenario 2	22.9	22.6
Escenario 3	29.2	28.8
Escenario 4	28.6	28.2
Escenario 5	25.3	24.9
Escenario 6	23.0	22.7

En las Tablas 6.3 y 6.4 se muestra el mismo cálculo para el período de deshielo y a nivel anual. Los valores observados del Período Base son 84.6 y 56.8 [m³/s] respectivamente. Según los valores de la Tabla 6.1, para el período de deshielo y a nivel anual, el modelo subestima los valores del período observado, y por lo tanto, para los escenarios también.

Tabla 6.3
Valores corregidos período deshielo CA-CC-1

	Q_{desh} prom orig [m³/s]	Q_{desh} prom correg [m³/s]
Escenario 1	82.9	83.7
Escenario 2	83.5	84.3
Escenario 3	85.7	86.5
Escenario 4	82.3	83.1
Escenario 5	89.0	89.8
Escenario 6	81.7	82.5

Tabla 6.4
Valores corregidos nivel anual CA-CC-1

	Q_{anual} prom orig [m³/s]	Q_{anual} prom correg [m³/s]
Escenario 1	52.1	52.2
Escenario 2	53.2	53.3
Escenario 3	57.4	57.5
Escenario 4	55.5	55.5
Escenario 5	57.1	57.2
Escenario 6	52.3	52.4

De los valores corregidos se observa que para el período de deshielo y a nivel anual, los caudales de salida se modifican, pero no hay ningún escenario en que su caudal pase de estar por debajo del valor del Período Base, a estar por encima de éste, o viceversa.

De todos los resultados mostrados en las Tablas 6.1 a 6.4, se observa que el “error del modelo”, no afecta en demasía a los valores obtenidos para los escenarios de esta cuenca. Por lo tanto, cualquier variación con respecto al Período Base, se debe principalmente a los efectos del cambio climático.

6.2.2 Cuenca Pangal-Blanco (PAN-CC1-1)

Para esta cuenca el análisis que se realiza es prácticamente igual al de CA-CC1-1, obviamente en este caso los resultados son distintos, pero la forma de abordarlos es similar. Debido a esto, para PAN-CC1-1 el detalle del análisis realizado se entrega en el Anexo E1.

Es importante mencionar que de los resultados obtenidos y analizados para esta cuenca, se concluye que para los escenarios planteados, sí existen efectos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos, que son muchos más claros para el período invernal, en el que para todos los escenarios se aprecian fuertes disminuciones de caudal y de recarga subterránea con respecto al Período Base. Estos efectos no son tan marcados en el período de deshielo, en el que hay disminuciones menores e incluso aumentos de caudal para algunos escenarios y hay aumentos de recarga para todos ellos. Todo lo anterior está ligado principalmente a la variación en el tipo de precipitación, la cual se produce por la disminución de la temperatura, la que a su vez también influye en que haya más acumulación de nieve, lo que afecta a los niveles de derretimiento y consecuentemente a la escorrentía y la recarga al acuífero.

Por otro lado, también es importante recalcar que, si bien en la etapa de calibración del modelo Sacramento se obtuvieron resultados bastante satisfactorios (coeficiente NS = 0.82 a nivel mensual, ver Capítulo 4), no se puede atribuir toda la diferencia entre caudales de los escenarios y los valores observados, a los efectos del cambio climático, sino que también existe un error asociado a la calibración del modelo. Este error puede ser especialmente importante para caudales de alta probabilidad de excedencia (a partir de 90% aproximadamente), es decir, caudales bajos, donde dicho error (diferencia entre los valores simulados y observados en el Período Base) comienza a ser de magnitud similar (aunque siempre menor) a la diferencia entre los valores simulados para los escenarios y los observados en el Período Base (diferencia atribuida a los efectos del cambio climático).

Al igual que para CA-CC1-1, se analizó cuánto de la variación de los caudales de los escenarios con respecto al Período Base, corresponde a la incertidumbre del modelo y cuánto al cambio climático; el error porcentual de la simulación del Período Base se muestra en la Tabla 6.5. De los resultados obtenidos, que se indican en la Tabla 6.6, se aprecia que en el período de deshielo los caudales se acercan a los del Período Base (25.8 [m³/s]), mientras que en el período invernal estos siguen siendo cerca del 50% del valor del Período Base (9 [m³/s]), con lo que se mantienen caudales medios anuales menores a los de dicho período (17.4 [m³/s]).

Tabla 6.5
Diferencia porcentual valores SIM-OBS Período Base PAN-CC1-1

Período Invernal	Período Deshielo	Anual
-22.31%	-0.88%	-6.34%

Tabla 6.6
Valores corregidos período invernal, deshielo y anual PAN-CC-1

	Q _{inv} prom orig [m ³ /s]	Q _{inv} prom corr [m ³ /s]	Q _{desh} prom orig [m ³ /s]	Q _{desh} prom corr [m ³ /s]	Q _{anual} prom orig [m ³ /s]	Q _{anual} prom corr [m ³ /s]
Escenario 1	3.2	3.9	21.3	21.5	12.3	13.0
Escenario 2	3.6	4.4	25.3	25.6	14.5	15.4
Escenario 3	3.8	4.6	24.6	24.8	14.2	15.1
Escenario 4	3.9	4.8	26.1	26.3	15.0	16.0
Escenario 5	3.8	4.6	25.0	25.2	14.4	15.3
Escenario 6	3.5	4.3	24.4	24.6	14.0	14.8

6.2.3 Comparación de los Efectos del Cambio Climático en las dos cuencas en estudio

Si bien para los dos casos de estudio, analizados en los acápite 6.2.1 y 6.2.2, se comprobó de manera clara que existen efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos, que van más allá de un error asociado a la calibración del modelo Sacramento, también es interesante establecer de manera más cuantitativa las variaciones de los caudales de salida, y los cambios asociados de las variables estudiadas en los puntos anteriores de este capítulo. De esta manera, se pueden comparar los efectos de cambio climático en los recursos superficiales y subterráneos de las dos cuencas en estudio.

Lo primero es analizar los porcentajes de variación de los caudales de salida de los escenarios con respecto al Período Base. Para ello en las Figuras 6.13 y 6.14 se muestran, para las dos cuencas, el porcentaje de variación (positivo si hay aumento, negativo si hay disminución) de los caudales obtenidos para los escenarios con respecto a los del Período Base, todo esto a nivel estacional.

Como se observa en las dos figuras recién mencionadas, para el período invernal claramente la cuenca más afectada es PAN-CC1-1 (pensando que a mayor disminución hay mayor afección), ya que para todos los escenarios se tienen porcentajes de disminución mucho mayores a CA-CC1-1 (con respecto a los valores observados, Figura 6.13, la mayor disminución para PAN-CC1-1 es de más de 60%, versus una disminución máxima en torno a 20% para CA-CC1-1).

Es importante notar la gran diferencia que existe entre dichos porcentajes para PAN-CC1-1, si se calculan con respecto a los valores observados o los simulados. Como se explica en el Anexo E1, esto se debe a que el modelo subestima los valores observados, lo que implica que los valores de los escenarios también están subvalorados, y por lo tanto, la diferencia de éstos con respecto a los valores observados, es mayor que con respecto a los simulados.

Figura 6.13
Variación Porcentual de Caudales escenarios con respecto a Período Base (OBS)

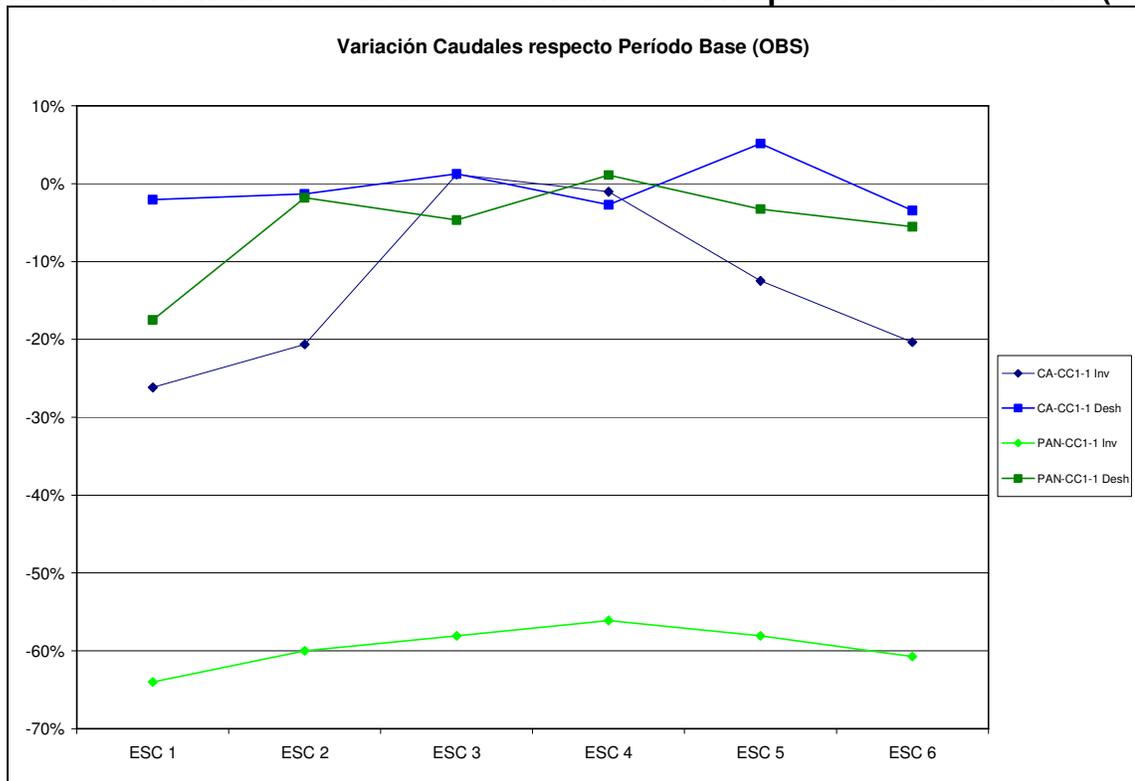
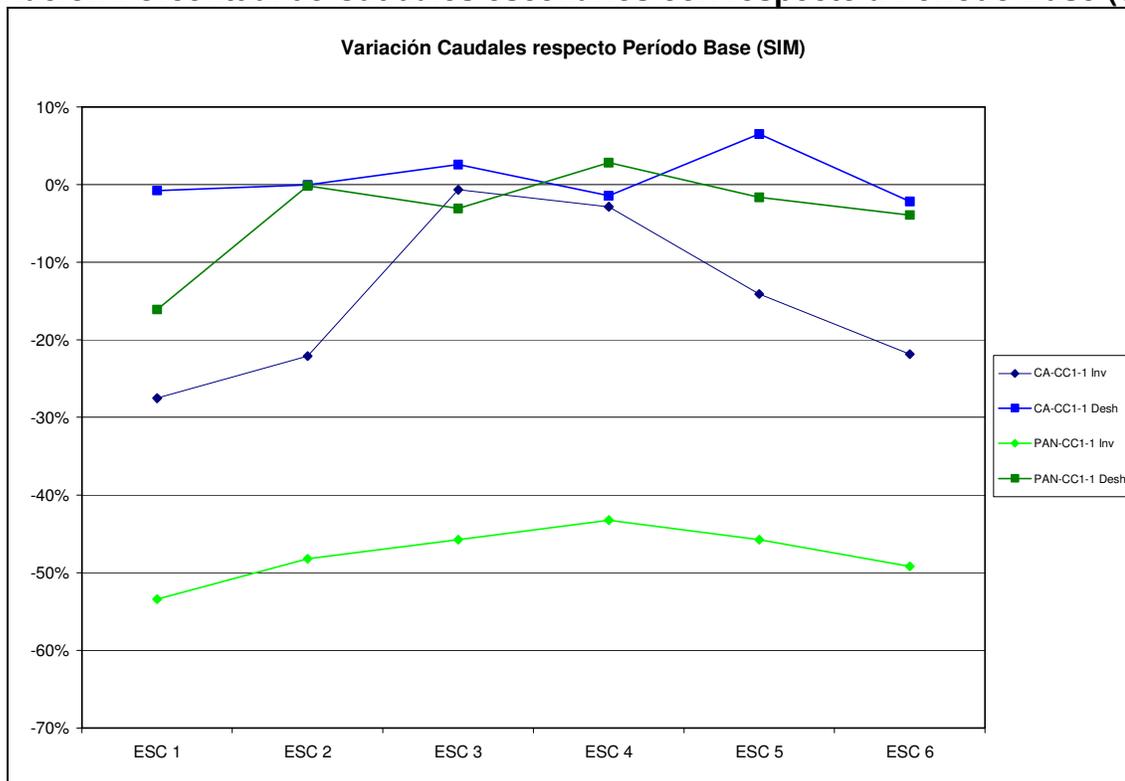


Figura 6.14
Variación Porcentual de Caudales escenarios con respecto a Período Base (SIM)



Para el período de deshielo, ambas cuencas tienen porcentajes no tan altos de disminución (excepto el Escenario 1 de PAN-CC1-1). La cuenca menos afectada es CA-CC1-1, ya que en todos los escenarios, excepto el 4, sus niveles de disminución son menores que en la otra cuenca.

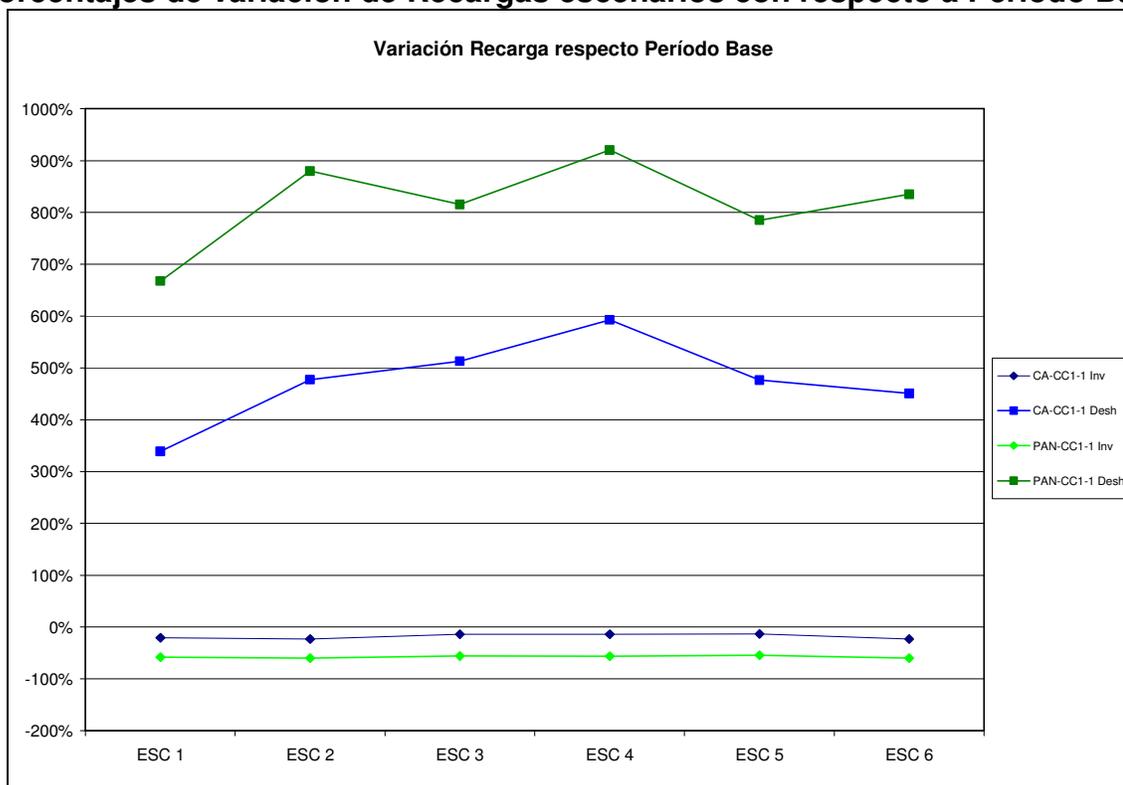
Por lo tanto, para ambos períodos se concluye que, en términos generales, la cuenca más afectada, es decir, que experimenta las mayores disminuciones de caudal de salida por efectos del cambio climático, es PAN-CC1-1 (a excepción del Escenario 4 del período de deshielo).

En la Figura 6.15 se muestran los porcentajes de variación de las recargas subterráneas, para cada uno de los escenarios con respecto al Período Base (también a nivel estacional).

Para PAN-CC1-1 en el período invernal, se tiene una fuerte reducción de la recarga al acuífero para todos los escenarios, en cambio para el período de deshielo se registran los mayores incrementos (de las dos cuencas), alcanzando un valor máximo de 929% para el Escenario 4.

Para CA-CC1-1 en el período invernal, se tienen las menores reducciones de la recarga al acuífero de las dos cuencas, alcanzando para todos los escenarios valores en torno al 20%. Para el período de deshielo, se tienen los segundos mayores aumentos, alcanzando un valor máximo de aproximadamente 600% para el Escenario 4.

Figura 6.15
Porcentajes de variación de Recargas escenarios con respecto a Período Base



Si para las recargas se puede establecer un ordenamiento, de mayor a menor afección (mayor a menor disminución de los valores de recarga subterránea), éste es igual que para el caso de los caudales, ya que PAN-CC1-1, pese a tener los mayores valores de aumento en el período de deshielo, tiene una fuerte reducción en el período invernal. La cuenca CA-CC1-1 sería la menos afectada, ya que en el período invernal tiene valores relativamente bajos de reducción, en comparación a la otra cuenca, y en el período de deshielo registra un importante aumento con respecto al Período Base.

Habiendo establecido de manera cuantitativa cual es la cuenca que se ve más afectada en la escorrentía superficial de salida y en la recarga al acuífero (recarga subterránea, según lo expuesto en el Capítulo 4), por los efectos del cambio climático, resulta interesante determinar, tal como se dijo en los puntos anteriores, la razón de las diferencias tan marcadas en las dos cuencas (para caudal de salida y recarga subterránea), si en términos generales se observa que, al menos las tendencias de variación de las variables meteorológicas son similares. Para ello, en las Figuras 6.16 a 6.21 se muestran los porcentajes de variación de la precipitación total, líquida y nival, también de temperatura, evaporación y acumulación nival; todo esto a nivel estacional.

En las Figuras 6.14 y 6.17 se verifica que el ordenamiento de los caudales, en cuanto a los aumentos y disminuciones, está directamente ligado con el de la precipitación líquida. En términos generales (considerando todos los escenarios) la mayor disminución se da para PAN-CC1-1 invernal, lo que coincide con la mayor disminución de caudales de salida. Luego sigue CA-CC1-1 invernal, PAN-CC1-1 deshielo y CA-CC1-1 deshielo, todos los cuales también coinciden con el ordenamiento de caudales.

Todo esto indica que la variable de mayor influencia, en los aumentos o disminuciones de caudales, corresponde a la precipitación líquida. Para el resto de las variables, obviamente todas influyen en las variaciones de caudal, pero no se observa ninguna relación tan directa como con la precipitación líquida.

Para el caso de la recarga subterránea, se observa que no tiene una relación directamente proporcional con alguna de las variables estudiadas, sin embargo, se comprueba que está fuertemente influenciada por la precipitación líquida, nival y por la temperatura. De todas maneras establecer relaciones de estas tres variables con la recarga, en cuanto a si un aumento o disminución porcentual implica lo mismo en la recarga (del mismo modo que se hizo para el caudal y precipitación líquida), resulta complicado, porque la relación no es directa, y por lo tanto, puede ser afectada por algunas otras variables no consideradas en este caso.

Con respecto a la acumulación nival, se observa que está fuertemente influenciada por la precipitación nival y la temperatura. El mayor aumento porcentual (en términos generales) se observa en PAN-CC1-1 deshielo, lo que coincide con lo que sucede en la acumulación nival. Luego, PAN-CC1-1 invernal ocupa el segundo lugar, pese a que su aumento porcentual de la precipitación nival ocupa el tercer puesto; esto se explica por la menor disminución porcentual de la temperatura que se tiene en este caso, con respecto a CA-CC1-1 deshielo, que ocupa el tercer lugar de aumento en la acumulación y el segundo lugar en el alza de precipitación nival. Por último, para CA-CC1-1 invernal se tiene el menor aumento de acumulación, lo que coincide con la precipitación nival y la mayor disminución de temperatura.

Figura 6.16
Porcentajes de variación de Precipitación Total escenarios con respecto a
Período Base

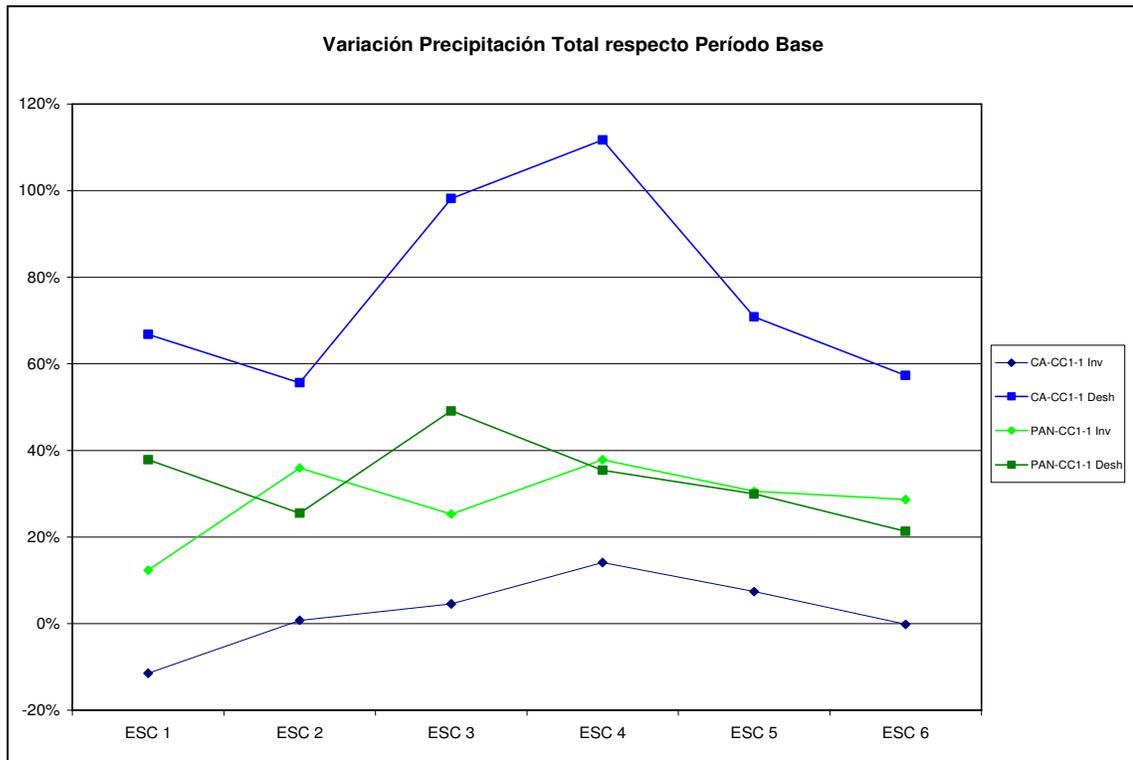


Figura 6.17
Porcentajes de variación de Pp Líquida escenarios con respecto a Período Base

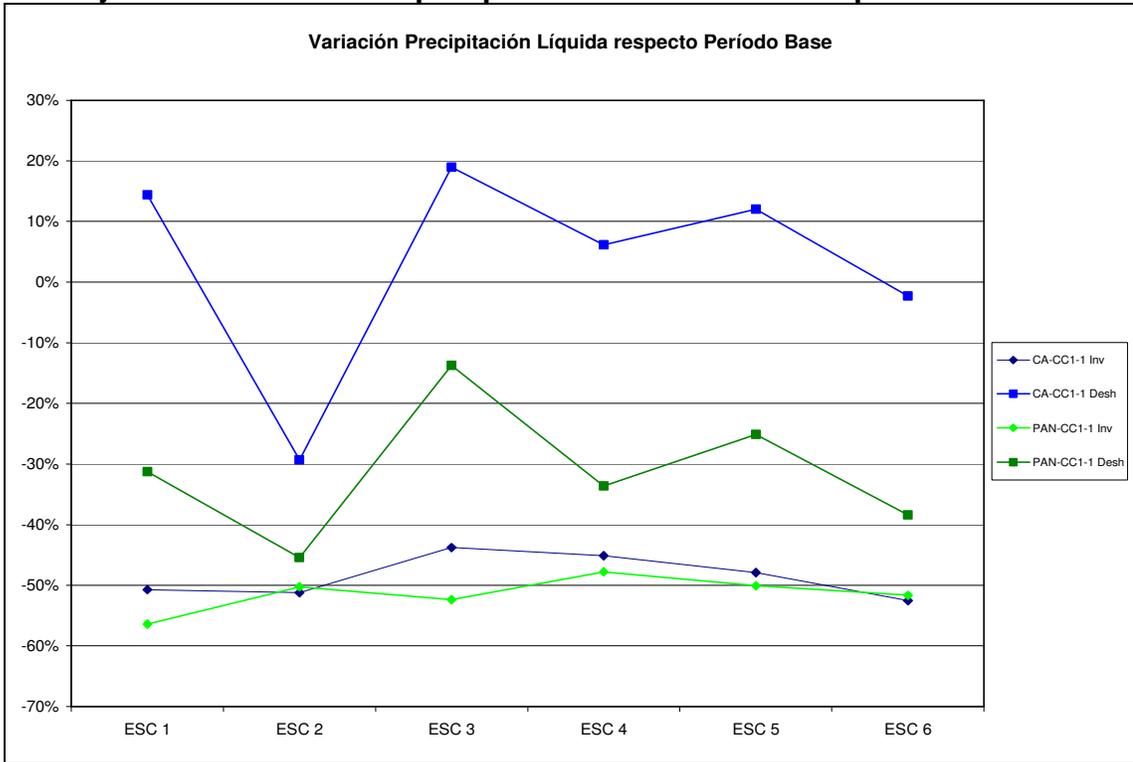


Figura 6.18
Porcentajes de variación de Pp Nival escenarios con respecto a Período Base

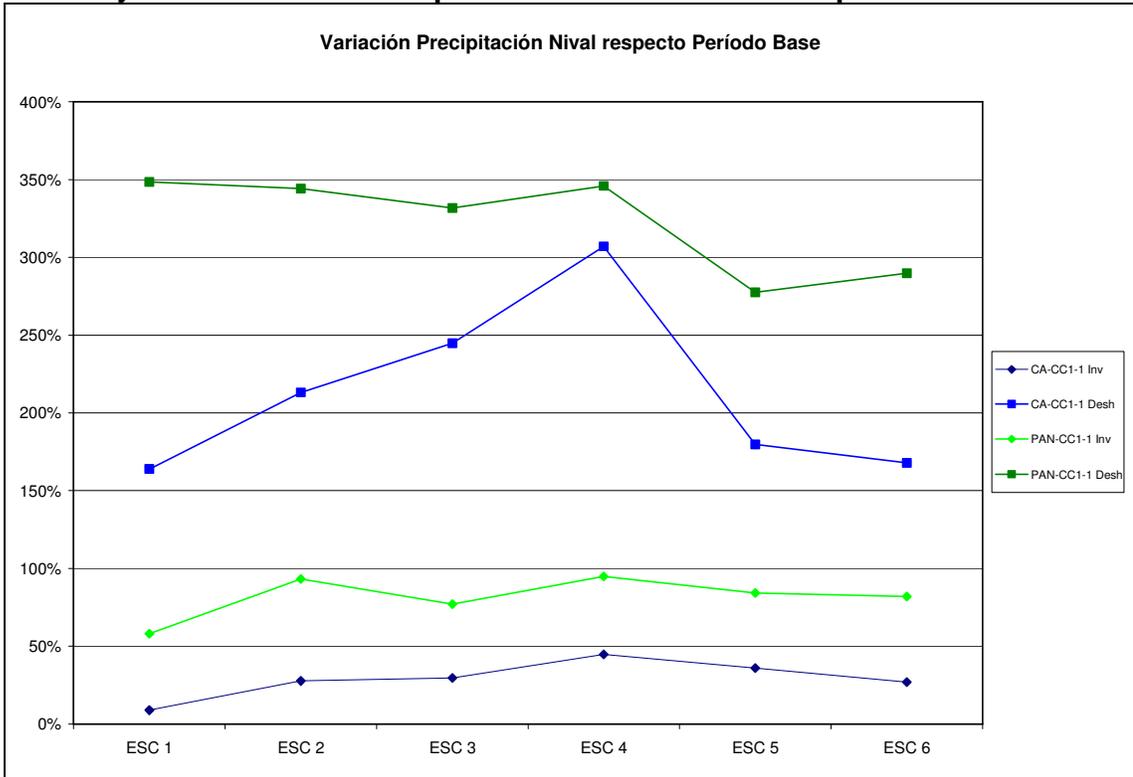


Figura 6.19
Porcentajes de variación de Temperatura escenarios con respecto a Período Base

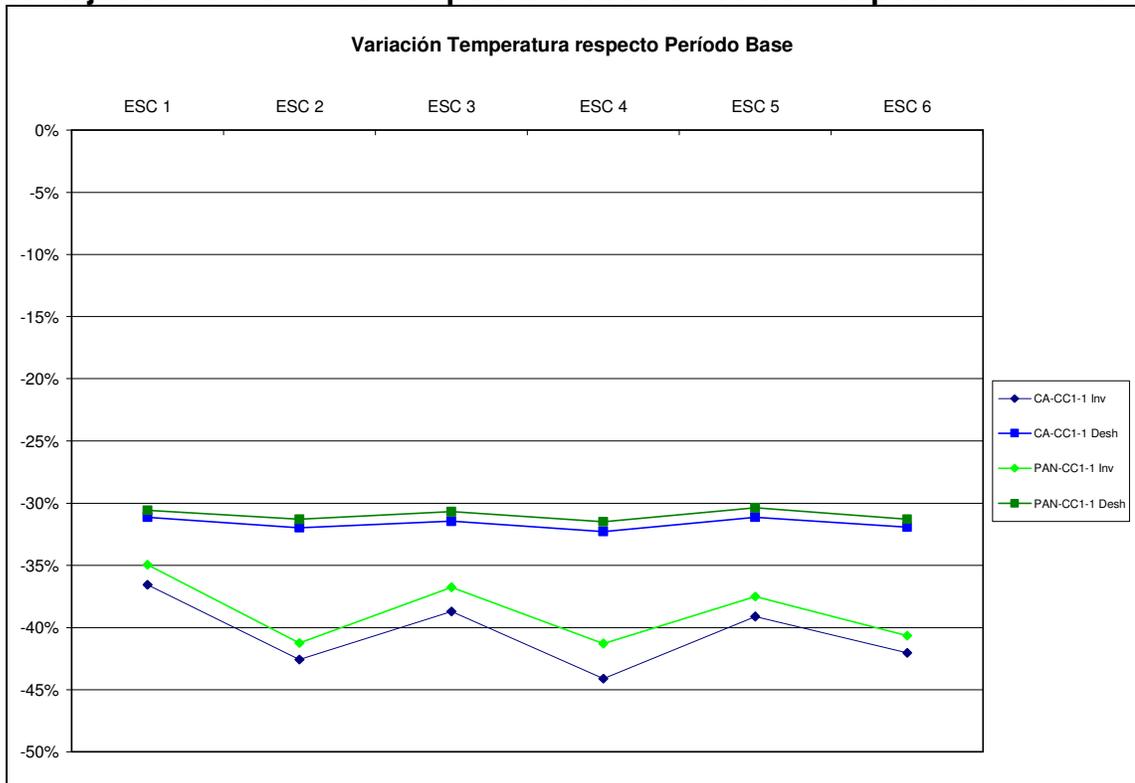


Figura 6.20
Porcentajes de variación de Evaporación escenarios con respecto a Período Base

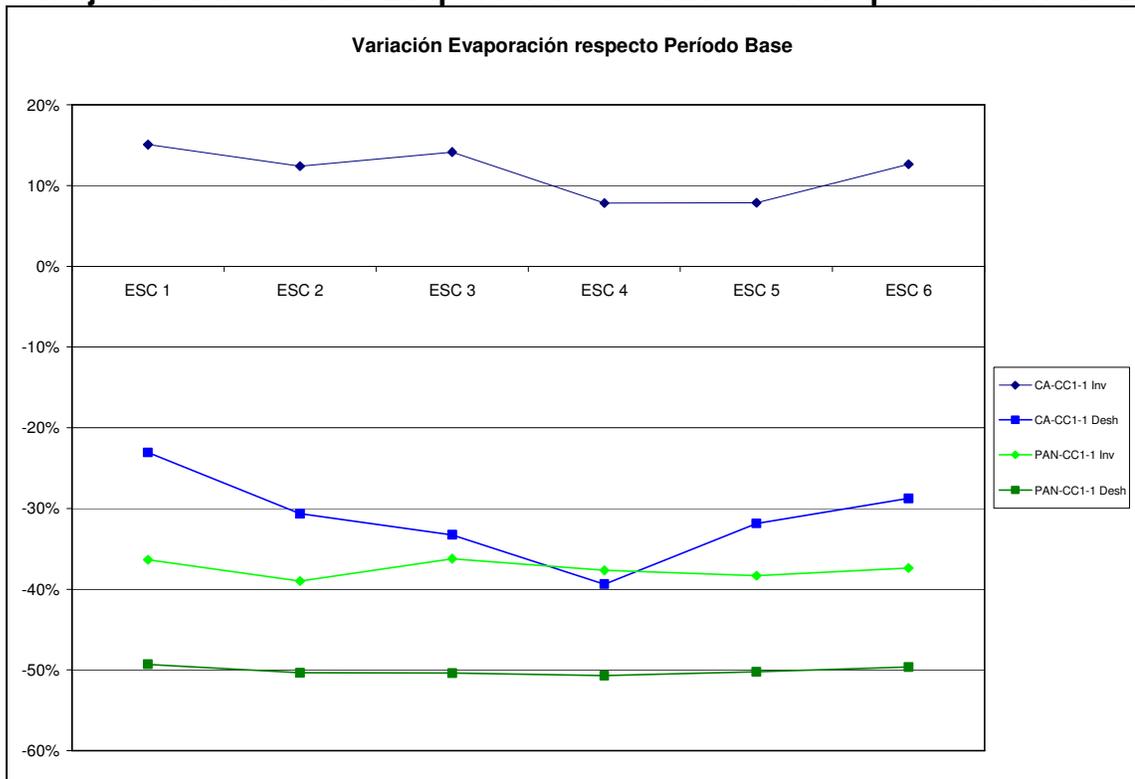
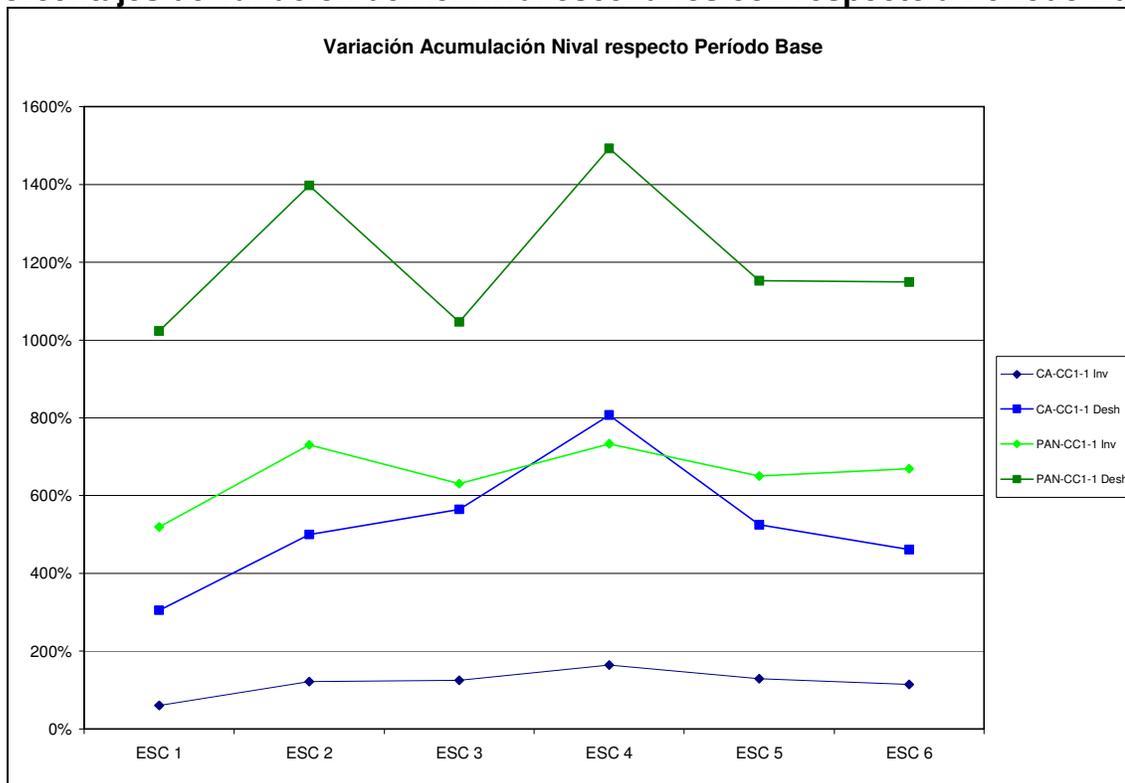


Figura 6.21
Porcentajes de variación de Ac. Nival escenarios con respecto a Período Base



En relación a las variables meteorológicas, es importante notar que, para todos los escenarios existen modificaciones con respecto a lo observado en el Período Base. La temperatura disminuye más en el período invernal, la precipitación nival aumenta más en el período de deshielo, la precipitación líquida disminuye más en el período invernal, y por último, la evaporación disminuye en ambos períodos para PAN-CC1-1 y CA-CC1-1 deshielo, y aumenta para CA-CC1-1 invernal.

Con respecto a la temperatura y la evaporación, resulta interesante notar que pese a que los Escenarios 1, 3 y 5 y los Escenarios 2, 4 y 6, corresponden a la misma serie de temperaturas promedio en la estación base (Convento Viejo), en las Figuras 6.19 y 6.20 se observa que los porcentajes de variación no son iguales para cada grupo de escenarios, lo cual puede estar asociado al efecto que producen los gradientes aleatorios, con los que se modifican los valores base de dichas variables meteorológicas.

En la Tabla 6.7, se hace una comparación a nivel anual de los porcentajes de aumento o disminución de cada uno de los escenarios con respecto al Período Base. En dicha tabla se destacan, para cada ítem y para cada cuenca, en color rojo el escenario que tiene mayor disminución o menor aumento, y en color verde el escenario que tiene menor disminución o mayor aumento. Si se establece un ordenamiento de todos los escenarios, de más a menos favorable, éste sería el siguiente: Escenario 4, Escenario 3, Escenario 5, Escenario 6, Escenario 2 y Escenario 1. Estos resultados coinciden plenamente (con mínimas diferencias) con el análisis hecho en el acápite 5.3.6.4, en

cuanto a los escenarios que deberían ser más o menos favorables, desde el punto de vista de su influencia en los recursos hídricos.

Todo esto confirma lo expresado en los acápites 6.2.1 y 6.2.2, en cuanto a que para estas cuencas, existe una fuerte modificación asociada a los distintos escenarios de cambio climático, lo que se refiere principalmente a disminución de temperatura, reducción de la precipitación líquida (excepto CA-CC1-1 deshielo en que sólo para los Escenarios 2 y 6 hay disminución) y aumento de la precipitación nival. Todo lo cual repercute en el caudal de salida y la recarga subterránea de ambas cuencas, mayormente en PAN-CC1-1.

Tabla 6.7
Comparación a nivel anual de los efectos de cada escenario c/r a Período Base

Item	Cuenca	ESC 1	ESC 2	ESC 3	ESC 4	ESC 5	ESC 6
Caudal de Salida	CA-CC1-1	-8.20%	-6.25%	1.22%	-2.30%	0.65%	-7.76%
	PAN-CC1-1	-29.47%	-16.80%	-18.43%	-13.63%	-17.38%	-19.74%
Recarga Subterránea	CA-CC1-1	2.62%	9.12%	20.36%	25.52%	18.52%	7.87%
	PAN-CC1-1	2.83%	19.30%	17.34%	25.83%	16.18%	15.42%
Precipitación Total	CA-CC1-1	-4.79%	5.43%	12.54%	22.43%	12.78%	4.74%
	PAN-CC1-1	16.23%	34.37%	28.95%	37.48%	30.47%	27.53%
Precipitación Líquida	CA-CC1-1	-40.90%	-47.90%	-34.33%	-37.40%	-38.87%	-44.96%
	PAN-CC1-1	-49.65%	-48.93%	-41.97%	-43.96%	-43.37%	-48.08%
Precipitación Nival	CA-CC1-1	16.13%	36.33%	39.69%	57.09%	42.71%	33.53%
	PAN-CC1-1	73.06%	106.24%	90.14%	107.73%	94.19%	92.77%
Temperatura	CA-CC1-1	-32.50%	-34.65%	-33.28%	-35.27%	-33.15%	-34.47%
	PAN-CC1-1	-31.67%	-33.80%	-32.20%	-33.95%	-32.17%	-33.64%
Evaporación	CA-CC1-1	-18.30%	-25.26%	-27.33%	-33.48%	-26.89%	-23.56%
	PAN-CC1-1	-47.71%	-48.97%	-48.65%	-49.11%	-48.77%	-48.15%
Acumulación Nival	CA-CC1-1	67.09%	107.95%	121.26%	167.00%	125.95%	107.06%
	PAN-CC1-1	316.96%	410.75%	365.12%	442.36%	383.77%	386.54%

6.3 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS USOS SUPERFICIALES DEL RECURSO HÍDRICO

En esta sección se analizan los efectos del cambio climático, en los principales usos del recurso hídrico de la cuenca del río Cachapoal. Dichos usos son: riego agrícola, agua potable, minería (El Teniente) y centrales hidroeléctricas (Sauzal y Sauzalito).

6.3.1 Riego Agrícola

Como en cada módulo del Modelo Integrado existen muchas zonas de riego, en esta sección se analizan para cada uno de estos módulos, dos de estas zonas, una representativa de la parte alta y otra de la parte baja.

Para cada zona escogida se muestra un gráfico de satisfacción porcentual promedio de la demanda. Estas curvas fueron generadas de manera similar a una curva de variación estacional, es decir, tanto para el Período Base como para los escenarios, se calculó el valor promedio de los resultados mensuales entregados por el Modelo Integrado (por

ejemplo, se promediaron todos los resultados para Abril, luego para Mayo, etc., de los 6 años del Período Base, y los 30 años de los escenarios).

Además, a modo de resultado global, para cada módulo se presenta la misma curva de satisfacción promedio de la demanda, pero en este caso considerando un promedio ponderado de todas las zonas de riego de dicho módulo, de acuerdo a la demanda nominal que presenten. Esto permite que el valor medio obtenido, esté ponderado según la importancia que tiene cada zona, de acuerdo a la magnitud de sus requerimientos de riego.

Es importante mencionar que los porcentajes de satisfacción de riego, incluyen el aporte de los recursos superficiales y subterráneos (aunque estos últimos no son muy importantes).

En el Anexo E2, se presentan tablas con los porcentajes de satisfacción de la demanda, para todas las zonas de riego de cada módulo y para todos los escenarios.

Como todos los resultados que se muestran en el presente acápite son a nivel promedio, el análisis asociado estará supeditado a esto.

Considerando que el análisis de los resultados para todos los módulos es bastante similar, a continuación se muestran sólo los valores de satisfacción para los módulos Estero Zamorano y Cachapoal Bajo, que representan el caso de mayor y menor reducción de la demanda satisfecha respectivamente. Para el resto de los módulos, el detalle de los resultados se muestra en el Anexo E2.

6.3.1.1 Módulo Cachapoal Alto (CA)

Para este módulo se verifica que el cambio climático afecta la capacidad del sistema de abastecer la demanda (a nivel promedio), al menos como se satisfacía en el Período Base, lo cual obviamente tiene relación con la disponibilidad del recurso, que claramente se ve disminuida. Para más detalles ver Anexo E2.

6.3.1.2 Módulo Estero La Cadena (ELC)

En este módulo, sus zonas de riego no son muy afectadas por el cambio climático (a nivel promedio), sólo se observan modificaciones con respecto al Período Base en dos de los escenarios. En todo caso, en los meses de Diciembre y Enero, cualquier disminución con respecto al período inicial tiene importancia, ya que en éste no se cumplía la demanda nominal, por lo que cualquier baja por sobre ese incumplimiento resulta importante. Esto último es lo que observa en los Escenarios 1 y 6. Para más detalles ver Anexo E2.

6.3.1.3 Módulo Claro de Rengo (CR)

En este módulo, en el período de deshielo no se satisface la totalidad de la demanda para el caso base, por lo que cualquier disminución sobre esto resulta importante, ya que inicialmente se tenía un déficit. Por lo tanto, se concluye que el cambio climático afecta de manera importante, la capacidad del sistema de abastecer la demanda (a

nivel promedio) con respecto al Período Base (para el Escenario 1 el efecto es algo mayor). Esto implica que existe una disminución en la disponibilidad del recurso hídrico, pero que no afecta de manera crítica al sistema de riego de este módulo. Para más detalles ver Anexo E2.

6.3.1.4 Módulo Estero Zamorano (EZ)

En las Figuras 6.22 y 6.23, se muestran los resultados de la zona de riego EZ-Z1, que se ubica en la parte alta del Estero Zamorano, y la zona de riego EZ-Z5 que se ubica en la parte baja.

En la Figura 6.22 se observa que para la zona EZ-Z1, tanto en el Período Base como en los escenarios, la satisfacción de la demanda no alcanza el 100% para el período de deshielo, lo cual se debe a que en este período, aumenta considerablemente la demanda de los cultivos con respecto al período invernal.

También se observa que para todos los escenarios, el nivel de satisfacción es menor que en el Período Base, siendo más marcada esta diferencia para el Escenario 1. Para éste, el menor valor es de 45% en Diciembre, y para el mismo mes el Período Base tiene un valor de 69%.

En este sector de riego los efectos del cambio climático, a nivel promedio, son de alta importancia (excepto para Escenario 1), afectando sobre todo en los meses del período de deshielo, en los que se tienen mayores requerimientos de agua por parte de los cultivos. Probablemente las diferencias porcentuales con respecto al Período Base, no sean mucho mayores que en los otros sectores estudiados, sin embargo, en este caso cualquier disminución es importante, ya que en el Período Base el sistema ya no era capaz de cumplir con la demanda nominal (con porcentajes bastante bajos), por lo tanto cualquier reducción relativa a dicho período es significativa.

En la Figura 6.23 se observa que para la zona EZ-Z5, sólo en el Escenario 6 se registra una leve disminución, con respecto a los porcentajes de satisfacción del Período Base, incluso para algunos escenarios se supera, en los meses de Diciembre y Enero, los valores de dicho período. Para el resto de los meses los porcentajes son iguales para el Período Base y los escenarios. Observándose incumplimiento de la demanda nominal para el período Diciembre-Febrero, alcanzando los menores valores en el primer mes, con aproximadamente un 85%.

Los efectos del cambio climático en este sector, a nivel promedio, son poco importantes, afectando en sólo uno de los escenarios, para algunos meses del período de deshielo; y aunque la satisfacción de la demanda en el Período Base no sea 100% para dichos meses, que para el Escenario 6 hayan porcentajes de satisfacción menores, no es tan relevante, porque son valores muy cercanos a los del Período Base y además son porcentajes altos.

En la Figura 6.24 se observa que la forma en que se satisface la demanda para el módulo es bastante similar a la zona EZ-Z1, aunque los porcentajes a nivel de módulo son considerablemente mayores. Por lo mismo ya explicado para dicha zona, para este módulo, los efectos del cambio climático son de alta importancia.

Figura 6.22
Porcentajes de satisfacción promedio demanda de riego EZ-Z1

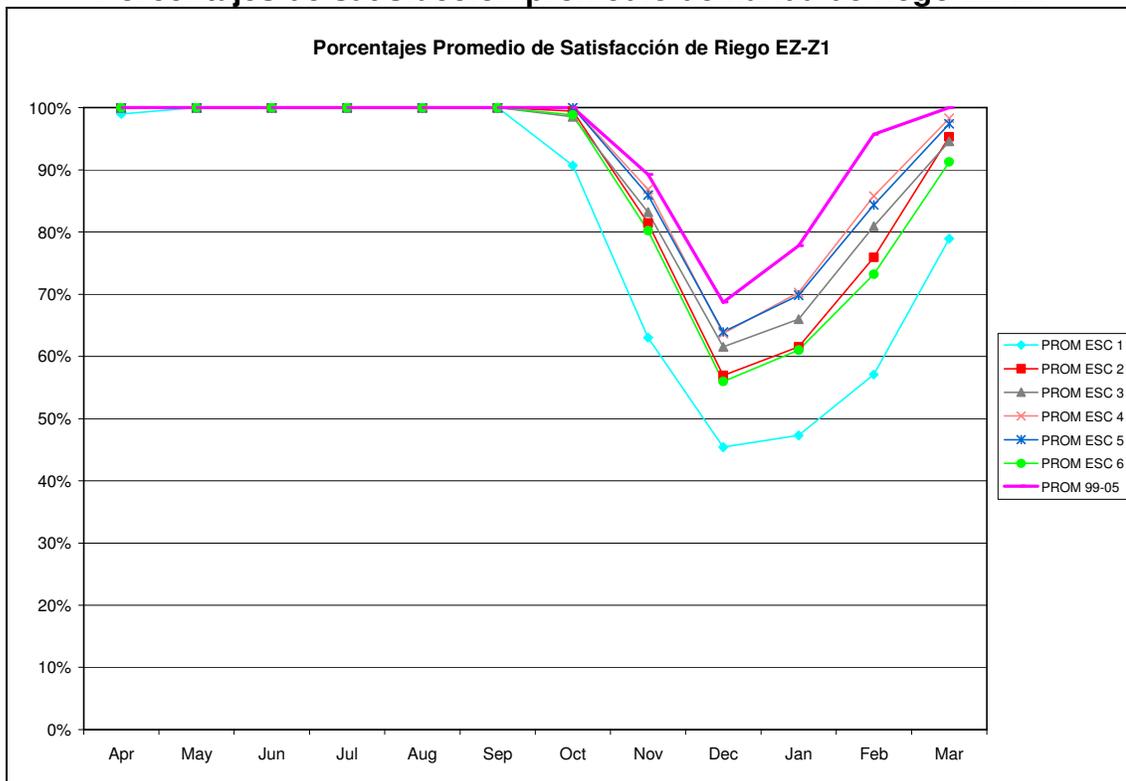


Figura 6.23
Porcentajes de satisfacción promedio demanda de riego EZ-Z5

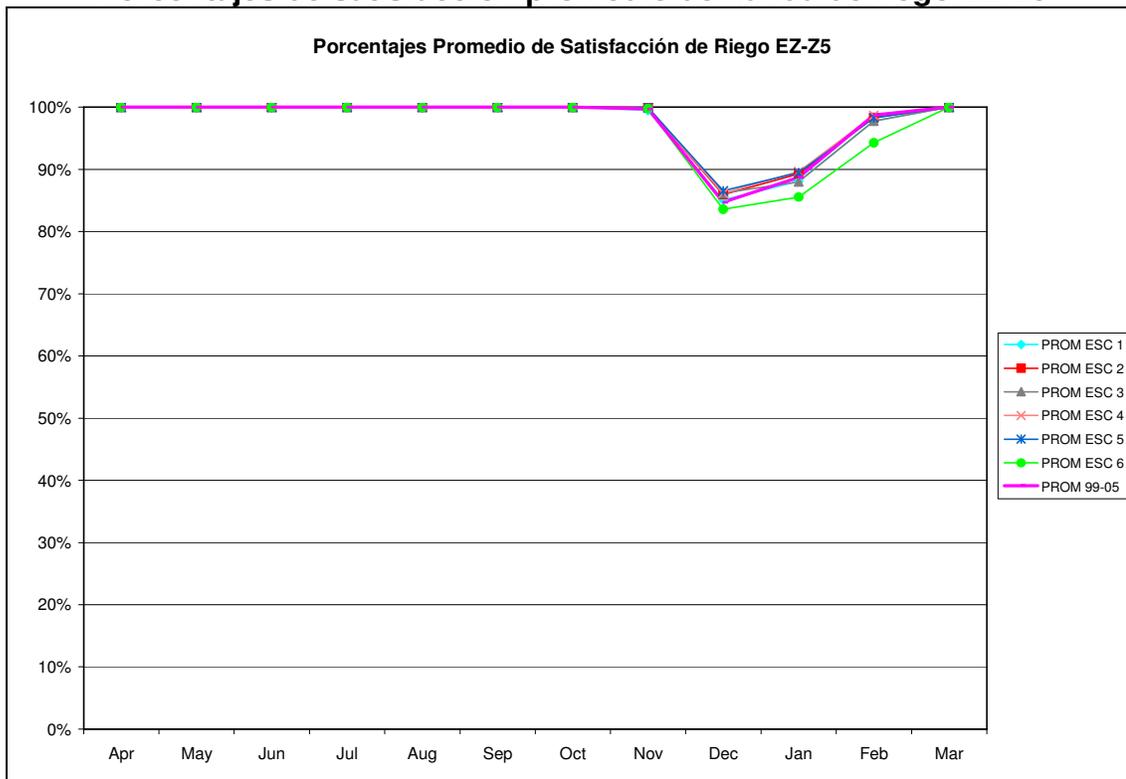
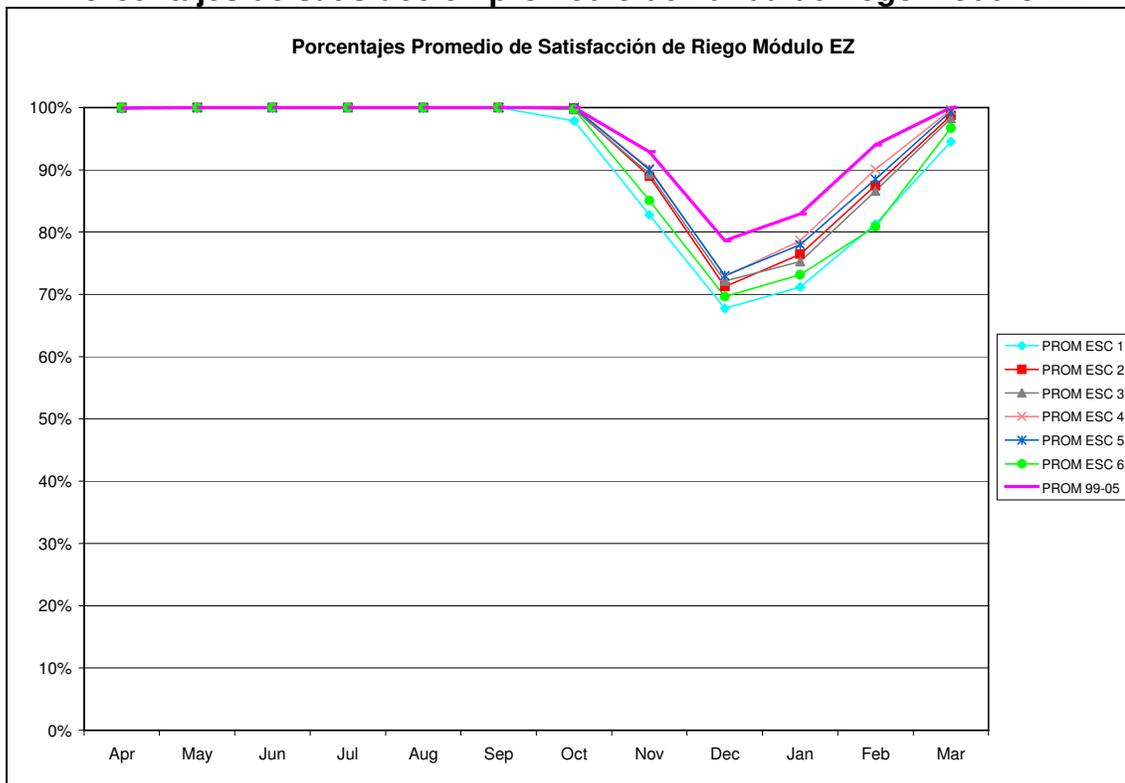


Figura 6.24
Porcentajes de satisfacción promedio demanda de riego Módulo EZ



6.3.1.5 Módulo Cachapoal Bajo (CB)

En las Figuras 6.25 y 6.26, se muestran los resultados de la zona de riego CB-CI2-1, que se ubica en la parte alta del Cachapoal Bajo, y la zona de riego CB-CI7-1 que se ubica en la parte baja.

En la Figura 6.25 se observa que para la zona CB-CI2-1, los porcentajes son prácticamente iguales para todos los escenarios y el Período Base. La satisfacción de la demanda, en todos los casos no alcanza el 100% para el período de deshielo, lo cual se debe a que en este período, aumenta considerablemente la demanda de los cultivos con respecto al período invernal.

Para este sector, al menos a nivel promedio, no se aprecian efectos notorios del cambio climático. Ya que el comportamiento de los escenarios es igual al del Período Base.

En la Figura 6.26 se observa que para la zona CB-CI7-1, tanto en el Período Base como en los escenarios, se tiene un 100% de satisfacción de la demanda para todos los meses.

Claramente para este sector no se observan efectos del cambio climático, ya que al menos a nivel promedio el comportamiento de los escenarios es igual al del Período Base.

Figura 6.25
Porcentajes de satisfacción promedio demanda de riego CB-CI2-1

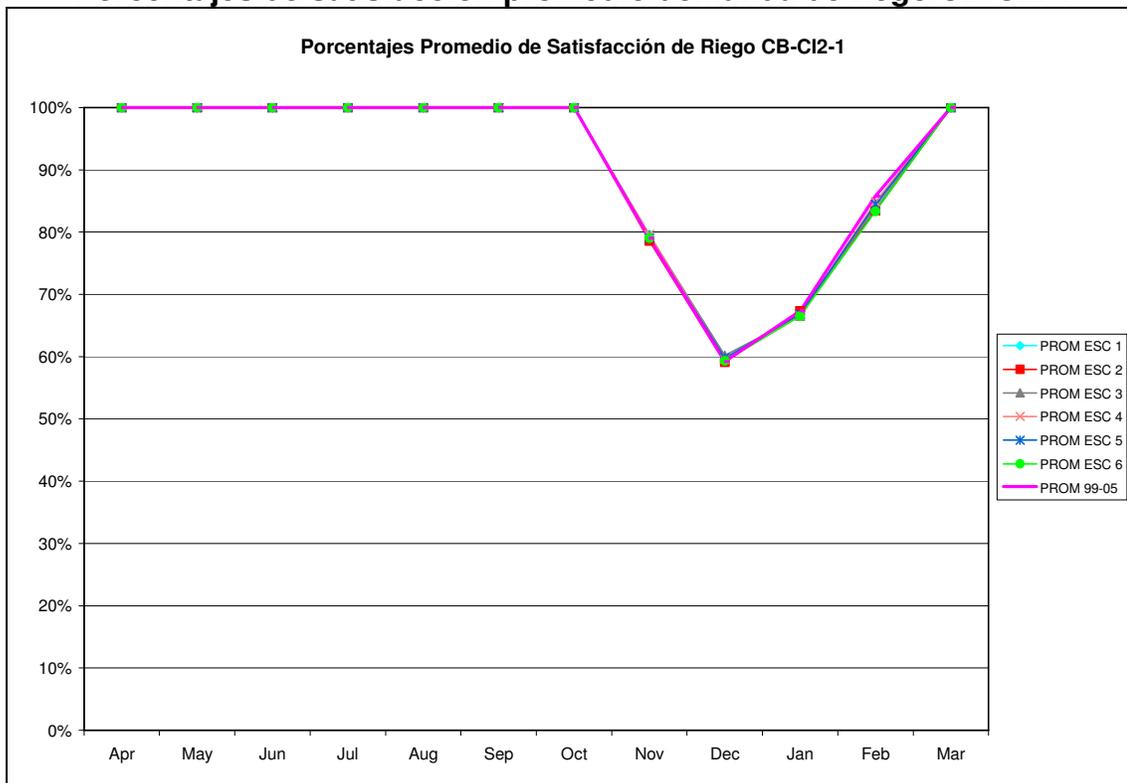
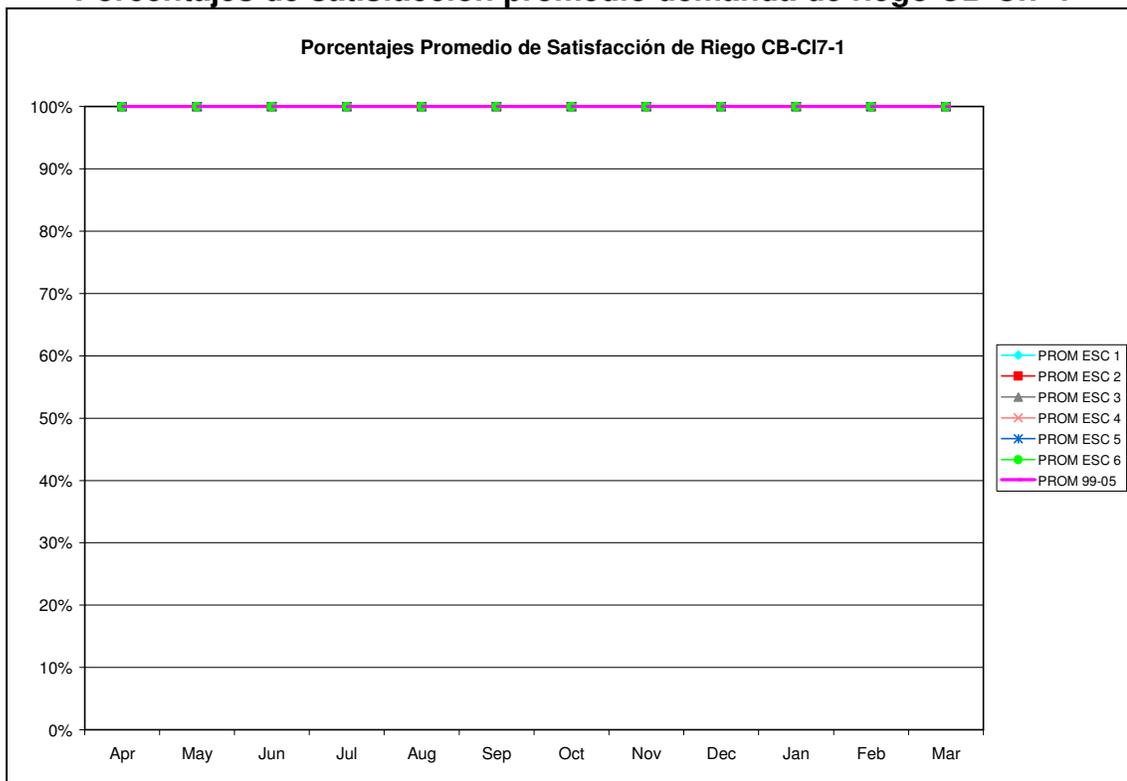


Figura 6.26
Porcentajes de satisfacción promedio demanda de riego CB-CI7-1



En la Figura 6.27 se observa que para el período invernal las zonas de riego de este módulo tienen un comportamiento muy similar al Período Base. En particular se observa que el Escenario 1, es el único que tiene un valor algo menor para Abril.

Figura 6.27
Porcentajes de satisfacción promedio demanda de riego Módulo CB



En el período de deshielo se observa que para todos los escenarios, se tiene un porcentaje de satisfacción de la demanda que está por sobre los valores del Período Base, alcanzando porcentajes cercanos al 100%.

Es importante mencionar que los niveles de satisfacción para todo el módulo, en el período de deshielo, son bastante distintos a lo visto en CB-CI2-1 y muy similares en CB-CI7-1, esto se debe al efecto de sectores con valores más altos de demanda cubierta (y mayor peso porcentual con respecto a la demanda promedio del módulo), como CB-CI7-1.

En este módulo, claramente los efectos del cambio climático sobre la satisfacción de la demanda de riego, son positivos, ya que para el período de deshielo, en todos los escenarios se tienen porcentajes de satisfacción mayores que en el Período Base.

6.3.2 Agua Potable

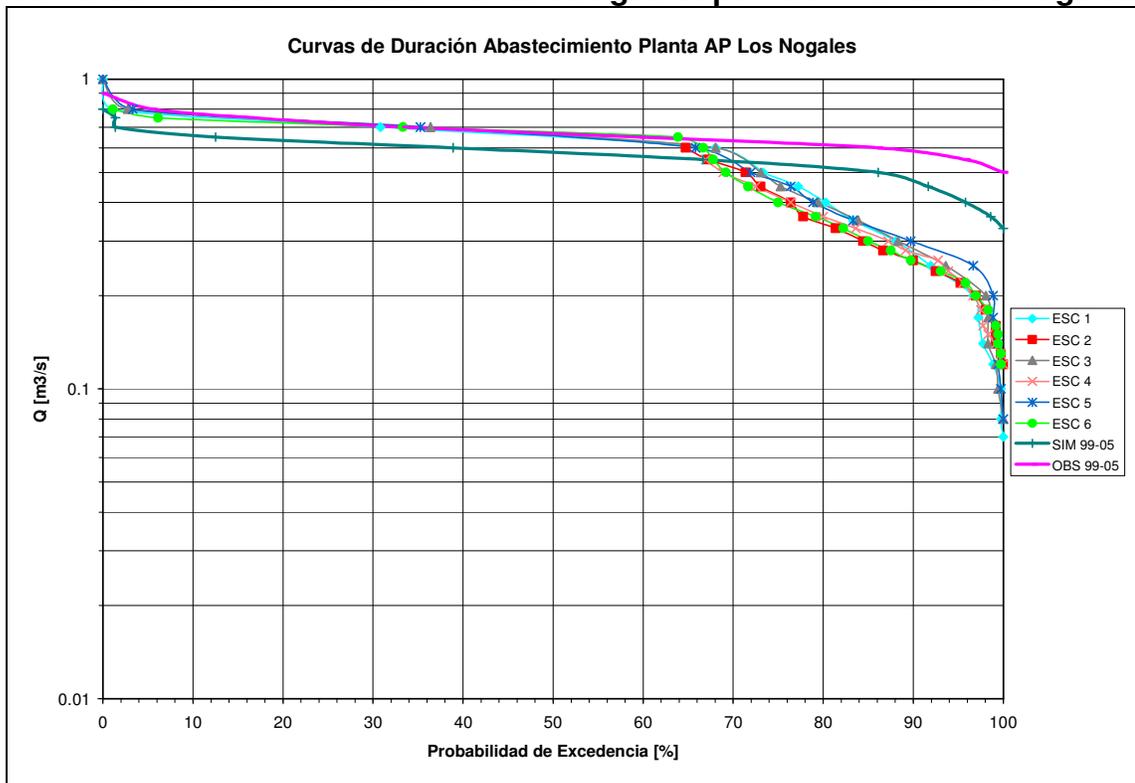
Como ya fue explicado en el Capítulo 4, en la cuenca del río Cachapoal, la mayor parte de las plantas de agua potable, extraen sus recursos a través de pozos de agua subterránea. De las 2 plantas que extraen a nivel superficial (que fueron consideradas

en el modelo, ver Capítulo 4), en este acápite se estudian los efectos del cambio climático en la Planta Los Nogales, la cual es la más importante en términos de caudal.

El análisis se realiza en base a la Figura 6.28, en la que se comparan las curvas de duración de los escenarios y el Período Base, tanto para los valores observados (funcionamiento real de la Planta) como para los simulados (los que el Modelo Integrado entregó como parte del funcionamiento simulado de la cuenca del río Cachapoal), ambos a nivel mensual.

De la forma que tienen las curvas de duración se observa que para todos los escenarios existe una disminución de los caudales de abastecimiento de la planta de agua potable (con respecto a los valores observados o reales del Período Base).

Figura 6.28
Curva de Duración Abastecimiento de agua superficial Planta Los Nogales



En la Tabla 6.8 se comparan para distintas seguridades de abastecimiento, los caudales asociados para los escenarios y el Período Base. Como fue explicado en el Capítulo 4, en el modelo no se calibra la extracción de agua potable, sino que a éste se le entrega una demanda nominal, y según la disponibilidad de recursos, se abastece toda la necesidad o parte de ella. Por ello en este caso no es aplicable un análisis, en cuanto a qué porcentaje del cambio es asociado al error del modelo (en este ítem en particular) y qué porcentaje es asociado a los efectos del cambio climático, ya que el error está asociado al funcionamiento del Modelo Integrado (por la misma razón las comparaciones se hacen con respecto a los valores observados y no a los simulados).

Tabla 6.8

Caudales para distintas seguridades de abastecimiento Planta Los Nogales [m³/s]

Seguridad Abastecimiento	Sim	Obs	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6
20%	0.64	0.74	0.74	0.72	0.75	0.73	0.75	0.72
40%	0.60	0.69	0.68	0.68	0.69	0.69	0.68	0.69
60%	0.56	0.65	0.62	0.65	0.63	0.65	0.62	0.66
80%	0.52	0.61	0.40	0.34	0.39	0.36	0.39	0.35
85%	0.50	0.60	0.33	0.30	0.34	0.32	0.34	0.30
90%	0.47	0.58	0.28	0.26	0.28	0.28	0.30	0.26
95%	0.41	0.55	0.22	0.22	0.23	0.23	0.26	0.23

Antes de proseguir con la comparación, es importante tener en consideración que, la demanda nominal de los escenarios, corresponde al máximo valor observado del Período Base (según lo expresado en el acápite 5.4). Pese a esto los resultados son comparables, ya que para el período observado, el modelo no fue capaz de abastecer toda la demanda nominal, por lo tanto, en dicho caso el sistema entregó el máximo que podía y no quedó acotado superiormente por los valores de demanda nominal.

En la Tabla 6.9, se muestra una comparación porcentual, de la diferencia entre los valores de satisfacción de los escenarios y los valores observados (se calcula la resta entre los valores de los escenarios y los observados, y se divide por los valores de estos últimos. Es decir, se calcula el aumento, en valores positivos, y la disminución, en valores negativos, de los resultados de los escenarios con respecto al Período Base). Se observa que a partir de una seguridad de un 80%, la diferencia de los valores generados para cada escenario, con respecto a los valores reales, aumenta a medida que se requiere un mayor nivel de seguridad. Esto quiere decir que para los caudales más pequeños, el sistema no es capaz de entregar los mismos valores que se entregaban en el Período Base, lo que probablemente tiene que ver con los descensos observados para el período invernal, en las cuencas en régimen natural estudiadas en el acápite 6.2.

Tabla 6.9

Comparación seguridades de abastecimiento entre valores escenarios y reales (Obs), Planta Los Nogales

Seguridad Abastecimiento	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6
20%	-0.5%	-2.7%	1.2%	-1.7%	1.1%	-2.1%
40%	-1.7%	-0.6%	0.2%	0.5%	-0.4%	0.3%
60%	-4.3%	0.4%	-3.7%	0.8%	-4.7%	1.1%
80%	-33.9%	-44.2%	-35.6%	-41.1%	-36.6%	-42.5%
85%	-44.8%	-51.0%	-43.9%	-47.1%	-44.0%	-50.2%
90%	-52.6%	-55.2%	-51.0%	-52.5%	-48.6%	-55.5%
95%	-60.7%	-59.9%	-57.7%	-59.1%	-52.7%	-59.2%

Por otro lado, para las seguridades de abastecimiento mayores, se observa que las diferencias son menores, incluso en algunos casos, para los escenarios se tienen valores mayores que los observados (aunque esta diferencia no es muy grande). Esto se podría deber a que en el período de deshielo, los caudales aumentan para algunos escenarios, y por lo tanto, al imponerse como demanda nominal el máximo del período

observado, como se tienen más recursos que permiten cubrir dichos requerimientos, para los escenarios se tienen valores mayores de satisfacción.

Comparando los resultados de la Tabla 6.9 para cada escenario, se observa que los más afectados para los caudales mayores (20% y 40%) son los Escenarios 1 y 2, y los menos afectados serían los Escenario 3 y 5. Los otros dos, estarían en un lugar intermedio. Con respecto a los caudales menores, si se ordenan de más a menos afectado, el orden sería Escenario 2, 6, 1, 4, 5 y 3.

Basándose en los resultados obtenidos, se concluye que efectivamente existen efectos del cambio climático, en la planta de agua potable (con fuente de extracción superficial) más importante de la cuenca del río Cachapoal. Estos efectos se refieren principalmente, a disminuciones de los caudales asociados a las mayores seguridades de abastecimiento.

En el Anexo E3, se entregan los caudales medios mensuales simulados, para las extracciones de las plantas de agua potable, en cada uno de los escenarios.

6.3.3 Minería

El estudio de los efectos del cambio climático en la minería, para efectos de este trabajo, se refiere a la variación en la disponibilidad de los recursos hídricos, en las principales extracciones de agua de la mina El Teniente.

Como ya fue detallado en el Capítulo 4, dichas extracciones son: Extracciones de la cuenca del río Coya, Extracción río Blanco e Impulsión Coya – Sapos.

Al igual que el estudio del agua potable, los resultados de los caudales mensuales se presentan en forma de curvas de duración, tal como se observa en la Figura 6.29.

Tal como se hizo para la Planta Los Nogales, en este caso se impuso que la demanda nominal de los escenarios, corresponde al máximo valor observado del Período Base. A diferencia de dicho caso, los resultados para la minería no son muy comparables, ya que para el período observado, el modelo sí fue capaz de abastecer toda la demanda nominal, por lo tanto, en dicho caso el sistema probablemente no entregó el máximo que podía (ya que no se le exigió más) y quedó acotado superiormente por los valores de demanda nominal observados.

Para este caso, en la Tabla 6.10 sólo se muestran los resultados de la comparación porcentual, de la diferencia entre los valores de los escenarios con respecto a los valores observados (explicado en el acápite 6.3.2).

Figura 6.29
Curva de Duración Extracciones de la cuenca del río Coya

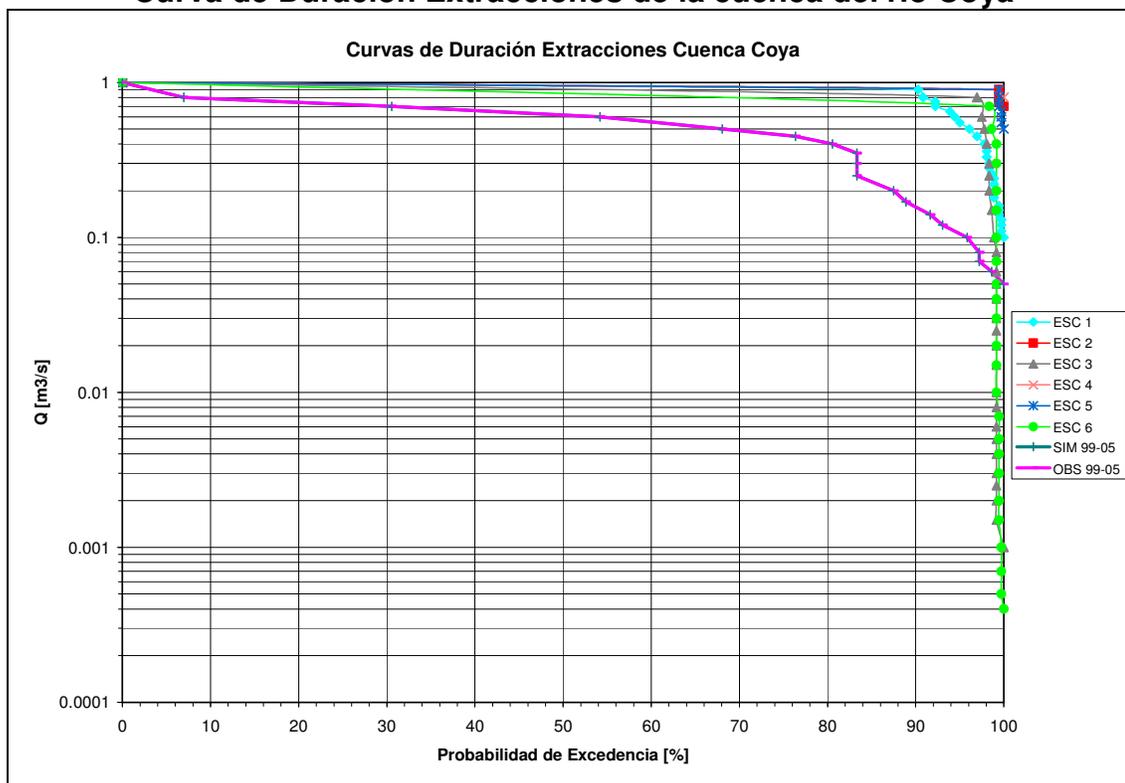


Tabla 6.10
Comparación seguridades de abastecimiento entre valores escenarios y reales (Obs), Extracciones río Coya

Seguridad Abastecimiento	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6
20%	31.3%	31.6%	28.7%	31.6%	31.6%	26.1%
40%	44.8%	45.4%	39.0%	45.4%	45.4%	33.0%
60%	67.3%	68.4%	57.0%	68.4%	68.4%	46.4%
80%	124.1%	126.1%	105.3%	126.1%	126.1%	85.9%
85%	293.8%	297.6%	258.5%	297.6%	297.6%	222.0%
90%	469.8%	475.6%	415.4%	475.6%	475.6%	359.1%
95%	418.9%	753.3%	658.5%	753.3%	753.3%	570.0%

En la Figura 6.29 y Tabla 6.10 se observa que, claramente en todos los escenarios se superan holgadamente los valores de satisfacción de la demanda del Período Base. Esto probablemente, más que a una condición favorable del sistema (en cuanto al aumento de la disponibilidad), se debe a lo mencionado anteriormente, con respecto a que en el Período Base el sistema era capaz de sacar más de lo que se exigía.

De las curvas de duración se observa que para los Escenarios 3 y 6, para seguridades en torno al 99% (caudales muy pequeños), los caudales están por debajo de los valores del período observado. Lo que podría estar asociado a disminuciones (con respecto al Período Base) de caudal en el período invernal.

Comparando los resultados para cada escenario, se observa que los que más aumentan con respecto al Período Base, son los Escenarios 2, 4 y 5, luego está el Escenario 3, el 1 y por último el 6.

Pese a la dificultad asociada a la comparación, de todas maneras de estos resultados se concluye que, al menos en cuanto a la extracción de agua desde esta cuenca, no hay efectos negativos del cambio climático, ya que para los escenarios no se tienen valores menores a los del Período Base (excepto para caudales muy pequeños para los Escenarios 3 y 6), lo que asegura que para esta extracción se tendrán como mínimo los valores de dicho período.

A continuación se estudia el caso de las Extracciones desde el río Blanco. Al igual que para las Extracciones del río Coya, en este caso se impuso que la demanda nominal de los escenarios, corresponde al máximo valor observado del Período Base. Por lo tanto, sucede algo similar a lo explicado para dicho caso.

En la Figura 6.30 y Tabla 6.11 se observa que, para un nivel de seguridad de hasta un 85%, sucede algo bastante similar al caso anterior, pero con la diferencia de que a medida que los caudales se hacen más pequeños (mayor nivel de seguridad), la diferencia con respecto al Período Base va disminuyendo.

Figura 6.30
Curva de Duración Extracciones desde el río Blanco

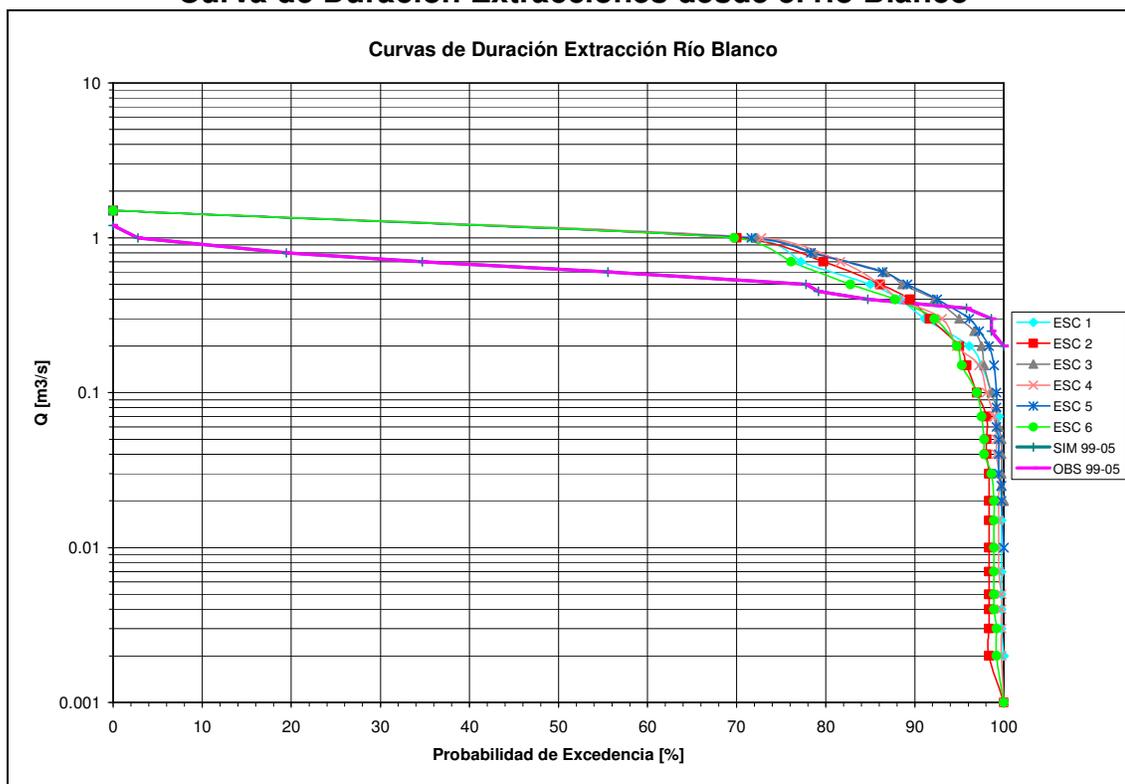


Tabla 6.11
Comparación seguridades de abastecimiento valores escenarios y reales (Obs),
Extracciones río Blanco

Seguridad Abastecimiento	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6
20%	70.9%	70.4%	71.0%	71.1%	70.8%	70.3%
40%	81.1%	80.0%	81.3%	81.6%	81.0%	79.8%
60%	86.7%	84.7%	87.0%	87.5%	86.4%	84.4%
80%	42.1%	56.2%	73.0%	70.9%	71.4%	31.8%
85%	25.4%	34.1%	60.8%	37.9%	59.1%	14.2%
90%	-9.6%	-0.3%	22.7%	-3.1%	26.2%	-7.0%
95%	-37.2%	-43.5%	-15.2%	-45.0%	-6.5%	-50.5%

Comparando los resultados para cada escenario, y ordenándolos desde los que más aumentan (para caudales grandes) y menos disminuyen (para caudales más pequeños), con respecto al Período Base, se tiene el siguiente ordenamiento: Escenario 5, 3, 2, 4, 1 y 6.

Se observa que para seguridades de abastecimiento menores a 85%, no existen efectos adversos del cambio climático, ya que el sistema es capaz de entregar más de lo que entregaba en el Período Base. Por el contrario, si se evalúan seguridades mayores al 85%, existen notorios efectos del cambio climático para los caudales más pequeños.

Por último, se estudia el caso de la Impulsión Coya – Sapos. Al igual que para los casos anteriores, se impuso que la demanda nominal de los escenarios, corresponde al máximo valor observado del Período Base. Por lo tanto, sucede algo similar a lo explicado anteriormente.

En la Figura 6.31 y Tabla 6.12 se observa que, claramente en todos los escenarios, se supera holgadamente los valores observados y simulados del Período Base. Esto probablemente, más que a una condición favorable del sistema (en cuanto al aumento de la disponibilidad), se debe a lo mencionado anteriormente con respecto a que en el Período Base el sistema era capaz de sacar más de lo que se exigía.

Comparando los resultados para cada escenario, se observa que los que más aumentan con respecto al Período Base, son los Escenarios 5, 4 y 3, luego está el Escenario 1, el 2 y por último el 6.

Pese a la dificultad asociada a la comparación, de todas maneras de estos resultados se concluye que, al menos en cuanto a la extracción de agua para la impulsión hacia el embalse Sapos, no hay efectos negativos del cambio climático, ya que para los escenarios no se tienen valores menores a los del Período Base, lo que asegura que para esta extracción se tendrán como mínimo los valores de dicho período.

Figura 6.31
Curva de Duración Impulsión Coya – Sapos

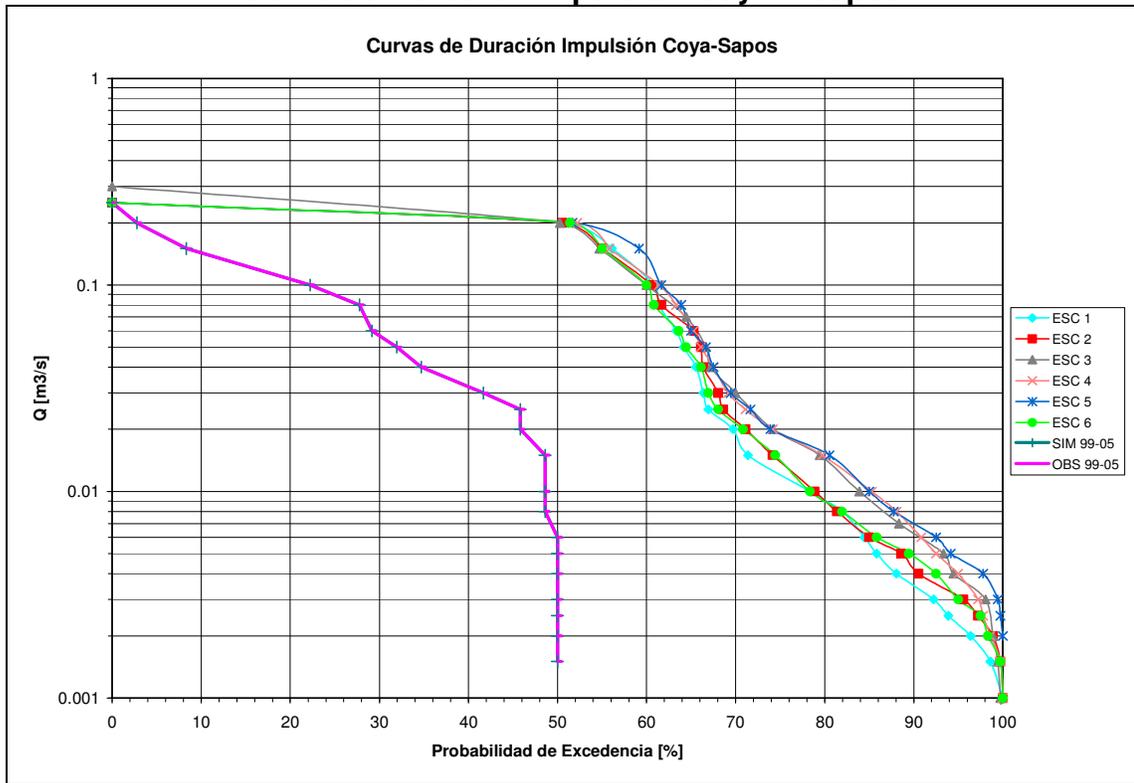


Tabla 6.12
Comparación seguridades de abastecimiento valores escenarios y reales (Obs), Impulsión Coya – Sapos

Seguridad Abastecimiento	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6
20%	16.4%	16.4%	20.4%	16.5%	16.5%	16.5%
40%	550.2%	549.5%	580.4%	553.4%	552.1%	551.5%
60%	7,673.1%	7,400.0%	7,042.9%	7,935.7%	9,423.8%	7,042.9%
80%	656.4%	659.3%	1,097.9%	1,129.2%	1,184.7%	656.4%
85%	387.0%	421.7%	704.3%	791.3%	769.6%	459.0%
90%	221.2%	289.6%	475.8%	422.7%	541.7%	338.0%
95%	116.9%	196.3%	295.6%	281.0%	354.2%	185.7%

En términos generales, se observa que para la actividad minera, representada por las principales extracciones de agua de la mina El Teniente, no existen efectos negativos del cambio climático, (a excepción de la extracción desde el río Blanco para seguridades mayores al 85%, donde se observa una incapacidad del sistema de abastecer al menos la demanda del Período Base), ya que para todos los escenarios el sistema es capaz de satisfacer más que la demanda nominal del Período Base, por lo que si el funcionamiento continuara igual que en la actualidad, no debería haber mayores problemas de abastecimiento.

En el Anexo E3, se entregan los caudales medios mensuales simulados, para las extracciones de la minería.

6.3.4 Centrales Hidroeléctricas

El estudio de los efectos del cambio climático en las centrales hidroeléctricas, para efectos de este trabajo, se refiere a la variación en la disponibilidad de los recursos hídricos, en dos de las principales centrales de pasada de la cuenca del río Cachapoal, las centrales Sauzal y Sauzalito.

Al igual que en los casos anteriores, los resultados mensuales se presentan en forma de curvas de duración.

Tal como se hizo para la Planta Los Nogales, en este caso se impuso que la demanda nominal de los escenarios, corresponde al máximo valor observado del Período Base. Los resultados son relativamente comparables, ya que para el período observado el modelo no fue capaz de abastecer toda la demanda nominal, para una parte de los caudales (más de 30 [m³/s] aproximadamente), por lo tanto, en dicho caso el sistema entregó el máximo que podía y no quedó acotado superiormente por los valores de demanda nominal. Para otra parte de los caudales (menos de 30 [m³/s] aproximadamente), sí se cubrió toda la demanda y el sistema quedó restringido a dicho valor.

En la Figura 6.32 y Tabla 6.13, se observa que para un nivel de seguridad de hasta un 60% y por sobre el 95% (incluido), los valores de abastecimiento de los escenarios, son mayores que los observados para el Período Base. Esto probablemente está asociado a que en el primer tramo, para dichos escenarios, existe un aumento en la disponibilidad de recursos para el período de deshielo (con respecto al Período Base). Para el segundo tramo, esta situación se explica por el acotamiento de los valores simulados del Período Base (ya que para este tramo los valores simulados son iguales a los observados), lo que ya fue mencionado en el caso de la minería.

Para niveles de seguridad mayores al 60% y menores al 95%, se observa que los valores de abastecimiento de los escenarios, son menores a los del Período Base. Esto se puede deber a que los caudales asociados al rango de seguridad mencionado, para el caso de los escenarios, no son suficientes para satisfacer al menos la demanda del Período Base.

Comparando los resultados para cada escenario, y ordenándolos desde los que más aumentan (para caudales grandes y los más pequeños) y menos disminuyen (para caudales más pequeños), con respecto al período base, se tiene el siguiente ordenamiento: Escenario 5, 3, 4, 1, 6 y 2.

Para este caso se observa que para seguridades de abastecimiento menores a 60% y mayores a 95%, no existen efectos adversos del cambio climático, ya que el sistema es capaz de entregar más de lo que entregaba en el Período Base. Por el contrario, si se evalúan seguridades entre el 60% y el 95%, se verifica que existen notorios efectos del cambio climático para estos caudales, ya que el sistema no puede satisfacer al menos la demanda del Período Base.

Figura 6.32
Curva de Duración Abastecimiento Central Sauzal

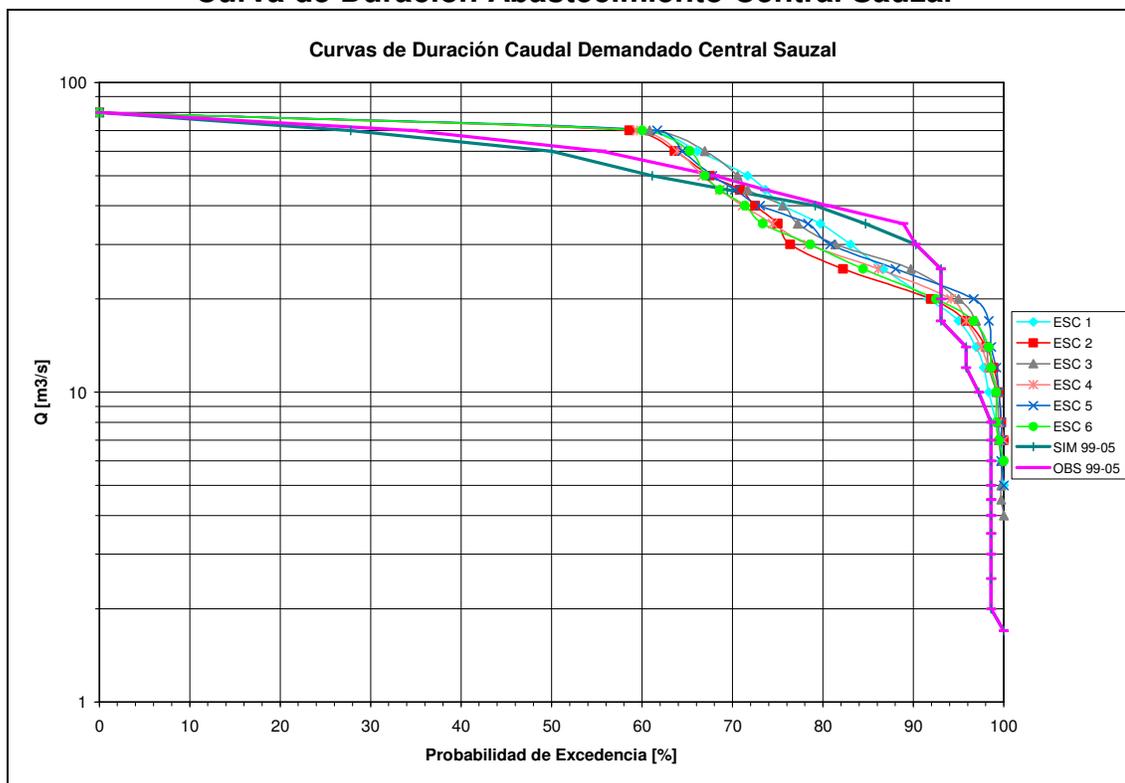


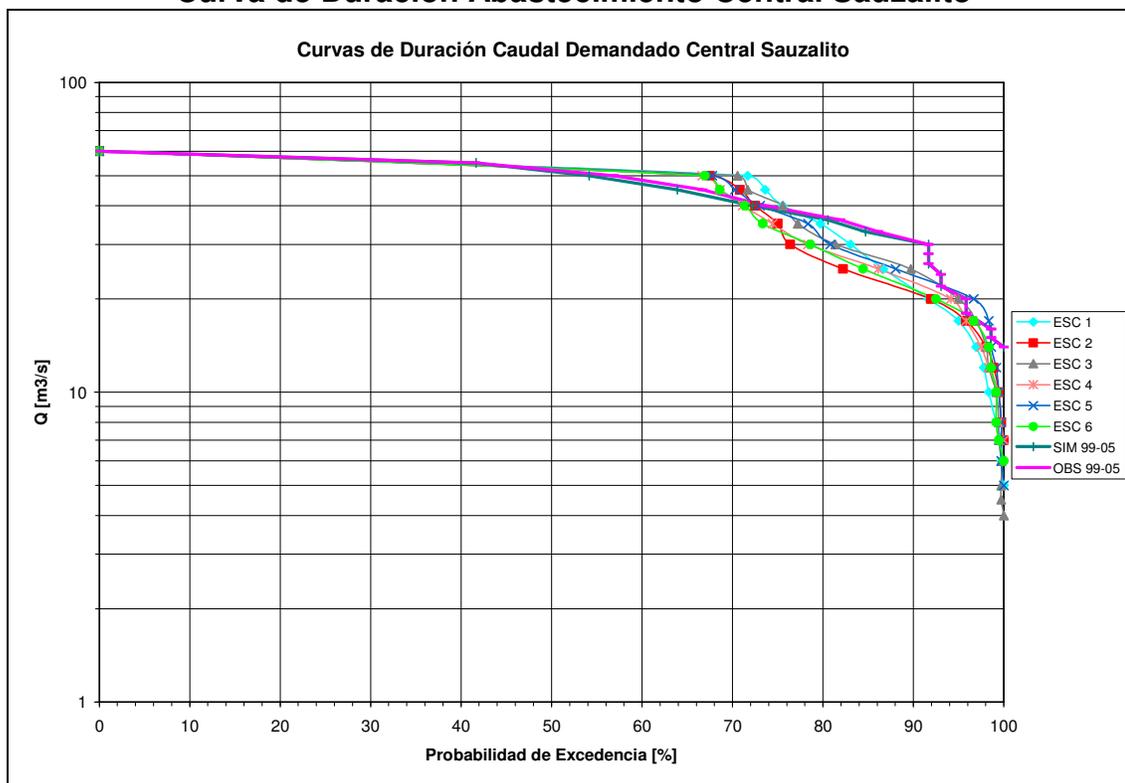
Tabla 6.13
Comparación seguridades de abastecimiento valores escenarios y reales (Obs), Central Sauzal

Seguridad Abastecimiento	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6
20%	3.3%	3.2%	3.3%	3.2%	3.4%	3.3%
40%	8.7%	8.5%	8.8%	8.6%	9.0%	8.7%
60%	24.0%	19.1%	24.3%	21.8%	24.5%	24.0%
80%	-14.4%	-33.4%	-21.6%	-28.4%	-21.6%	-28.7%
85%	-26.9%	-36.9%	-25.4%	-31.1%	-27.4%	-34.0%
90%	-34.2%	-32.3%	-20.2%	-27.1%	-23.0%	-30.5%
95%	14.1%	18.4%	34.2%	24.2%	40.7%	22.1%

A continuación se estudia el caso de las extracciones asociadas a la Central Sauzalito. Al igual que para la Central Sauzal, se impuso que la demanda nominal de los escenarios, corresponde al máximo valor observado del Período Base. Por lo tanto, sucede algo similar a lo explicado para dicho caso.

El análisis para esta Central sigue una lógica similar a la expuesta para la Central Sauzal, por lo que no se hará una mayor descripción de los resultados.

Figura 6.33
Curva de Duración Abastecimiento Central Sauzalito



En la Tabla 6.14, se observa que para este caso, para seguridades de abastecimiento menores a 40% y mayores a 70%, existen efectos adversos del cambio climático, ya que el sistema no es capaz de entregar más de lo que hacía en el Período Base. Por el contrario, si se evalúan seguridades entre el 40% y el 70%, se verifica que no existen efectos negativos del cambio climático para estos caudales, ya que el sistema satisface más que lo requerido en el Período Base.

Tabla 6.14
Comparación seguridades de abastecimiento valores escenarios y reales (Obs), Central Sauzalito

Seguridad Abastecimiento	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6
20%	-0.7%	-1.0%	-0.8%	-1.0%	-1.0%	-1.0%
40%	-1.4%	-2.0%	-1.6%	-2.2%	-2.0%	-2.1%
60%	6.6%	5.5%	6.3%	5.3%	5.6%	5.4%
80%	-6.4%	-27.2%	-14.3%	-21.7%	-14.3%	-22.0%
85%	-19.2%	-30.3%	-17.7%	-23.9%	-19.8%	-27.1%
90%	-29.9%	-32.0%	-19.9%	-26.9%	-22.7%	-30.3%
95%	-17.5%	-14.4%	-2.9%	-10.2%	1.8%	-11.7%

En términos generales se observa que, para la actividad de generación hidroeléctrica, representada por las centrales Sauzal y Sauzalito, para caudales más grandes (menor seguridad de abastecimiento) no existen efectos negativos del cambio climático (para la central Sauzalito se tienen disminuciones con respecto al Período Base, pero son muy pequeñas, por lo que no constituyen un efecto muy pronunciado), ya que para todos los

escenarios el sistema es capaz de satisfacer más (o al menos lo mismo) que la demanda nominal del Período Base. Por otro lado, para caudales más pequeños (mayor seguridad de abastecimiento), sí se observan efectos negativos del cambio climático, ya que el sistema no es capaz de abastecer al menos lo requerido en el Período Base. Por lo tanto, para esta actividad, si se busca operar con niveles de seguridad alta, los efectos del cambio climático son importantes.

En el Anexo E3, se entregan los caudales medios mensuales simulados, para las extracciones de las centrales hidroeléctricas.

6.3.5 Comparación de los efectos del cambio climático en los distintos usos

A modo de comparación, de las consecuencias asociadas a las modificaciones en la disponibilidad del recurso hídrico, en la Tabla 6.15 se muestran las diferencias porcentuales de los valores obtenidos para cada escenario, con respecto al Período Base, es decir, cuánto aumenta o disminuye (porcentualmente) la satisfacción, con respecto al valor del mencionado período.

Para el caso del riego, el cálculo se hizo en base a los valores mostrados en el acápite 6.3.1, en el que se obtuvo un valor promedio anual ponderado, según la importancia de cada mes, con respecto a la demanda evapotranspirativa total.

Para el resto de los usos (agua potable, minería y centrales hidroeléctricas), se hizo un promedio simple de los valores mostrados en las Tablas 6.9 a 6.14. Este promedio si bien entrega un valor bastante grueso, al menos muestra una tendencia de lo que ocurre en cada uno de dichos usos.

De los resultados de la Tabla 6.15, se observa que en términos generales, para el riego existen claros efectos adversos del cambio climático (excepto para el módulo CB), ya que para todos los escenarios existe una disminución de la satisfacción de la demanda, con respecto a la situación del Período Base. El módulo CB es el único que en términos promedio, no se ve afectado por una disminución en su capacidad de satisfacer la demanda de riego.

Para el agua potable, se observa que en términos generales también hay efectos adversos, debido a que para todos los escenarios, se comprueba una merma (en términos promedio) en la satisfacción de la demanda. Ésta, en todos los casos, supera el 25% de reducción, lo cual es bastante significativo.

Para la minería, tal como se explicó en el acápite 6.3.3, no se observan efectos negativos, y los grandes porcentajes de aumento no indican que la situación mejore tan radicalmente, sino que tiene que ver con que en el Período Base, el sistema no fue exigido de igual manera que en los escenarios.

Para las centrales hidroeléctricas se observa que, en promedio, para la mayoría de los escenarios existen más efectos adversos que positivos (lo que coincide con lo planteado en el acápite 6.3.4, en cuanto a que para mayores seguridades de abastecimiento se ven mayores efectos), con reducciones importantes, sobre todo para la Central Sauzalito.

Si se establece un ordenamiento de las actividades desde la más a la menos afectada (porcentualmente con respecto a la situación en el Período Base), el orden sería: Agua Potable, Centrales Hidroeléctricas, Riego y Minería.

En resumen, se podría concluir que, para los distintos usos analizados para la cuenca del río Cachapoal, sí existen efectos asociados al cambio climático, que hacen que en términos promedio, se observe una merma en la capacidad del sistema, de satisfacer las demandas de las distintas actividades. El único caso en que no se pueden verificar dichos efectos negativos, es la minería, y esto se explica porque las extracciones provienen de fuentes con niveles altos de escorrentía, que aunque ven disminuido su caudal (no necesariamente es así), no se afectan en un nivel que incida en la satisfacción de los requerimientos (no muy altos versus los requerimientos de las centrales hidroeléctricas, por ejemplo) de esta actividad. Es importante tener en consideración que para todos los usos no se hizo una proyección de la demanda, por lo que los resultados obtenidos se refieren a los usos definidos en el Período Base.

En la Tabla 6.15 se destacan, para cada uso, en color rojo el escenario que tiene mayor disminución o menor aumento, y en color verde el escenario que tiene menor disminución o mayor aumento. Claramente se observa que el escenario más favorable es el Escenario 5, seguido muy de cerca por el Escenario 4. Por otro lado, los más desfavorables son los Escenarios 1 y 2. Si bien el Escenario 6, es el menos favorable en los tres casos estudiados para la minería, no se puede calificar como el más desfavorable, porque para dicha actividad no hay reducciones con respecto al Período Base.

Tabla 6.15
Efectos del cambio climático en los distintos usos del recurso hídrico

Actividad	Uso específico	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6
Riego	Módulo CA	-3.9%	-3.3%	-4.2%	-2.8%	-3.2%	-3.9%
	Módulo ELC	-0.7%	-0.1%	-0.2%	-0.1%	0.0%	-2.0%
	Módulo CR	-3.8%	-1.1%	-0.8%	-0.2%	-0.2%	-1.5%
	Módulo EZ	-8.3%	-4.2%	-4.4%	-2.9%	-3.3%	-6.9%
	Módulo CB	3.3%	3.5%	3.5%	3.5%	3.5%	3.5%
Agua Potable	Planta Los Nogales	-28.4%	-30.5%	-27.2%	-28.6%	-26.6%	-29.7%
Minería	Extracción río Coya	207.2%	256.9%	223.2%	256.9%	256.9%	191.8%
	Extracción río Blanco	37.1%	40.2%	54.4%	42.9%	55.5%	31.9%
	Impulsión Coya - Sapos	1,374.5%	1,361.8%	1,459.6%	1,589.9%	1,834.7%	1,321.4%
Generación Hidroeléctrica	Central Sauzal	-3.6%	-7.6%	0.5%	-4.1%	0.8%	-5.0%
	Central Sauzalito	-9.8%	-14.5%	-7.3%	-11.5%	-7.5%	-12.7%

Si se establece un ordenamiento de todos los escenarios, de más a menos favorable, éste sería el siguiente: Escenario 5, Escenario 4, Escenario 3, Escenario 6, Escenario 2 y Escenario 1. Estos resultados coinciden plenamente (con mínimas diferencias) con el

análisis hecho en el acápite 5.3.6.4, en cuanto a los escenarios que deberían ser más o menos favorables, desde el punto de vista de su influencia en los recursos hídricos; y al ordenamiento establecido para las cuencas en régimen natural (Tabla 6.7).

6.4 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÁNEOS

En el presente acápite se analizan los efectos del cambio climático, en los recursos hídricos subterráneos de la cuenca del río Cachapoal. Este estudio se refiere a variaciones de los descensos del nivel piezométrico, recargas al acuífero, interacción río – acuífero, balance total del sistema y por supuesto cómo se ve afectada la satisfacción de la demanda de estos recursos (todos resultados obtenidos de Visual Modflow). Además se analizan de manera conjunta los aspectos recién mencionados, para así justificar las diferencias que puede haber entre los resultados para cada escenario.

Es importante mencionar que los resultados de recargas, afloramientos, infiltraciones y balance, que se muestran en este acápite, son el promedio de todos los delta tiempo considerados en el período de simulación (360 meses), ya que mostrar los resultados para todos los pasos de tiempo resulta poco práctico.

Si bien el sector acuífero 1 (Codegua) no pertenece a la cuenca del Cachapoal, este sector se incluye en el presente análisis, ya que al formar parte del acuífero, influye en los resultados observados en los demás sectores del sistema. Los únicos casos en que no se analiza dicho sector, son para la satisfacción de la demanda, ya que si bien la explotación de pozos es incluida dentro del modelo, no forma parte de las necesidades de la cuenca del Cachapoal; y el balance hídrico subterráneo ya que si bien aporta en términos de flujo subterráneo (éste se incluye), su interacción con la parte superficial, no interesa mayormente en términos del balance total del acuífero (sí se analizan la infiltración y el afloramiento para analizar los efectos del cambio climático).

Por último, también se realiza el ejercicio de evaluar el cumplimiento del primero de los “Criterios de sustentabilidad para sectores acuíferos abiertos” de la DGA (DGA, 2006), ver Anexo E4. Suponiendo por simplicidad, que en este caso todos los sectores acuíferos están abiertos (pueden seguir siendo explotados), lo cual en estricto rigor no es así, pero como se modificaron los sectores de balance, resulta engorroso definir que sector está abierto o no, de acuerdo a la configuración utilizada en el estudio de la DGA.

6.4.1 Descensos Nivel Piezométrico

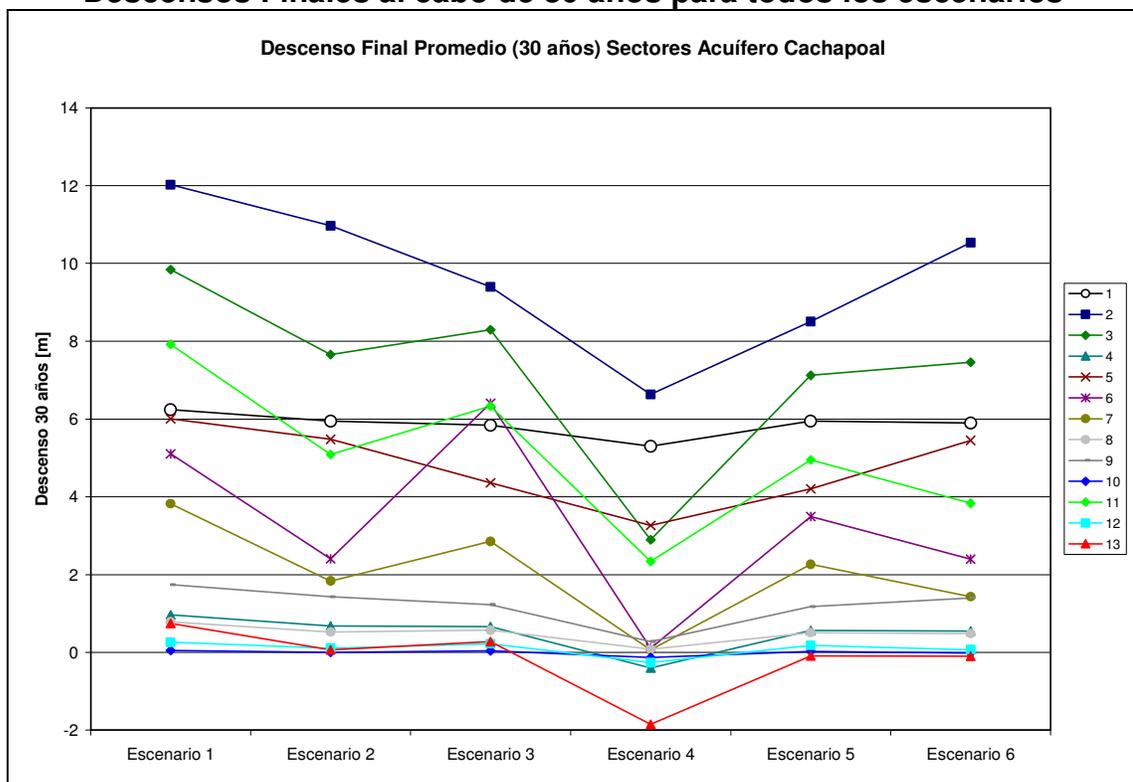
A diferencia del estudio en los recursos hídricos superficiales, para el caso de los descensos del nivel piezométrico, resulta mucho más complicado hacer comparaciones para distintos períodos de tiempo. Por lo tanto, para esta variable se busca analizar las magnitudes de las variaciones observadas en cada escenario, con respecto al nivel final del Período Base.

En la Figura 6.34 se muestran los descensos finales promedio, al cabo de los 30 años asociados a cada uno de los escenarios planteados. Para cada sector se promediaron los valores de los pozos observados de cada uno de dichos sectores (los descensos

específicos para cada uno de esos pozos a través del tiempo, para todos los sectores y para cada escenario, se muestran en el Anexo E5). Los sectores son identificados con los números indicados en el Capítulo 4. En dicha figura se observa claramente que para todos los escenarios, el sector 2 es el que experimenta mayores descensos con respecto al nivel inicial del acuífero. También se puede observar que los sectores 1, 3, 5, 6, 7 y 11 experimentan descensos significativos. En el resto de los sectores se observan descensos menores, incluso con aumentos con respecto al Período Base, esto último para los sectores 4, 10, 12 y 13 (para Escenario 4).

Con respecto a los resultados de todos los escenarios, se observa que para el Escenario 4, se experimentan los menores descensos e incluso los aumentos de nivel ya mencionados. Por otro lado, para el Escenario 1 se verifican los mayores descensos.

Figura 6.34
Descensos Finales al cabo de 30 años para todos los escenarios



Si se analizan los resultados según los módulos en los que se separó el modelo, se observa lo siguiente:

- **Módulo CB:** los sectores acuíferos asociados a este módulo son el 3, 4, 12 y 13 (en estricto rigor este último no corresponde a este módulo, ya que está aguas abajo del punto de salida de la cuenca, pero de todas maneras se incluye para este análisis). Claramente se observa que los descensos para este módulo, son mayores para las zonas más altas (sector 3) y que van bajando para las zonas medias (sector 4), haciéndose muy pequeños y aumentando incluso los niveles para la parte baja (sectores 12 y 13). Para todos los sectores el escenario más favorable es el 4 y el más desfavorable es el 1.

También es importante destacar que para el sector 3, existen grandes diferencias entre los resultados obtenidos para el Escenario 4 y el resto, por ejemplo para el Escenario 1 hay aproximadamente 7 [m] más de descenso que en el Escenario 4. Para los otros sectores, si bien existen las diferencias mencionadas para el sector 3, éstas no son tan pronunciadas.

- **Módulo ELC:** los sectores acuíferos asociados a este módulo son el 1 y 2 (en estricto rigor el primero no corresponde a este módulo, ya que no pertenece a la cuenca del Cachapoal, pero de todas maneras se incluye para efectos de este análisis). Para este caso se observa que en todos los escenarios existe descenso, pero éste es mucho más pronunciado para el Escenario 1; por ejemplo para el sector 2 hay aproximadamente 5 [m] más de descenso que en el Escenario 4. Para el resto de los casos también hay descensos mayores que en el 4, pero las diferencias no son tan marcadas.

Los descensos en el sector 1 son menores que en el sector 2, lo que se debe a que para el primero se utilizó un pozo ubicado en el área más septentrional (APR Angostura, ver Capítulo 4), donde existe una desconexión asociada a los escurrimientos superficiales, y por lo tanto una menor afección, lo cual produce que los valores de descenso a nivel promedio sean más bajos.

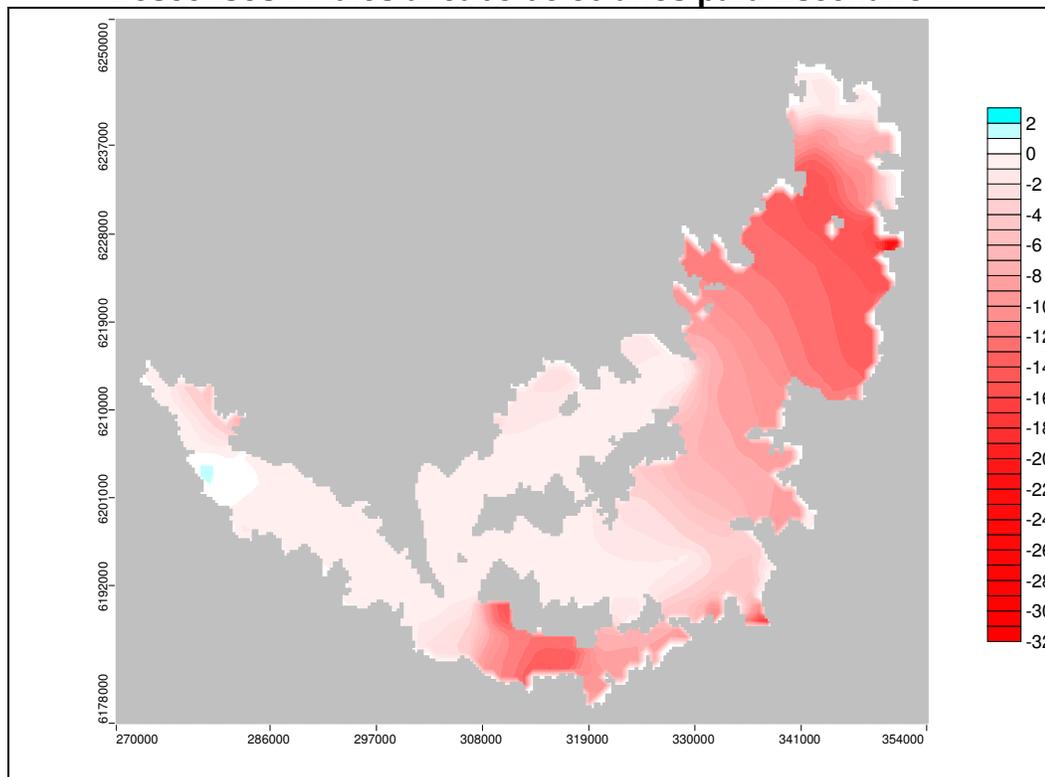
- **Módulo CR:** los sectores acuíferos asociados a este módulo son el 5, 6, 7, 8, 9 y 10. Claramente se observa que los descensos en este caso, son mayores para las zonas más altas (sectores 5 y 6) y que van bajando para las zonas medias (sector 7, 8 y 9), haciéndose muy pequeños y aumentando incluso, los niveles piezométricos de la parte baja (sector 10). Para todos los sectores el escenario más favorable es el 4 y el más desfavorable es el 1 (excepto para el sector 6, cuyo escenario más desfavorable es el 3).

También es importante destacar que para los sectores de la parte alta e intermedia, existen grandes diferencias entre los resultados obtenidos para el Escenario 4 y el resto, por ejemplo en el sector 6, para el Escenario 3 hay aproximadamente 6 [m] más de descenso que en el Escenario 4. Para los otros sectores, si bien existen las diferencias mencionadas para el sector 6, éstas no son tan pronunciadas.

- **Módulo EZ:** el sector acuífero asociado a este módulo es el 11. Para este caso se observa que en todos los escenarios existe descenso, pero éste es mucho más pronunciado para el Escenario 1, en que hay aproximadamente 5 [m] más de descenso que en el Escenario 4. Para el resto de los casos también hay descensos mayores que en el 4, pero las diferencias no son tan marcadas.

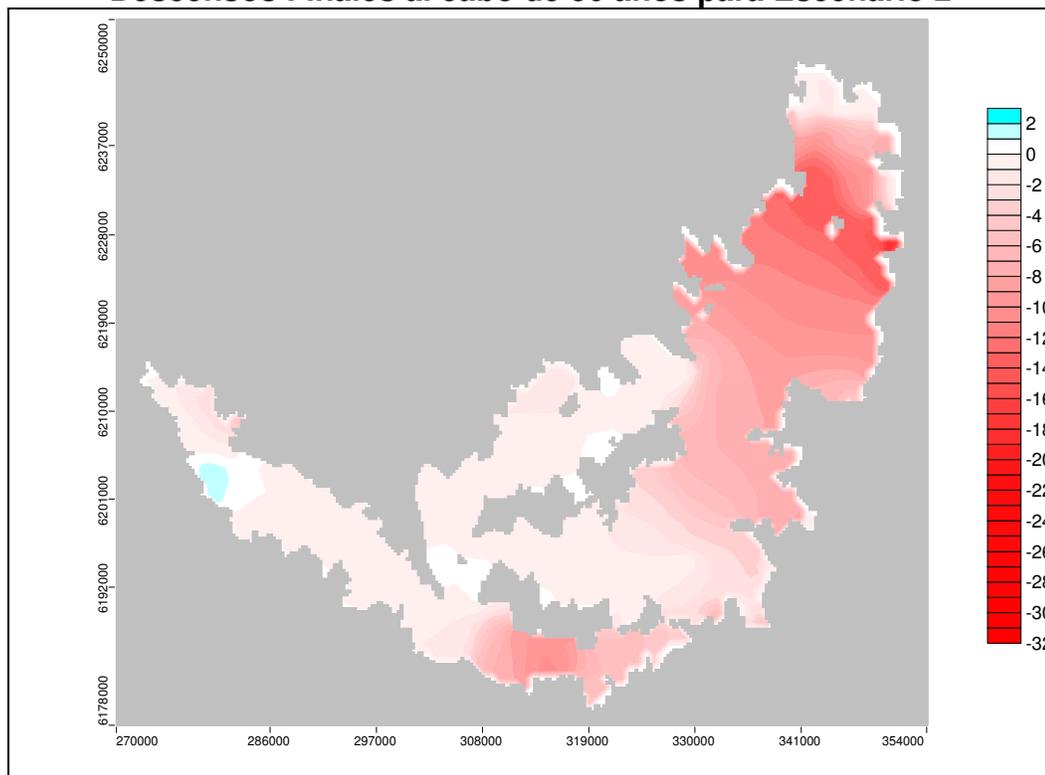
Lo indicado anteriormente se verifica en las Figuras 6.35 a 6.40, donde se muestran de manera esquemática (en forma de curvas de nivel) las variaciones de niveles para cada uno de los escenarios, con respecto al Período Base (en este caso se grafica la diferencia para cada una de las celdas activas de la grilla del modelo).

Figura 6.35
Descensos Finales al cabo de 30 años para Escenario 1



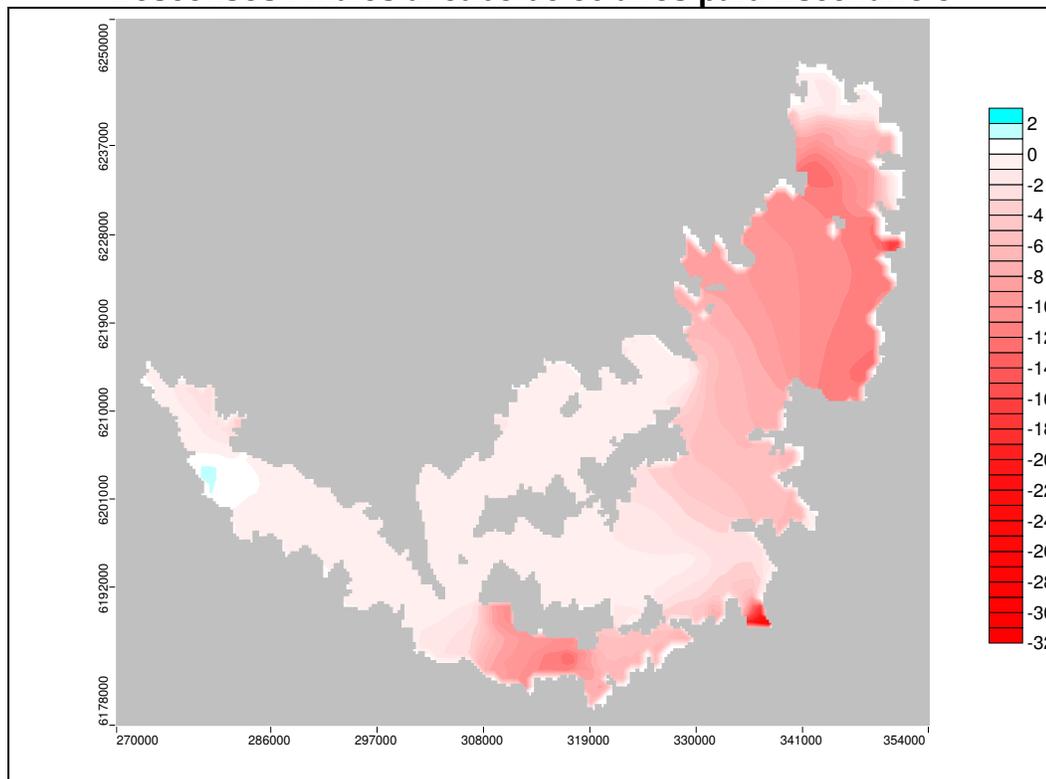
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.36
Descensos Finales al cabo de 30 años para Escenario 2



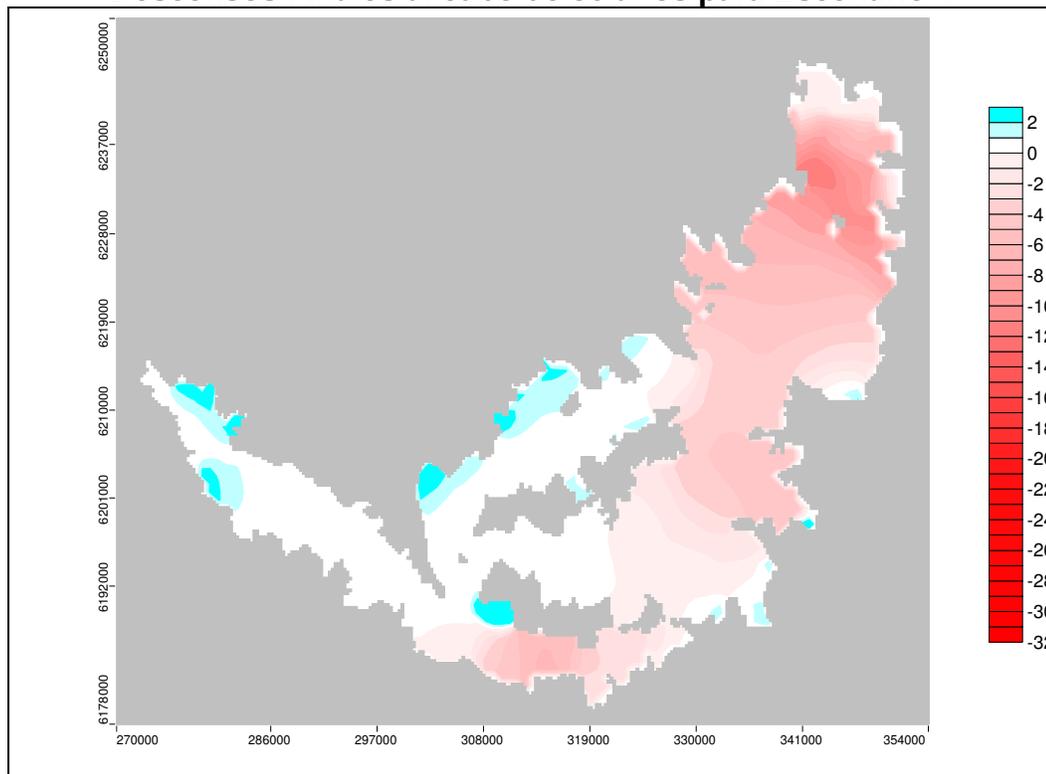
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.37
Descensos Finales al cabo de 30 años para Escenario 3



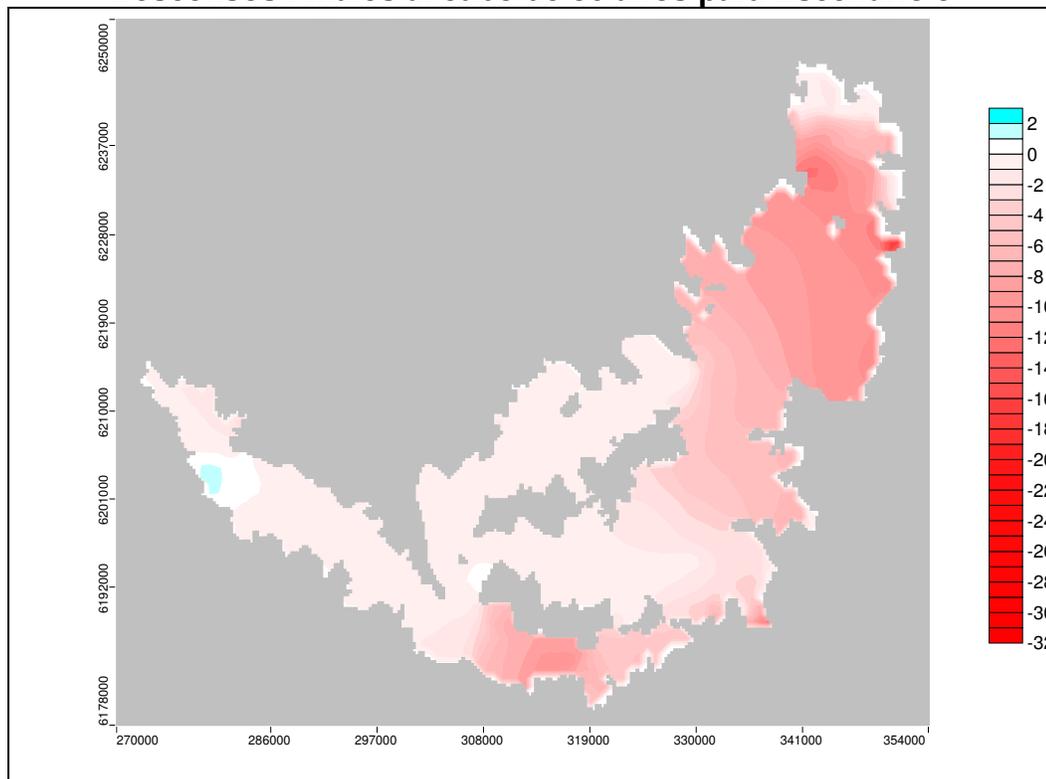
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.38
Descensos Finales al cabo de 30 años para Escenario 4



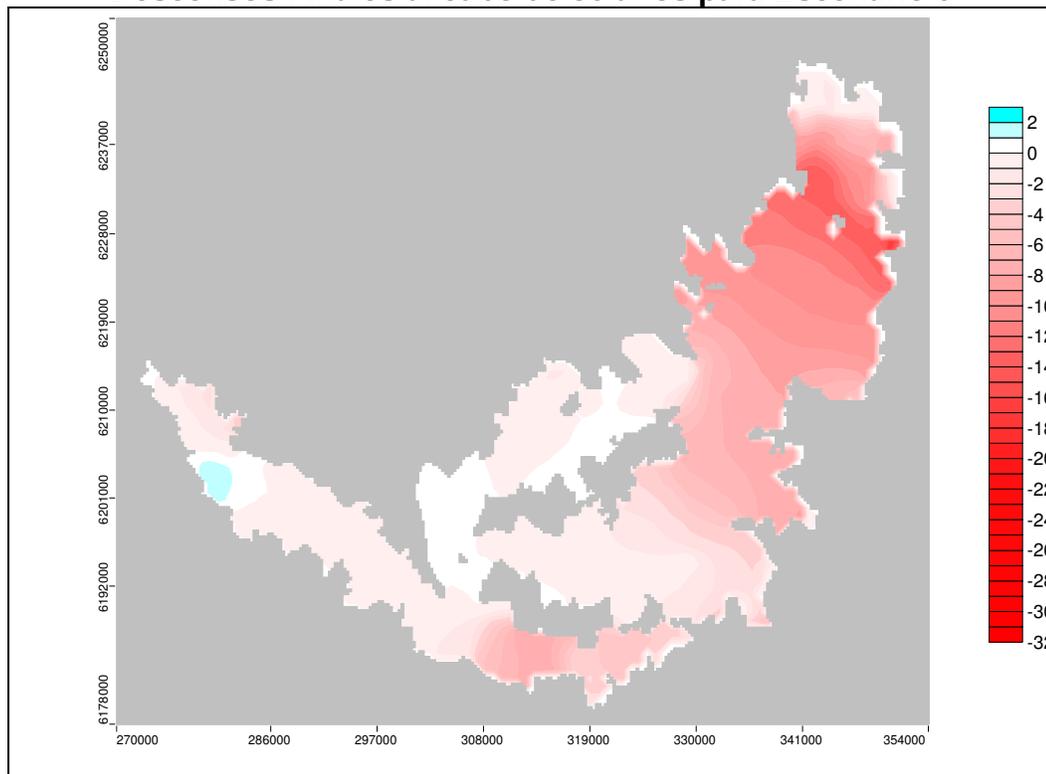
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.39
Descensos Finales al cabo de 30 años para Escenario 5



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.40
Descensos Finales al cabo de 30 años para Escenario 6



Fuente: Elaboración Propia.

En las Figuras 6.35 a 6.40 se confirma que son las partes altas del acuífero, las que se ven más afectadas por los descensos de niveles (excepto para el sector 1 en el que los descensos disminuyen hacia el norte), versus afecciones bastante menores e incluso aumentos en las partes bajas. Con respecto al escenario en que se observan mayores descensos, claramente éste es el Escenario 1, seguido por el 2, 3, 5, 6; y el que se ve menos afectado es el Escenario 4.

El ordenamiento establecido para los escenarios, en cuanto a los mayores descensos registrados, coinciden plenamente con el análisis hecho en el acápite 5.3.6.4, en cuanto a los escenarios que deberían ser más o menos favorables, desde el punto de vista de su influencia en los recursos hídricos.

Por último, en la Tabla 6.16 se evalúa, para los descensos, el cumplimiento del primer criterio de sustentabilidad de la DGA. Obviamente en este caso no se tienen 50 años de simulación, y por lo tanto, se hace un ajuste a dicho criterio, evaluando los últimos 12 años de los escenarios (que corresponden al 40% del tiempo. Porcentaje calculado a partir de los 20 años, sobre un total de 50, que se tienen en el criterio original).

Tabla 6.16
Verificación del Criterio 1 DGA para los descensos últimos 12 años[m]

Sector	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
1	0.32	0.38	0.34	0.20	0.38	0.45
2	0.32	2.49	-0.26	0.96	0.23	2.78
3	4.68	5.71	5.17	3.76	5.38	6.24
4	0.00	0.41	-0.10	-0.41	0.11	0.32
5	0.25	1.10	-0.15	0.30	0.30	1.28
6	-2.79	0.98	-0.50	-0.93	1.88	0.82
7	-0.37	0.71	-0.60	-0.37	1.36	0.70
8	0.03	0.17	-0.03	-0.21	0.17	0.17
9	0.10	0.35	-0.05	-0.45	0.18	0.35
10	0.00	0.04	0.00	-0.11	0.03	0.01
11	0.52	1.54	0.12	-0.27	1.74	2.47
12	-0.01	0.11	-0.03	-0.24	0.10	0.09
13	-0.11	0.51	-0.20	-0.83	0.09	0.45

En la Tabla 6.16 se observa que en el único caso, en que para todos los escenarios no se cumpliría el criterio de descensos, es para el sector 3. Para los sectores 2, 5, 6, 7 y 11 en algunos de los escenarios no se cumple el criterio. Mientras que para el resto de los casos (la mayoría) se observa que el sistema incluso se recupera en los últimos 12 años de los escenarios (valores negativos). Por lo tanto, en términos generales se podría decir que para el acuífero Cachapoal, si bien existen descensos, éstos son sostenibles (bajo el supuesto de que todos los sectores están abiertos), es decir, tienen cierto grado de estabilización, a excepción del sector acuífero 3.

6.4.2 Recargas al Acuífero

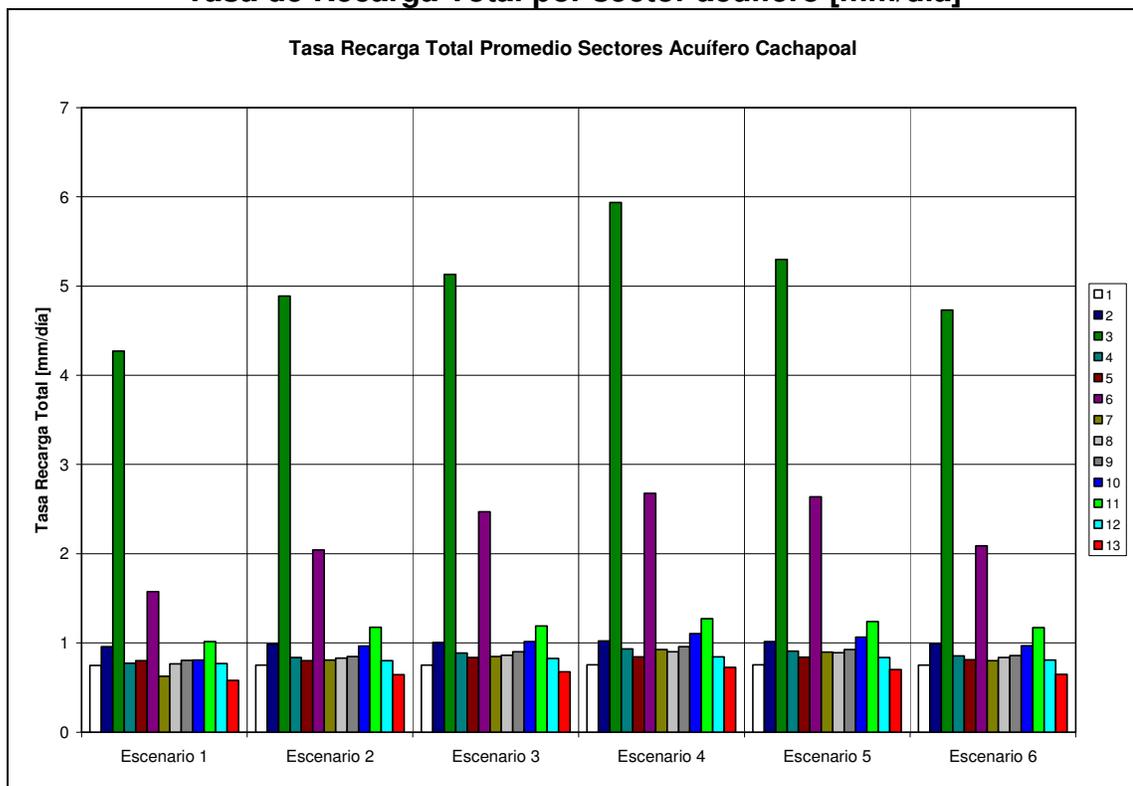
A continuación se muestran y analizan los valores de las tasas de recarga promedio (en [mm/día]), para cada uno de los sectores acuíferos (los cuales son distintos a los

sectores de recarga indicados en el Capítulo 4). En este caso se muestra la recarga total (la suma de la recarga superficial, lateral y subterránea) por sector de balance, para relacionar sus variaciones con las de los descensos.

El sector 14, asociado a la conexión con la parte alta del Cachapoal, se incluye como parte del sector 3, para efectos del cálculo de la tasa de recarga (en estricto rigor son un mismo sector, pero se hizo la separación para que en el balance se distinga de manera clara cuanto ingresa por dicha conexión). Para el sector 15 (conexión con la parte alta del Claro de Rengo) se hizo lo mismo con el sector 6.

En la Figura 6.41 se observa que los valores de recarga, son mucho mayores en los sectores 3 y 6, lo cual se debe a que en dichos sectores ingresa el aporte de las partes altas, tal como se indicó en el párrafo anterior. A simple vista, se verifica que a excepción de los sectores recién mencionados, el resto tiene tasas de recarga bastante similares. Además, entre un escenario y otro no se distinguen mayores diferencias para un mismo sector.

Figura 6.41
Tasa de Recarga Total por sector acuífero [mm/día]

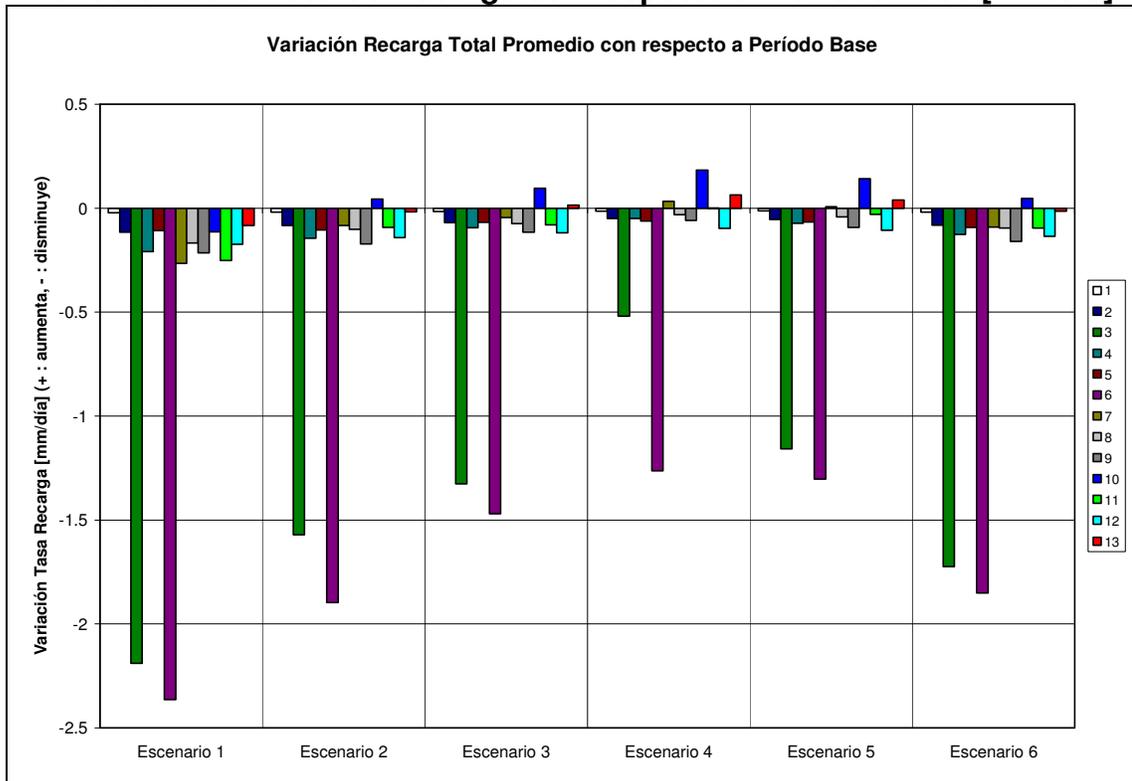


En la Figura 6.42 se muestra la variación de la recarga con respecto al Período Base, que permite comparar las magnitudes de cambio en cada uno de los escenarios. A diferencia del caso de los descensos, en éste sí se pueden estudiar los efectos del cambio climático, en las magnitudes de las tasas de recarga.

En la mencionada figura se observa que, en cada uno de los escenarios, prácticamente todos los sectores experimentan disminuciones (valores negativos en el gráfico) con

respecto al Período Base. En particular, las mayores disminuciones se verifican para los sectores 3 y 6. Por otro lado, el sector 10 es el menos afectado, ya que para todos los escenarios (excepto para el Escenario 1) la recarga total aumenta. El sector 13 también registra aumentos en los Escenarios 4 y 5.

Figura 6.42
Variación de la Tasa de Recarga con respecto al Período Base [mm/día]



En las Figuras 6.34 y 6.42 se observa que, existe una clara relación entre las variaciones en los descensos y en la recarga total. Por ejemplo, si se analiza el sector 3, se aprecia que para el Escenario 1 se tiene la máxima disminución de la recarga, y a su vez se experimenta el mayor descenso en los 30 años de simulación; al mismo tiempo, para este sector, en el Escenario 4 se tiene la menor disminución de la recarga y consecuentemente el menor descenso.

Por otro lado, si se observan los valores de descenso y variación de recarga para el sector 10, se observa que los descensos prácticamente nulos en dicho sector, están asociados a aumentos en los niveles de recarga total (excepto para el Escenario 1 en que hay disminución, pero no tan marcada).

Obviamente, esta relación no es exactamente así para todos los escenarios de todos los sectores (por ejemplo, para el sector 3 existe menor disminución de la recarga en el Escenario 3 que en el 2, pero hay mayores descensos en este último), pero en la gran mayoría se observa esta ligazón, por lo que se infiere que las magnitudes de los descensos, están vinculadas con las magnitudes de las disminuciones en la recarga total.

Lo indicado anteriormente, también se verifica al observar ambas variables, pero por escenario; por ejemplo, para el Escenario 4 se registran los menores niveles de disminución de la recarga (incluso con aumentos para algunos sectores), lo que coincide con los menores valores de descenso con respecto a los otros escenarios. Por otro lado, para el Escenario 1 se observa que se tienen los mayores niveles de disminución de la recarga y los mayores descensos (esto en términos generales), y además ningún sector experimenta aumentos.

En la Tabla 6.17 se muestran los porcentajes de disminución de la recarga total con respecto al Período Base. Esto permite tener una idea, de la magnitud real de los efectos que tiene el cambio climático, en la recarga total para cada uno de los sectores (y para cada escenario), ya que con esto es posible determinar si la variación es significativa, o no, en relación al valor inicial.

Tabla 6.17
Variación porcentual de la tasa de Recarga Total con respecto al Período Base

Sector	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
1	-2.7%	-2.4%	-2.1%	-1.7%	-1.6%	-2.4%
2	-10.8%	-7.7%	-6.4%	-4.7%	-5.1%	-7.6%
3	-33.9%	-24.3%	-20.5%	-8.1%	-17.9%	-26.7%
4	-21.3%	-14.7%	-9.6%	-5.0%	-7.3%	-12.9%
5	-11.8%	-11.5%	-7.5%	-6.7%	-7.2%	-10.2%
6	-60.0%	-48.1%	-37.3%	-32.1%	-33.1%	-47.0%
7	-29.8%	-9.2%	-4.9%	3.8%	0.8%	-10.1%
8	-17.9%	-10.9%	-7.8%	-3.4%	-4.4%	-10.1%
9	-21.1%	-16.9%	-11.4%	-5.7%	-9.1%	-15.7%
10	-12.3%	4.8%	10.4%	19.9%	15.5%	5.2%
11	-19.8%	-7.2%	-6.3%	0.2%	-2.3%	-7.6%
12	-18.3%	-15.1%	-12.6%	-10.3%	-11.2%	-14.3%
13	-12.4%	-2.6%	2.3%	9.5%	6.1%	-2.0%

Nota: en rojo se destacan todos los porcentajes de 10% o más de reducción, en negro están los porcentajes de reducción menores a 10% y en azul los porcentajes de aumento.

Estos porcentajes de reducción permiten apreciar que para el sector 6, por ejemplo, las magnitudes de disminución son bastante importantes, llegándose en casos como el Escenario 1, a un detrimento del 60% con respecto a lo que se tenía en el Período Base. Lo mismo se observa para el sector 3, en que los porcentajes de disminución son también considerables.

En la Tabla 6.17, se observa una clasificación de las variaciones de la recarga. Si se considerara que una disminución de más de 10% es significativa, se tendría que para todos los escenarios hay al menos dos sectores con importantes afecciones, asociadas al cambio climático, en los valores de la tasa de recarga.

Si bien para las cuencas en régimen natural se verificaron disminuciones de caudal y aumento de la recarga (a nivel local), en términos globales (todo el acuífero) se observa que esta última también experimenta efectos adversos (disminución) del cambio climático, lo que puede estar asociado a los cambios de fase (de agua a nieve) en la

precipitación que cae sobre la cuenca del Cachapoal (lo que se pudo verificar a nivel local en el estudio de dichas cuencas en régimen natural), lo que implica una menor disponibilidad de recursos hídricos para recargar al acuífero.

Si se establece un ordenamiento de todos los escenarios, de más a menos favorable (menores disminuciones y mayores aumentos de la recarga, representan el escenario más favorable), éste sería el siguiente: Escenario 4, Escenario 5, Escenario 3, Escenario 6, Escenario 2 y Escenario 1. Estos resultados coinciden plenamente con el análisis hecho en el acápite 5.3.6.4, en cuanto a los escenarios que deberían ser más o menos favorables, desde el punto de vista de su influencia en los recursos hídricos; y al ordenamiento establecido para los descensos.

Los valores asociados a la recarga superficial, lateral y subterránea de cada zona, se entregan en el Anexo E6, para cada escenario de cambio climático.

6.4.3 Interacción río – acuífero

6.4.3.1 Afloramiento en ríos y esteros

A continuación se muestran y analizan los valores de las tasas de afloramiento promedio (en [mm/día]), que se producen en los ríos y esteros de cada uno de los sectores acuíferos. En este caso la tasa se calculó dividiendo el caudal en [m³/día], que entrega Visual Modflow, por el área de cada sector. Este traspaso de caudal a tasa, se hizo para que los resultados entre los sectores puedan ser comparables.

En la Figura 6.43 se observa que la tasa de afloramiento del sector 8, como mínimo dobla al valor que le sigue (sectores 4 ó 6 según el escenario). También se verifica que para los sectores 2 y 5 la tasa es prácticamente nula.

En la Figura 6.44 se muestra la variación del afloramiento con respecto al Período Base, que permite comparar las magnitudes de cambio en cada uno de los escenarios. En dicha figura se observa que los sectores en los que más disminuye el afloramiento son el 3 y el 6, lo cual tiene cierta correspondencia con el caso de la recarga total (ver Figura 6.42), para el cual los mismos sectores son los que experimentan las mayores disminuciones.

También se observa que todos los sectores (salvo en los Escenarios 4 y 5) experimentan una disminución del afloramiento con respecto a la situación inicial.

Al igual que para la recarga, en la Tabla 6.18 se entregan los valores de variación porcentual.

De estos valores se puede concluir que las disminuciones de afloramiento son muy significativas, alcanzándose valores cercanos al 80% en los sectores 2 y 3. De hecho, en tales sectores no hay ningún porcentaje menor al 50% de reducción. En términos porcentuales, los sectores menos afectados son el 8, 9 y 13. También se observa que los sectores intermedios y bajos (4, 8, 9, 10, 11, 12 y 13) se ven menos afectados que los altos (1, 2, 3, 5, 6 y 7).

Figura 6.43
Tasa de Afloramiento por sector acuífero [mm/día]

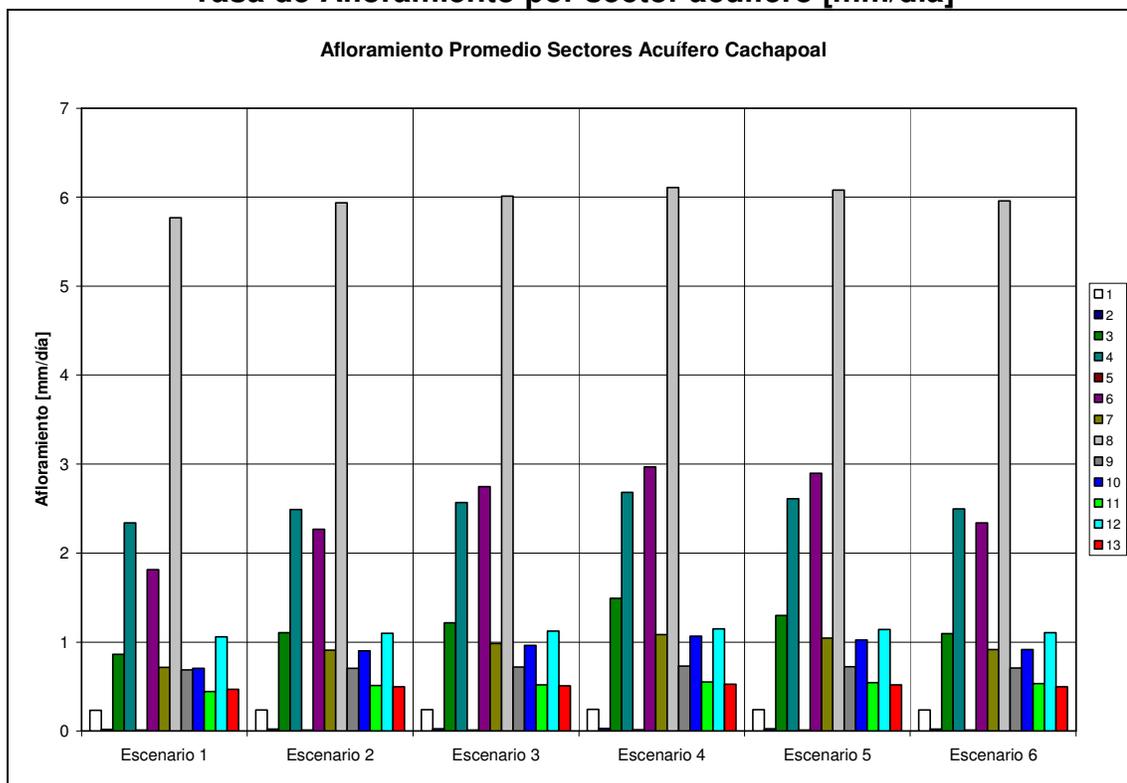
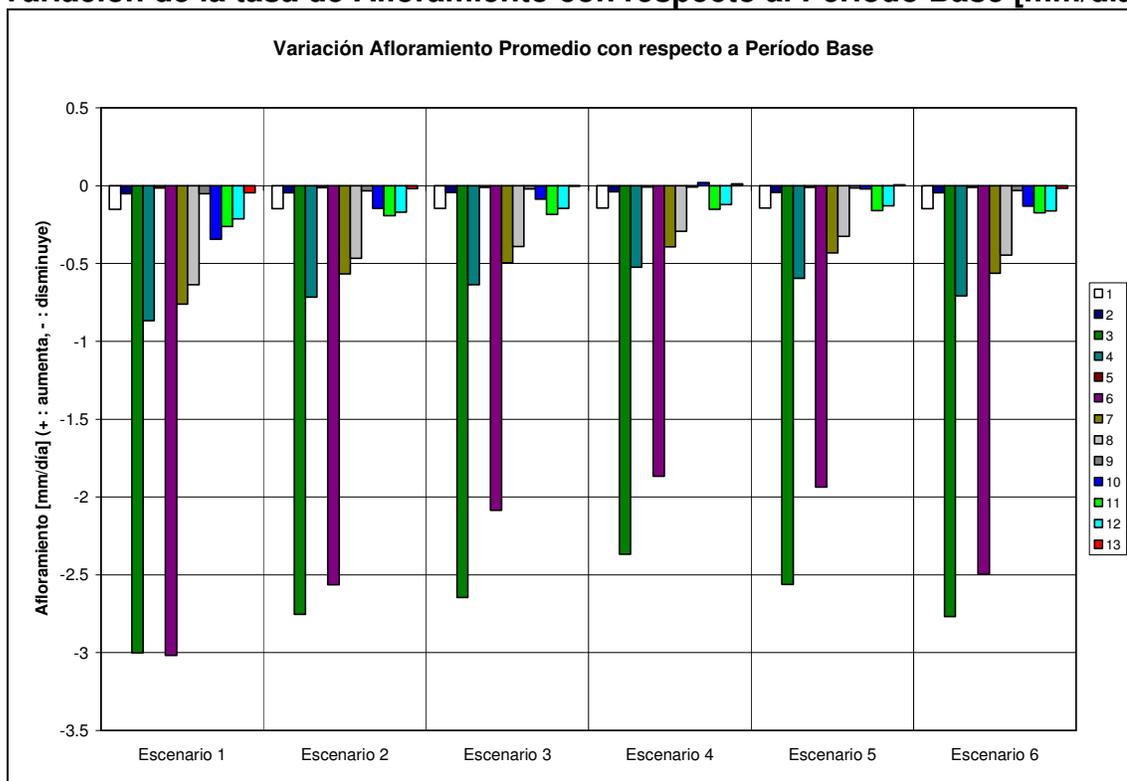


Figura 6.44
Variación de la tasa de Afloramiento con respecto al Período Base [mm/día]



Si se establece un ordenamiento de todos los escenarios, de mayor a menor afección, éste sería el siguiente: Escenario 4, Escenario 5, Escenario 3, Escenario 6, Escenario 2 y Escenario 1. Estos resultados coinciden plenamente con el análisis hecho en el acápite 5.3.6.4, en cuanto a los escenarios que deberían ser más o menos favorables, desde el punto de vista de su influencia en los recursos hídricos; y al ordenamiento establecido para los descensos y la recarga, lo cual es bastante lógico, ya que en aquellos escenarios en que hay menores descensos y más recarga, se tendrán mayores niveles de afloramiento.

Tabla 6.18
Variación porcentual de la tasa de Afloramiento con respecto al Período Base

Sector	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
1	-39.6%	-38.7%	-38.1%	-37.4%	-37.5%	-38.7%
2	-74.8%	-68.0%	-65.1%	-57.6%	-62.9%	-68.2%
3	-77.7%	-71.3%	-68.5%	-61.4%	-66.4%	-71.7%
4	-27.0%	-22.3%	-19.9%	-16.3%	-18.6%	-22.1%
5	-64.6%	-55.9%	-50.5%	-43.7%	-47.4%	-55.1%
6	-62.4%	-53.0%	-43.1%	-38.6%	-40.1%	-51.6%
7	-51.6%	-38.4%	-33.5%	-26.6%	-29.3%	-38.1%
8	-9.9%	-7.3%	-6.1%	-4.6%	-5.1%	-7.0%
9	-7.0%	-4.5%	-3.0%	-1.1%	-2.0%	-4.2%
10	-32.8%	-13.9%	-8.2%	1.8%	-2.2%	-12.6%
11	-37.1%	-27.6%	-26.3%	-21.7%	-22.8%	-24.7%
12	-16.7%	-13.4%	-11.5%	-9.6%	-10.2%	-12.7%
13	-8.7%	-3.7%	-0.7%	2.5%	1.3%	-3.3%

Nota: en rojo se destacan todos los porcentajes de 10% o más de reducción, en negro están los porcentajes de reducción menores a 10% y en azul los porcentajes de aumento.

6.4.3.2 Infiltración en ríos y esteros

A continuación se muestran y analizan los valores de las tasas de infiltración promedio (en [mm/día]), que se producen en los ríos y esteros de cada uno de los sectores acuíferos. En este caso la tasa se calculó dividiendo el caudal en [m³/día], que entrega Visual Modflow, por el área de cada sector. Este traspaso de caudal a tasa, se hizo para que los resultados entre los sectores puedan ser comparables.

En la Figura 6.45 se observa que la tasa de infiltración de los sectores 3 y 5, son bastante superiores a las tasas del resto de los sectores. En todos los otros casos, los valores son bastante pequeños para todos los escenarios.

En la Figura 6.46 se muestra la variación de la infiltración con respecto al Período Base, que permite comparar las magnitudes de cambio en cada uno de los escenarios. En dicha figura se observa que, los sectores en los que más aumenta la infiltración son el 3 y el 5. También se verifica que todos los sectores experimentan un aumento con respecto a la situación inicial.

Figura 6.45
Tasa de Infiltración por sector acuífero [mm/día]

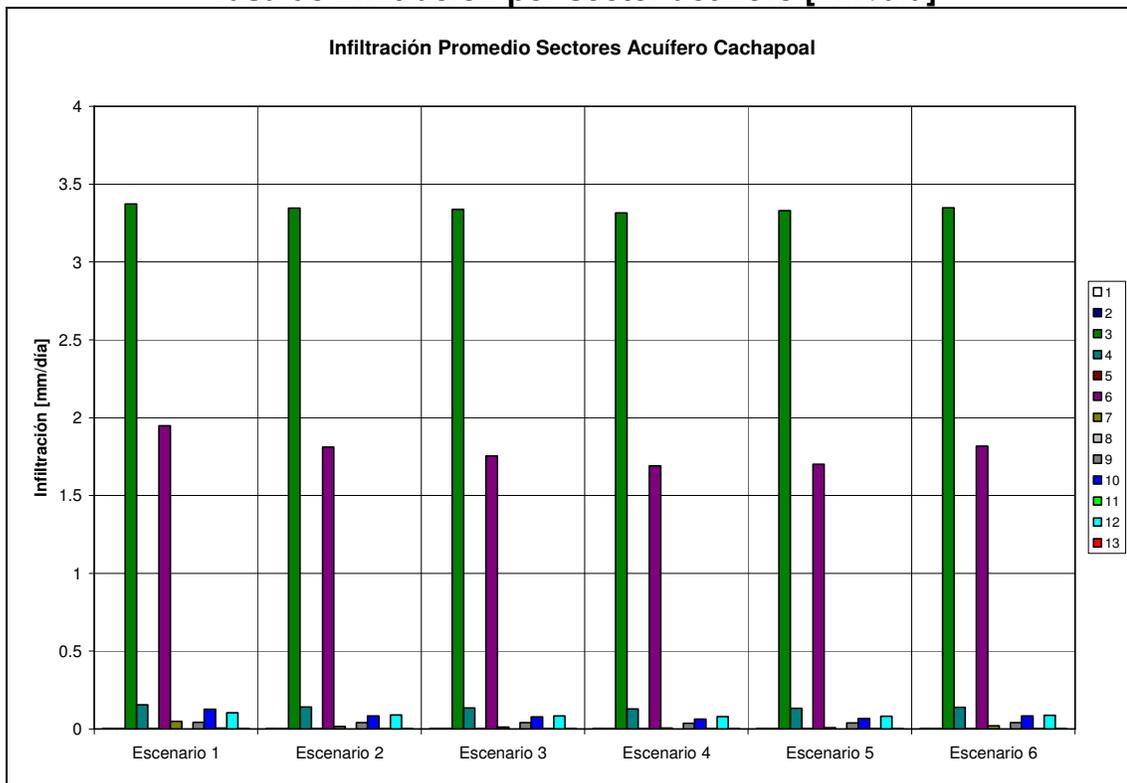
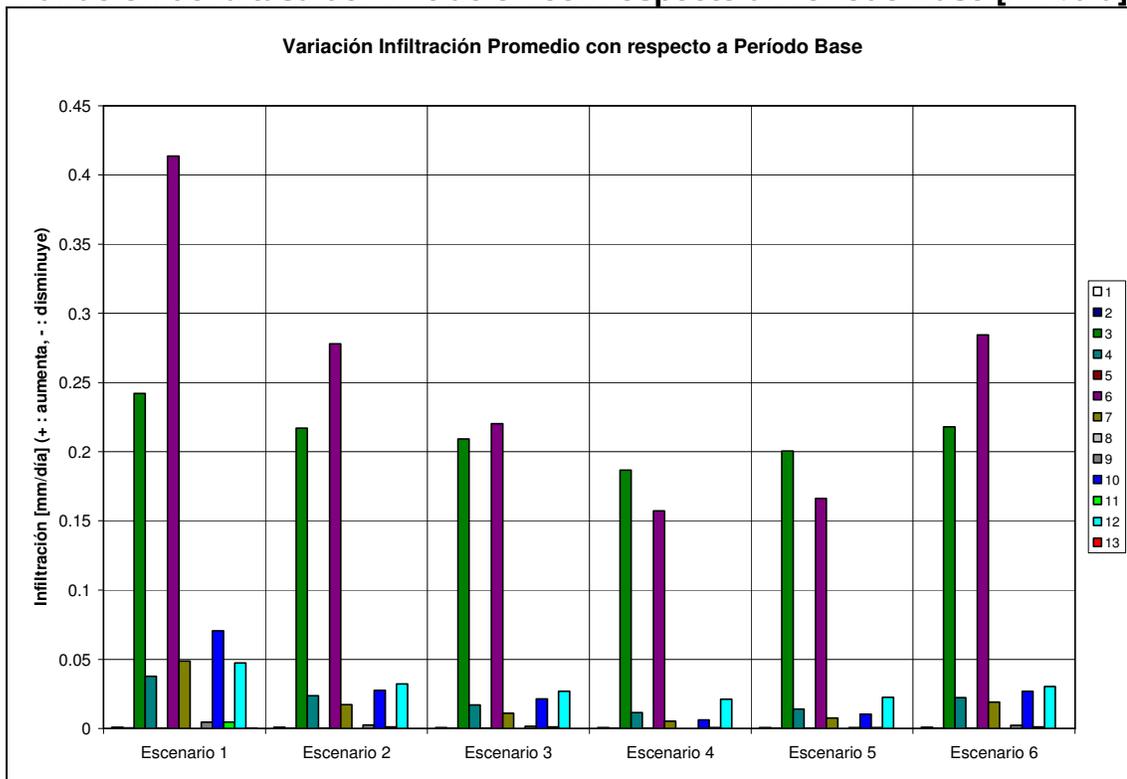


Figura 6.46
Variación de la tasa de Infiltración con respecto al Período Base [mm/día]



Al igual que para el afloramiento, en la Tabla 6.19 se entregan los valores de variación porcentual (no se usa el criterio de los colores, ya que en este caso todo es aumento).

Tabla 6.19
Variación porcentual de la tasa de Infiltración con respecto al Período Base

Sector	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4	Escenario 5	Escenario 6
1	25.3%	23.8%	22.7%	21.5%	21.7%	23.7%
2	34.3%	28.6%	25.8%	19.5%	24.6%	28.5%
3	7.7%	6.9%	6.7%	6.0%	6.4%	7.0%
4	32.1%	20.1%	14.4%	9.7%	11.9%	19.0%
5	16.9%	13.7%	12.1%	10.4%	11.4%	13.6%
6	27.0%	18.1%	14.4%	10.3%	10.8%	18.6%
7	---	---	---	---	---	---
8	---	---	---	---	---	---
9	11.9%	6.6%	4.1%	0%	1.9%	6.0%
10	125.4%	48.8%	37.9%	11.0%	18.1%	47.5%
11	786.6%	197.6%	187.8%	88.6%	90.6%	204.6%
12	81.8%	55.9%	46.5%	36.7%	39.0%	52.5%
13	12.2%	7.3%	4.7%	2.4%	3.7%	6.5%

De estos valores se observa que los mayores aumentos porcentuales se dan en los sectores bajos de la cuenca. Aunque en términos generales, en todo el acuífero la infiltración aumenta con respecto a los valores iniciales (los sectores 7 y 8 no tienen valores asociados, ya que la infiltración en el Período Base es 0, por lo que el aumento porcentual en dichos casos sería infinito).

Con respecto a los escenarios, en este caso obviamente el Escenario 1 es el que registra mayores aumentos y el Escenario 4 los menores, esto está directamente relacionado con lo observado en los descensos, recarga y afloramiento, ya que entre menor sea el nivel de la napa (asociado a menores recargas), menor será el afloramiento y mayor la infiltración desde el acuífero al río.

6.4.3.3 Tasa de Infiltración Neta

Se define como tasa infiltración neta a la diferencia entre la tasa de infiltración y la tasa de afloramiento (se puede hacer directamente la diferencia, porque en ambos casos para calcular las tasas de cada sector, se dividió por la misma área). Los valores positivos indican que en términos netos hay infiltración y los valores negativos indican afloramiento.

En la Figura 6.47 se muestra la infiltración neta promedio, para todos los sectores acuíferos y para todos los escenarios. Además se incluyen los valores del Período Base, para así apreciar de manera gráfica, los cambios que se experimentan en el sentido del flujo. En la Figura 6.48 se muestran las variaciones de esta infiltración, con respecto al Período Base.

Figura 6.47
Tasa de Infiltración neta por sector acuífero [mm/día]

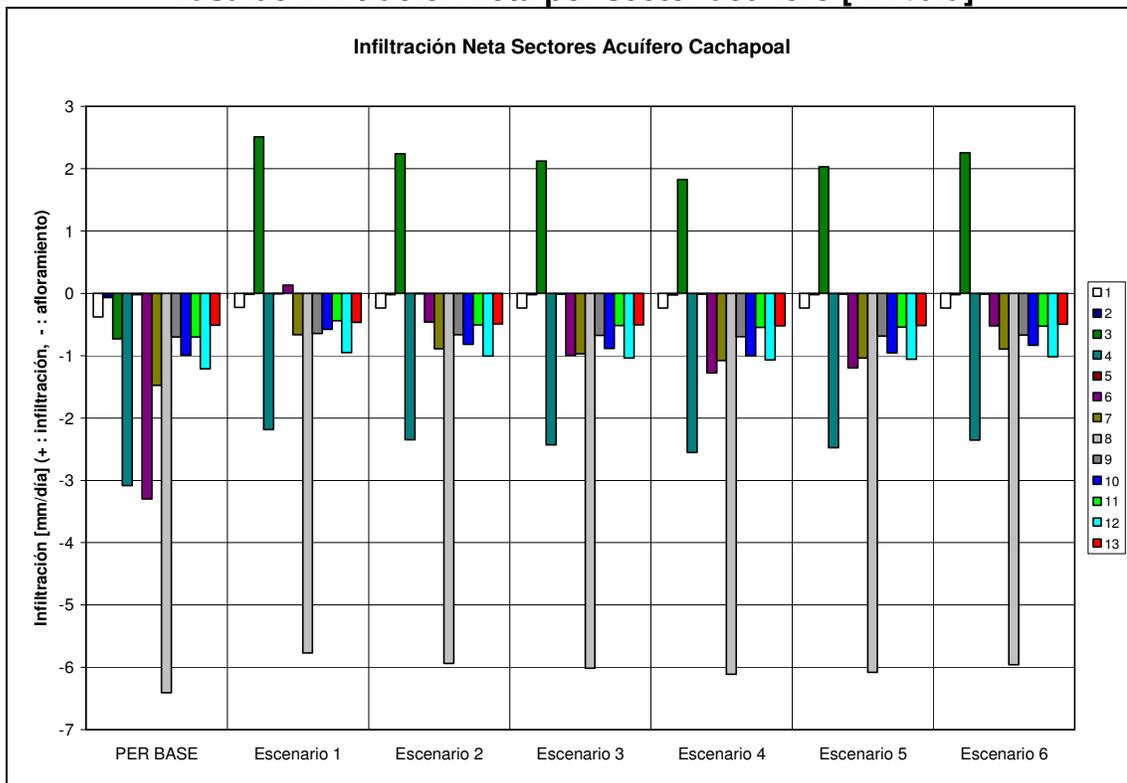
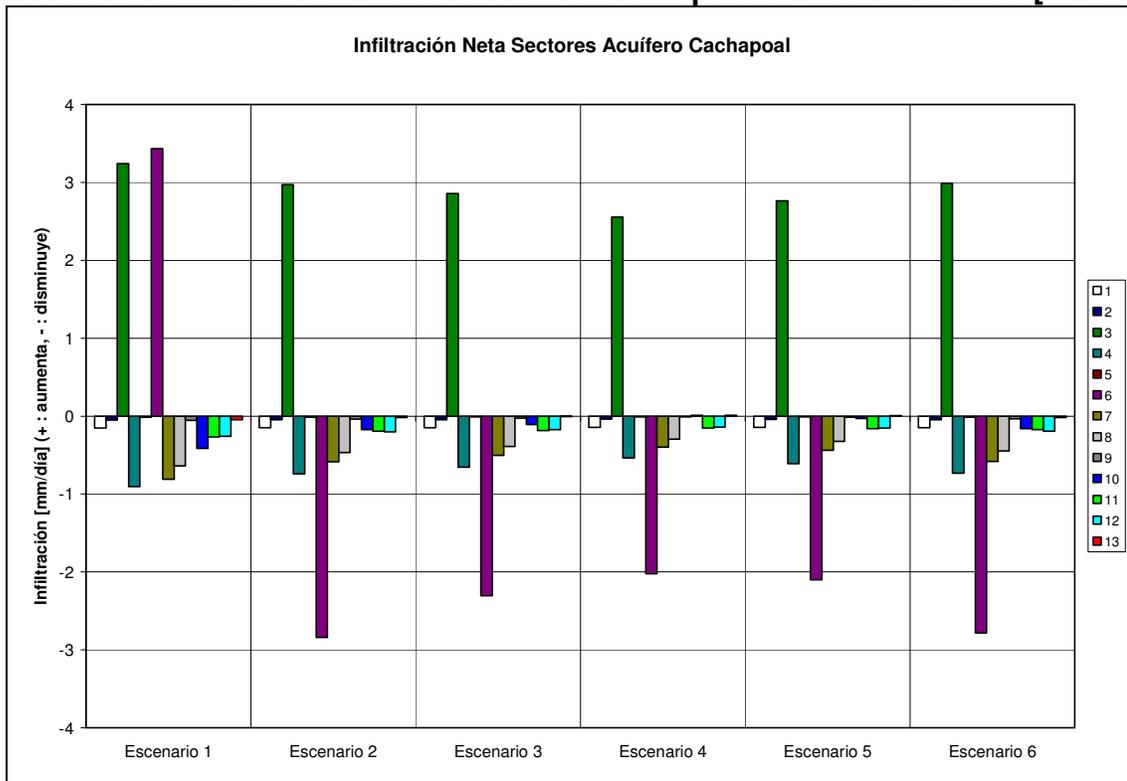


Figura 6.48
Variación de la tasa de Infiltración neta con respecto al Período Base [mm/día]



En la Figura 6.47 se observa que, pese a que el afloramiento disminuye y la infiltración aumenta, el valor neto se mantiene negativo (a excepción de los sectores 3 y 6), es decir, existe afloramiento. En el sector 3, para todos los escenarios existe un cambio con respecto al Período Base, que se refiere a que los niveles piezométricos descendieron de tal manera que los flujos son ahora desde el río al acuífero (sentido inverso al inicial), es decir, en términos netos existe infiltración. Para el Sector 6, en el Escenario 1 también se produce la misma situación.

En relación a las variaciones con respecto al Período Base, en la Figura 6.48 se observa que en los únicos casos en que hay “aumento” (en estricto rigor se pasa de afloramiento a infiltración neta), son los mencionados en el párrafo anterior. En todo el resto existen disminuciones en los niveles de afloramiento neto.

En términos generales, que haya una disminución en los afloramientos y un aumento de la infiltración, son indicadores inequívocos de que, durante el período de simulación asociado a los escenarios, el nivel del acuífero disminuye. Lo cual podría estar asociado a los niveles de explotación del sistema (que nominalmente se mantiene constante durante los 30 años) y a la disminución en la recarga total.

Por lo tanto, para la infiltración neta, no es posible decir directamente que existen efectos adversos del cambio climático, solamente se infiere que éste puede influir en que las variaciones se incrementen, por las disminuciones en los niveles de recarga del sistema acuífero.

6.4.4 Satisfacción de la Demanda

En este acápite se presentan, los resultados asociados a la satisfacción de la demanda promedio, de los distintos usos que se dan al recurso hídrico subterráneo, que fueron descritos en el Capítulo 4.

Es importante mencionar que no se hace un análisis separado de la satisfacción de la demanda para los distintos usos (riego, agua potable, industrial y minero), ya que Visual Modflow entrega la satisfacción total de la demanda de los pozos y no por grupos, por lo que resulta impracticable una separación de ésta.

También cabe destacar que el sector 1 no es analizado en este ítem, ya que administrativamente no pertenece a la cuenca del Cachapoal.

Tal como fue indicado en el Capítulo 5, para los escenarios de cambio climático la explotación de los recursos hídricos subterráneos se modifica, ya que en dichos casos todos los pozos funcionan desde el primer minuto de la operación, en cambio en el Período Base, según la fecha de ingreso, no necesariamente todos operan desde el comienzo de la simulación.

Esta modificación se observa en la Tabla 6.20, donde se aprecia la diferencia entre los caudales nominales del Período Base (Nom PB) y de los escenarios (Nom Esc).

Tabla 6.20
Demandas nominales y satisfechas Período Base y escenarios [m³/s]

Sector	Nom PB	Nom Esc	Per Base	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6
2	0.65	0.71	0.55	0.71	0.67	0.68	0.66	0.65	0.53
3	0.51	0.51	0.47	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
4	0.70	0.70	0.63	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
5	0.41	0.41	0.34	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41	0.41
6	0.08	0.10	0.08	0.10	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
7	0.24	0.30	0.21	0.30	0.26	0.26	0.25	0.25	0.26
8	0.09	0.12	0.09	0.12	0.11	0.11	0.10	0.10	0.10
9	0.12	0.12	0.09	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
10	2E-06	2E-06	1E-06	9E-07	9E-07	9E-07	9E-07	9E-07	4E-07
11	0.81	0.79	0.53	0.60	0.61	0.61	0.60	0.61	0.53
12	0.24	0.24	0.23	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
13	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

Se observa que si bien hay algunos sectores en que se modifica la demanda nominal, en otros los valores se mantienen iguales e incluso descienden (sectores 10 y 11). También se observan las marcadas diferencias, que hay entre las demandas de los sectores, lo cual está claramente asociado al tamaño de cada uno de éstos, lo que incide en la cantidad de pozos incluidos dentro de sus áreas de influencia.

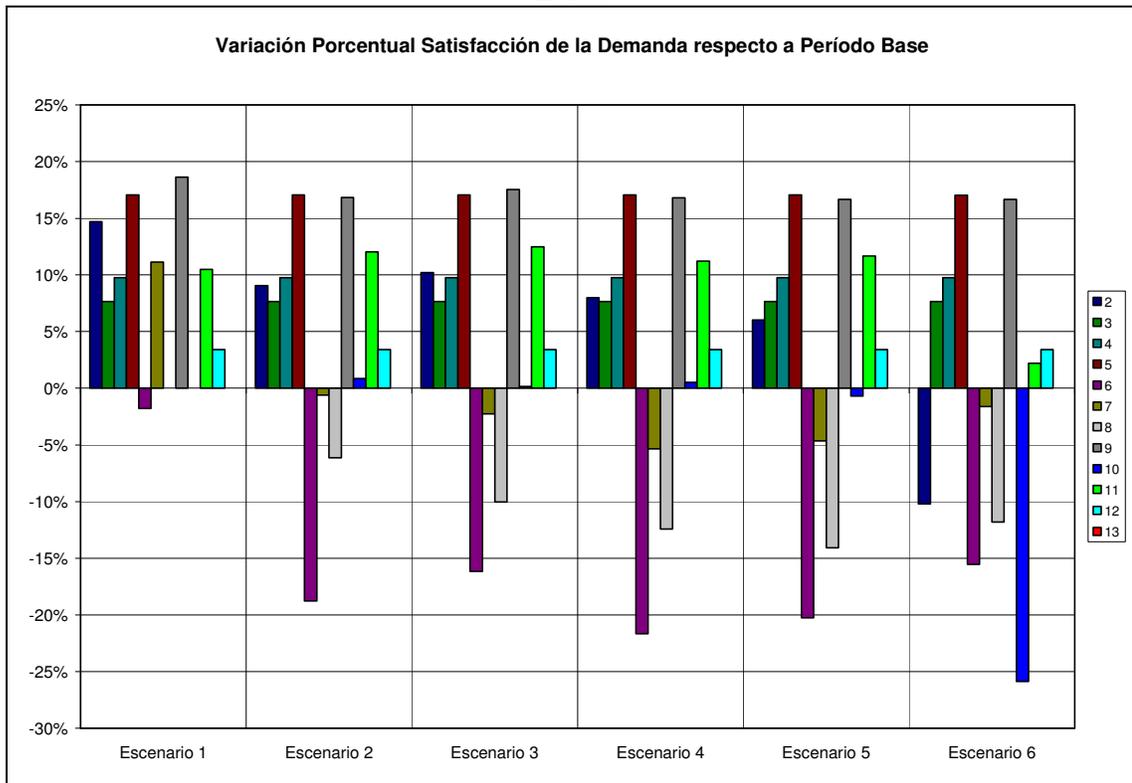
En la Tabla 6.21 se muestran los porcentajes de satisfacción de la demanda, para los distintos escenarios y el Período Base, de esta manera los resultados son más comparables que si se analizan los caudales satisfechos de la tabla anterior (que tienen distintos valores nominales).

De los valores de la mencionada tabla se observa que en términos generales, la satisfacción de la demanda aumenta con respecto al Período Base. Esto se confirma en la Figura 6.49, donde se muestra la variación del porcentaje de satisfacción de la demanda, de los escenarios con respecto al Período Base (valor porcentual de los escenarios menos valor porcentual del Período Base).

Tabla 6.21
Porcentaje de satisfacción de la demanda Período Base y escenarios

Sector	Per Base	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6
2	85.30%	100%	94.34%	95.53%	93.30%	91.32%	75.09%
3	92.35%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
4	90.23%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
5	82.95%	100%	100%	100%	100%	100%	99.99%
6	97.89%	96.10%	79.12%	81.74%	76.23%	77.63%	82.33%
7	88.86%	100%	88.27%	86.60%	83.50%	84.22%	87.25%
8	100%	100%	93.86%	89.95%	87.56%	85.92%	88.20%
9	81.37%	100%	98.20%	98.90%	98.19%	98.02%	98.04%
10	50.00%	50.00%	50.84%	50.15%	50.53%	49.32%	24.12%
11	64.82%	75.31%	76.86%	77.31%	76.04%	76.48%	67.02%
12	96.59%	100%	100%	100%	100%	100%	99.99%
13	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Figura 6.49
Variación del porcentaje de satisfacción de la demanda con respecto al Período Base



En la Figura 6.49, se observa que para la mayoría de los sectores, existe un aumento de satisfacción porcentual de la demanda. Es importante tener claro que para sectores como el 11, este aumento está asociado a que la demanda nominal, disminuye con respecto al Período Base. Para el sector 10 también hay una reducción de la demanda nominal, pero en dicho caso de todas maneras se observan disminuciones en los porcentajes de satisfacción. Para este último sector se aprecia que para el Escenario 6 hay una fuerte reducción porcentual, lo que se atribuye a que al ser tan pequeños los caudales de demanda, cualquier variación es muy importante en términos de porcentaje.

Por otro lado, para sectores como el 9, se observa que pese a que hay un aumento en la demanda nominal, el porcentaje de satisfacción aumenta con respecto al Período Base. Lo mismo ocurre para sectores en los que dicha demanda se mantiene igual (sectores 3, 4 y 5 por ejemplo), pero el nivel de satisfacción aumenta para todos los escenarios.

También resulta interesante ver que, de los sectores que experimentan disminuciones en los porcentajes de satisfacción, la mayoría están asociados al módulo Claro de Rengo (Sectores 6, 7, 8 y 10), lo que está relacionado a que en dichos sectores se experimentan aumentos de la demanda nominal.

Con respecto a los resultados para cada escenario, se observa que el Escenario 1 es el que experimenta mayores aumentos de los porcentajes de satisfacción de la demanda, versus el Escenario 4, el cual experimenta las mayores disminuciones.

Con respecto a la demanda de agua potable, se observa que para el sector 3, donde se ubica la Planta Los Nogales, la satisfacción de la demanda, aumenta en todos los escenarios con respecto al Período Base, por lo tanto, la componente subterránea del abastecimiento de dicha planta no es afectada.

Por último, también es importante mencionar que, de los resultados de la Tabla 6.20, se observa que en términos generales, los caudales de satisfacción en los escenarios son mayores a los del Período Base. En aquellos sectores en que creció la demanda nominal, el aumento pasa por este incremento en la explotación. Por otro lado, también hay sectores en que la demanda nominal se mantuvo igual, y que de todas maneras experimentan un alza en los caudales satisfechos, la justificación se entrega en el acápite 6.4.5.

6.4.5 Balance Hídrico Subterráneo

En el presente acápite, se muestra y analiza el balance hídrico promedio para el acuífero Cachapoal. Este balance fue extraído de los resultados que entrega Visual Modflow.

Tal como se indicó en el comienzo del acápite 6.4, para efectos del balance hídrico no se incluye el sector de Codegua, sólo se considera el flujo subterráneo que ingresa desde dicho sector al 2.

Como en este balance se incluyen resultados de recarga, afloramiento, infiltración y demanda satisfecha, se realiza un análisis conjunto (utilizando también lo visto en los acápites 6.4.1 a 6.4.4), de cómo se ve afectado el sistema hídrico subterráneo, ya sea por la explotación mantenida durante 30 años o por los posibles efectos del cambio climático.

En la Tabla 6.22 se muestra el balance hídrico para todo el acuífero para el Período Base y los escenarios.

Se observa que para los escenarios, la suma de la recarga lateral y subterránea disminuye considerablemente con respecto al valor del Período Base. También se observa que la recarga superficial disminuye, pero esta reducción no es tan considerable como en el primer caso. Estos resultados son acorde a lo observado en el acápite 6.4.2.

Con respecto a dichas recargas, resulta interesante notar que mientras menor es el valor total de ésta (suma de recarga superficial, lateral y subterránea), mayor es el valor del afloramiento y menor el de infiltración. Esto se explica porque al haber más recarga, los niveles del acuífero se elevan, lo que produce un aumento en el gradiente entre el nivel de energía del acuífero y del río, lo que induce a mayores valores de afloramiento neto. Esto se ejemplifica a continuación para el Período Base y el Escenario 1.

- Recarga Total (RT) = Recarga Superficial + Recarga Lateral
- Afloramiento Neto (AN) = Afloramiento – Infiltración

$$RT \text{ Período Base} = 24.6 > RT \text{ Escenario 1} = 18.4 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

$$AN \text{ Período Base} = 26.4 > AN \text{ Escenario 1} = 15.7 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Con respecto al caudal neto extraído del almacenamiento del acuífero (almacenamiento entrada menos almacenamiento salida), es importante destacar que éste, depende de la capacidad del sistema de cubrir los requerimientos a los que está sometido. Para verlo de manera más clara, se usan como ejemplo los resultados del Período Base y los Escenarios 1 y 4.

La recarga total para estos tres casos es:

$$RT \text{ Período Base} = 24.6 > RT \text{ Escenario 4} = 22.9 > RT \text{ Escenario 1} = 18.4 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

El afloramiento neto:

$$AN \text{ Período Base} = 26.4 > AN \text{ Escenario 4} = 19.5 > AN \text{ Escenario 1} = 15.7 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Se observa que para los escenarios, la recarga total es mayor que el afloramiento neto, lo cual no es así para el Período Base.

Las salidas desde el acuífero también consideran la demanda por pozos (DP) y la conexión al Embalse Rapel (CER), por lo tanto, la salida total (ST = AN + DP + CER) en cada caso es:

$$ST \text{ Período Base} = 29.9 > ST \text{ Escenario 4} = 23.5 > ST \text{ Escenario 1} = 19.8 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

La entrada total (ET = RT + BC + FS1) al sistema acuífero, considera también el aporte de los bordes constantes (BC) y el flujo desde el sector 1 (FS1):

$$ET \text{ Período Base} = 24.9 > ET \text{ Escenario 4} = 23.1 > ET \text{ Escenario 1} = 18.7 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Claramente, se observa que las entradas al sistema no son suficientes para cubrir las salidas, por lo tanto, en cada caso es necesario extraer agua desde el almacenamiento.

Y los almacenamientos de entrada (AE), de salida (AS) y neto (CNA = AE - AS):

$$AE \text{ Período Base} = 12.9 > AE \text{ Escenario 4} = 8.2 > AE \text{ Escenario 1} = 7.4 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

$$AS \text{ Período Base} = 7.9 > AS \text{ Escenario 4} = 7.8 > AS \text{ Escenario 1} = 6.4 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

$$CNA \text{ Período Base} = 5.0 > CNA \text{ Escenario 1} = 1.1 > CNA \text{ Escenario 4} = 0.4 \text{ [m}^3/\text{s]}$$

Si se suman las entradas (ET) con el caudal neto extraído desde el almacenamiento (CNA), se verifica que el sistema es capaz de cubrir los caudales de salida.

Por lo tanto, se observa que para mayores niveles de recarga, el caudal de entrada (AE) desde el almacenamiento es mayor en el Período Base, que en el Escenario 4 y en el 1. Esto se debe a que el gradiente asociado al afloramiento neto (que se supone debería ser mayor en el Período Base, luego el Escenario 4 y por último el Escenario 1) implica que se requiere más agua, la que es obtenida desde el almacenamiento, de manera más rápida que desde algún punto más lejano del acuífero.

Posteriormente, se aprecia que el caudal de salida (AS) hacia el almacenamiento sigue el mismo ordenamiento, pero para el Período Base el caudal no es mucho mayor que el de los escenarios. Esto se debe a que el modelo, si bien “devuelve” al almacenamiento el agua que requirió de manera rápida, esta devolución es porcentualmente menor (con respecto a AE) para el Período Base, ya que en dicho caso los requerimientos son mayores y la recarga, aunque es más grande, no es suficiente para cubrirlos.

El caudal neto extraído del almacenamiento (CNA) no sigue el mismo ordenamiento, ya que como se dijo anteriormente depende de la recarga y los requerimientos del sistema. Para el Período Base, pese a tener más recarga se requiere más de este caudal, ya que la salida es mayor. Luego vendría el Escenario 1, que requiere menos extracción del almacenamiento, ya que las entradas son suficientes para cubrir un mayor porcentaje de la salida. Por último está el Escenario 4, en el cual se necesita aún menos extracción.

La disminución del afloramiento, junto con el aumento de la infiltración, permiten que para los escenarios, el sistema sea capaz de abastecer el aumento de demanda con respecto al Período Base, pese a que la recarga al sistema disminuye.

Además, el aumento de la infiltración y la disminución del afloramiento, implican un nivel de afección mayor a los caudales superficiales, con respecto a la situación inicial.

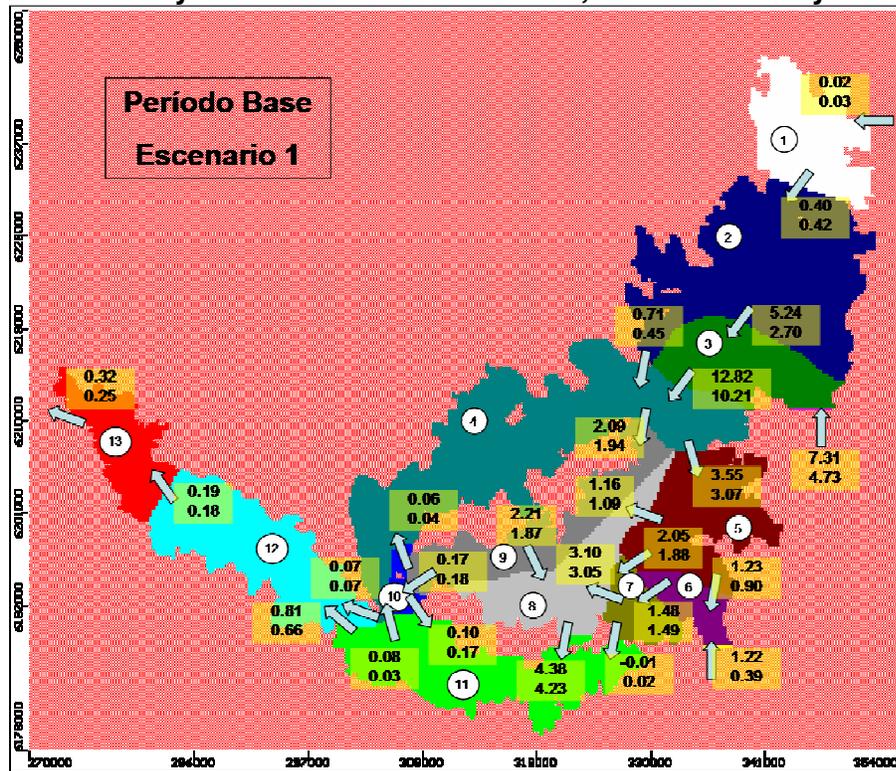
Continuando con el análisis de los resultados de la Tabla 6.22, con respecto a la conexión con el Embalse Rapel, se aprecia que los caudales disminuyen para los escenarios, esto está asociado directamente con la disminución de niveles observada en el acápite 6.4.1. En la Figura 6.34, se observa que para el sector 13, donde se ubica la mencionada conexión, la disminución de los niveles (a nivel promedio) es muy baja, registrándose incluso aumentos para algunos escenarios.

En las Figuras 6.50 a 6.55 se muestran los flujos de entrada y salida promedio para cada uno de los sectores acuíferos, para todos los escenarios. El valor superior corresponde al flujo en el Período Base y el inferior al flujo en el escenario respectivo.

En dichas figuras se observa que en cada escenario, prácticamente todos los flujos entre sectores disminuyen con respecto al Período Base. Los únicos casos en que hay aumento son: el flujo de entrada al sector 1, el flujo desde este sector al 2, el flujo entre los sectores 10 y 11 y por último hay un cambio en el sentido de flujo entre los sectores 7 a 11 (en el Período Base era de 11 a 7). En términos generales se aprecia que para los escenarios existe menos volumen de agua circulando en el acuífero que en el caso base, lo cual está asociado a las reducciones en las conexiones con el Cachapoal Alto y con el Claro de Rengo Alto, además de las reducciones de la recarga superficial.

Figura 6.50

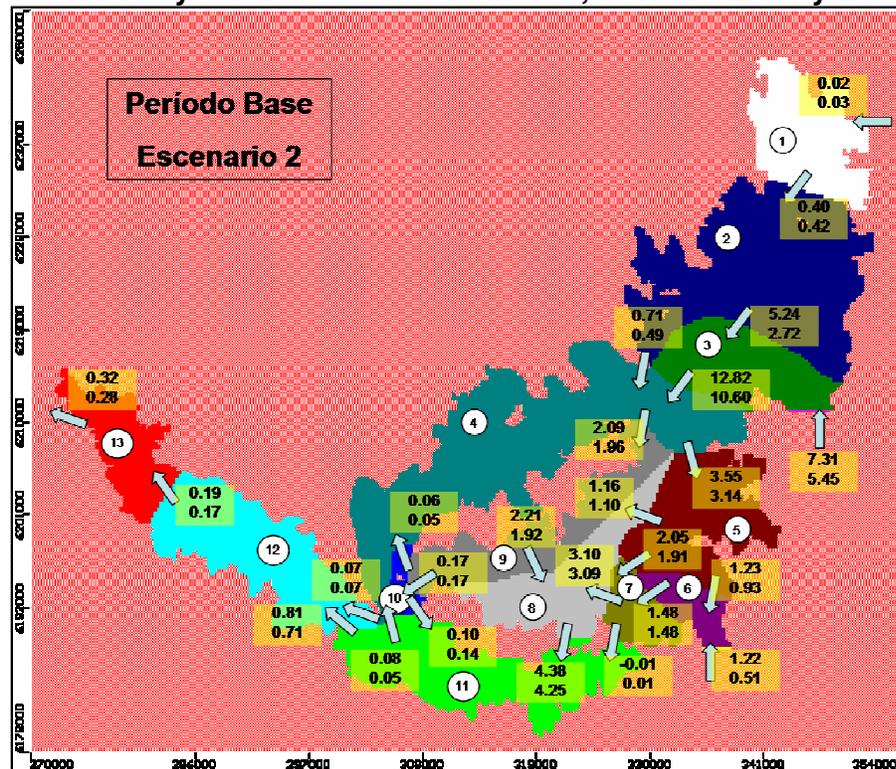
Flujos de entrada y salida sectores acuíferos, Período Base y Escenario 1



Fuente: Elaboración Propia.

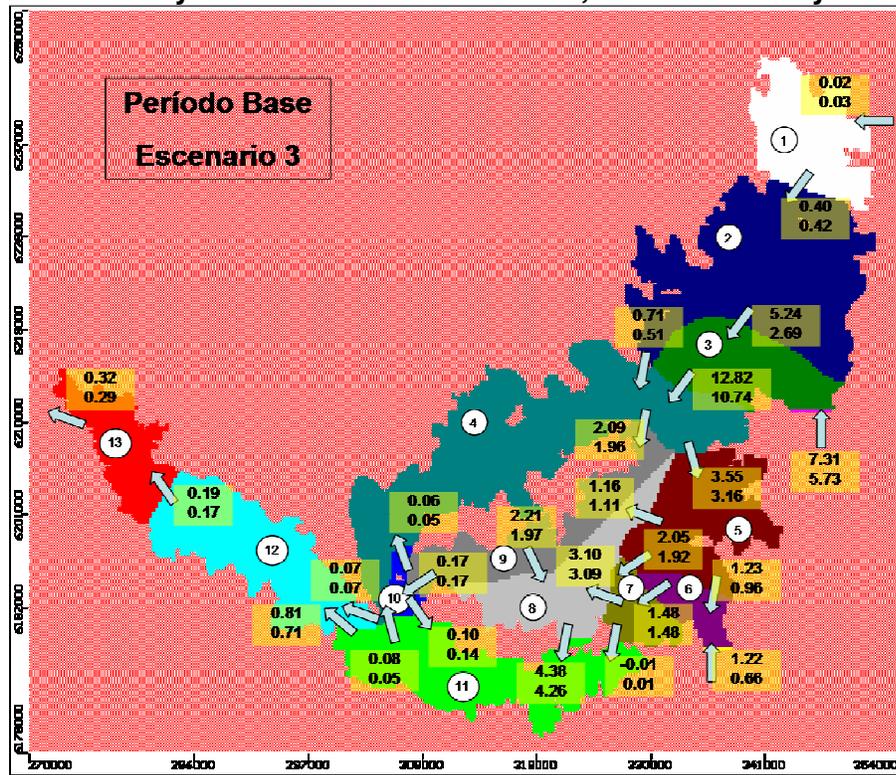
Figura 6.51

Flujos de entrada y salida sectores acuíferos, Período Base y Escenario 2



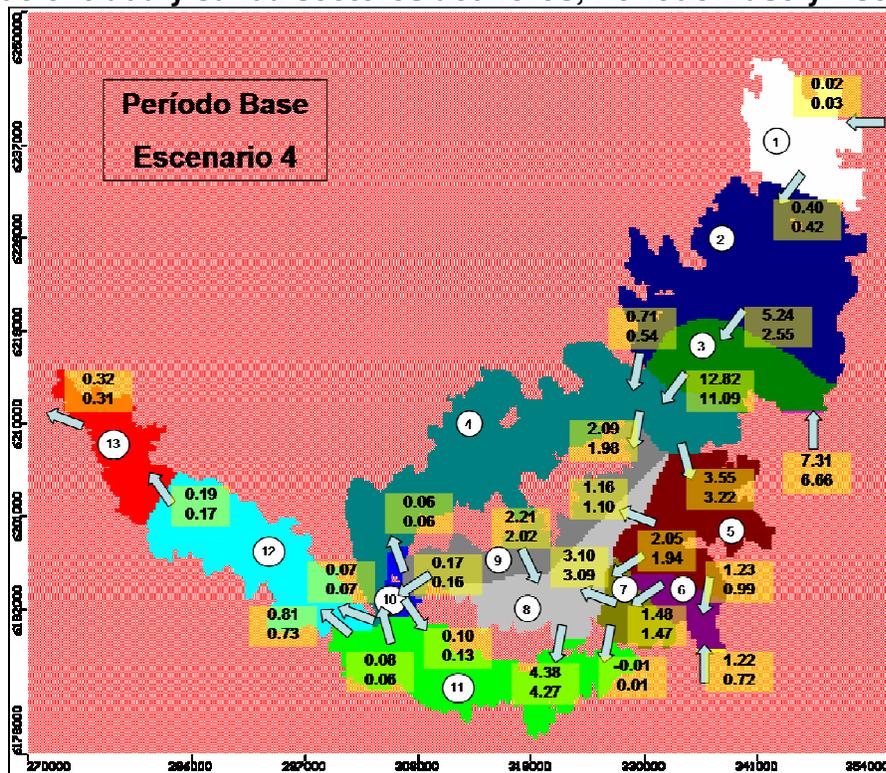
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.52
Flujos de entrada y salida sectores acuíferos, Período Base y Escenario 3



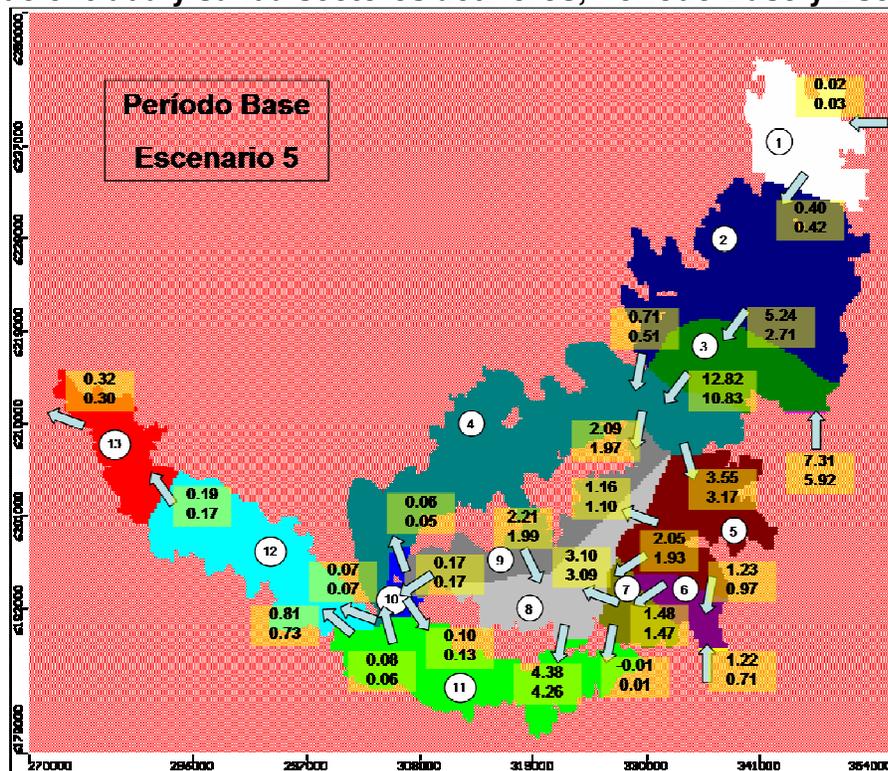
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.53
Flujos de entrada y salida sectores acuíferos, Período Base y Escenario 4



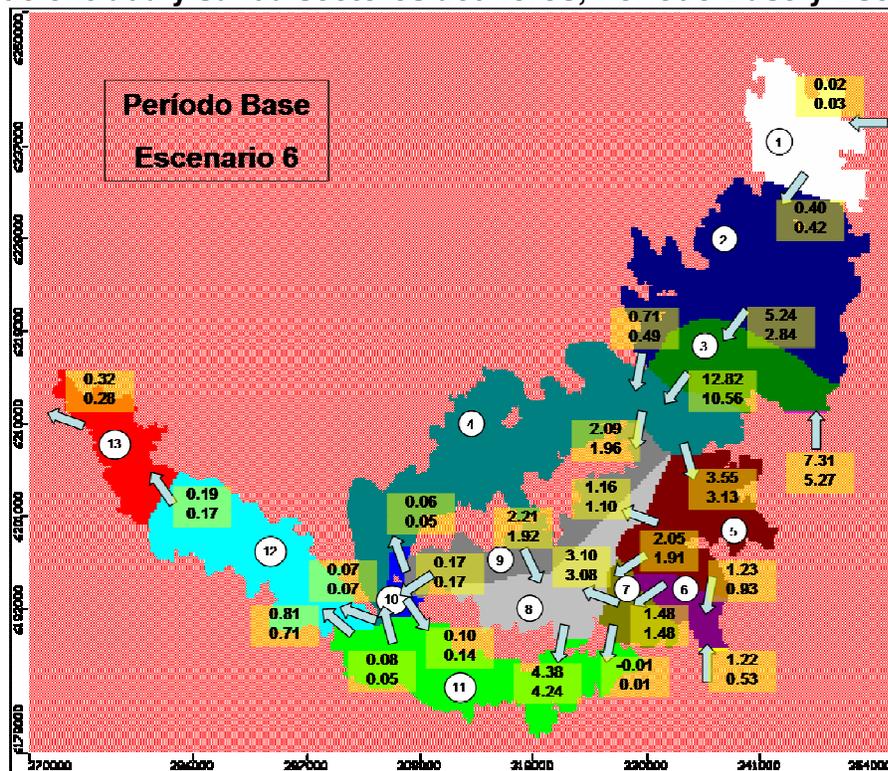
Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.54
Flujos de entrada y salida sectores acuíferos, Período Base y Escenario 5



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 6.55
Flujos de entrada y salida sectores acuíferos, Período Base y Escenario 6



Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se busca aclarar lo esbozado en el acápite 6.4.4, en cuanto a que hay sectores en que la demanda nominal se mantuvo igual, y que de todas maneras experimentan un alza en los caudales satisfechos. Esto se podría justificar porque en el caso del Período Base, al haber más requerimientos asociados al afloramiento, el sistema no puede extraer más desde el almacenamiento, y por lo tanto, no es capaz de abastecer la demanda por pozos. Por otro lado, para los escenarios, como el caudal de afloramiento es menor, en dichos casos no se llega al límite de extracción desde el almacenamiento, y por lo tanto, se puede abastecer la demanda por pozos.

Como complemento a lo analizado en términos de balance, en la Tabla 6.23 se muestra la variación de volumen del acuífero con respecto al valor inicial, tanto para el Período Base como para los escenarios.

Tabla 6.23
Variación volumétrica del acuífero del Cachapoal

	PB	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6
$V_{inicial} [m^3]^*$	1.73E+11	1.65E+11	1.65E+11	1.65E+11	1.65E+11	1.65E+11	1.65E+11
$V_{final} [m^3]^*$	1.65E+11	1.57E+11	1.58E+11	1.58E+11	1.62E+11	1.59E+11	1.59E+11
$(V_{inicial}-V_{final})/V_{inicial}$	4.7%	5.3%	4.3%	4.2%	2.0%	3.7%	4.0%

(*): estos valores no están multiplicados por la porosidad, porque en el porcentaje se simplifica, por lo tanto, no representan el volumen real de agua.

De estos resultados se aprecia que para todos los escenarios (excepto el Escenario 1), se tiene que en los 30 años de simulación, la variación porcentual del volumen de agua contenido en el acuífero, es menor que en los 6 años de simulación del Período Base (el volumen final obviamente es menor en los escenarios, ya que éstos comienzan del valor final del Período Base). Esto claramente indica, que la mayor afección del sistema se da en el comienzo de la operación de éste, y a medida que avanza el tiempo se observa una estabilización, e incluso recuperación para algunos sectores puntuales, aunque también hay sectores que mantienen un descenso más pronunciado (ver Tabla 6.16).

Si se establece un ordenamiento de todos los escenarios, de más a menos favorable, éste sería el siguiente: Escenario 4, Escenario 5, Escenario 6, Escenario 3, Escenario 2 y Escenario 1. Estos resultados coinciden plenamente (con mínimas diferencias) con el análisis hecho en el acápite 5.3.6.4, en cuanto a los escenarios que deberían ser más o menos favorables, desde el punto de vista de su influencia en los recursos hídricos; y al ordenamiento establecido para los descensos, la recarga, afloramiento e infiltración.

6.5 EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA SALIDA DE CADA MÓDULO

En la presente sección se muestran y analizan los resultados para los caudales de salida, a nivel medio mensual, de cada uno de los módulos del modelo de simulación operacional. Es importante mencionar que, al igual que para el caso de las cuencas en régimen natural, para esta sección, los caudales son mostrados en curvas de duración, para así facilitar la comparación de los escenarios con el Período Base, los cuales tienen distintas longitudes de tiempo.

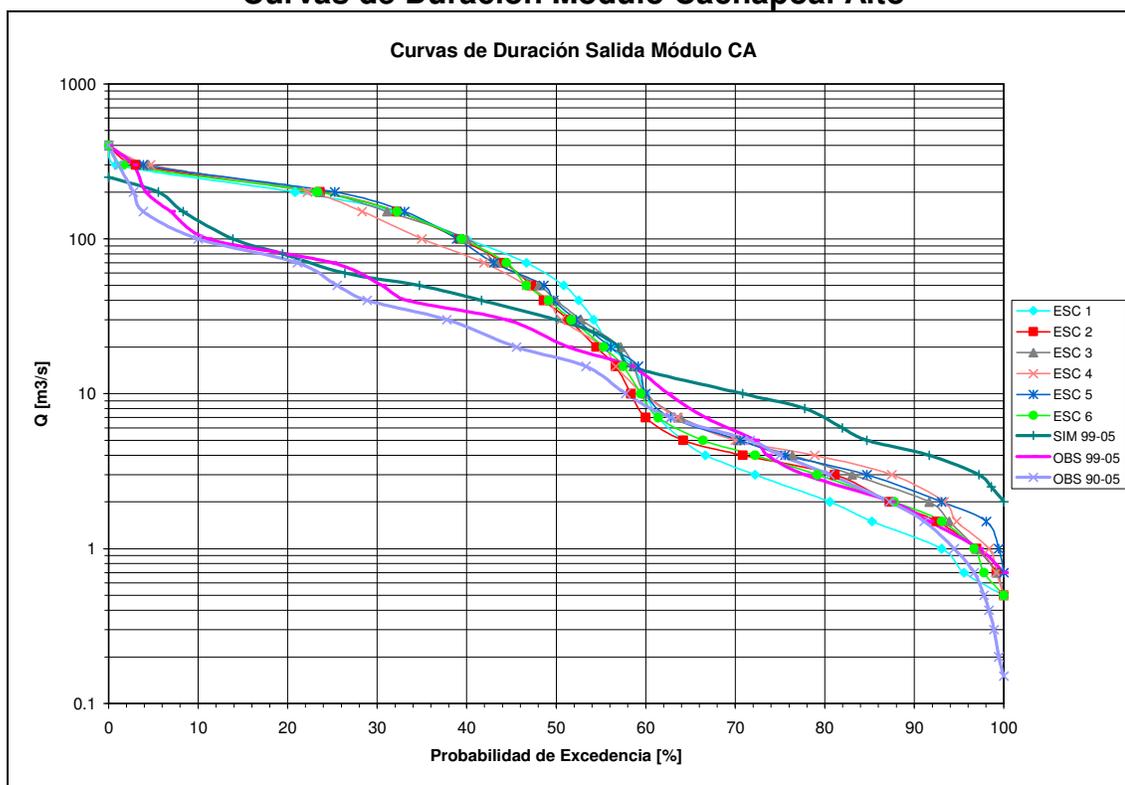
Además, para el módulo Cachapoal Bajo se muestran las curvas de variación estacional para probabilidades de excedencia de 25%, 50% y 75%. En este caso se busca hacer un análisis algo más profundo, ya que este módulo representa la salida de la cuenca del río Cachapoal.

Las curvas de variación estacional para los otros módulos, así como los caudales de salida para todos los casos, se entregan en el Anexo E7.

6.5.1 Módulo Cachapoal Alto (CA)

Se observa que en la Figura 6.56 se incluye una curva para el período observado 1990 – 2005, esto se hace sólo para este caso y para CB, ya que en ambos se tiene más información. Esta curva permite comparar los resultados de los escenarios, con una curva de caudales observados, de un período más largo que el usado para la calibración.

Figura 6.56
Curvas de Duración Módulo Cachapoal Alto



En la Figura 6.56 se observa que para bajas probabilidades de excedencia, los caudales de los escenarios son mayores que los del Período Base (tanto para los observados como lo simulados). En cambio, para altas probabilidades de excedencia, los caudales de los escenarios son similares al mencionado período, a excepción de los valores simulados, que son mayores.

Esto quiere decir que los caudales altos, se observan de manera más frecuente en los escenarios que en el Período Base. Por ejemplo, un caudal de 100 [m³/s], tiene en el

período de observación una probabilidad de 11% (considerando las dos curvas de valores observados), en cambio para los escenarios, en promedio la probabilidad de excedencia es mayor a un 35%.

Por otro lado para los caudales más bajos, la frecuencia de ocurrencia es más pareja en los valores observados que en los de los escenarios. Por ejemplo, para un caudal de 2 [m³/s] la probabilidad de excedencia para el Período Base (considerando sólo las dos curvas de valores observados), es aproximadamente 87%. Para los escenarios, el menor valor es el del Escenario 1 con un 81% aprox. y el mayor valor es 93% aprox. para los Escenarios 4 y 5.

Para el caso de los valores simulados del período de observación, se observa que para probabilidades mayores al 30%, la curva se separa considerablemente de las de valores observados. A contar de dicho valor, para una misma probabilidad los caudales simulados son siempre mayores.

Al igual que en el caso de las cuencas en régimen natural, se podría suponer que, en términos generales, el modelo sobrestima los valores del período de observación, y por lo tanto, si este “error” se mantiene para los escenarios, sus valores también podrían estar sobrestimados. Todo esto implicaría que para los escenarios, los caudales de mayor seguridad de abastecimiento podrían quedar por debajo de los observados, ya que para este rango de valores, la diferencia que se observa entre la curva SIM 99-05 y OBS 99-05 es bastante marcada. Para los caudales de menor seguridad, la diferencia no debería ser mucha, ya que el “error” del modelo en dicho caso no es tan grande.

Cabe destacar que lo mencionado en el párrafo anterior, en cuanto a las diferencias entre los valores simulados y observados, es aún más marcado para el caso de la curva OBS 90-05, para la cual se aprecia que se tienen caudales más bajos (esto se observa tanto en la curva de duración, como en las curvas de variación estacional). Por lo tanto, considerando un período de operación real más extenso, se verifica que este módulo tiene efectos más marcados del cambio climático, que en el caso del período de calibración.

Para este módulo no se hace el cálculo aproximado del error del modelo, que se hizo para las cuencas en régimen natural. Esto se debe a que los resultados de la salida de este módulo están asociados a la utilización de varios modelos, por lo que dicha aproximación resultaría ser demasiado gruesa en este caso.

Con respecto a cómo se afecta este módulo por el cambio climático, se verifica que sí se observan efectos, lo que se comprueba al apreciar que los caudales mayores aumentan y los más pequeños se mantienen similares o disminuyen (probablemente deberían disminuir, según lo planteado con respecto al error del modelo).

Los mencionados efectos se verifican de manera aún más clara en las curvas de variación estacional (Anexo E7), en las que se observa que los caudales en el período invernal disminuyen y en el período de deshielo aumentan, lo cual está de acuerdo a lo analizado para las cuencas en régimen natural (que pertenecen a este módulo), en las cuales también se observa una disminución invernal, aunque para el período de

deshielo hay diferencias, ya que en las mencionadas cuencas se observan leves disminuciones (con algunos aumentos) para dicho período.

Las diferencias en el período de deshielo, que se observan entre el estudio de las cuencas en régimen natural y lo analizado para la salida del módulo CA, se deben a que probablemente la temperatura a nivel de módulo (área mucho mayor y con una altura promedio menor que en el caso de las cuencas en régimen natural, lo que implica una menor disminución, por efectos de gradiente, de la temperatura base de la estación Convento Viejo), no experimenta una merma tan acentuada, como lo visto para las cuencas de la parte alta, lo que permite que la mayor cantidad de nieve acumulada (sobre el resto de las cuencas del módulo CA) se derrita, provocando este aumento en el período de deshielo.

Los efectos negativos del cambio climático, en cuanto a la reducción de caudal, repercuten en la agricultura, generación hidroeléctrica y abastecimiento de agua potable, actividades que dependen de los recursos hídricos extraídos desde este módulo (ver acápite 6.3). La única actividad que no se ve afectada en este caso es la minería.

6.5.2 Módulo Estero La Cadena (ELC)

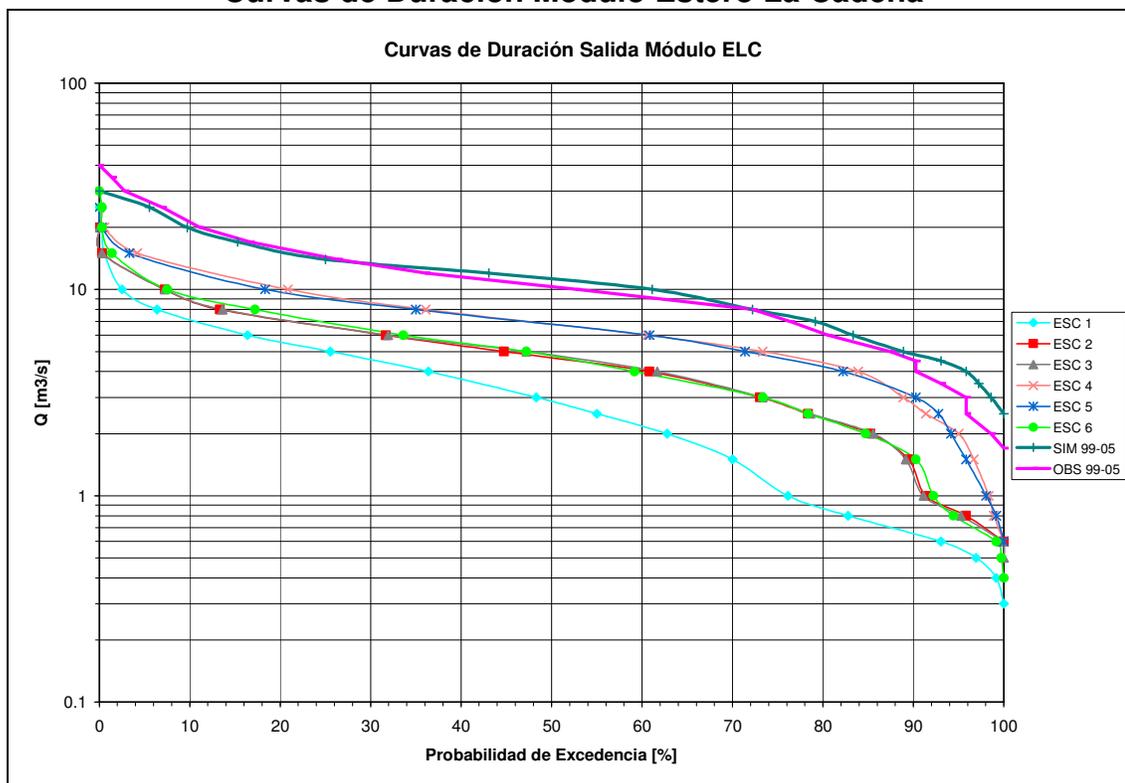
En la Figura 6.57 se muestra la curva de duración para el módulo Estero La Cadena. En dicha figura se observa que para este caso, los caudales de los escenarios son mucho menores a los del Período Base. Esta diferencia es aún más marcada para el Escenario 1, para los Escenarios 2, 3 y 6 la disminución es menor que en el primer caso, y los Escenarios 4 y 5 son los menos afectados.

También es importante considerar que en la calibración de este módulo, los resultados de la simulación no fueron muy buenos (coeficiente NS = 0.28 a nivel mensual, ver Capítulo 4), por lo tanto, la componente de error asociada a los resultados de este caso es importante. Esto se aprecia de manera mucho más clara, en las curvas de variación estacional (Anexo E7), en las que se observa que para los caudales pequeños (CVE 50% y 75%) la calibración del modelo es bastante pobre, siendo incluso incapaz de reproducir el régimen pluvial del sistema (para los caudales más grandes, CVE 25%, el ajuste es mejor).

Pese a la importancia que tiene la poca precisión de la calibración, en este caso también se concluye que existen efectos adversos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos, al menos para los caudales más grandes, ya que para ellos la diferencia entre los caudales simulados y observados del Período Base (error de ajuste), es menor que la diferencia de los caudales simulados u observados de dicho período con respecto a los valores de los escenarios (diferencia asociada al cambio climático); es decir, para esos caudales el error en la simulación no es tan grande, como para no atribuir parte del cambio en la disponibilidad de recursos hídricos a los efectos del cambio climático.

Los efectos negativos del cambio climático, en cuanto a la reducción de caudal, se reflejan en la agricultura, que es la principal actividad que se desarrolla en este módulo (ver acápite 6.3.1 y 6.3.5).

Figura 6.57
Curvas de Duración Módulo Estero La Cadena



6.5.3 Módulo Claro de Rengo (CR)

En la Figura 6.58 se muestra la curva de duración para el módulo Claro de Rengo. En dicha figura se observa que para este caso, los caudales de los escenarios son menores a los del Período Base. Esta diferencia es aún más marcada para el Escenario 1, para los Escenarios 2 y 6 la disminución es menor que en el primer caso, y los Escenarios 3, 4 y 5 son los menos afectados.

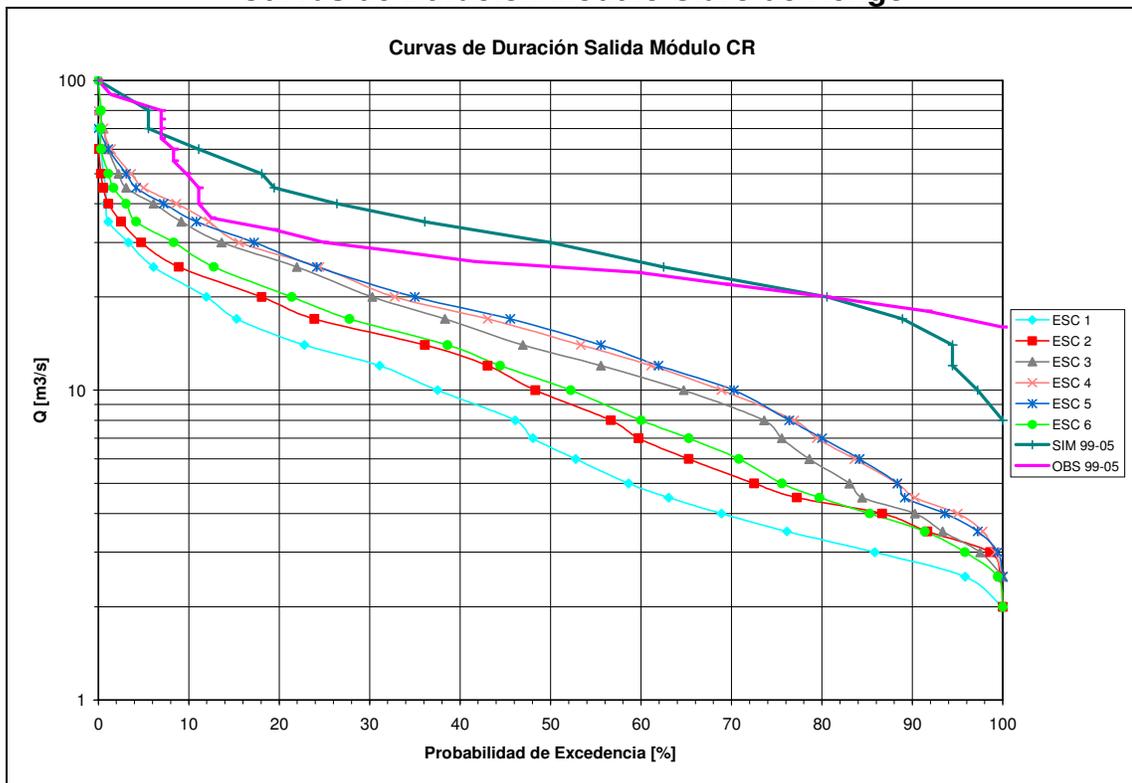
El análisis de este caso es bastante similar al del módulo ELC, aunque para el presente módulo, el error en la calibración es menos importante que en el mencionado caso.

Para este módulo, el principal problema de ajuste se da para los caudales más pequeños (ver curvas de variación estacional en Anexo E7), en que los valores observados son sobrestimados por el modelo. Por lo tanto, al igual que en el caso del módulo CA, se infiere que probablemente las disminuciones registradas en los escenarios, deberían ser mayores.

Por todo esto, se concluye que en este módulo también existen efectos del cambio climático, que producen una disminución clara de los caudales con respecto a los valores del período observado. Esta merma de caudales, es importante tanto en el período invernal como en el de deshielo.

Estos efectos negativos se reflejan en la agricultura, que es la principal actividad que se desarrolla en este módulo (ver acápites 6.3.1 y 6.3.5).

Figura 6.58
Curvas de Duración Módulo Claro de Rengo



6.5.4 Módulo Estero Zamorano (EZ)

En la Figura 6.59 se muestra la curva de duración para el módulo Estero Zamorano. En dicha figura se observa que para este caso, los caudales de los escenarios, prácticamente no experimentan modificaciones con respecto a los valores simulados en el Período Base, pero si presentan diferencias con respecto a los valores observados de dicho período.

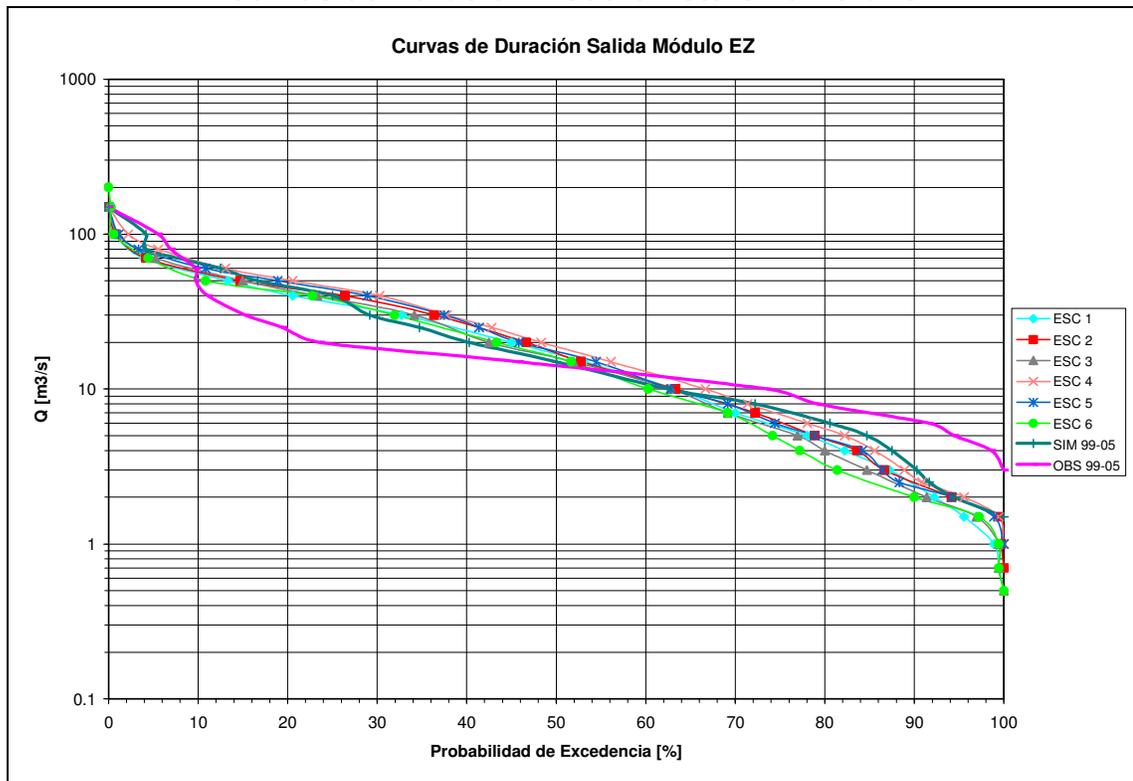
Por lo que se aprecia en las curvas de duración y curvas de variación estacional (ver Anexo E7), el modelo sobrestima los caudales para el período invernal (excepto para caudales más grandes) y los subestima para el período de deshielo. Además se observa que las diferencias de los resultados, entre los escenarios y el período observado, es prácticamente la misma que con los simulados en dicho período.

Por lo mencionado en el párrafo anterior, se podría suponer que en este caso, las disminuciones o aumentos observados para los escenarios, con respecto al Período Base, son atribuibles en gran parte a la calibración del modelo. Aunque de todas maneras, existe una parte más pequeña que puede ser atribuible a los efectos del cambio climático y que produce que en términos generales se tengan mayores caudales en el período invernal y menores en el de deshielo.

Esta disminución de caudales en el período de deshielo, es la que produce los efectos negativos en la principal actividad de este módulo, la agricultura, la cual no satisface

toda su demanda de riego en el período donde se registran las mayores necesidades de los cultivos (ver acápite 6.3.1 y 6.3.5).

Figura 6.59
Curvas de Duración Módulo Estero Zamorano



6.5.5 Módulo Cachapal Bajo (CB)

En la Figura 6.60 se muestra la curva de duración para el módulo Cachapal Bajo, y al igual que para el módulo CA, se incluye una curva para el período observado 1990 – 2005.

De las curvas de duración se observa que, para cualquier probabilidad de excedencia, el caudal de los escenarios es mayor que los valores observados en el período 99-05. Con respecto al período 90-05, para probabilidades hasta 5% la situación es inversa, para todo el resto los valores observados son menores a los de los escenarios. Para los valores simulados se tiene que entre 10 y 80% de probabilidad de excedencia, los caudales son mayores para los escenarios, y para el resto es lo contrario.

En las Figuras 6.61 a 6.63 se muestran las curvas de variación estacional para 25, 50 y 75% de probabilidad de excedencia.

Cabe destacar también que, observando las curvas de duración y las curvas de variación estacional, se aprecia que en la mayoría de los casos, el caudal simulado es mayor que los valores observados (para ambas curvas). Esto implica que existe una sobrestimación de los caudales por parte del modelo, por lo tanto, los caudales de los escenarios también están algo sobre valorados.

Figura 6.60
Curvas de Duración Módulo Cachapoal Bajo

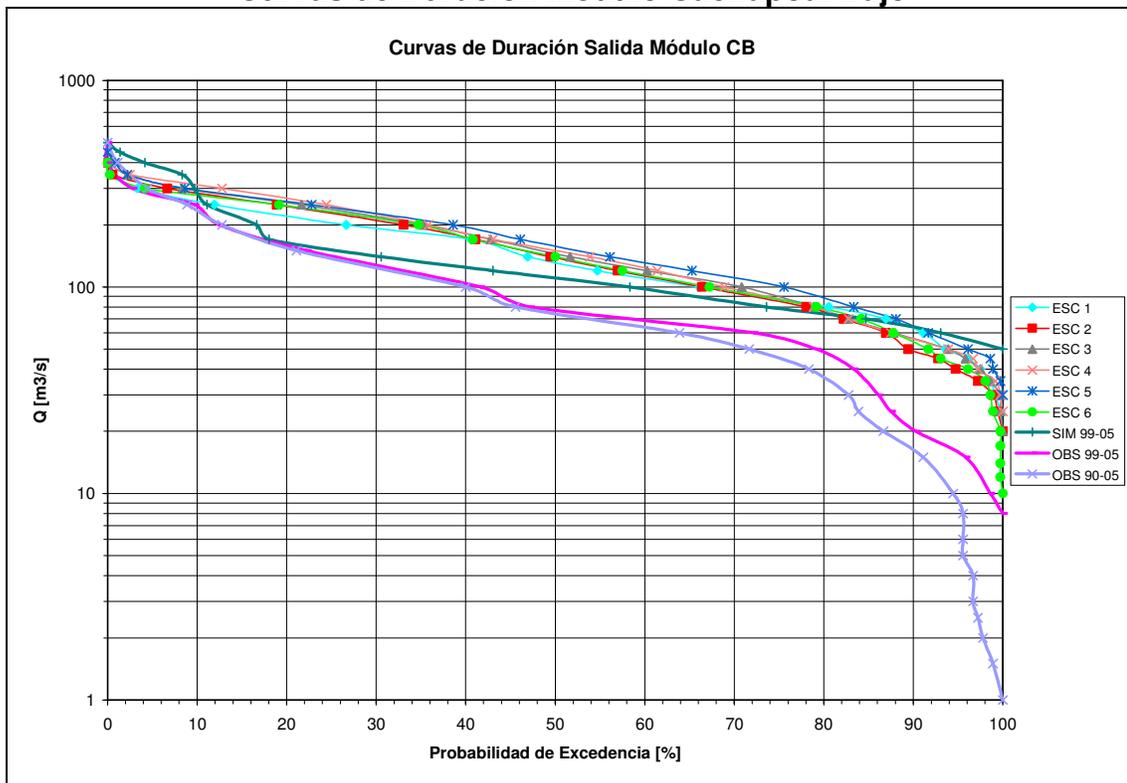


Figura 6.61
Curvas de Variación Estacional 25% Módulo Cachapoal Bajo

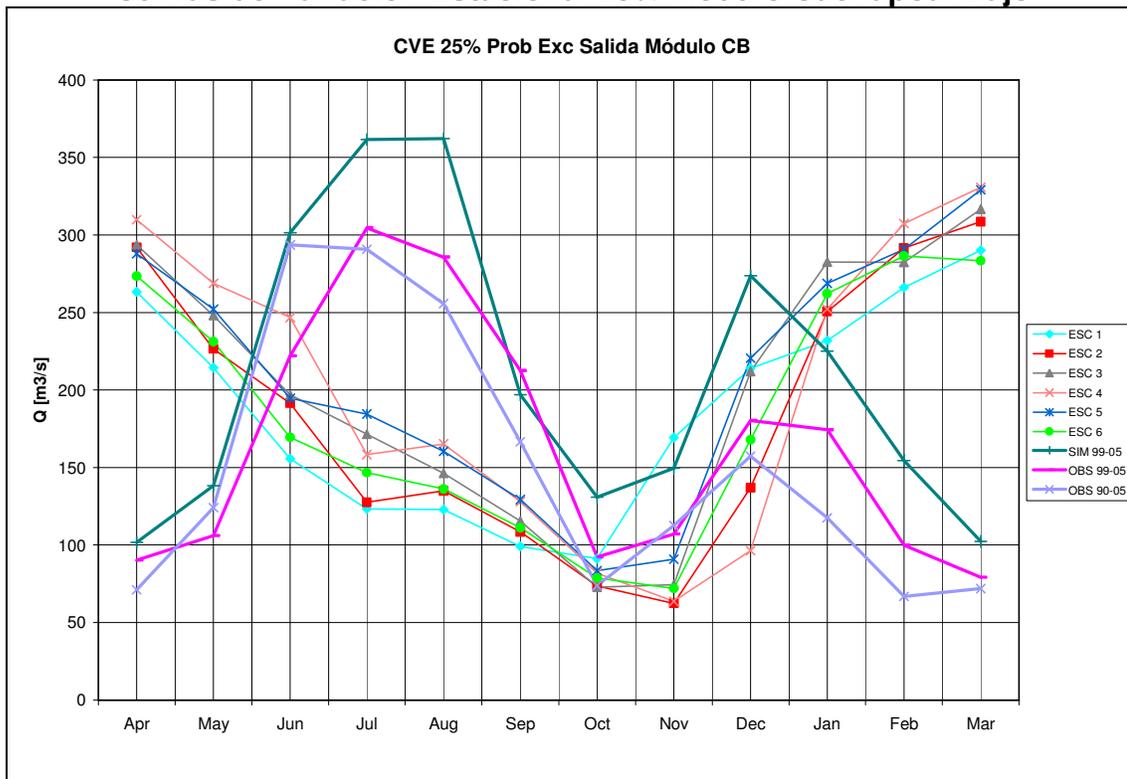


Figura 6.62
Curvas de Variación Estacional 50% Módulo Cachapal Bajo

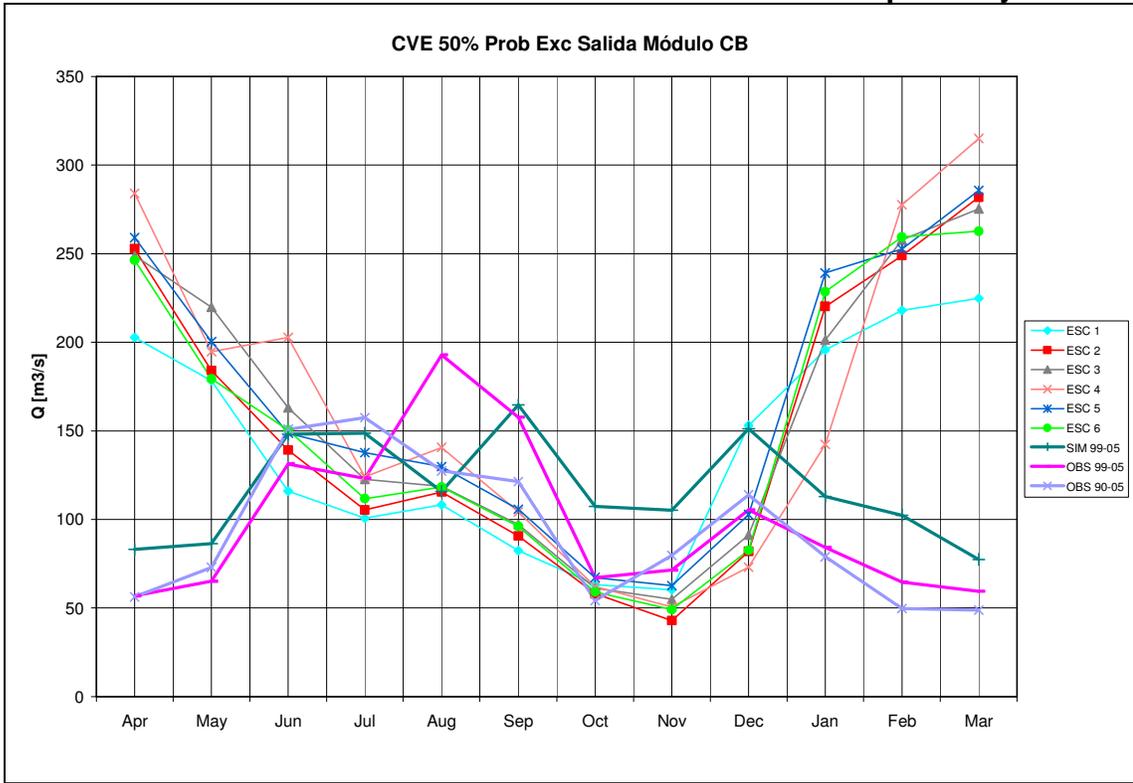
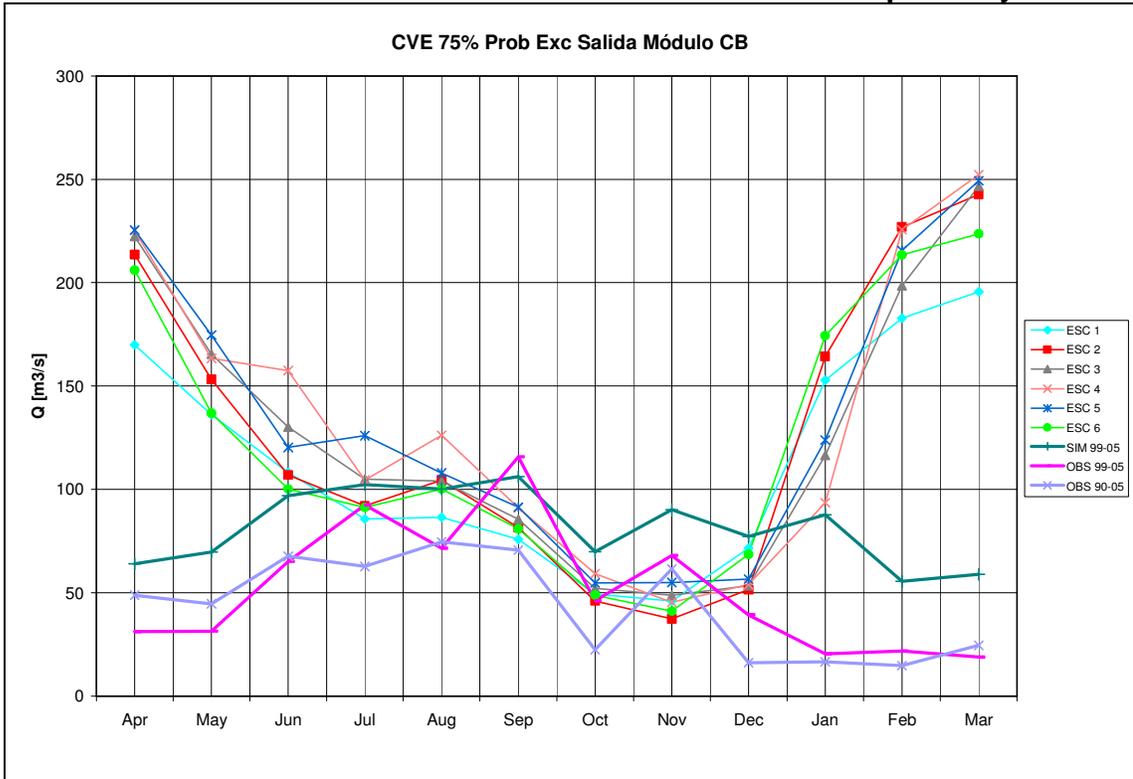


Figura 6.63
Curvas de Variación Estacional 75% Módulo Cachapal Bajo



Si se observan las curvas de variación estacional, se aprecia que existe un claro desplazamiento de los valores peak. Para los escenarios el máximo valor se registra en el mes de Marzo, mientras que para el período observado dicho valor se registra en Julio, por lo tanto, existe un claro cambio en el régimen de escorrentías no sólo de este módulo, sino que también de la cuenca en general, ya que éste es el punto de salida del río Cachapoal.

Junto con el desplazamiento del valor peak, se observa que para el período de deshielo, los caudales máximos aumentan y los mínimos se mantienen relativamente similares a los caudales del Período Base (además de estar desplazados). Además, los caudales mínimos en el período invernal están desplazados y son mayores que los mínimos del Período Base (ver CVE 75% en Figura 6.63), mientras que los valores máximos disminuyen (ver CVE 25% en Figura 6.61). Todo esto quiere decir que este módulo, y la cuenca del Cachapoal en su totalidad, pasan a estar más influenciadas por el derretimiento, y por lo tanto, a tener un régimen más nival que en el Período Base, donde se observa un régimen más pluvial.

Todo lo mencionado en el párrafo anterior claramente está asociado a lo analizado en el módulo CA, en el que se distingue un aumento de la escorrentía en la época de deshielo y una disminución de la escorrentía en la época invernal. Que la disminución no sea tan fuerte en el período invernal, como lo es el aumento en el período de deshielo, se debe a que el módulo EZ incrementa su escorrentía en la época invernal, lo que permite que la reducción no sea tan grande (los módulos CA y EZ son los que más influyen en los caudales que se registran en CB).

Considerando lo antes dicho, con respecto a que el modelo sobrestima los valores del período de observación, se infiere que hay un “error” asociado a los valores de los escenarios, ya que éstos podrían estar sobrestimados. Todo esto implicaría que para los escenarios, en el período invernal la disminución podría ser más marcada, ya que tanto los valores máximos como los mínimos quedarían por debajo de los valores del período observado. Para el período de deshielo también habría una disminución, pero los valores máximos y mínimos de los escenarios se mantendrían por sobre los observados.

Cabe destacar que lo mencionado en el párrafo anterior, en cuanto a las diferencias entre los valores simulados y observados, es aún más marcado para el caso de la curva OBS 90-05, para la cual se aprecia que se tienen caudales más bajos (esto se observa tanto en la curva de duración, como en las curvas de variación estacional). Por lo tanto, considerando un período de operación real más extenso, se verifica que este módulo tiene efectos más marcados del cambio climático, que en el caso del período de calibración.

Para este módulo no se hace el cálculo aproximado del error del modelo, que se hizo para las cuencas en régimen natural. Esto se debe a que los resultados de la salida de este módulo, están asociados a la utilización de varios modelos (y en este caso al error acumulado en los distintos módulos), por lo que dicha aproximación resultaría ser demasiado gruesa en este caso.

Con respecto a cómo se afecta esta cuenca por el cambio climático, se verifica que para este módulo sí se observan efectos, y están asociados a aumentos en los caudales de deshielo y disminuciones de caudales del período invernal.

Para este módulo el aumento de caudales en el período de deshielo, es el que produce los efectos positivos en la principal actividad de este módulo, la agricultura, la cual aumenta su porcentaje de demanda de riego satisfecha, en el período donde se registran las mayores necesidades de los cultivos (ver acápite 6.3.1 y 6.3.5).

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

7.1 INTRODUCCIÓN

Como uno de los objetivos de este trabajo de tesis, se construyó un Modelo Integrado a nivel superficial y subterráneo, que permitió evaluar los efectos del cambio climático, en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Cachapoal.

De la construcción y calibración de este Modelo Integrado, de la generación de los escenarios de cambio climático y los resultados obtenidos a partir de estos procesos, se generan una serie de conclusiones, comentarios y recomendaciones, que son entregadas en el presente capítulo.

7.2 CONCLUSIONES GENERALES

- Se corrigió y mejoró la versión del modelo Sacramento + SNOW17 implementada por Muñoz (2007), lo que permitió simular de manera aceptable (coeficientes de NS mayores o iguales a 0.6, tanto para la calibración y validación a nivel mensual) los caudales de salida de las cuencas en régimen natural en las que se tenía la información suficiente. Por lo tanto, se logró construir un modelo de escorrentía superficial, que permitió cumplir con el objetivo de simular de manera adecuada, esta componente del Modelo Integrado.
- Se implementó un modelo de simulación operacional propio, que permitió cumplir con el objetivo de ligar de buena manera los resultados generados en Sacramento, con la operación del sistema y la interacción con el acuífero. Si bien los resultados de calibración, en cuanto a los valores de Nash – Sutcliffe, para algunos módulos no fueron excelentes (NS = 0.28 a nivel mensual para el módulo ELC fue el valor más bajo), sí fueron suficientemente buenos para cumplir los objetivos planteados para este modelo (para el resto de los módulos se obtuvieron coeficientes NS mayores o iguales a 0.47 a nivel mensual), considerando que éste es más bien simple en cuanto a la información que incorpora (que no es mucha comparada con otros modelos de simulación operacional, como OASIS, MAGIC o MODSIM) y a la cantidad de supuestos que realiza.
- Con respecto al modelo de aguas subterráneas, considerando que tanto los resultados de la calibración en régimen permanente, como los del caso transiente, fueron bastante satisfactorios (RMS normalizado de 5.2% en ambos casos), se concluye que se obtuvo un modelo que permitió cumplir con el objetivo de representar de manera adecuada a la componente subterránea de los recursos hídricos. Además, se logró un modelo más representativo que la versión original de la DGA, ya que los valores de recarga superficial y lateral ahora son mucho más reales, lo mismo que la distribución de conductividades.

- De los resultados obtenidos en la calibración de los modelos de escorrentía superficial, simulación operacional y de aguas subterráneas, se concluye que se logró cumplir el objetivo de construir un Modelo Integrado representativo del funcionamiento de la cuenca del río Cachapoal (considerando la parte superficial y subterránea), en cuanto a la generación y utilización de los recursos hídricos; el cual permitió cumplir las tareas planteadas inicialmente para este modelo, referidas a la adecuada simulación de la cuenca estudiada, integración de la fase superficial y subterránea de los recursos hídricos y la evaluación de escenarios de cambio climático.
- Se logró el objetivo de generar escenarios de cambio climático que permitieron evaluar, a través del Modelo Integrado, los efectos de dichos cambios en los recursos hídricos. De acuerdo a dichos escenarios, en las series de 30 años generadas para las variables meteorológicas se obtuvo lo siguiente:
 - Para la temperatura, en las dos estaciones estudiadas, Rengo y Convento Viejo, se observaron distintas tendencias en cuanto a los escenarios de cambio climático, ya que para Rengo se verificaron aumentos para los dos escenarios planteados (con respecto al período observado, 1980 – 2005), de los valores a nivel mensual, estacional y anual promedio; por otro lado, para Convento Viejo, en términos generales, se observaron disminuciones de las temperaturas con respecto al período observado (las excepciones son para algunos valores mensuales).
 - Para la evaporación, en la estación estudiada, Rengo, se observó que existe una tendencia al aumento de la evaporación mensual, estacional y anual promedio con respecto al período observado (1971 – 2005).
 - Para la precipitación, en las estaciones estudiadas se observó una tendencia al aumento de la precipitación a nivel mensual, estacional y anual promedio (con respecto al período observado, el cual comprende 1971 – 2005 para la mayoría de las estaciones), excepto para el Escenario 1.
 - De acuerdo al análisis realizado a los escenarios de cambio climático generados, se concluye que el escenario más favorable, está basado en el Escenario B2 del IPCC, mientras que el más desfavorable está basado en el Escenario A2, lo que concuerda plenamente con las definiciones de dichos escenarios, en cuanto a que para el A2 se esperan cambios mucho más extremos que para el B2, que es un escenario de cambios más moderados. De todas maneras es importante tener presente que, para determinar de manera más precisa cuál de los dos escenarios (A2 o B2) es más favorable o desfavorable, habría sido necesario incorporar el análisis de más series de precipitación.
- Con respecto a los efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel superficial y los usos asociados se concluye que:
 - En las cuencas en régimen natural estudiadas, Cortaderal – Cachapoal y Pangal – Blanco, existen efectos del cambio climático en la disponibilidad de

recursos hídricos, que van más allá de un error asociado a la calibración del modelo Sacramento. Dichos efectos se refieren principalmente, a las disminuciones observadas en el período invernal y los aumentos en el período de deshielo (con respecto al Período Base) de los caudales superficiales de salida (en el período de deshielo, para esta variable hay aumentos y disminuciones menores, excepto para el Escenario 1 de Pangal – Blanco) y los valores de recarga al acuífero (conexión río Cachapoal). Lo cual está ligado a la variación en el tipo de precipitación (disminuye la precipitación líquida y aumenta la nival), la cual se produce por la disminución de la temperatura, la que a su vez también influye en que haya más acumulación de nieve.

- Para los caudales medios mensuales de salida de cada módulo del Modelo Integrado, no se observa una misma tendencia en los cambios registrados en cada caso (con respecto al Período Base, 1999 – 2005), ya que en los módulos Cachapoal Alto y Cachapoal Bajo se registran aumentos en el período de deshielo y disminuciones en el período invernal; por otro lado, para el módulo Claro de Rengo, pese a que existe una parte de los cambios observados que es claramente atribuible a errores del Modelo Integrado, otra parte sí se debe al cambio climático, y se manifiesta con reducciones de los caudales tanto en el período invernal como de deshielo; para el caso del módulo Estero Zamorano, pese a que también existe una parte de los cambios observados, que es claramente atribuible a errores del Modelo Integrado, la parte que sí se debe al cambio climático implica aumentos de los caudales en el período invernal y disminuciones en el de deshielo; por último, para el módulo Estero La Cadena, pese a la poca precisión de la calibración del Modelo Integrado, en este caso también existen efectos adversos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos, al menos para los caudales más grandes, que disminuyen con respecto al Período Base.
- Según los resultados obtenidos en este estudio, se puede concluir que en términos generales, todas las actividades de la cuenca del río Cachapoal (que fueron estudiadas) que dependen de la disponibilidad del recurso hídrico, se verían afectadas por un eventual cambio climático. En el riego se observó una disminución de la satisfacción de la demanda con respecto al Período Base en todos los módulos (excepto en el módulo CB); para las extracciones superficiales de las plantas de agua potable y de las centrales hidroeléctricas, se obtuvo una disminución de los caudales asociados a las mayores seguridades de abastecimiento; la única actividad que según los resultados obtenidos en este estudio no se vería afectada, sería la minería.
- Con respecto a la disponibilidad de recursos hídricos a nivel subterráneo y los usos asociados, se concluye que si existen efectos del cambio climático sobre el acuífero, éstos se refieren principalmente a modificaciones en los balances propios de éste (asociados a la disminución de la recarga), ya que a nivel de operación se aprecia que el sistema es capaz de mantener, e incluso aumentar (en términos generales) los niveles de satisfacción de la demanda. Por lo tanto, en dicho sentido (de la operación) no es posible establecer de forma clara un efecto asociado a los cambios en las variables meteorológicas.

- Los resultados obtenidos en este trabajo de tesis, podrían resultar útiles como guía para la implementación de políticas, tendientes a enfrentar de mejor manera las posibles consecuencias del cambio climático, en la disponibilidad de recursos hídricos y todas las actividades asociadas. Sin embargo, es importante mencionar que, dichos resultados no deben ser considerados como un pronóstico de lo que efectivamente va a pasar, ya que en la evaluación de los escenarios de cambio climático, se hacen una serie de supuestos que no permiten afirmar, que los resultados obtenidos sean una posibilidad con total certeza de ocurrencia.

7.3 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

7.3.1 Modelo Superficial

7.3.1.1 Modelo Sacramento

- La manera en que fue implementado el modelo Sacramento en la versión de Muñoz (2007), no permite acceder de manera fácil a la información, debido a que para cada cuenca es necesario crear un archivo Excel de gran tamaño, y considerando que se tienen más de 40 cuencas intermedias y de cabecera, cualquier modificación que se quiera hacer al modelo completo requiere mucho tiempo.
- La función objetivo utilizada (Nash – Sutcliffe) no permite obtener una mejor calibración del modelo, ya que dicha función le da mucha más importancia a los caudales más grandes, los cuales aportan mucho más error si es que difieren de los valores observados, por lo tanto, ajustar simultáneamente los caudales menores y mayores resultó muy difícil.
- Pese a que se trasladaron parámetros desde las cuencas calibradas (CA-CC1-1, CR-CC1-1 y PAN-CC1-1) al resto de las cuencas intermedias y de cabecera, los resultados obtenidos a nivel mensual fueron bastante satisfactorios, ya que éstos permitieron una buena calibración del Modelo Integrado.
- Los valores de calibración mensual fueron bastante mejores que los diarios, lo que indica que la versión del modelo Sacramento utilizada en este trabajo de tesis, es capaz de reproducir de mejor manera los caudales de salida a una escala más grande que la diaria; probablemente los resultados para esta escala serían mejores, si se consideraran más aleatorios o si se incluyera información de entrada más precisa (gradientes, información meteorológica, etc.).

7.3.1.2 Modelo de Simulación Operacional

- Los porcentajes de retorno y reutilización no resultaron determinantes como variables de calibración, sí lo fueron los caudales de infiltración, que modificaban de manera importante los resultados, según las magnitudes que tuvieran.
- El carácter genérico de la programación del modelo de simulación operacional, permite que sólo con pequeños ajustes pueda ser utilizado en cualquier otra cuenca,

en la que se cuente con la información de entrada necesaria para el funcionamiento adecuado del modelo.

- Es importante mencionar que en su versión actual, el algoritmo del modelo de simulación operacional, no considera el hecho de que todas las demandas de una sección de río, en todos sus nodos, deben ser suplidas con una misma dotación por acción, si es que en dicha sección hay junta de vigilancia. En el modelo actual dicha consideración se hace para cada tramo definido por un par de nodos, pero no se considera que varios tramos de nodos, pueden estar contenidos dentro de una misma sección de río, en la que existe una sola junta de vigilancia que regula el sistema. En términos de resultados, para el presente caso no afecta mayormente, ya que las extracciones nunca llegaron al punto de secar alguno de los cauces superficiales, pero en los casos que sí ocurra esta eventualidad (por ejemplo en épocas de sequía) incorporar este cálculo resulta primordial.

7.3.2 Modelo de Aguas Subterráneas

- Desde el punto de vista de la programación del Modelo Integrado, Visual Modflow resulta amigable, ya que el formato de la información de salida, permite extraer de manera relativamente simple los datos que se requieren. Si además se considera que, los resultados que entrega son bastante precisos, se cuenta con una herramienta de modelación importante, para representar el comportamiento de la fase subterránea.
- Los valores de conductividad hidráulica planteados inicialmente, no distan demasiado de los valores finales de la calibración en régimen transiente, lo que implica que en este caso, todas las entradas al modelo son bastante representativas de la realidad del sistema acuífero, ya que no se tuvo que realizar grandes modificaciones a la conductividad inicial (que se supone es representativa del sistema real) para lograr una buena calibración del modelo.
- Los valores de recarga determinados mediante la componente superficial del Modelo Integrado, permitieron obtener una calibración bastante buena del modelo de aguas subterráneas, lo cual sumado a los buenos resultados en la parte superficial, llevan a concluir que los valores obtenidos tanto para la recarga superficial, lateral y subterránea constituyen una buena aproximación a lo que realmente ingresa al acuífero desde la parte superficial.
- Con respecto a la versión original del modelo con el que contaba la DGA, se lograron una serie de mejoras, entre las que destacan:
 - En la versión original sólo se realizó una calibración en régimen permanente del modelo, en cambio, en este caso se hizo también una calibración en régimen transiente, lo que permite asegurar, junto con los valores de los parámetros de calibración obtenidos (RMS normalizado de 5.2% para el régimen permanente y transiente, entre otros valores), que el modelo de aguas subterráneas generado en este trabajo, es mucho más representativo del sistema que la versión previa.

- Se incorporaron nuevos valores de recarga superficial, lateral y subterránea (en régimen transiente), generados a partir de la componente superficial del Modelo Integrado, lo que implica una representación mucho más certera de dichas recargas, con respecto a la versión original del modelo, en la cual sólo se supusieron (como porcentajes de la precipitación) los valores de éstas.
- Tanto en los períodos de calibración como en la evaluación de escenarios, el modelo mostró una estabilidad (no se tuvo que alterar ningún parámetro para lograr que el modelo convergiera) que la versión original no tenía, ya que en ella había que modificar constantemente parámetros (como la variable de aceleración) para que el modelo convergiera.
- Tanto en los períodos de calibración como en la evaluación de escenarios, el número de celdas secas que se registró, fue claramente inferior a los que se obtenían en el modelo original, lo cual implica que el modelo actual funciona mucho mejor y que además sus resultados incorporan un error menor, ya que al tener menos celdas secas, se pierde menos recarga superficial (en la versión original del modelo se observaba que a mayor cantidad de celdas secas, los valores de recarga superficial disminuían, ya que dichas celdas quedaban inactivas).

7.3.3 Modelo Integrado

- Para efectos de utilizar el Modelo Integrado en la evaluación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos, se debe considerar que cada componente del modelo tiene asociado un error de calibración, que puede incrementar o disminuir dichos efectos en los recursos hídricos.
- La integración de la componente superficial y subterránea no resultó muy simple, debido a que:
 - El modelo Sacramento entrega resultados a nivel diario, mientras que el modelo de simulación operacional y el modelo de aguas subterráneas lo hacen a nivel mensual. Esto implicó que para cada corrida del Modelo Integrado, se necesitaban archivos que transformarían la gran cantidad de información generada en Sacramento (para los escenarios se tenían 30 años de valores diarios) al formato requerido por los otros modelos.
 - Como ya se mencionó anteriormente, la forma en que se implementó el modelo Sacramento, no permitió acceder de manera fácil a la información requerida, para alimentar a las otras componentes del Modelo Integrado, por lo que en cada calibración se requirió mucho tiempo y recursos computacionales (espacio en el disco duro, archivos que se tuvieron que crear y rutinas en Matlab), para poder establecer la ligazón entre la fase superficial y subterránea del Modelo Integrado.
- Con respecto a la posibilidad de utilizar el Modelo Integrado en otra cuenca del país, esto resulta poco factible, debido que el modelo es muy específico en lo que respecta a los modelos de escorrentía superficial y de aguas subterráneas (como se indicó anteriormente el modelo de simulación operacional, al ser más genérico, sí es

utilizable en otros sistemas). En cambio, sí es factible seguir el mismo procedimiento utilizado en este caso, si es que se pretende implementar un modelo de estas características en otra cuenca de estudio; para ello en el presente informe se entregan todos los pasos seguidos para la construcción del mencionado modelo.

7.3.4 Escenarios de Cambio Climático

- Con respecto a la generación de escenarios, es importante mencionar que las series generadas para las tres variables meteorológicas estudiadas, podrían no estar directamente relacionadas entre si, por lo cual los valores obtenidos para cada una de ellas, podrían ser incoherentes. Según lo indicado por Wilby et al. (2007), la correlación inter-variables podría ser intrínsecamente preservada por los predictores utilizados en cada caso, pero ante la incerteza de dicha preservación, esta debilidad del programa debe ser tomada en cuenta, a la hora de realizar el proceso de escalamiento y al utilizar los resultados derivados de dicho proceso.
- Con respecto a la temperatura se concluye que:
 - Para las dos estaciones estudiadas, Rengo y Convento Viejo, las mayores variaciones con respecto al período observado (1980 – 2005) se dan en el período de deshielo.
 - En el sector bajo – medio (240 – 310 [m.s.n.m.], rango de altura en que se encuentran ambas estaciones estudiadas) de la cuenca del río Cachapoal, se constata que los escenarios planteados, en los 30 años del horizonte de evaluación, introducen un cambio climático (con respecto al período observado) que no muestra una tendencia única en las dos estaciones estudiadas. Por lo tanto, los resultados obtenidos para una u otra estación, no son representativos para toda la cuenca del río Cachapoal, teniendo en cuenta que para cada una de las cuencas intermedias y de cabecera, en las cuales se genera escorrentía con el modelo Sacramento, los datos de temperatura media diaria de la estación Convento Viejo son sólo una entrada al modelo, dicha estadística es modificada de acuerdo a los gradientes de temperatura y los aleatorios utilizados (explicado con más detalle en el acápite 4.3), por lo cual, en cuencas más altas (módulo CA) o más bajas (módulo EZ), no necesariamente pueden mantenerse estas tendencias a la disminución o al aumento de la temperatura.
 - En las cuencas en régimen natural PAN-CC1-1 y CA-CC1-1, en todos los escenarios se obtuvieron disminuciones (con respecto al Período Base) de las temperaturas medias a nivel de cuenca, tanto a nivel estacional como anual, lo que resultó congruente con lo obtenido en la estación base Convento Viejo.
- Con respecto a la evaporación se concluye que:
 - Al menos para la estación estudiada, Rengo, se determinó que en el Escenario 2 (por lo tanto, los Escenarios 4 y 6 también) se experimentan mayores aumentos (con respecto al período observado, 1971 – 2005) de esta variable que en el Escenario 1 (por lo tanto, los Escenarios 3 y 5 también), lo que no está de acuerdo con las definiciones de los Escenarios A2 y B2 del IPCC, a partir de los

cuales fueron obtenidos. Este resultado se podría contradecir también, con lo obtenido para el caso de la temperatura, ya que si ésta aumenta, es esperable un incremento proporcional de la evaporación, y por lo tanto, en dicho caso la evaporación en el Escenario 1 debería ser mayor que en el Escenario 2, aunque en esta relación también podrían afectar otros factores ambientales y meteorológicos, que no fueron estudiados en este caso.

- Para todos los escenarios, en la estación estudiada, los aumentos en el período invernal y de deshielo (con respecto al período observado) son prácticamente iguales, aunque más marcados en el de deshielo.
 - Para la evaporación, en el sector bajo – medio (en torno a 310 [m.s.n.m.], altura de la estación Rengo) de la cuenca del río Cachapoal, se constató que en los 30 años del horizonte de evaluación, existe una tendencia al aumento (con respecto al período observado) de la evaporación mensual, estacional y anual media.
 - Los resultados obtenidos (aumento de la evaporación), no son representativos para toda la cuenca del río Cachapoal, por las mismas razones esgrimidas en el caso de la temperatura.
 - En la cuenca en régimen natural CA-CC1-1, en todos los escenarios se obtuvieron disminuciones (con respecto al Período Base) de las evaporaciones medias a nivel de cuenca en el período de deshielo, y aumentos leves en el período invernal (resultando una disminución a nivel anual). Por otro lado, en la cuenca en régimen natural PAN-CC1-1, en todos los escenarios se obtuvieron disminuciones (con respecto al Período Base) de las evaporaciones medias a nivel de cuenca en el período de deshielo, y disminuciones leves en el período invernal (resultando una disminución a nivel anual). Los resultados de ambos casos, no fueron coincidentes con lo obtenido en la estación base, Rengo, en la cual, a nivel invernal y anual se observaron aumentos para todos los escenarios, y sólo en el período de deshielo se registraron disminuciones. Las mencionadas diferencias están asociadas principalmente a los cambios que introducen los gradientes de evaporación, que permiten obtener disminuciones significativas con respecto al Período Base en CA-CC1-1 y PAN-CC1-1.
- Con respecto a la precipitación se concluye que:
 - Para las estaciones estudiadas, se observa que en términos de precipitación, el más favorable es el Escenario 4 (basado en el Escenario B2), ya que desde el punto de vista de los recursos hídricos, habría más precipitación (con respecto al período observado, el cual comprende 1971 – 2005 para la mayoría de las estaciones) y por lo tanto, más disponibilidad de agua que escurre superficialmente y que recarga a la napa. Por otro lado, el más desfavorable es el Escenario 1 (basado en el Escenario A2).

Si para la precipitación, de acuerdo a los resultados obtenidos en las estaciones estudiadas, se establece un ordenamiento de escenario más a menos favorable, éste sería el siguiente: 4, 5, 3, 6, 2, 1.

- Para las estaciones estudiadas, se determinó que en el Escenario 4 se experimentan mayores aumentos de esta variable que en los demás escenarios.
- Con respecto a los períodos invernal y de deshielo los resultados son bastante distintos entre estaciones pluviométricas y escenarios de cambio climático, por lo que no se puede establecer una tendencia a nivel estacional.
- Para la precipitación, en el sector bajo – medio (entre 280 y 720 [m.s.n.m.], rango de alturas de las estaciones pluviométricas estudiadas) de la cuenca del río Cachapoal, se constató que los escenarios planteados, en los 30 años del horizonte de evaluación, introducen un cambio climático, asociado principalmente a una tendencia al aumento de la precipitación a nivel mensual, estacional y anual promedio (con respecto al período observado), excepto para el Escenario 1.
- Para este caso, al contar con más estaciones distribuidas en distintos sectores de la cuenca del río Cachapoal, los resultados obtenidos (en cuanto al aumento o disminución de la precipitación, según cada escenario) pueden ser más representativos que en el caso de la temperatura y la evaporación, por lo que, en las cuencas en que se estudie esta variable, es esperable obtener tendencias que vayan en el mismo sentido a las verificadas en las estaciones base.
- En la estación Rengo, para todos los escenarios de precipitación, excepto para el 1, se observa un aumento en el período 2005-2035 a nivel promedio con respecto al período 1999-2005 al mismo nivel, por otro lado, en las tendencias de las precipitaciones anuales, se observan tendencias a la disminución con respecto al valor del año 2005 (excepto para el Escenario 3). Estas diferencias se deben principalmente a la corrección hecha a los resultados que entregó el programa SDSM, lo cual no implica que los escenarios planteados en este caso, no sean coherentes, sino que simplemente dadas las características de la zona de estudio y de la metodología de escalamiento (downscaling), las tendencias obtenidas resultan adecuadas. En este sentido los resultados obtenidos en las tendencias anuales a partir del 2005, son coherentes con los resultados (mantienen la tendencia) de los trabajos de CONAMA (2006), King (1970) y D'Arcangeli (1997), en los que se obtuvo una tendencia a la disminución de la precipitación a lo largo del país, durante gran parte del siglo XX.
- En las cuencas en régimen natural PAN-CC1-1 y CA-CC1-1, en todos los escenarios (excepto el 1) se obtuvieron aumentos (con respecto al Período Base) de la precipitación total (líquida más nival), mientras que la precipitación líquida disminuyó y aumentó la nival. Dicho aumento de la precipitación total, resultó congruente con lo observado en términos generales, en todas las estaciones estudiadas en la cuenca del río Cachapoal.
- Se estableció un ordenamiento del escenario más a menos favorable, desde el punto de vista de los efectos que puedan observarse en la disponibilidad de los recursos hídricos; dicho orden se basa mayoritariamente en la precipitación, ya que las diferencias entre escenarios para dicho caso es más marcada que para las otras variables, en las cuales se tiene la misma tendencia para todos los escenarios (con

distintas magnitudes). De esta manera se determina que el ordenamiento de más a menos favorable es el siguiente: Escenario 4, Escenario 5, Escenario 3, Escenario 6, Escenario 2 y Escenario 1.

7.3.5 Efectos del Cambio Climático en los Recursos Hídricos

- Con respecto a las cuencas en régimen natural del sistema del río Cachapoal, que no fueron estudiadas de igual manera que Cortaderal – Cachapoal y Pangal – Blanco, no se realizó un análisis de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos asociados, debido a las dificultades ya mencionadas, que impone trabajar con el modelo Sacramento. Por lo tanto, no es posible concluir que los efectos apreciados en las cuencas estudiadas, sean extensibles a todo el sistema, aunque de todas maneras resulta altamente probable, que sí se registren modificaciones, en cuanto a la disponibilidad de agua, con respecto al Período Base.
- Con respecto a los usos a nivel superficial del recurso hídrico en la cuenca del río Cachapoal:
 - Para la actividad agrícola, se concluye que sí existen claros efectos adversos del cambio climático (excepto para el módulo CB), ya que para todos los escenarios se observa una disminución de la satisfacción de la demanda de riego, con respecto a la situación del Período Base. El módulo CB es el único que en términos promedio, no se ve afectado, por una disminución en su capacidad de satisfacer la demanda de riego, por el contrario, para los escenarios futuros, el sistema es capaz de abastecer más de lo que lo hacía en el Período Base.
 - Con respecto a la disponibilidad de recursos hídricos para las extracciones superficiales de las plantas de agua potable (tomando como representativo el caso de la Planta Los Nogales), se concluye que sí existen efectos del cambio climático, los cuales se refieren principalmente a disminuciones de los caudales, asociados a las mayores seguridades de abastecimiento. Esto último resulta primordial para esta actividad, ya que las plantas son diseñadas para proporcionar una alta seguridad en el suministro, y para ello requieren que los caudales de entrada con mayores seguridades, no sean tan bajos, pero en este caso se aprecia que dichos caudales disminuyen con respecto al Período Base.
 - Para la actividad minera, representada por las principales extracciones de agua de la mina El Teniente, se concluye que no existen efectos negativos del cambio climático, (a excepción de la extracción desde el río Blanco para seguridades mayores al 85%, donde se observa una incapacidad del sistema de abastecer al menos la demanda del Período Base), ya que para todos los escenarios el sistema es capaz de satisfacer más que la demanda nominal del Período Base, por lo que si el funcionamiento continuara igual que en la actualidad, no debería haber mayores problemas de abastecimiento. Por otro lado, los aumentos en los porcentajes de satisfacción de demanda, no indican que la situación mejore tan radicalmente, sino que tiene que ver con que en el Período Base el sistema no fue exigido de igual manera que en los escenarios (tal como fue explicado en el Capítulo 6).

- Para la actividad de generación hidroeléctrica, representada por las centrales Sauzal y Sauzalito, se concluye que para caudales más grandes (menor seguridad de abastecimiento), no existen efectos negativos del cambio climático (para la central Sauzalito se tienen disminuciones con respecto al Período Base, pero son muy pequeñas por lo que no constituyen un efecto muy pronunciado), ya que para todos los escenarios el sistema es capaz de satisfacer más (o al menos lo mismo) que la demanda nominal del Período Base. Por otro lado, para caudales más pequeños (mayor seguridad de abastecimiento), se concluye que sí existen efectos negativos del cambio climático, ya que el sistema no es capaz de abastecer al menos lo requerido en el Período Base. Por lo tanto, para esta actividad, si se busca operar con niveles de seguridad alta, los efectos del cambio climático son importantes.
- Según los resultados obtenidos en este estudio, se puede concluir que en términos generales, todas las actividades de la cuenca del río Cachapoal, que dependen de la disponibilidad del recurso hídrico, se verían afectadas negativamente por un eventual cambio climático (excepto la minería). Por lo tanto, considerando que el horizonte de evaluación no fue muy largo (30 años), resultaría conveniente que para todas las mencionadas actividades, se tomen los resguardos necesarios, para evitar un déficit imprevisto de agua, que pueda llevar a pérdidas importantes en la agricultura, así como también a una disminución importante, en el abastecimiento de agua potable de las principales ciudades de la VI Región y a problemas de racionamiento de energía eléctrica.

Es importante destacar que para el estudio de todas las actividades no se hicieron proyecciones, en cuanto a cómo podrían evolucionar las demandas asociadas a dichas actividades, por lo tanto, si los requerimientos de agua a futuro aumentaran (más allá del máximo valor observado en el Período Base), los efectos observados podrían ser aún más marcados que los obtenidos.

- Con respecto a los resultados expuestos para los recursos hídricos subterráneos, y cómo se afectan éstos y sus usos por el cambio climático, se concluye lo siguiente:
 - Los descensos observados en los niveles piezométricos, para cada uno de los escenarios, no son atribuibles de manera exclusiva a efectos del cambio climático, sino que también son una consecuencia de la operación del sistema, durante los 30 años de simulación. Descomponer los valores de descenso, en una componente asociada al cambio climático y en otra asociada a la operación, resulta para este caso prácticamente imposible, por lo que no es factible concluir, de manera tajante, que en este caso hay efectos asociados al mencionado cambio.
 - Son claros los efectos del cambio climático sobre la recarga total al sistema acuífero, observándose marcadas disminuciones para todos los escenarios.
 - Existe una afección directa a los recursos hídricos superficiales, ya que al aumentar la infiltración y disminuir el afloramiento, el flujo neto que va hacia el río disminuye. Aunque esta afección no puede ser asociada sólo al cambio climático,

sino que al igual que para los descensos, también influye la operación del sistema.

- Con respecto a la satisfacción de la demanda, en términos generales, ésta no se ve afectada por las disminuciones de recarga. Incluso, frente a aumentos en los valores nominales de los requerimientos de los pozos, el sistema es capaz de responder de manera adecuada. Por lo tanto, los usos en el riego, agua potable, industrias y minería, no se ven mayormente afectados, excepto para los sectores 6, 7, 8 y 10 (asociados al módulo Claro de Rengo), en los que sí se verifica una merma en la satisfacción de la demanda, con respecto al Período Base.

En particular para el caso del uso en agua potable, para todos los sectores existen efectos del cambio climático. Para los sectores asociados al módulo Claro de Rengo, dichos efectos son negativos, ya que en términos generales se registra una merma en la satisfacción de la demanda de los pozos. Para el resto de los sectores, en general se observa que existe un aumento de la satisfacción de los pozos para todos los usos (riego, agua potable, industrial y minero), y por lo tanto, los efectos en este caso son positivos.

Para el sector 3, donde se ubica la Planta Los Nogales, la satisfacción de la demanda para todos los usos, aumenta en todos los escenarios con respecto al Período Base, por lo tanto, la componente subterránea del abastecimiento de dicha planta no es afectada. Por lo que si bien, para la mencionada planta hay una afección a nivel superficial, ésta podría ser cubierta por la mejora observada a nivel subterráneo.

En conclusión, para aquellas plantas de agua potable que no se encuentran en el módulo Claro de Rengo, y que extraen sus recursos hídricos subterráneamente, los efectos del cambio climático no son negativos, ya que se puede extraer más agua que en el Período Base (aunque en algunos casos la demanda nominal sea un poco mayor para los escenarios). Para el caso del módulo Claro de Rengo, los efectos son negativos, ya que existe una merma en la satisfacción de la demanda para los pozos relacionados con las plantas de agua potable.

Con respecto al riego, sólo para el módulo Cachapoal Bajo se observa que existe un aumento en la satisfacción total de la demanda (superficial + subterránea), lo que está ligado con el incremento de la satisfacción a nivel subterráneo. Para el resto de los módulos, pese a haber un aumento en el suministro de los pozos, se observa una merma en la satisfacción total del riego.

- Para los caudales medios mensuales de salida de cada uno de los módulos, que conforman la cuenca del río Cachapoal, se concluye que:
 - Para el módulo Cachapoal Alto, se observan efectos del cambio climático, los cuales están asociados a que los caudales más grandes (más de 30 [m³/s]) aumentan y los más pequeños (menos de 30 [m³/s]) se mantienen similares o disminuyen. Los mencionados efectos se verifican de manera aún más clara en las curvas de variación estacional, en las que se observa que los caudales en el período invernal disminuyen y en el período de deshielo aumentan, lo cual está

de acuerdo a lo analizado para las cuencas en régimen natural (que pertenecen a este módulo), en las cuales se observa la misma disminución invernal, aunque para el período de deshielo hay diferencias, ya que en las mencionadas cuencas se observan leves disminuciones (con algunos aumentos) para dicho período.

Las diferencias en el período de deshielo, que se observan entre el estudio de las cuencas en régimen natural y lo analizado para la salida del módulo CA, se deben a que probablemente la temperatura a nivel de módulo no experimenta una merma tan fuerte, como lo visto para las cuencas de la parte alta, lo que permite que la mayor cantidad de nieve acumulada (sobre el resto de las cuencas del módulo CA) se derrita, provocando este aumento en el período de deshielo.

Los efectos negativos del cambio climático, en cuanto a la reducción de caudal, repercuten en la agricultura, generación hidroeléctrica y abastecimiento de agua potable, actividades que dependen de los recursos hídricos extraídos desde este módulo. La única actividad que no se ve afectada en este caso es la minería.

- Para el módulo Estero La Cadena, pese a la poca precisión de la calibración del modelo Sacramento y de simulación operacional, en este caso también existen efectos adversos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos, al menos para los caudales más grandes, ya que para ellos la diferencia entre los valores simulados y observados del Período Base (error de ajuste), es menor que la diferencia de los caudales simulados u observados con respecto a los valores de los escenarios (diferencia asociada al cambio climático); es decir, para esos caudales el error en la simulación no es tan grande, como para no atribuir parte del cambio en la disponibilidad de recursos hídricos a los efectos del cambio climático.

Los efectos negativos del cambio climático, en cuanto a la reducción de caudal, se reflejan en la agricultura, que es la principal actividad que se desarrolla en este módulo.

- Para el módulo Claro de Rengo, pese a que el ajuste del modelo en el Período Base tampoco fue muy bueno (pero mucho mejor que para Estero La Cadena), sí existen efectos del cambio climático, que producen una disminución clara de los caudales con respecto a los valores del período observado, tanto en el período invernal como de deshielo. Estos efectos negativos se reflejan en la agricultura, que es la principal actividad que se desarrolla en este módulo.
- Para el módulo Estero Zamorano, pese a que las disminuciones o aumentos observados para los escenarios, con respecto al Período Base, son atribuibles en gran parte a la calibración del modelo, de todas maneras, existe una parte más pequeña que es atribuible a los efectos del cambio climático y que produce que en términos generales se tengan mayores caudales en el período invernal y menores en el de deshielo.

Esta disminución de caudales en el período de deshielo, es la que produce los efectos negativos en la principal actividad de este módulo, la agricultura, la cual

no satisface toda su demanda de riego en el período donde se registran las mayores necesidades de los cultivos.

- Para el módulo Cachapoal Bajo, sí se observan efectos del cambio climático, los que están asociados a aumentos en los caudales de deshielo y disminuciones de éstos en el período invernal. Esto se produce por lo explicado anteriormente en el módulo CA, que es el que tiene más influencia sobre los caudales del módulo CB.

Para este módulo el aumento de caudales en el período de deshielo, es el que produce los efectos positivos en la principal actividad de este módulo, la agricultura, la cual aumenta su porcentaje de demanda de riego satisfecha (con respecto al Período Base), en el período donde se registran las mayores necesidades de los cultivos.

- Para determinar que porcentaje de las diferencias entre los escenarios y el Período Base es atribuible al cambio climático, y que porcentaje al error del modelo, se hizo un cálculo bastante grueso, ya que al tratarse de períodos de tiempo distintos la única manera (no tan engorrosa) de hacerlo era analizando los períodos estacionales. Por lo tanto, una diferenciación más precisa entre qué parte de los cambios en la disponibilidad de los recursos hídricos, corresponde al error del modelo y qué parte a los efectos del cambio climático, queda como un tema propuesto para futuros estudios.
- Con respecto a los escenarios, se observó que en términos generales, el caso en el que se tuvieron mayores efectos adversos sobre la disponibilidad y uso de los recursos hídricos (a nivel superficial y subterráneo), fue el Escenario 1; mientras que el Escenario 4 fue el caso en el que se tuvieron los menores efectos adversos del cambio climático en los recursos hídricos. Lo que está de acuerdo al ordenamiento planteado en el Capítulo 5, en cuanto a los escenarios de cambio climático que debían ser más favorables o desfavorables desde el punto de vista de los recursos hídricos.

7.3.6 Validez de los resultados obtenidos

- En cuanto a los resultados que el Modelo Integrado entrega para el Período Base, se puede afirmar que éstos son totalmente válidos, ya que en los procesos de calibración de cada componente del modelo se obtuvieron resultados aceptables, lo que implica que la caracterización del sistema es consistente, y por lo tanto, los resultados que entrega también; y si bien se hicieron supuestos para incorporar cierta información faltante, éstos fueron planteados dentro de rangos razonables, que confirmaron su validez en la medida que se obtuvieron resultados adecuados en las calibraciones.
- Los resultados obtenidos en la evaluación de los efectos del cambio climático, en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Cachapoal, no deben ser considerados como un pronóstico de lo que efectivamente va a pasar, las razones de esto son:

- En el Modelo Integrado se consideró que para los escenarios futuros, los usos de recursos hídricos se mantendrían iguales que en el Período Base, lo que no incluye en la evaluación de la disponibilidad de dichos recursos, posibles variaciones en las magnitudes y distribuciones espaciales, de las demandas asociadas a los usos considerados (riego, minería, agua potable y centrales hidroeléctricas).
- Los escenarios de cambio climático planteados en el presente trabajo, sólo constituyen una posibilidad de lo que podría pasar a futuro, si es que se dieran las proyecciones de crecimiento poblacional, económico y de emisión de CO₂, que utilizan los escenarios de cambio climático planteados por el IPCC, que se utilizaron como base para construir los mencionados escenarios.

7.4 RECOMENDACIONES

7.4.1 Modelo Sacramento

- Debido a lo complejo que resulta manejar un modelo tan grande, también resulta muy difícil poder hacer un análisis más completo. Especialmente el extraer información del modelo Sacramento, implica un consumo de tiempo muy grande, así como también se requiere mucho espacio de almacenamiento en el computador. Por lo tanto, es recomendable implementar un modelo más sencillo (principalmente que no requiera tanto espacio en el computador) para la generación de escorrentías, que permita realizar un trabajo más rápido (en la calibración) y así generar aún más resultados.
- Para la calibración del modelo Sacramento, el uso de los algoritmos genéticos, de la manera que estaba implementado el modelo en la versión de Muñoz (2006), no resulta eficiente, por lo que se sugiere que en futuros usos, para la actual versión del modelo, la calibración se haga de la siguiente manera (procedimiento seguido para la realización del presente trabajo): primero realizar una calibración con algoritmos genéticos (que permite acotar un poco el rango de los parámetros) y luego empezar a modificar manualmente las distintas variables. Este procedimiento resulta mucho más rápido y además se obtienen calibraciones bastante mejores.
- Para futuros usos del modelo Sacramento, se recomienda la utilización de una función objetivo que permita ponderar de igual manera, el error de ajuste para los caudales grandes y los pequeños, de esta forma la calibración del modelo, resultará mucho mejor que lo obtenido en el presente trabajo.

7.4.2 Modelo de Simulación Operacional

- Para futuros usos del modelo de simulación operacional, se debe incorporar al algoritmo del modelo, el hecho de que todas las demandas de una sección de río, en todos sus nodos, deben ser suplidas con una misma dotación por acción, si es que en dicha sección hay junta de vigilancia (actualmente se considera por tramo de nodos, pero no por tramo de río); lo que resulta primordial en casos en que la disponibilidad de agua en un río disminuya considerablemente.

7.4.3 Modelo de Aguas Subterráneas

- Para que el modelo de aguas subterráneas sea más representativo, se recomienda recabar la información necesaria, que permita llevar al modelo los distintos estratos del acuífero, ya que en este caso se utilizó sólo uno.
- También se recomienda mejorar la estimación inicial de los valores de conductividad y almacenamiento, sobre todo este último parámetro, ya que en este modelo se utilizaron valores tabulados que no necesariamente son representativos de la realidad del sistema acuífero.
- Para la calibración en régimen transiente del modelo de aguas subterráneas, sería recomendable incorporar más información de pozos, sobre todo en los sectores acuíferos 1, 5, 6, 7 y 8, de tal manera de lograr un ajuste aún mejor del modelo.

7.4.4 Modelo Integrado

- Si en trabajos futuros se pretende utilizar el Modelo Integrado de la cuenca del río Cachapoal desarrollado en el presente trabajo, se recomienda que se realicen campañas de terreno, tendientes a recopilar la mayor cantidad de información posible, de tal manera de actualizar la información actual y agregar datos nuevos en cada componente del Modelo Integrado.

7.4.5 Generación y Análisis de Nuevos Resultados

- Se recomienda llevar a cabo un trabajo, en el que se analicen exclusivamente las variaciones en las variables meteorológicas y las escorrentías, de las cuencas de cabecera e intermedias en régimen natural, que por motivos de tiempo no pudieron ser estudiadas en este trabajo de tesis. Esto permitirá tener una idea más completa de cómo se ven afectados los recursos hídricos, que “alimentan” al modelo de simulación operacional de la hoya del río Cachapoal.
- Considerando las limitaciones enfrentadas en la comparación de resultados, entre los escenarios y el Período Base, debido a las distintas longitudes de tiempo, resulta recomendable generar otro escenario (de 30 años) en el que no se incorpore cambio climático, para así determinar de manera más precisa, qué efectos son directamente atribuibles al cambio climático, y cuáles al error de cierre del Modelo Integrado. En este caso no se realizó, ya que fue necesario acotar el extenso trabajo, que implicó la confección del Modelo Integrado.
- Para futuros trabajos, ya sea en esta cuenca o en otra, resultaría interesante plantear escenarios en que se considere también, variaciones en cuanto a los usos del recurso hídrico, como por ejemplo, proyecciones en la demanda de agua potable, cambios de uso de suelo agrícola, etc.
- También resulta interesante el poder extender el trabajo realizado en esta tesis, al resto de la VI Región, aprovechando que para los otros dos sistemas (Tinguiririca y Alhué), también existen modelos subterráneos que podrían ser usados (y

mejorados) como parte de un Modelo Integrado, al igual que para la cuenca del Cachapoal.

7.4.6 Escenarios de Cambio Climático

- Con respecto a los escenarios de cambio climático, en el caso particular de la precipitación se recomienda generar más series, que permitan tener un rango más amplio de resultados al evaluarlas en el Modelo Integrado, de tal manera que permitan hacer conclusiones más certeras, en cuanto a las tendencias observadas (en la precipitación y los recursos hídricos) en el caso del escenario SRES A2 o el B2.
- Con respecto al estudio del cambio climático, es también recomendable extender el análisis hecho en este caso, a las principales cuencas del resto del país, lo que permitiría establecer líneas de acción frente a posibles modificaciones en el clima y los consecuentes cambios en la disponibilidad de los recursos hídricos.

7.4.7 Efectos del Cambio Climático en los Usos del Recurso Hídrico

- Para los distintos usos estudiados en el presente trabajo, a continuación se recomiendan algunas medidas, tendientes a paliar los posibles efectos del cambio climático:
 - Para el riego, mejorar los sistemas de conducción y distribución, para disminuir las pérdidas. Además, implementar mejores tecnologías, en lo que se refiere a las metodologías de riego existentes. Todo lo cual permitiría optimizar el uso del recurso, y así hacer frente a posibles disminuciones en la disponibilidad de agua. Claro está, que todo esto bajo el supuesto de que las áreas cultivadas no aumentan (por lo que tampoco aumentan las demandas de riego), ya que de lo contrario, quizás no bastaría con optimizar el uso del recurso.
 - Para el agua potable, en particular para la Planta Los Nogales, se recomienda aumentar las extracciones subterráneas de agua, que permitan cubrir las posibles falencias a nivel superficial. Esto se podría realizar, ya que en el sector de dicha planta, se comprobó que el sistema es capaz de abastecer más de lo que lo hacía en el Período Base.
 - Para las centrales hidroeléctricas Sauzal y Sauzalito, si bien hoy en día tienen una pequeña capacidad de almacenamiento (que fue despreciada para efectos del modelo), quizás sería recomendable aumentar algo más dicha capacidad, de tal manera de aprovechar los mayores recursos que se generarían en el período de deshielo, para así enfrentar de mejor manera la merma de agua en el período invernal.
 - En el caso de la mina El Teniente, si bien no se observan efectos negativos, las medidas que se podrían considerar, apuntan a un aumento en la reutilización del recurso hídrico, lo cual permitiría que frente a posibles incrementos en la demanda del recurso, no se tuviera problemas con el abastecimiento en las fuentes de extracción.

Referencias

Anderson, E.A. (1978). Snow cover Energy Exchange, National Weather Service River Forecast System Manual and Documentation II.2.1-1, NOAA Office of Hydrology, U.S. National Weather Service.

Baede, A.P.M., Ahlonsou, E., Ding, Y., Schimel D. (2001). The Climate System, An Overview; Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.

Basaure, P. (2005). Análisis del uso de un modelo de simulación operacional generalizado para sistemas de Recursos Hídricos. Tesis para optar al Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Mención Recursos y Medio Ambiente Hídrico. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Biblioteca del Congreso Nacional (BCN, 2006). Servicios de Información Territorial, Síntesis Nacional y Regional, Regiones de Chile, VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins. < <http://www.bcn.cl>>

Bustamante, G. (2002). Determinación de los Períodos de Recurrencia de los caudales mínimos mensuales en la cuenca del río Cachapoal. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Carter, T.R., Hulme, M., Lal M. (1999). Guidelines on the use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment. Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, IPCC.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA, 2002). Política Ambiental de la Región del Lib. Bdo. O'Higgins.

Comisión Nacional de Riego (CNR, 1997). Cartografía de la Evapotranspiración Potencial en Chile.

Comisión Nacional de Riego (CNR, 2004). Cálculo de superficie regada por medio de tecnología de sensores remotos, 2ª Etapa. Estudio realizado por el Centro de Estudios Espaciales (CEE) de la Universidad de Chile.

Comisión Nacional de Riego (CNR, 2005). Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y algunas experiencias de organizaciones de usuarios del agua.

Comisión Nacional de Riego (CNR, 2006). Definición y Análisis de la Situación actual de las organizaciones de regantes en la VI Región. Estudio realizado por Agraria Sur Limitada.

Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA, 2006). Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI. Estudio realizado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

Dirección de Obras Hidráulicas (DOH, 1998). Modelo de Simulación Hidrológico Valle del Río Aconcagua. Tomo II, Anexo I y Manuales de Uso. Desarrollado por INGENDESA con la asesoría de AC Ingenieros Consultores Ltda.

Dirección General de Aguas (DGA, 2000). Complemento Diseño Modelación Hidrológica. Estudio realizado en conjunto con la Universidad de Concepción.

Dirección General de Aguas (DGA, 2004 a). Modelo de Simulación Quebrada Los Choros – Evaluación de los Recursos Hídricos en la Quebrada Los Choros, IV región de Coquimbo. Estudio realizado por Departamento de Estudios y Planificación de los Recursos Hídricos.

Dirección General de Aguas (DGA, 2004 b). Modelación Hidrogeológica Valle del Estero Casablanca. Estudio realizado por Departamento de Estudios y Planificación de los Recursos Hídricos.

Dirección General de Aguas (DGA, 2005 a). MAGIC v1.3: Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas. Manual de Referencia Técnica Versión 1.1, desarrollado por el Departamento de Estudios y Planificación.

Dirección General de Aguas (DGA, 2005 b). MAGIC v1.3: Modelación Analítica, Genérica e Integrada de Cuencas. Manual de Usuario Versión 1.1, desarrollado por el Departamento de Estudios y Planificación.

Dirección General de Aguas (DGA, 2005 c). Evaluación de los recursos hídricos subterráneos de la VI Región – Modelación Hidrogeológica de los Valles de Alhué, Cachapoal y Tinguiririca. Estudio realizado por el DICTUC.

Dirección General de Aguas (DGA, 2006). “Evaluación de la explotación máxima sustentable de los acuíferos de la VI Región – Modelación Hidrogeológica de los Valles de Alhué, Cachapoal y Tinguiririca”. Estudio realizado por la División de Recursos Hídricos y Medio Ambiente, Departamento Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Dirección Meteorológica de Chile (DMC, 2006 a). Fenómenos de El Niño - La Niña.
< http://www.meteochile.cl/climas/climas_sexta_region.html >

Dirección Meteorológica de Chile (DMC, 2006 b). Climas de Chile, Sexta Región.
< http://www.meteochile.cl/climas/climas_sexta_region.html >

Dirección Meteorológica de Chile (DMC, 2006 c). El Cambio Climático.
< <http://www.meteochile.cl/ayudaest.html> >

Dirección Nacional de Planeamiento (DNP, 2006). Informe de Síntesis Regional 2006, Región del Libertador General Bernardo O’Higgins.

Doorenbos, J., Pruitt, W.O. (1976). Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio perteneciente a la FAO. Roma, Italia.

D’Arcangeli, V. (1997). Variación Temporal de Algunos Factores Meteorológicos en Chile. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Edwards, F. (1987). Análisis y Calibración del Modelo de Simulación Hidrológica de Sacramento. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Empresa de Servicios Sanitarios del Bío-Bío (ESSBIO, 2005). Estudio de alternativas de modelamiento para el cuarto proceso tarifario Grupo 1, Etapa 1A: Estudios Hidrológicos e Hidrogeológicos (Rancagua – Machalí, San Fernando, Pichilemu). Estudio realizado por IFARLE Ingenieros Consultores.

Empresa de Servicios Sanitarios del Bío-Bío (ESSBIO, 2006). Actualizaciones Planes de Desarrollo Localidades VI Región. Estudios realizados entre Noviembre 2005 y Febrero 2006. Información disponible en la biblioteca de la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS).

Espíldora, B., Brown, E., Cabrera, G., Isensee, P. (1975). Elementos de Hidrología. Departamento Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Espinoza, C. (2005). Apuntes del Curso Hidráulica de Aguas Subterráneas, CI51J. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Espinoza, C. (2006). Apuntes del Curso Modelación de Aguas Subterráneas, CI71T. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Fuenzalida, H. (1971). Climatología de Chile. Departamento de Geofísica, Universidad de Chile.

Fuenzalida, H., Villagrán, C. (1989). Posibles efectos del cambio climático global en Chile. Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Volumen 4, Número 3, Diciembre 1989.

Guzmán, C. (2004). Gestión de los Recursos Hídricos de la Cuenca Hidrográfica río Coya y su relación con el mineral Codelco El Teniente VI Región. Tesis de Magíster. Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile.

Hadjigeorgalis, E., Riquelme, C. (2002). “Análisis de los precios de los derechos de aprovechamiento de aguas en el río Cachapoal”. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguera, M., van der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.

Instituto Nacional de Estadísticas (INE, 2007). Estadísticas Económicas – Agropecuarias. <www.inehiggins.cl/PDF/Agropecuaria.pdf>

Iglesias, A., Estrela, T., Gallart, F. (2005). Capítulo 7: Impactos sobre los Recursos Hídricos. Evaluación Preliminar de los Impactos en España por efecto del Cambio Climático (Ministerio de Medio Ambiente).

King, H. (1970). Variación de algunos factores meteorológicos en Chile a través del tiempo. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Kistler, R., Kalnay, E., Collins, W., Saha, S., White, G., Woollen, J., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Kanamitsu, M., Kousky, V., van den Dool, H., Jenne, R., y Fiorino, M. (1999). The NCEP/NCAR 50-year Reanalysis.
<ftp://ftp.cpc.ncep.noaa.gov/wd51we/reanal/bams_paper.2001/reanal2.htm>

Ledermann, J. (2001). Efecto del cambio climático global en el diseño de un embalse de riego. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

López, R. (2001). Impactos sobre Recursos Hídricos de Chile Central producto de los cambios climáticos. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Muñoz, R. (2006). Análisis de Técnicas de Escalamiento Espacial de Variables Meteorológicas en Cuencas Nivo – pluviales utilizando el Modelo Sacramento de Simulación Hidrológica. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Osses, A. (2006). Influence of Climate Change on Drinking Water Supply from a Reservoir in Santiago, Chile. Tesis de Magíster. Institute for Technology in the Tropics, University of Applied Sciences Cologne, Alemania.

Osses, A., Vargas, X. (2007). Análisis de Escenarios de Cambio Climático en el período 1980 – 2005 en la cuenca el Embalse El Yeso. XVII Congreso Chileno de Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

Peña, H. (1989). “Sensibilidad del régimen hidrológico de la cuenca superior del río Maipo a un cambio climático”. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, IX Congreso Nacional.

Real Academia Española (RAE, 2008). < <http://www.rae.es/>>

Robles, E. (1985). “Descripción del Modelo Sacramento”. Seminario Itinerante sobre los modelos matemáticos utilizados en predicción hidrológica, Montevideo, Uruguay.

Rojo, N. (2004). Modelo de Simulación de la Recarga del Acuífero de la Zona Norte de la ciudad de Santiago. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Scientific Software Group (SSG, 2008). Descripción de Modflow.
<http://www.scisoftware.com/products/modflow_details/modflow_details.html>

Singh, V.P. (1988). Hydrologic Systems, Volume 1: Rainfall-runoff modelling. Prentice Hall, New Jersey.

Singh, V.P. (1995). Computer Models of Wathershed Hydrology. Water Resources Publications.

Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS, 2005). Informes de gestión del sector sanitario 2004 y 2005. <<http://www.siss.cl/default.asp?cuerpo=1226>>

Todd, D., Mays, L. (2005). Groundwater Hydrology. John Wiley & Sons, Inc. (Tercera Edición.

Vargas, X. (2004). Apuntes del Curso Hidrología, CI41C. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Vargas, X. (2006). Apuntes del Curso Análisis Hidrológico y Evaluación de Recursos Hídricos Avanzados, CI61R. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

Vicuña Mackenna, B. (1877). El Clima de Chile: ensayo histórico.

Von Frey, A. (2004). Modelación del Acuífero de la Zona Norte de Santiago. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Wilby, R., Dawson, C. (2007). Manual de usuario de Statistical Downscaling Model (SDSM) versión 4.2.

Xu, C. (2002). Textbook of Hydrologic Models. Universidad de Upsala, Departamento de Ciencias de la Tierra, Hidrología. <<http://folk.uio.no/chongyux/textbook1.htm>>

Zeray, L. (2006). Climate Change Impact on Lake Ziway Watershed Water Availability, Ethiopia. Tesis de Magíster. Institute for Technology in the Tropics, University of Applied Sciences Cologne, Alemania.