

UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE LA CUENCA DEL ALTO CACHAPOAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

TOMÁS IGNACIO GÓMEZ ZAVALA

PROFESORA GUÍA

XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISION

JAMES MCPHEE TORRES

JULIO PINEDA ARIAS

SANTIAGO DE CHILE

2013

RESUMEN DE LA DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL POR: TOMÁS
IGNACIO GÓMEZ ZAVALA
FECHA: 08/06/2013
PROFESORA GUÍA: XIMENA VARGAS MESA.

EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DE LA CUENCA DEL ALTO CACHAPOAL

El cambio climático es un proceso que afecta y seguirá afectando diversos fenómenos naturales, entre los que se encuentra el ciclo hidrológico de vital importancia para la generación hidroeléctrica. Para evaluar el impacto sobre esta actividad, en la cuenca del Alto Cachoapal, en esta memoria se desarrollan modelos hidrológicos de los ríos Pangal, Cachapoal y Cipreses y modelos operacionales de las centrales Chacayes, Coya y Pangal, los cuales en conjunto con proyecciones meteorológicas, bajo escenarios de cambio climático, permiten realizar pronósticos, en este caso, para el período comprendido entre los años 2040 a 2070 en ese lugar.

El trabajo para hacer la evaluación señalada, se desarrolla en tres secciones. Estas secciones son:

- a. Creación de bases de datos por medio de proyecciones para el periodo futuro sobre variables meteorológicas, en particular de precipitaciones y temperaturas, utilizando los modelos climáticos de circulación global ECHAM5 y MK3.6, bajo escenarios SRES-A1B y RCP6.0, respectivamente, debidamente procesados para representar el contexto local.
- b. Calibración de modelos hidrológicos para los ríos de interés, los que una vez planteados permiten pronosticar sus caudales en periodos futuros, utilizando como información de entrada los pronósticos de las variables meteorológicas.
- c. Diseño de modelos operacionales de las centrales hidroeléctricas de interés, que, al utilizar las series de caudales proyectadas, permiten estimar los cambios esperados con respecto a un periodo de línea base.

Como consecuencia de los procedimientos anteriores, se obtuvieron los siguientes resultados:

- a. Ambos modelos de circulación global predicen una disminución cercana a un 20% de las precipitaciones en la cuenca y un aumento de 2°C a 4°C en las temperaturas, tanto a nivel mensual como anual.
- b. Se pronostican cambios en los regímenes hidrológicos de las cuencas: la ocurrencia del caudal máximo se adelanta, así como también el inicio del periodo de deshielo; el caudal medio anual disminuye entre un 20% y un 40%, según qué modelo climático e hidrológico se utiliza.
- c. La generación hidroeléctrica de la central Chacayes disminuye entre un 11% y un 22% y el de la central Coya entre un 2% y un 7%. En la central Pangal se presenta un comportamiento disímil según sea el modelo, haciendo variar la distribución mensual de producción, pero sin generar una disminución de la potencia. Además, se observa un cambio en la distribución temporal de los meses con mayor generación.

AGRADECIMIENTOS

Junto con el término de esta memoria, también llega el fin de una etapa de la vida que creo y espero haber sabido aprovechar al máximo, el cual ahora ya es hora de cerrar. Sin embargo, y como en todo buen cierre, siento necesario hacer una pausa y evaluar lo vivido y agradecer a quienes fueron un apoyo y un aporte, y que colaboraron en gran parte a haber hecho de estos años lo mejor que pudieron ser.

Indudablemente, la película se la roban mis padres queridos, Marcela y Hernán, sin quienes esto no podría haber sido posible: omitiendo el hecho no menor de haberme dado la vida, su apoyo y cariño ha sido incondicional en todo momento (jamás olvidar cuando mi madre querida me felicita por haber reprobado Hidráulica o por haber tenido la nota más baja en un control de Mecánica, aludiendo a que son experiencias que uno tiene que vivir...). Muchas gracias por cuidarme, regalarme y haberme apoyado incluso cuando esto significara que me fuera lejos por un tiempo... Los quiero infinito.

Por supuesto, tampoco puedo dejar de nombrar a mi Chechi querida, quien siempre me malcría y que más de una vez me ha salvado un almuerzo con su beca alimenticia... Una mención honrosa merecen mis hermanos Jorge e Isabel, por ser los vivos ejemplos de que era posible estudiar en Beauchef y tener vida de todas formas.

Por supuesto, el paso por la U no tiene sentido si no se tiene buena compañía. En mi caso, siento que tiene todo el sentido del mundo. Hay mucha gente con quien compartí, muchas personas con quienes estuvimos en estudios y en carretes, en noches de informes y en paseos, y a todos les doy las gracias pero siempre hay quienes se destacan. Parto por mis ocho favoritos de primero¹, aquellos con los que compartí tantos cafés y otros bebestibles que es imposible acordarse ya (...), y de los cuales tuve la suerte que tres de ellos me acompañaran a Civil. En Civil, se suman dos más al stock de favoritos – un dieciochero y uno que me acompañó por el mundo – y ya en hidráulica aún todavía llegan dos más – un partner y una que es tan (mucho más) drama como yo. Mención aparte tienen mi manga de Diablos que son demasiados y demasiado importantes como para empezar a hintear (cof cof.. un doctor, un samoano, un acalambrado y un zorrón, cof cof) y a los otros Tukys que andan por el mundo, haciendo de las suyas...

Y aunque la compañía es importante, se necesitan también guías en este periodo. Aquí es donde debo agradecer muy especialmente a mi profesor James McPhee, de quién conocí y aprendí a querer la hidrología y en especial, a mi profesora Ximena Vargas, quien profundizó este cariño y confió en mí, dándome oportunidades y desafíos, de los que espero haber estado a la altura y haber sabido responder.

Last but not less, un gracias gigante a esa persona con la que nos turnamos para andar cruzando un océano, que me tuvo una paciencia infinita y que soportó mis gruñidos más que nadie...

¹ Una que es como un saucito, uno que se ríe piola (?), una chinita deportista, uno que improvisa , una que es mi amiga lana, uno que puro corría y ahora vuela, uno que lee caminando y uno que maletea siempre...

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	iii
Agradecimientos.....	iii
Índice de Contenidos.....	iv
Índice de Tablas	vi
Índice de Figuras	vii
1. Introducción.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Estructura del Informe	3
2. Revisión Bibliográfica.....	4
2.1 Antecedentes Cambio Climático.....	4
2.2 Modelación	6
2.2.1 Modelación Hidrológica.....	7
2.2.2 Modelación Climática	13
2.3 Métodos de Procesamiento de Información	16
2.3.1 Proceso de Escalamiento - Downscaling	17
2.4 Generación Hidroeléctrica	20
2.4.1 Generación	20
2.4.2 Distribución	20
2.5 Series Sintéticas	22
3. Caracterización Zona de Estudio.....	24
3.1 Ubicación y antecedentes de la región en estudio	24
3.2 Geología y Relieve.....	25
3.3 Clima	27
3.4 Uso de Suelo.....	27
3.5 Recursos Hídricos de la Cuenca	27
3.5.1 Recursos Superficiales	28
3.5.2 Recursos Subterráneos	28
3.6 Instalaciones hidroeléctricas.....	28
3.7 Delimitación de las cuencas en estudio.....	29
3.8 Información Disponible.....	33
3.8.1 Temperatura	33
3.8.2 Precipitaciones.....	33
3.8.3 Registro de Caudales.....	34
4. Procesamiento de datos	37
4.1 Datos Calibración	37
4.1.1 Temperaturas.....	37
4.1.2 Precipitaciones.....	38
4.1.3 Humedad Relativa	38
4.1.4 Velocidad de Viento	39
4.1.5 Índice de nubosidad.....	40
4.2 Datos de Proyecciones	40

4.2.1	Escalamiento de datos PRECIS-ECHAM5	41
4.2.2	Escalamiento de datos MK3.6	46
4.2.3	Proyecciones de Índice de Nubosidad y Viento	47
4.3	Análisis de resultados del proceso de escalamiento	48
4.3.1	Temperaturas	48
4.3.2	Precipitaciones	52
5.	Planteamientos de Modelos	59
5.1	Modelos Hidrológicos	59
5.1.1	Análisis de Sensibilidad de los Modelos	67
5.2	Modelos Operacionales	71
5.2.1	Modelo Chacayes	72
5.2.2	Modelo Conjunto Coya-Pangal	74
6.	Resultados de Proyecciones	81
6.1	Proyecciones Meteorológicas y sus implicancias	81
6.2	Proyecciones de Caudales	89
6.2.1	Río Pangal	91
6.2.2	Río Cachapoal	95
6.2.3	Río Cipreses	98
6.3	Proyecciones de Generación	101
6.3.1	Modelo Chacayes	102
6.3.2	Modelo Coya-Pangal	107
7.	Comentarios y Conclusiones	114
8.	Referencias Bibliográficas	118
Anexos		121
A.	Ecuaciones del Modelo WEAP	121
B.	Delimitación de Cuenca mediante modelos de elevación digital.	123
C.	Gradientes de Temperaturas	124
D.	Gradientes de precipitaciones	126
E.	Valores de Caudales obtenidos de las Proyecciones	128

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Trayectorias representativas de concentración.....	6
Tabla 2-2. Potenciales efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos	7
Tabla 2-3. Parámetros del método de humedad del suelo	12
Tabla 2-4. Parámetros meteorológicos y climatológicos de WEAP	12
Tabla 2-5. Resolución de modelos globales climáticos	16
Tabla 3-1. Coordenadas de puntos de interés.....	30
Tabla 3-2. Propiedades geomorfológicas de las cuencas.....	32
Tabla 3-3. Parámetros hidrológicos adicionales de las cuencas.	32
Tabla 3-4. Especificaciones de estaciones de registro de temperatura.....	33
Tabla 3-5. Especificaciones estaciones de precipitaciones.....	34
Tabla 3-6. Longitudes de registro de las estaciones fluviométricas.....	35
Tabla 4-1. Selección de puntos representativos de PRECIS.....	42
Tabla 4-2. Distribuciones de probabilidad ajustadas para generación de temperaturas.	44
Tabla 4-3. Estadísticos de índice de nubosidad.	47
Tabla 4-4. Variación de las intensidades de las precipitaciones según modelo.....	57
Tabla 5-1. Periodos de calibración y validación de los modelos.....	59
Tabla 5-2. Valores de propiedades geomorfológicas de las bandas.	59
Tabla 5-3. Parámetros calibrados para cada cuenca	61
Tabla 5-4. Valores de los indicadores de modelación hidrológica.	62
Tabla 5-5. Desempeño general de los modelos.	68
Tabla 5-6. Propiedades de las unidades de las centrales Coya y Pangal.	76
Tabla 6-1. Especificaciones de series de entrada para las proyecciones.	81
Tabla 6-2. Rangos de seguridad según margen comprendido.	82
Tabla 6-3. Temperaturas medias en grados celsius ponderadas en las cuencas.	82
Tabla 6-4. Precipitaciones medias en mm ponderadas a la cuenca del río Pangal.....	83
Tabla 6-5. Precipitaciones medias ponderadas sobre la cuenca del río Cachapoal.	83
Tabla 6-6. Precipitaciones medias ponderadas sobre la cuenca del río Cipreses.	84
Tabla 6-7. Centro de gravedad de los perfiles de elevación de nieve.	86
Tabla 6-8. Variación de almacenamiento nival máximo en equivalente de agua.....	87
Tabla 6-9. Variación de día de máximo almacenamiento nival.	87
Tabla 6-10. Valores de Coeficiente de Escorrentía.....	88
Tabla 6-11. Comparación de caudales simulados y de reanálisis río pangal.....	90
Tabla 6-12. Comparación de caudales simulados y de reanálisis río Cachapoal.	90
Tabla 6-13. Potencia media generable de la Central Chacayes	103
Tabla 6-14. Energía total media mensual generable en la central Chacayes	105
Tabla 6-15. Potencia media generable de la Central Pangal.	107
Tabla 6-16. Potencia media generable de la central Coya.....	108
Tabla 6-17. Energía total media mensual generable en la central Pangal.....	110
Tabla 6-18. Energía total media mensual generable en la central Coya.	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1. Esquema explicativo de los escenarios SRES.....	5
Figura 2-2. Tipos de modelos Hidrológicos.....	8
Figura 2-3. Esquema de las variables del método de humedad del suelo.....	11
Figura 2-4 - Ejemplos de proyecciones de diversos modelos globales climáticos.....	14
Figura 2-5. Ilustración de escalamiento y la relación entre GCM y resoluciones menores.....	17
Figura 2-6. Diagrama explicativo de la ponderación por inverso de la distancia.....	19
Figura 3-1. Ubicación de la zona de estudio.	24
Figura 3-2. Geología de los ríos Cachapoal y Tinguiririca.....	26
Figura 3-3. Usos de suelo de la VI región.	27
Figura 3-4. Diagrama de las cuencas definidas por los puntos de interés.....	30
Figura 3-5. Curvas hipsométricas de las cuencas en estudio.	32
Figura 3-6. Ubicación de estaciones de registro de la DGA.....	33
Figura 3-7. Climograma según estaciones base seleccionadas.....	34
Figura 3-8. Curva de variación estacional río Pangal en Pangal.....	36
Figura 3-9. Curva de variación estacional río Cachapoal 5 km. bajo Cortaderal.....	36
Figura 4-1. Ejemplo de gradiente de temperatura generado para días sin precipitación para el mes de Enero.	37
Figura 4-2. Velocidades de viento para cada banda de elevación a nivel mensual.....	39
Figura 4-3. Proceso de escalamiento y remoción de sesgo.....	42
Figura 4-4. Verificación de las funciones de transferencia de la temperatura.	49
Figura 4-5. Curvas de duración diarias, mensuales y anuales de la temperatura en línea base y proyecciones.	50
Figura 4-6. Promedios Mensuales modelo MK3.6, PRECIS y promedios anuales.....	52
Figura 4-7. Verificación del escalamiento de precipitaciones.....	53
Figura 4-8. Curvas de duración de precipitaciones diaria, mensual y anual.....	54
Figura 4-9. Valores medios anuales de precipitación por periodo y modelo.....	55
Figura 4-10. Promedios mensuales de precipitación y número medio de días con precipitación mayor a cero según modelo.	56
Figura 5-1. Serie de caudales observados y modelados para las cuencas del estudio.....	63
Figura 5-2. Comparación de caudales simulados con observados, curva de duración diaria, comparación de valores mensuales y valores de caudal medio para la cuenca del río Cachapoal.....	64
Figura 5-3. Comparación de caudales simulados con observados, curva de duración diaria, comparación de valores mensuales y valores de caudal medio para la cuenca del río Pangal.....	65
Figura 5-4. Análisis de Sensibilidad de las variables de mayor variación del modelo Cachapoal.	68

Figura 5-5. Análisis de sensibilidad de las variables de mayor variación del modelo Pangal.	70
Figura 5-6. Eficiencia conjunta para la central Chacayes en el rango de caudales factibles.	74
Figura 5-7. Esquema de prioridades de generación del sistema Coya-Pangal.	75
Figura 5-8. Diagrama de flujo del modelo operacional Coya-Pangal.	78
Figura 6-1. Altura de nieves promedio para el modelo MK3.6 y para el modelo PRECIS	86
Figura 6-2. Comparación de valores simulados con los diferentes reanálisis.	89
Figura 6-3. Análisis de caudales generados para el río Pangal: caudales medios, curva de duración diaria, curvas de duración mensual y anual y curvas de variación estacional según modelo.....	92
Figura 6-4. Variaciones de caudales mensuales en el río Pangal.....	93
Figura 6-5. Variaciones porcentuales de los caudales para el río Pangal.	93
Figura 6-6. Variaciones de caudales mensuales en el río Cachapoal.....	95
Figura 6-7. Variación porcentual de los caudales en el río Cachapoal.....	95
Figura 6-8. Análisis de caudales generados para el río Cachapoal: caudales medios, curva de duración diaria, curvas de duración mensual y anual y curvas de variación estacional según modelo.....	96
Figura 6-9. Variaciones absolutas de caudales mensuales del río Cipreses.....	98
Figura 6-10. Variación porcentual de los caudales del río Cipreses.....	98
Figura 6-11. Análisis de caudales generados para el río Cipreses: caudales medios, curva de duración diaria, curvas de duración mensual y anual y curvas de variación estacional según modelo.....	99
Figura 6-12. Proyecciones de generación media en la central Chacayes	102
Figura 6-13. Variación porcentual de la potencia proyectada.	104
Figura 6-14. Energía media mensual generable en la central Chacayes.	104
Figura 6-15. Curva de variación estacional de potencia proyectada según el escenario RCP6.0-MK3.6	105
Figura 6-16. Curva de variación estacional de potencia proyectada según el escenario A1B del modelo PRECIS-ECHAM5.	106
Figura 6-17. Proyecciones de potencia de la central Pangal.....	108
Figura 6-18. Proyecciones de potencia de la central Coya.....	108
Figura 6-19. Energía media mensual generable en la central Pangal.	111
Figura 6-20. Energía media mensual generable en la central Coya.....	111
Figura 6-21. Solución gráfica del total de Potencia Generable según la combinación de caudales afluentes a las bocatomas.....	112
Figura 6-22. Comparación de los valores de caudales mensuales medios y su potencial generación.	113

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

El agua es un elemento fundamental para el desarrollo de la vida humana. No solo para su consumo, donde se requiere inherente e imprescindible para el desarrollo de la vida de todo tipo, sino que también es un insumo básico para el desarrollo de múltiples actividades que tienen directa relación de nuestra sociedad. Actividades como la minería, la generación hidroeléctrica y la agricultura presentan una dependencia directa y evidente del agua, y serían impracticables en ausencia de la misma.

En consideración de estas actividades resulta importante para la sociedad la comprensión de los fenómenos asociados a la disponibilidad hídrica. En particular, dada la geografía característica de nuestro país, la electricidad que se obtiene a través de centrales de origen hidráulico resulta ser una de las dos fuentes principales de abastecimiento. Este tipo de generación contribuyó en un 34% de la electricidad consumida en Chile durante el año 2010 [MMA, 2011], y se espera que este porcentaje aumente durante el siglo XXI, en desmedro de otros tipos de energía. Evidentemente, para que esto sea posible, se requiere del insumo básico que es el agua, cuya disponibilidad se encuentra condicionada por el ciclo hidrológico. Este, a su vez, se encuentra condicionado por las condiciones climáticas de cada zona e influye en el tipo de régimen de la cuenca, la acumulación de nieves, la cantidad de agua evaporada, entre otros fenómenos. Todos ellos presentan una relación directa con variables meteorológicas como la precipitación y la temperatura, por lo cual cualquier variación en éstas podría generar una alteración en la respuesta hídrica de la cuenca y, en casos muy drásticos incluso un cambio del régimen hídrico de la cuenca.

Con respecto a este último punto, el calentamiento del sistema global climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar. Estas observaciones efectuadas en todos los continentes y la mayoría de los océanos evidencian que numerosos sistemas naturales están siendo afectados por cambios climáticos a nivel regional, generalmente por un aumento de las temperaturas observadas. [IPCC², 2007]

En particular dentro del territorio nacional, estudios recientes muestran cambios en la temperatura, observándose disminuciones en los sectores del océano y la costa, y aumentos en el valle central y la cordillera, para el periodo 1979-2006. [Falvey y Garreaud, 2006].

Para enfrentar el punto anterior se han realizado proyecciones para el siglo XXI bajo diversos escenarios de emisión definidos por el IPCC. En éstas se proyectan para el territorio nacional incrementos en la temperatura media, pudiendo estos llegar a presentar valores entre 1°C y 4°C hacia finales de siglo dependiendo del escenario. En el caso del escenario A2 (el más

² Panel Intergubernamental del Cambio Climático, por sus siglas en inglés IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change.

desfavorable), se observarían en la región andina, aumentos de incluso hasta 5°C en la estación de verano [CONAMA, 2007].

Estas proyecciones han motivado una serie de estudios, tanto globales como locales a través de la utilización de diversos modelos de proyección climática, sobre el efecto que podrían tener en la disponibilidad de los recursos hídricos de nuestro país, llegando a resultados que apuntan en general a una disminución de los caudales disponibles en la totalidad de las cuencas estudiadas, y en los casos más severos, un cambio en el régimen hidrológico de las mismas [Mena, 2009; Salgado, 2010; Mardones, 2009].

Si bien esas evaluaciones han logrado una buena modelación de los recursos hídricos bajo diferentes escenarios de proyección global, existe una carencia de antecedentes y estudios acerca de los potenciales efectos directos de estos cambios, en las diferentes actividades que dependen directamente del recurso hídrico. De particular interés resulta el análisis de centrales hidroeléctricas de paso, las cuales debido a la operación inherente a su definición, no poseen la capacidad de almacenar agua y por lo tanto no presentan la capacidad de transferir recursos entre periodos estacionales o anuales, como sería capaz una central que cuente con una obra de embalse. Este hecho hace que las centrales de paso presenten una condición de dependencia mucho mayor a la meteorología de la región y que por tanto sea mucho más sensible a potenciales cambios climáticos. Resulta interesante y provechoso entonces analizar la eventual situación futura de este tipo de centrales, considerando que tienen un efecto directo sobre la realidad de nuestro país y de su funcionamiento.

1.2 OBJETIVOS

Se presentan a continuación los objetivos de este trabajo, tanto el objetivo general como los específicos:

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este trabajo consiste en evaluar el impacto del cambio climático sobre la potencial generación de centrales hidroeléctricas localizadas en la cuenca del Alto Cachapoal, ubicadas en la VI región del Libertador Bernardo O'Higgins bajo diversos escenarios, en un horizonte de mediano plazo, periodo 2041-2070, mediante la implementación del módulo hidrológico del modelo de planificación WEAP³.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos del estudio son:

1. Implementar un modelo hidrológico de la cuenca del Alto Cachapoal, en particular de los ríos Pangal y Cachapoal, mediante el programa WEAP.
2. Escalar y generar series de proyecciones de datos meteorológicos bajo diferentes condiciones de proyecciones futuras que sean representativas del lugar de interés para este estudio.

³ Water Evaluation and Planning.

3. Utilizar este modelo para predecir series de futuros caudales para el periodo 2041-2070 bajo distintos escenarios de proyecciones de cambio climáticos.
4. Generar un modelo operacional de las centrales que represente adecuadamente el funcionamiento de éstas según sus reglas de operación actuales.
5. Evaluar el impacto del cambio climático sobre la potencial generación hidroeléctrica en las centrales hidroeléctricas Cachapoal, Coya y Pangal, al simular su funcionamiento con las proyecciones de caudal generadas, utilizando para ello los modelos operacionales desarrollados.

1.3 ESTRUCTURA DEL INFORME

En el capítulo 2 se entrega una recopilación de los antecedentes encontrados en la literatura sobre el cambio climático, las tendencias que se han observado durante el último tiempo y distintos modelos y escenarios que se han definido para generar proyecciones que son de utilidad al momento de realizar estudios como el presente. En base a esta información se seleccionan los escenarios sobre los cuales se trabaja. Se incluyen adicionalmente en este capítulo los antecedentes referentes al funcionamiento del modelo WEAP utilizado en el desarrollo de este trabajo.

En el capítulo 3 se describe la zona en estudio y sus principales características. Se delimitan las cuencas del río en estudio, con su correspondiente análisis de los recursos hídricos presentes en la cuenca. Se presenta también antecedentes adicionales de la cuenca tales como su clima, su geomorfología y el uso de suelo, entre otros.

El procesamiento de la información que fue utilizada como base para la modelación, tales como series de temperaturas, precipitaciones y caudales, entre otros, es presentado en el capítulo 4. Adicionalmente en este capítulo, se procesan y analizan las proyecciones de los datos requeridos para simulaciones futuras, en base a procesos de escalamiento aplicados a datos obtenidos de modelos globales climáticos.

En el capítulo 5 se incluye todo lo referente a modelación: por un lado se tiene la delimitación, calibración y validación de los modelos hidrológicos de las cuencas y por otro, la creación de modelos de operación básica de las centrales hidroeléctricas involucradas.

En el capítulo 6 se presentan los resultados de las proyecciones, tanto de caudales para las cuencas en estudio, como de la generación potencial esperada, al tomar como forzantes meteorológicas, los datos obtenidos de las proyecciones de los modelos climáticos para el periodo futuro.

Finalmente, en el capítulo 7 se realizan comentarios y conclusiones sobre el estudio realizado, así como recomendaciones para futuros trabajos.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 ANTECEDENTES CAMBIO CLIMÁTICO

Cerca de la mitad del siglo XIX debido a la segunda revolución industrial, la utilización de combustibles fósiles se convirtió en la principal fuente de energía de diversos procesos productivos. Una consecuencia directa de esto es el incremento de la emisión y presencia en la atmósfera de gases tales como el dióxido y el monóxido de carbono, debido a los procesos de combustión que generan como desechos estos productos, liberándolos directamente a la atmósfera.

Debido a este incremento de emisiones de gases (tanto de los asociados al carbono como de otros aerosoles) la composición química de la atmósfera se vio sometida a cambios drásticos con lo cual comenzó a producirse el llamado Efecto Invernadero, una disminución de la radiación neta que logra salir de la atmósfera terrestre, generando entonces un incremento de la temperatura global. Esto trae como consecuencias diversos efectos sobre el clima a nivel global, como por ejemplo variaciones de temperatura, cambios de regímenes hidrológicos de cuencas, nivel del mar, disminución de hielo entre los polos, alteraciones de los regímenes de precipitaciones, entre otras.

Si bien en algún momento se consideró la posibilidad de que estos fenómenos de cambio climático pudiesen estar asociados con procesos naturales del ecosistema global, hoy en día el IPCC declara con un grado de confianza muy alto que el efecto neto de las actividades humanas desde 1850 ha sido el responsable del aumento de la temperatura, concluyendo que la variación de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles en la atmósfera, y las variaciones de la cubierta terrestre y de la radiación solar, alteran el equilibrio energético del sistema climático [IPCC, 2007].

Si bien las causas de esta alteración atmosférica se encuentran presentes desde hace aproximadamente dos siglos, es durante los últimos tres decenios que ha sido más evidente que nunca su efecto. Durante este periodo el calentamiento por acciones antropogénicas ha ejercido probablemente una influencia discernible, a escala mundial, sobre los cambios observados en numerosos sistemas físicos y biológicos. La concordancia espacial entre las regiones del mundo que han experimentado un calentamiento observable y los lugares en que se han observado cambios apreciables en numerosos sistemas, coincidiendo con el calentamiento, muestran que es muy improbable que se deba únicamente a la variabilidad natural. Varios estudios de modelación han vinculado ciertas respuestas específicas de los sistemas físicos y biológicos al calentamiento antropogénico [Santer, 1995; Rosenzweig, 2008].

Con el fin de proveer un marco de trabajo sobre el cual trabajar, la ONU a través del IPCC ha definido distintos escenarios de proyección de emisiones atmosféricas para encausar en una forma común los estudios que se realizan: para la elaboración del cuarto informe resumen del

cambio climático se definieron los escenarios SRES⁴, los cuales entregan una serie de supuestos de evolución del mundo en distintos ámbitos -sociales, demográficos y tecnológicos – que condicionan las emisiones de gases de efecto invernadero, así como también de las directrices de desarrollo en que se enfoquen las naciones. Dentro de estas directrices, se tienen dos principales direcciones que presentan alternativas opuestas: por un lado se definen las familias de escenarios 1 y 2 dependiendo si es que existe un énfasis en el desarrollo a nivel global o regional respectivamente; por otro lado, se definen las familias A y B dependiendo si es que se prioriza el desarrollo económico o bien políticas medioambientales. Esta explicación se puede ver gráficamente de forma más fácil en la :

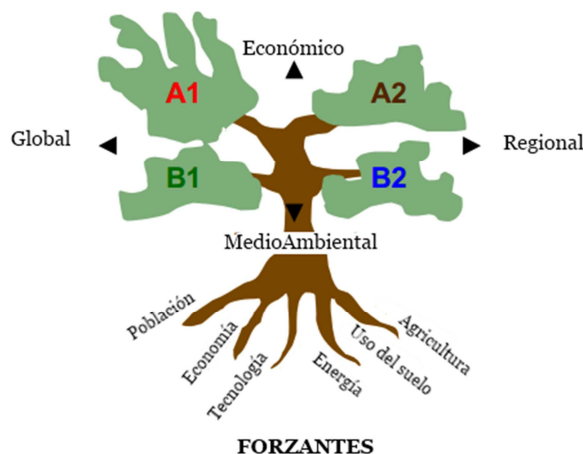


FIGURA 2-1. ESQUEMA EXPLICATIVO DE LOS ESCENARIOS SRES.
FUENTE: MODIFICADO DE NAKICENOVIC ET AL, 2000.

Por otro lado, en el marco de preparación del quinto reporte resumen de cambio climático se han elaborado un conjunto de nuevos escenarios que se enfocan no en la definición de escenarios sociales sino más bien en los efectos prácticos del cambio climático, definiendo como factor preponderante el incremento de radiación solar que permanece dentro de la atmósfera y reconociendo que estos valores pueden ser alcanzados por medio de múltiples condiciones de desarrollo. [Taylor et al, 2009] Estos escenarios son comúnmente conocidos como *Trayectorias Representativas de Concentración*, comúnmente referenciadas como los escenarios RCP⁵ y representan el actual estado del arte en lo que se refiere a parámetros de referencia de modelación climática, al ser los escenarios más actualizados y que sirven como marco de referencia en la elaboración del próximo informe del IPCC sobre cambio climático [Taylor et al, 2009]. Una breve descripción de cada uno de las trayectorias se observa en la Tabla 2-1, donde se observa la cantidad de radiación que queda atrapada en la atmósfera, el equivalente en partículas de CO₂ atmosférico y el comportamiento esperado.

⁴ SRES – Special Reports on Emission Scenarios. Reporte elaborado por el IPCC con la finalidad de unificar los posibles escenarios sobre los cuales se podría trabajar de manera de unificar esfuerzos en los estudios de evaluación de cambio climático.

⁵ Por sus siglas en ingles de Representative Concentration Pathways.

TABLA 2-1. TRAYECTORIAS REPRESENTATIVAS DE CONCENTRACIÓN.
FUENTE: MODIFICADA DE MOSS ET AL, 2010

Nombre	Radiación Forzante (Wm ⁻²)	Concentración atmosférica [ppm]	Comportamiento
RCP 8.5	> 8.5 en el año 2100	> 1370 CO ₂ -equiv. en 2100	En aumento
RCP 6.0	~6 una vez estabilizado después del año 2100	~850 CO ₂ -equiv. (estabilización posterior al año 2100)	Estabilización sin aumentos radicales
RCP 4.5	~4.5 una vez estabilizado después del año 2100	~650 CO ₂ -equiv. (stabilization after 2100)	Estabilización sin aumentos radicales
RCP 2.6	Radiación máxima de ~3 antes del año 2100 con descenso posterior.	Concentración máxima de ~490 CO ₂ -equiv. antes del año 2100, con descenso posterior	Valor máximo a mediados de siglo y posterior descenso.

Hay un alto nivel de coincidencia y abundante evidencia que apunta a que, aún con las políticas actuales de mitigación de los efectos del cambio climático y con las prácticas de desarrollo sostenible que aquellas conllevan, las emisiones mundiales de GEI (Gases de Efecto Invernadero) seguirán aumentando en los próximos decenios. De proseguir las emisiones de GEI a una tasa igual o superior a la actual, el sistema climático mundial experimentaría durante el siglo XXI numerosos cambios, muy probablemente con efectos más notorios que los observados durante el siglo XX. Aun en el caso de que se mantuvieran constantes las concentraciones de todos los gases de efecto invernadero y aerosoles en los niveles del año 2000, cabría esperar un aumento promedio de las temperaturas medias de aproximadamente 0,1°C por decenio.

Teniendo los puntos anteriores en consideración, es posible observar que diversos efectos del cambio climático afectarán directamente los recursos hídricos, de múltiples formas, como las que se presentan en la Tabla 2-2.

Adicionalmente a estos efectos, se esperan otros de gran magnitud proyectados a otros sectores que también son susceptibles a variaciones del clima y que tienen una relación que puede ser directa o indirecta en relación con el funcionamiento de las sociedades. Se proyecta que sectores tales como la agricultura, la silvicultura, los ecosistemas, la salud humana, la industria y los asentamientos también se verán afectados por estas alteraciones.

2.2 MODELACIÓN

El proceso de modelación corresponde a la representación desarrollada por medio de algún tipo de herramientas ya sean físicas, matemáticas, conceptuales, esquemáticas, físicas, teóricas o de cualquier otra metodología que permita desarrollar una simulación respecto de alguna fenomenología en estudio, pudiendo ser ésta última cualquiera de las ramas de las ciencias. La finalidad de una modelación consiste en la utilización de ésta como una herramienta para la simulación, desarrollo, estudio y análisis de diversos escenarios que pudiesen resultar de interés según sea el caso de estudio que se tenga. Algunas áreas y ciencias que comúnmente utilizan la modelación como herramienta son la economía, la estadística, la

computación, el análisis estructural, la hidrología y la climatología, siendo de especial interés para el desarrollo de este trabajo estas dos últimas.

TABLA 2-2. POTENCIALES EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS
FUENTE: IPCC

Fenómenos y dirección de la tendencia	Probabilidad de tendencias de proyecciones de cambio para el siglo XXI	Efecto sobre Recursos Hídricos
En áreas terrestres, días y noches frecuentemente muy cálidos y menos frecuentemente fríos.	Prácticamente seguro	Dependiendo del deshielo, efecto sobre algunos suministros hídricos
Aumento de la frecuencia, en la mayoría de las extensiones terrestres, de períodos cálidos y de olas de calor.	Muy probable	Aumento de la demanda de agua; problemas de calidad del agua (por ejemplo, por proliferación de algas)
Aumento de la frecuencia, en la mayoría de las regiones, de episodios de precipitación intensa.	Muy probable	Efectos adversos sobre la calidad del agua superficial y subterránea; contaminación de los suministros hídricos; posiblemente, menor escasez de agua.
Áreas afectadas por el aumento de sequías.	Probable	Mayores extensiones afectadas por estrés hídrico.
Aumento de la intensidad de los ciclones tropicales.	Probable	Cortes de corriente eléctrica causantes de la alteraciones del suministro hídrico público.
Mayor incidencia de subidas extremas del nivel del mar (con excepción de los tsunamis).	Probable	Menor disponibilidad de agua dulce por efecto de la intrusión de agua salada.

2.2.1 MODELACIÓN HIDROLÓGICA

La modelación hidrológica se define como el uso de modelos matemáticos para la simulación de los procesos de transporte de agua que ocurren dentro de una cuenca. Estos modelos pueden estar basados en las ecuaciones físicas que rigen el comportamiento de las

variables dentro de una cuenca o pueden ser de naturaleza conceptual, donde se representan los procesos que ocurren dentro de la cuenca a través de esquemas y algoritmos simplificados.

Los modelos hidrológicos pueden ser clasificados según los tipos mostrados en la Figura 2-2.

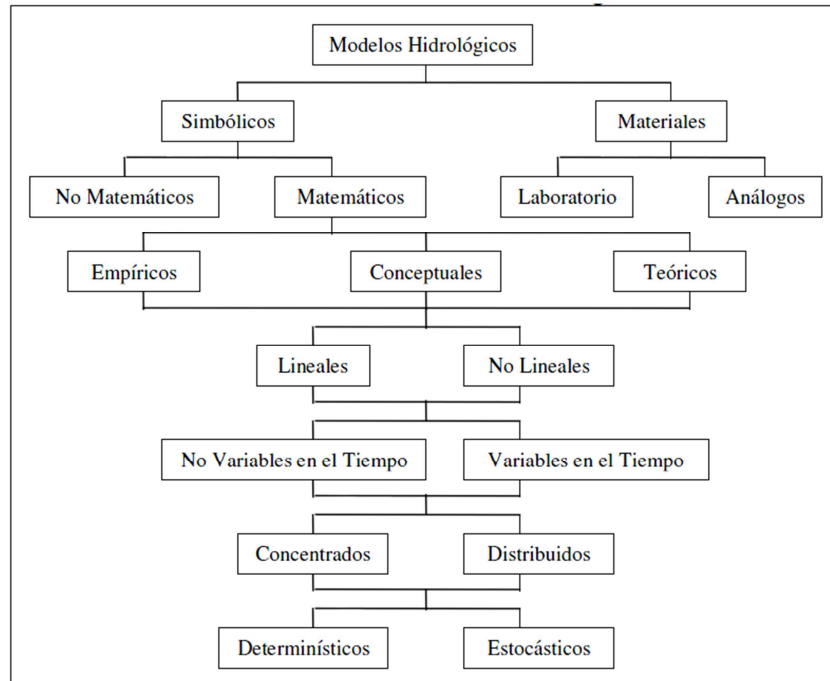


FIGURA 2-2. TIPOS DE MODELOS HIDROLÓGICOS.
FUENTE: MODIFICADO DE XU, 2002

2.2.1.1 Índices de Modelación Hidrológica

Para evaluar la calidad de un modelo hidrológico se utilizan distintos índices. Sin embargo, cada uno de ellos presenta características según su definición que pueden entregar un buen resultado a pesar de presentar errores sistemáticamente o en algunos casos sobre valorar algunos errores [Krause, 2005]. Es por esto que se utiliza un conjunto de tres índices de evaluación para lograr una mayor precisión de resultados. Los índices que se ocupan son los siguientes:

a. Coeficiente de Determinación – r^2

El coeficiente de correlación r^2 se define como el valor al cuadrado del coeficiente de correlación definido por Bravais-Pearson. Se calcula como:

$$r^2 = \left(\sum_{i=1}^n \frac{(O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} * \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad \text{ECUACIÓN 2-1}$$

Donde los valores O corresponden a los valores observados y los P a los valores predichos por el modelo. El problema de este indicador es que no reconoce problemas de sub o sobrestimación sistemática por lo que no se recomienda su uso como único indicador. Su valor varía entre 0 y 1, donde un valor de 1 representa una mejor concordancia entre los datos observados y los modelados.

b. Índice de Nash-Sutcliffe - E

El índice de eficiencia propuesto por Nash y Sutcliffe en 1970 se define como:

$$E_0 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad \text{ECUACIÓN 2-2}$$

Donde los valores O corresponden a los valores observados y los P a los valores predichos por el modelo. Su valor varía entre $-\infty$ y 1. Si su valor es menor a cero, quiere decir que el promedio de los valores observados representa una mejor estimación que la modelación hecha. El problema de este índice resulta en que sobrestima el error producido por valores singulares muy grandes mientras que menosprecia el error de valores pequeños mal modelados.

c. Índice de Nash-Sutcliffe Logarítmico – Ln(E)

Representa una variación del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe. Su fórmula es la misma que la de este último con la salvedad de que se usan los valores log de la variable para evitar el problema de la diferencia entre valores muy grandes y muy pequeños.

$$E_{Ln} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Ln(O_i) - Ln(P_i))^2}{\sum_{i=1}^n (Ln(O_i) - Ln(\bar{O}))^2} \quad \text{ECUACIÓN 2-3}$$

2.2.1.2 Modelación WEAP

El modelo a utilizar en este trabajo, WEAP, corresponde a un modelo simbólico, ya que utiliza ecuaciones para simular los procesos asociados, lo que a su vez lo clasifica dentro de los modelos matemáticos. Además, corresponde a un modelo conceptual ya que utiliza simplificaciones de las variables que intervienen en el ciclo hidrológico, no lineal, no variable en el tiempo ya que asume una condición invariante de la cuenca durante los años, semi-distribuido ya que distribuye de forma discreta las variables observadas y finalmente determinístico ya que las ecuaciones no consideran procesos estocásticos para calcular las variables hidrológicas de la cuenca.

Dentro de los modelos que se han utilizado en Chile para simular procesos hidrológicos destaca este modelo, el cual se ha utilizado en diversas ocasiones debido a su simpleza y buenos resultados para simular escenarios de cambio climático [Mena, 2009; Mardones, 2009; Cortés, 2010; Lagos y Vargas, 2009].

El software de modelación hidrológica WEAP – Water Evaluation And Planning – es una iniciativa desarrollada por el Stockholm Environment Institute, cuyo objetivo es ser una herramienta de ayuda para la modelación, planificación, evaluación y simulación de la gestión de recursos hídricos. Provee un marco de trabajo amigable al usuario, flexible y de modelación para la gestión de recursos hídricos [SEI, 2012]. En este trabajo se explota principalmente la faceta que permite la modelación hidrológica.

El programa WEAP permite la modelación de una cuenca al representar ésta en función de diversas posibles subdivisiones de ella a elección, como puede ser en unidades de subcuencas por punto de interés o bandas de elevación. En cada una de estas subdivisiones, cuya elección se determina en función de los requerimientos y necesidades de la modelación, se ingresan variables meteorológicas tales como temperatura, precipitación, radiación solar, entre otras, con los cuales el programa desarrolla una estimación de los caudales de la cuenca modelada.

Como se señaló anteriormente, el programa WEAP utiliza un modelo semi-conceptual para la evaluación de los procesos que ocurren al interior de la cuenca, ofreciendo tres metodologías diferentes, según sea el objetivo que se tiene:

- i. Precipitación/Escurrimiento
- ii. Demandas de riego
- iii. Humedad del suelo

El primer método, precipitación/escurrimiento, resulta una buena aproximación en algunos casos donde el estudio no busca una mayor profundidad y no se consideran demasiados factores, pero carece de la profundidad necesaria para el tipo de análisis que se quiere desarrollar en este trabajo.

El segundo método, demandas de riego, tiene un enfoque centrado en las actividades agrícolas, por lo que tampoco es considerado adecuado, dado el enfoque final que considera este trabajo.

El tercer método nombrado, humedad del suelo, es la opción de modelo semi-conceptual más completo de los nombrados y representa una buena alternativa al momento de simular los procesos hidrológicos de la cuenca en estudio, al representar adecuadamente todos los fenómenos que es posible observar en el ciclo hidrológico y las distintas fases que puede adoptar el recurso hídrico, por medio de ecuaciones simplificadas de los procesos físicos involucrados.

El método de humedad del suelo representa cada una de las captaciones definidas por el usuario como un modelo de dos “estanques” que presentan interacciones entre ellos según el esquema de la Figura 2-3. Esquema de las variables del método de humedad del suelo
Fuente: weap user manual, modificado para este trabajo. Figura 2-3.

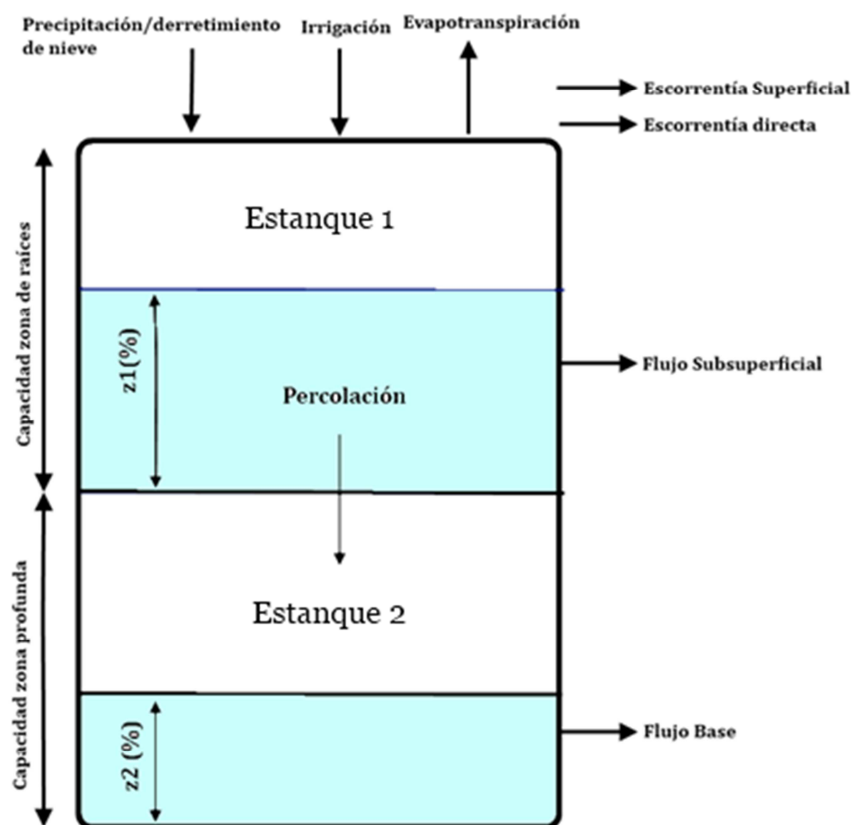


FIGURA 2-3. ESQUEMA DE LAS VARIABLES DEL MÉTODO DE HUMEDAD DEL SUELO
FUENTE: WEAP USER MANUAL, MODIFICADO PARA ESTE TRABAJO.

Las ecuaciones específicas que rigen los procesos se pueden ver en el anexo A. Estas ecuaciones son aplicadas a cada una de las captaciones usando como datos de entrada la información meteorológica. Como resultado se obtiene un valor de caudal proveniente de esa captación. Dependiendo de la definición de las captaciones, estos caudales podrían ser utilizados directamente (por ejemplo en el caso de que una captación representara una cuenca por sí sola) o bien requerir de algún tipo de agregación al ser necesario integrar varias series de caudales de diferentes captaciones (como por ejemplo en el caso de que una cuenca se modelara según bandas de elevación) para representar adecuadamente una cuenca.

Se presenta en la Tabla 2-3 la definición de cada una de las variables involucradas en los procesos de cálculo de los algoritmos del programa, según lo especificado en las ecuaciones del anexo A. De estas variables, solo la información de área y los valores iniciales de z_1 y z_2 no deben ser calibrados: en el caso de la primera variable corresponde a información definida por la delimitación de la cuenca mientras que para las otras su valor inicial no influye en el proceso de calibración después de un cierto lapso de tiempo, por lo que al considerar un periodo de “warm up” del modelo sus valores pueden quedar exentos de calibración (no obstante, intentar asignarles valores cercanos a los que se tienen en una condición de equilibrio puede ser una ayuda para el proceso de calibración).

TABLA 2-3. PARÁMETROS DEL MÉTODO DE HUMEDAD DEL SUELO

Parámetro	Traducción	Unidad	Descripción
Area	Área	m ² o km ²	Área de cada captación definida.
Crop coefficient	Coefficiente de cultivo	-	Coefficiente de cultivo utilizado por la FAO para calcular evapotranspiración.
Soil Water Capacity	Capacidad de la capa superior de suelo	mm	Capacidad de retención de agua de la primera capa de suelo.
Deep Water Capacity	Capacidad de la capa inferior de suelo	mm	Capacidad de retención de agua de la capa profunda de suelo.
Runoff Resistance Factor	Factor de resistencia a la escorrentía	-	Parámetro que controla la magnitud de escorrentía directa.
Root Zone Conductivity	Conductividad de la capa superior de suelo	mm/mes o mm/día	Conductividad hidráulica de la primera capa de suelo.
Deep Conductivity	Conductividad de la capa inferior de suelo	mm/mes o mm/día	Conductividad hidráulica de la capa de suelo profunda.
Preferred Flow Direction	Dirección preferida de flujo	%	Factor que divide flujo entre las capas.
Initial Z1	Z1 inicial	%	Porcentaje de humedad inicial de la capa superior de suelo.
Initial Z2	Z2 inicial	%	Porcentaje de humedad inicial de la capa inferior de suelo.

Evidentemente, para que el modelo simule caudales se requiere cierta información meteorológica y geográfica. Se muestra en la Tabla 2-4 el conjunto de valores específicos requeridos por el modelo. La escala temporal de la información definirá en que frecuencia se entreguen los resultados: información diaria entregara una simulación de caudales a nivel diario; una mensual entregará los caudales promedios de un mes y así sucesivamente.

TABLA 2-4 PARÁMETROS METEOROLÓGICOS Y CLIMATOLÓGICOS DE WEAP

Parámetro	Traducción	Unidad	Descripción
Precipitation	Precipitación	mm/mes	Precipitación que cae sobre cada área
Temperature	Temperatura	mm/día	Temperatura media registrada en cada área.
Humidity	Humedad Relativa	%	Humerdad relativa registrada en cada área.
Wind	Viento	m/s	Velocidad media del viento registrada en cada área
Cloudiness fraction	Fracción cubierta por nubes	%	Fracción del cielo cubierto en cada área
Rnet	Radiación neta incidente	W/m ²	Radiación incidente adicional
Latitude	Latitud	°	Latitud de la zona en estudio
Initial Snow	Nieve inicial	mm equivalente en agua	Nieve inicial observada en cada área.
Melting Point Td	Temperatura de derretimiento	°C	Temperatura de derretimiento para el método grado día (mes) del modelo
Freezing Point Ts	Temperatura de congelación	°C	Temperatura de congelación para el método grado día (mes) del modelo

De esta información, hay alguna que debe ser agregada como parte del proceso de calibración. Estas variables corresponden a las siguientes: Melting Point, Freezing Point y Rnet. En particular, esta última variable será modelada con una distribución sinusoidal a lo largo del año, a través de una ecuación de la forma señalada en la Ecuación 2-4:

$$R_{net} = R_{base} + R_{var} * \cos(t) \quad \text{ECUACIÓN 2-4}$$

Donde R_{base} es el valor promedio de radiación incidente, R_{var} es la amplitud de la variación de radiación y el tiempo t corresponde al día en que se está aplicando la radiación, ajustado de tal forma que es consecuente con los periodos estacionales.

La cantidad de nieve inicial puede suponerse como cero al definir como comienzo del proceso de calibración el inicio de cada año hidrológico. Todo el resto de las variables que se encuentran en la Tabla 2-4 no nombradas anteriormente corresponden a información que debe ser entregada como datos de entrada para obtener la serie de caudales como resultado.

2.2.2 MODELACIÓN CLIMÁTICA

Considerando los antecedentes señalados anteriormente sobre cambio climático, la comunidad científica ha realizado un esfuerzo por comprender los efectos, impactos y consecuencias que éste tendrá sobre el planeta. En el marco de llevar a cabo esta evaluación, el estudio, análisis y proyección de lo que sucederá con las variables climatológicas a nivel global resulta un paso fundamental. Para desarrollar predicciones de variables meteorológicas en periodos futuros de manera de poder estimar las variaciones a las que estas se verán sujetas, es que diversos actores, tales como centros de investigación, universidades, entre otros, han desarrollado diversos modelos globales – GCM, Global Circulation Model - que consideran diversas condiciones y escenarios, sobre los cuales desarrollan proyecciones. Sin embargo, un modelo global surge de la integración de otros dos modelos: un modelo de predicción atmosférica y un modelo de predicción oceánico.

Un modelo de predicción meteorológica se compone de un conjunto de ecuaciones matemáticas que intentan modelar los procesos que relacionan las propiedades atmosféricas que se quiere predecir y los mecanismos físicos que influyen estas propiedades. Dentro de su formulación estos modelos incluyen ecuaciones, procesos físicos parametrizables, procedimientos numéricos y condiciones iniciales que permiten un desarrollo integral de todo el escenario global en función de un conjunto de condiciones forzantes que son modificables con la finalidad de representar diversos escenarios futuros.

Por otro lado, también es posible encontrar modelos oceánicos, los cuales operan de manera análoga a un modelo de predicción meteorológico, pero haciendo lo propio con los procesos que se dan en los océanos. Lógicamente, estos también incluyen todas las componentes necesarias de un modelo, como las ecuaciones por las que se rige, la inclusión de procesos físicos, procedimientos numéricos y las condiciones iniciales.

Dado que ambos modelos presentan ciertas variables en común y la interacción natural y evidente que se da entre los ambientes que pretenden representar, es posible realizar una

integración de ambos a través de forzar ciertas variables que compartan en común, con lo cual se realiza un proceso de acoplamiento dinámico entre ambos, dando origen entonces a un modelo integrado y global.

Cada uno de estos modelos al ser simbólico presenta distintos planteamientos sobre los cuales trabaja, como por ejemplo distintas definiciones de resolución en la cual se calculara o por supuesto las mismas ecuaciones sobre las cuales se desarrollan. Se han desarrollado más de una veintena de modelos globales climáticos diferentes, que aunque presentan diferentes principios e hipótesis llegan a resultados razonablemente similares, bajo los mismos escenarios de emisiones, como es posible ver en la Figura 2-4. Dentro de este conjunto de modelos, se presentan a continuación dos que resultan de particular interés ya que son los utilizados para el desarrollo de proyecciones en este trabajo.

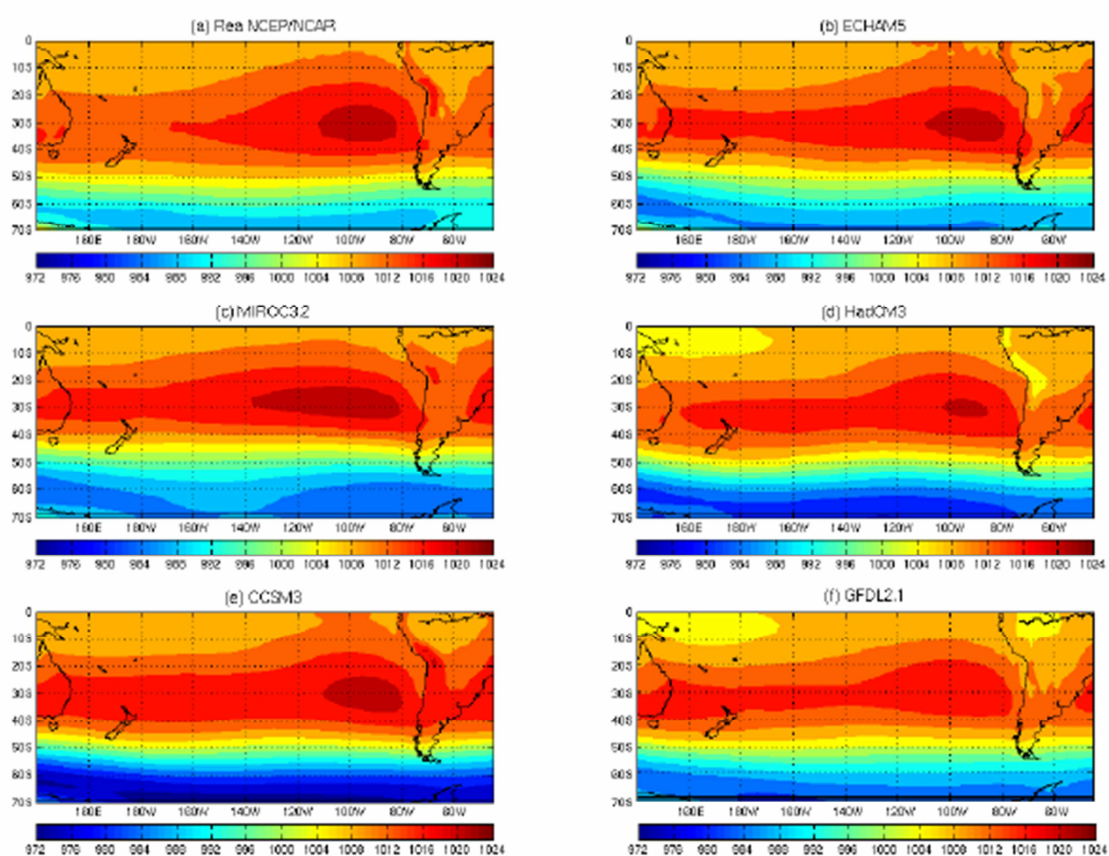


FIGURA 2-4 - EJEMPLOS DE PROYECCIONES DE DIVERSOS MODELOS GLOBAES CLIMÁTICOS
FUENTE: IPCC, 2007

CSIRO MK3.6

El modelo acoplado oceánico-atmosférico MK3.6 es desarrollado en conjunto por dos instituciones australianas: el *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* – *CSIRO* – y el instituto *Queensland Climate Change Centre of Excellence* –

QCCCE – en el marco del proyecto de intercomparación de modelos acoplados, fase 5 – CMIP5. Este modelo presenta una resolución horizontal de aproximadamente $1,9^{\circ} \times 1,9^{\circ}$ y cada punto atmosférico está relacionado con dos puntos oceánicos, con el fin de mejorar las interacciones interanuales entre ambas componentes. Representa una actualización de la versión anterior del modelo CSIRO-MK3.5 desarrollado por los mismos institutos [Gordon et al, 2010]. Sin embargo, presenta una mejora considerable con respecto a su antecesor al incorporar dentro de sus planteamientos la inclusión de una dinámica interactiva de los aerosoles a nivel atmosférico para modelar de mejor manera la forzantes radiativas atmosféricas. [Collier,2011].

Este modelo basa sus forzantes y directrices de sus proyecciones, en el contexto entregado por el CMIP5 y por tanto, utiliza las definiciones de los escenarios RCP para la definición de las variables atmosféricas en el desarrollo de sus cálculos [Taylor et al, 2009], además de cumplir con todas las exigencias para considerarse un modelo válido como fuente de información para estudios de proyección [Collier, 2011].

Analizando la información que entrega este modelo - el acceso a los datos es de libre disposición con fines de investigación – se observa que representa de manera adecuada la estacionalidad del hemisferio y que presenta puntos de información cercanos a los puntos de análisis que podrían resultar interesantes de análisis, por lo que se le selecciona como uno de los modelos a utilizar dentro de este estudio.

ECHAM 5

ECHAM es un modelo de circulación global de procedencia alemana desarrollado por el Instituto de Meteorología Max Planck, una de las organizaciones de investigación de la sociedad Max Planck. Fue creado al modificar los modelos de predicción global desarrollados por ECMWF⁶, desarrollados para estudios de investigación del clima.

El modelo recibe su nombre de una combinación de sus orígenes: EC es la abreviación de ‘ECMWF’ y HAM por el lugar donde se realizó su parametrización, Hamburgo. La configuración por defecto del modelo entrega resultados para la atmósfera de hasta 10 hectopascales (usada principalmente para estudios en la atmósfera baja), pero puede ser reconfigurado hasta para 0.01 hPa para ser usado en el estudio de la estratósfera y de la mesósfera baja.

Presenta múltiples cambios con respecto a versiones anteriores, siendo uno de los más destacables el cambio en la reformulación de procesos que ocurren en áreas terrestres, así como la base de datos de geografía superficial, lo cual es altamente importante si se considera que las variaciones de los modelos en general tienden a ser más divergentes en las áreas continentales. También se incluye en la nueva formulación la inclusión de nuevos parámetros para considerar orografía, correcciones a la radiación, entre otros cambios que contribuyen a mejorar el modelo.

⁶ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts: Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo

El modelo ECHAM en su versión 5 fue evaluado bajo los escenarios SRES en todas sus versiones. En particular, este modelo fue utilizado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile como condiciones de borde para realizar una simulación regional con la metodología PRECIS – *Providing Regional Climate for Impact Studies*⁷ - como una manera de refinar la información a una escala más de detalle para mejorar las proyecciones, como se explica en mayor detalle en la sección a continuación.

2.3 MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

En el punto 2.2.3 se presentan modelos de proyección climática los cuales generan una serie de datos para distintos parámetros meteorológicos, en distintas resoluciones para toda la grilla del globo terrestre, tales como precipitación y temperatura, los cuales al ser aplicados a un modelo hidrológico debidamente calibrado y validado entregan estimaciones razonables de valores de potencial interés tales como caudales e información variada de los recursos hídricos. Estos datos podrían a su vez ser utilizados para evaluar los efectos del cambio climático sobre diversos ámbitos, como por ejemplo la disponibilidad de agua para actividades agrícolas, o como en el caso de estudio presente, de generación hidroeléctrica.

Sin embargo, para realizar este proceso, es importante notar que existe una diferencia de escala a la cual se encuentra la información. Es posible observar en la Tabla 2-5 que las resoluciones de los modelos globales resultan demasiado gruesas para la escala del análisis que se quiere realizar: ambas dimensiones superan en varios ordenes la escala a la que se quiere trabajar, y hace que los datos pierdan cierta representatividad, ya que en el desarrollo de trabajos más locales como en una cuenca hidrográfica, hay factores tales como la orografía del lugar, que generan grandes variaciones en diversos lugares de la cuenca y el asumirlos homogéneamente sería una negligencia considerable. Sin embargo, existen diversos métodos a través de los cuales se puede abordar este problema.

TABLA 2-5. RESOLUCIÓN DE MODELOS GLOBALES CLIMÁTICOS

Modelo	Resolución			
	Horizontal		Vertical	
	Atmósfera	Océano	Atmósfera	Océano
ECHAM5	1.9° x 1.9°	1.5° x 1.5°	32	40
CSIRO-MK3.6	1.87° x 1.87°	1.25°x1.25°	19	20

Debido a lo anterior, es necesario realizar un procesamiento de la información obtenida de los GCM, de manera que se adapte de manera correcta a la escala a la cual se está trabajando, lo cual se realiza a través de los llamados procesos de escalamiento. Estos procesos son diversos en procedimientos y metodologías, y suponen un procesamiento de datos, por lo que será necesario además realizar una evaluación de los resultados obtenidos.

⁷ PRECIS: “Proyecciones de clima regional para estudios de impacto.”

2.3.1 PROCESO DE ESCALAMIENTO - DOWNSCALING

En contraste con la naturaleza global que se da en el análisis de los modelos climáticos y las simulaciones que estos realizan, las demandas que surgen desde la sociedad se enfocan en impactos regionales y las consecuencias locales de fenómenos de mayor escala. Sin embargo, es en esta área donde las técnicas de análisis presentan un desarrollo menor. Aunque los modelos de circulación global, herramientas primordiales en el estudio del cambio climático, proveen de simulaciones bastante precisas vistas desde una escala global, hemisférica y continental, el nivel más detallado de representación de éstos tiende a ser generalmente considerado altamente erróneo, especialmente en el área de la hidrología. [Hewitson et al, 2006]

Es en base a esta necesidad que se han desarrollado diversos métodos de refinar la información entregada por los GCM, dentro de los cuales existen distintas categorías. Un esquema de las distintas escalas asociadas al problema de derivar variables a nivel local (escala menor), se muestra en la Figura 2-5.

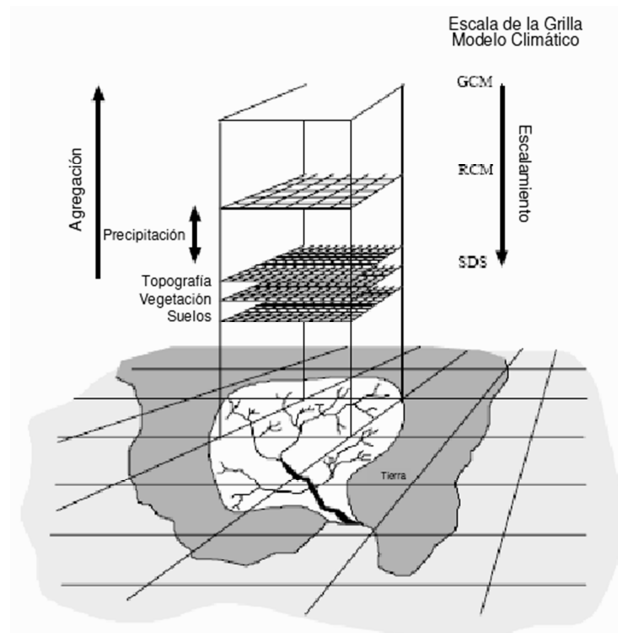


FIGURA 2-5. ILUSTRACIÓN DE ESCALAMIENTO Y LA RELACIÓN ENTRE GCM Y RESOLUCIONES MENORES

FUENTE: MODIFICADO DE WILBY ET AL, 2007

Las metodologías para realizar escalamiento pueden ser de diversos tipos, variando estos en planteamientos físicos o estadísticas, así como de procedimiento. En este trabajo se utilizan en particular los siguientes:

a. Modelación Regional Dinámica

Uno de los métodos más comúnmente utilizados es la anidación de una nueva rejilla, a una resolución menor, dentro de una de las cuadrillas de la resolución mayor y donde se usan

como condiciones de borde las condiciones de las cuadrículas laterales. Una de las metodologías más desarrolladas que utilizan este proceso corresponde a la llamada PRECIS (Providing Regional Climate for Impact Studies), desarrollado por la Oficina Meteorológica del Reino Unido. Sin embargo, esta metodología no es fácilmente aplicable y requiere de grandes recursos computacionales para ser llevada a cabo.

En Chile, se han realizado dos simulaciones en el marco de proyectos desarrollados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, la última de ellas desarrollada durante el año 2011 utilizando como condiciones de borde los datos entregados por el modelo ECHAM5 y simulado para el periodo 1970-2100 en todo el territorio nacional y se encuentran disponibles para libre acceso de cualquier usuario.⁸ Esta metodología entrega datos a gran resolución y se presenta como una buena alternativa de información para los estudios de impacto de cambio climático a nivel local.

b. Escalamiento Espacial

De no estar disponible la información por medio de la metodología anterior y contar solo con información directamente extraída de los modelos globales climáticos, es posible realizar otros procedimientos que apuntan a mejorar la representación en algún punto de interés. De particular interés resultan los del tipo escalamiento espacial. Este escalamiento espacial corresponde a realizar una ponderación de los puntos donde se tiene información con respecto a la ubicación específica donde se necesita la información a través de algún factor que sea influyente sobre la representatividad de los valores.

Para este estudio, se escoge la distancia al punto de interés como factor ponderador. Existen diversos métodos aplicables, entre los cuales destacan:

- a. Utilización del punto más cercano: reconociendo que el punto más cercano en la malla de puntos con información pudiese representar de manera más apropiada la información del lugar en estudio debido a la inclusión de factores geográficos, se propone elegir este punto sin ponderación alguna y como representación adecuada.
- b. Método del inverso de la distancia: este método pondera respecto al inverso de la distancia de los puntos que forman la grilla que rodea al punto de interés, a través de la fórmula que se muestra en la Ecuación 2-5.

$$X = \frac{\sum \frac{X_i}{d_i}}{\sum \frac{1}{d_i}} \quad \text{ECUACIÓN 2-5.}$$

⁸ Datos extraíbles desde la dirección web < <http://mirasol.dgf.uchile.cl/PRECIS-ECHAM.html>>. "Datos/figuras obtenidos del Proyecto Anillos SOC-28: Impactos Sociales Ambientales del Cambio Climático Global en la Región del Bío-Bío".

Un diagrama explicativo de este tipo de ponderación se presenta en la Figura 2-6. El objetivo de esta ponderación consiste en reducir la participación que tienen aquellos puntos que se encuentran a una mayor distancia en el valor final que se tiene para la ubicación que se quiere representar.

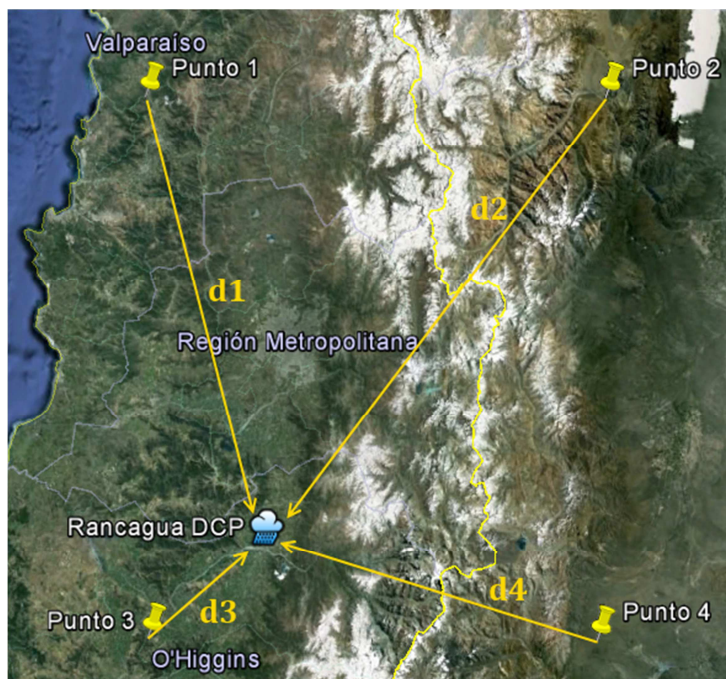


FIGURA 2-6. DIAGRAMA EXPLICATIVO DE LA PONDERACIÓN POR INVERSO DE LA DISTANCIA.

- c. Método del cuadrado inverso de la distancia: similar a la metodología presentada en el punto b, la gran diferencia con ésta es que la ponderación se hace por el cuadrado de la distancia de manera de reducir la influencia de aquellos puntos que se encuentran más lejos y aumentar aún más la de aquellos que están cerca en comparación los otros. Se presenta su forma de cálculo en la Ecuación 2-6.

$$X = \frac{\sum \frac{X_i}{d_i}}{\sum \frac{1}{d_i^2}} \quad \text{ECUACIÓN 2-6}$$

La elección de una de estas metodologías dependerá del punto a representar y será necesario contrastar los resultados con información local de registros para confirmar que se la más adecuada.

2.4 GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

2.4.1 GENERACIÓN

La generación hidroeléctrica se basa en la utilización de la energía potencial gravitatoria que posee la masa de agua de un cauce natural en virtud de un desnivel. Al hacer caer el agua por este desnivel y que este flujo pase a través de una turbina, la energía cinética generada es transmitida a un generador donde ésta se transforma en energía eléctrica.

Según lo anterior, la cantidad de energía generable dependerá principalmente de dos factores: caudal disponible y altura neta de caída del agua entre el nivel de la turbina y su captación. El caudal disponible para generación dependerá del río en el que se ubica la central; la altura de caída dependerá no solo de la diferencia de cotas entre la captación y la descarga (altura bruta) sino que también considera las pérdidas generadas por la aducción. Adicionalmente también se deben considerar factores de eficiencia de los equipos de turbina, generador y transformador, que tienen como consecuencia una disminución de la energía generable. Considerando todos estos factores, se presenta la Ecuación 2-7 que entrega la relación que se da entre estas variables y la potencia.

$$Potencia = 9.8 * Q * H_n * \eta_{turbina} * \eta_{generador} * \eta_{transformador} * \gamma_{agua}$$

ECUACIÓN 2-7

Es importante saber diferenciar entre los conceptos de potencia y energía: el primero corresponde a la cantidad máxima de energía generable y se mide en Watts (W) mientras que el segundo corresponde a la generación que se obtiene al utilizar la planta durante un periodo de tiempo y se mide en Watts Hora (Wh).

La generación de electricidad a través del uso del agua requiere de la construcción de ciertas obras hidráulicas de captación y conducción del agua, ya sea directamente desde el río o bien desde un embalse, que puede ser natural (en el caso de lagos) o artificial (en el caso de una represa). Esto genera una primera forma de categorías entre las centrales hidroeléctricas: aquellas que captan directamente desde el cauce natural y que no poseen capacidad de embalses son llamadas centrales hidroeléctricas de paso o pasada mientras que aquellas que presentan obras hidráulicas cuya finalidad es almacenar agua para generar a disposición son denominadas centrales de embalse. Mientras que las primeras resultan relativamente más sencillas de operar en su proceso de generación debido a que carecen de capacidad de embalse y que por lo tanto no es posible realizar grandes manejos del caudal afluente a los equipos generadores (salvo a nivel intradiario), las segundas presentan una mayor complejidad operacional debido a los costos de oportunidad asociados que conlleva el permitir el paso de agua para la generación.

2.4.2 DISTRIBUCIÓN

La distribución de electricidad en Chile se realiza principalmente a través del Sistema Interconectado Central (SIC), que es una red de conexiones que abarca desde la Tercera hasta la Décima Región. Este Sistema es el mayor de los cuatro sistemas eléctricos que suministran energía al territorio chileno, con 2200 kilómetros de largo, abasteciendo aproximadamente el

93% de la población. Junto con el SIC, en Chile operan el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), el Sistema Eléctrico de Aysén y el Sistema Eléctrico de Magallanes.

En cada uno de los sistemas interconectados se encuentran como proveedores todas las instalaciones con capacidad de generar electricidad conectadas a la red, sin importar el insumo que puedan tener como fuente. Esto se traduce en que todas las centrales eléctricas se encuentran conectadas a la misma red de distribución, y por lo tanto compiten por cuál de ellas es la que proveerá la energía al sistema según las demandas que este tenga.

La responsabilidad de asignar qué central proveerá la electricidad para suplir las demandas instantáneas en tiempo real que existen, cae sobre el Centro de Despacho Económico de Carga (CDEC). Esta entidad existe para cada uno de los sistemas interconectados y se denominan comúnmente con la conjunción de las siglas de ambos: para el caso del sistema interconectado central se denomina CDEC-SIC, siendo éste el de mayor interés para este estudio.

El CDEC-SIC se crea frente a la necesidad de compatibilizar el sistema de tarificación a costo marginal, según lo establece la ley General de Servicios Eléctricos de 1982, y la operación del parque generador del sistema a mínimo costo del conjunto, para dar cumplimiento a los contratos de suministros suscritos por las empresas generadoras.

Los antecedentes legales que llevan a la constitución del CDEC-SIC se encuentran en la ley General de Servicios Eléctricos, publicada mediante el Decreto con Fuerza de Ley N° 1 de 1982, del Ministerio de Minería, la que en su artículo N° 81 establece, entre otras disposiciones, que la operación de las instalaciones eléctricas de los concesionarios de cualquier naturaleza que operen interconectados entre sí, deberán coordinarse con el fin de:

- a. Preservar la seguridad del servicio en el sistema eléctrico.
- b. Garantizar la operación más económica para el conjunto de las instalaciones del sistema eléctrico.
- c. Garantizar el derecho de servidumbre sobre los sistemas de transmisión establecidos mediante concesión.

El punto b. resulta de especial interés, ya que en la práctica se traduce en que las centrales hidroeléctricas de paso como las involucradas en este estudio se encuentran en estado de generación permanentemente debido a que sus costos marginales involucrados son menores que las de cualquier otro tipo de generación (con excepción de las ERNC que no presentan una participación mayor en el sistema interconectado de estudio).

2.5 SERIES SINTÉTICAS

El concepto de series sintéticas surge de la creación de conjuntos alternativos que presenten propiedades y características estadísticas idénticas a alguna serie de tiempo de algún tipo de variable, como por ejemplo meteorológica (como por ejemplo precipitaciones y temperaturas) o hidrológica (comúnmente los caudales) que sean de interés y para la cual se requiera de escenarios alternativos. Estos procesos incorporan una variable estocástica que entrega la variabilidad buscada. La serie de esta variable de interés debe ser estacionaria y aleatoria, por lo que persistencia, dada por la tendencia x^* y la ciclicidad deben eliminarse.

Existen diversas formas para generar series sintéticas en base a alguna serie original, entre los cuales se encuentran:

a. Modelos autoregresivos - AR.

En este tipo de modelos el valor presente del proceso se expresa como una combinación lineal de los valores previos del mismo y de un impacto a_t . Al denotar los valores del proceso en instantes igualmente espaciados de tiempo por Z_t, Z_{t-1}, \dots y los valores del proceso, una vez removida la media por X_t, X_{t-1}, \dots en que $X_t = Z_t - \mu$, entonces el valor presente de X_t se define en un proceso según lo expuesto en la Ecuación 2-8.

$$X_t = a_t + \pi_1 * X_{t-1} + \pi_2 * X_{t-2} + \dots = a_t + \sum_{j=1}^{\infty} \pi_j X_{t-j} \quad \text{ECUACIÓN 2-8}$$

Donde π representa un parámetro del modelo.

Es importante destacar que el valor de la variable a_t está directamente asociada a la varianza de los residuos obtenida, lo cual permite la generación de series sintéticas consecuentes.

Dependiendo del número de parámetros, se define el orden del modelo. Un modelo que presenta un número p de parámetros se reconoce como un modelo autoregresivo de orden p .

b. Modelos de media móvil

En este tipo de modelos el valor presente del proceso se expresa como una combinación lineal de los impactos aleatorios previos y presentes. Utilizando la misma definición de las variables del punto a de X_t y Z_t , este tipo de modelos queda definido por la

$$X_t = a_t + \varphi_1 * a_{t-1} + \varphi_2 * a_{t-2} + \dots = a_t + \sum_{j=1}^{\infty} \varphi_j a_{t-j} \quad \text{ECUACIÓN 2-9}$$

Donde φ representa un parámetro del modelo.

Al igual que en el caso de los modelos autoregresivos, el orden de un modelo de media móvil queda definido por el número de parámetros que considere.

c. Modelos ARMA y ARIMA

Estos tipos de modelos surgen de la combinación de los dos modelos anteriores. En el primer caso – modelo ARMA - se mantiene un principio de estacionareidad, donde la media de la serie se mantiene constante. Por otro lado, en el caso de un modelo ARIMA – modelo autoregresivo integrado de promedio móvil – que convierte a través de formulaciones algebraicas una serie de un proceso no estacionario a uno estacionario.

Al tomar como información una serie de datos originales, y plantear con ésta ya sea alguno de los modelos anteriormente nombrados o alguna otra metodología que permita generar algún tipo de algoritmo el cual permita la creación de nuevos conjuntos de elementos, es posible obtener series sintéticas que representan alternativas a la serie original y a través de las cuales es posible realizar análisis de variabilidad. Este proceso puede ser realizado por ejemplo para la serie de caudales obtenidos o para variables meteorológicas, tales como la temperatura y la precipitación [Parot, 1988].

Su aplicación práctica en este trabajo consiste en el desarrollo y creación de series sintéticas de las variables meteorológicas más importantes – precipitación y temperatura – por medio de alguna metodología que sea aplicable. Estas series generadas deberán cumplir con los requisitos de similitud estadística a la serie original y serán posteriormente utilizadas para generar escenarios alternativos de resultados que permitan obtener un rango de confianza en las proyecciones finales.

3. CARACTERIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO

3.1 UBICACIÓN Y ANTECEDENTES DE LA REGIÓN EN ESTUDIO

La Sexta Región del Libertador General Bernardo O'Higgins es una de las quince regiones en que se encuentra dividido el territorio nacional chileno. Está compuesta por tres provincias y 33 comunas y su capital es la ciudad de Rancagua. Su nombre se debe en honor al prócer libertador y Padre de la Patria, don Bernardo O'Higgins Riquelme. Es también conocida simplemente como VI Región de O'Higgins.

La Sexta Región de O'Higgins limita por el norte con la Quinta Región de Valparaíso y la Región Metropolitana de Santiago, por el oeste con el Océano Pacífico, por el este con la República Argentina, y por el sur con la Séptima Región del Maule. La región se extiende entre los 33° 51' y los 35° 01' de latitud sur y desde los 70° 02' de longitud oeste hasta el Océano Pacífico. Su superficie, calculada por el Instituto Geográfico Militar, es de 16.387 [km²].

La cuenca del río Cachapoal, incluyendo las subcuencas de los ríos Pangal, Los Cipreses Cortaderal y Cachapoal se encuentra ubicada en el sector cordillerano septentrional de la VI región del Libertador Bernardo O'Higgins, como se aprecia en la Figura 3-1.

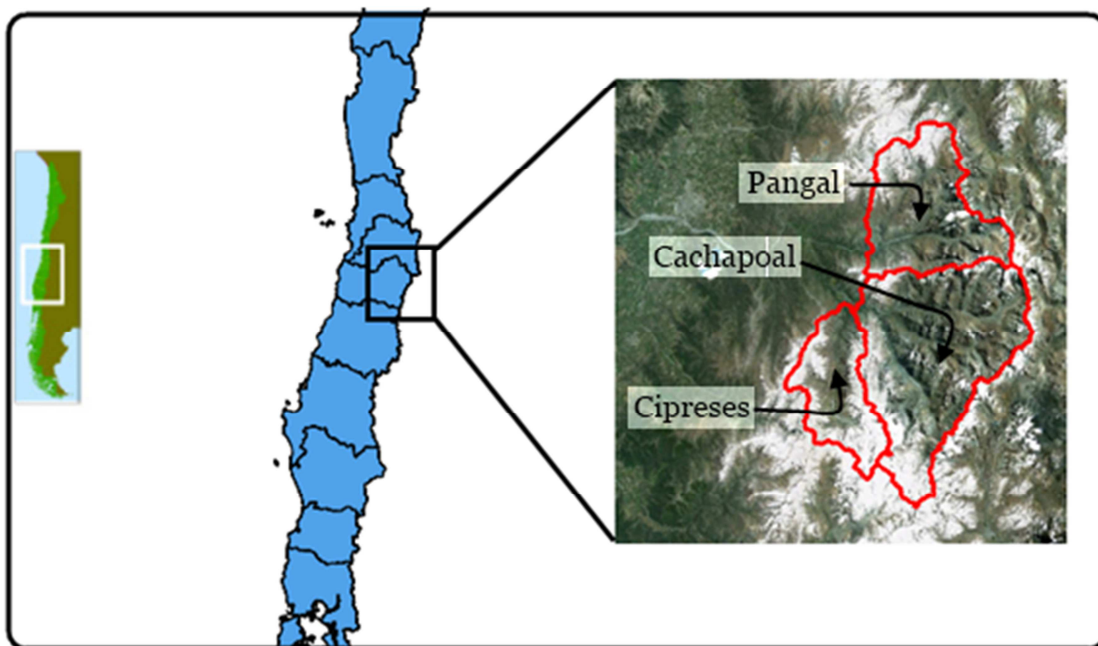


FIGURA 3-1. UBICACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.
FUENTE: GOOGLE EARTH

El desarrollo económico de esta región se basa en actividades de diversa índole. Es posible encontrar un gran desarrollo de diversas actividades según la ubicación en que se encuentre:

1. Actividades de pesca artesanal en el sector costero.
2. Actividades forestales y agrícolas en los sectores del valle central.
3. Actividades mineras en el sector de la cordillera.

En el penúltimo censo de población (2002), se registraron 780.627 habitantes (392.335 hombres y 388.292 mujeres) con una densidad de 47,63 habitantes por kilómetro cuadrado. La tasa media estimada de crecimiento anual para el período 2000-2005, es de 1,20 personas por cada 100 habitantes.

Al observar el tipo de actividades económicas que se desarrollan en la región, sumado con la cantidad de habitantes que presenta, es imposible no hacer notar la importancia que presenta el recurso hídrico dentro de la región, ya que se observan múltiples actores involucrados y cuyos usos particulares pueden generar un efecto sobre el uso de los otros, generando entonces una relación entre todos los actores.

3.2 GEOLOGÍA Y RELIEVE

Dada la ubicación en el sector cordillerano del área de estudio, se observan valores de elevación relativamente altos, así como también otros bajos lo que se traduce en grandes desniveles y pendientes elevadas. Esta propiedad de la cuenca la determina fuertemente ya que al considerar la gran variación que se presenta entre las alturas incide directamente en la validez y representatividad de los datos que se tienen desde algunas estaciones meteorológicas, en variables como por ejemplo la temperatura, o potenciales efectos sobre las precipitaciones, la cual puede precipitar como nieve en valores altos de altura o bien generar una componente de precipitación orográfica.

Sobre la geología de la región en estudio, ésta se puede observar en detalle para toda la región en la Figura 3-2. En particular, del área de estudio se puede comentar lo siguiente:

- a. Sobre los depósitos cuaternarios, se pueden observar la presencia de los del tipo morrénicos exclusivamente en el sector cordillerano, a lo largo de los cauces de los ríos.
- b. Sobre las rocas intrusivas, se observa que las presentes en el área de estudio corresponden a un grupo post Paleozoico. Se trata principalmente de granodioritas de granos finos y con poca alteración. Debido a que cortan la Formación Farellones, su edad es post Mioceno.
- c. Sobre las estructuras geológicas detectadas en la cordillera, se reconocen tres unidades separadas por discordancias (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.

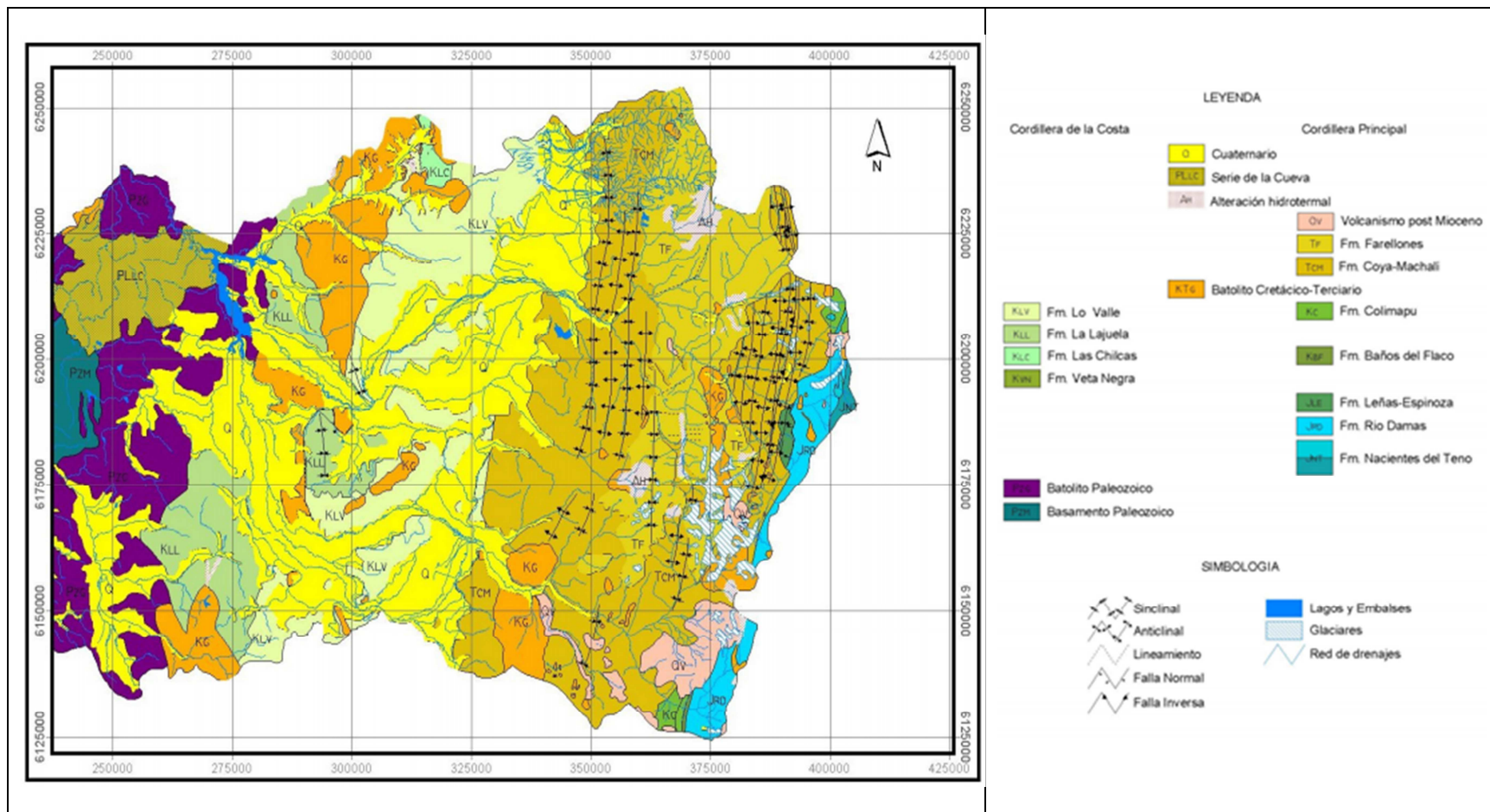


FIGURA 3-2. GEOLOGÍA DE LOS RÍOS CACHAPOAL Y TINGUIRIRICA.
FUENTE: DGA, 2005

3.3 CLIMA

En la VI región es posible encontrar una diversidad de climas dependiendo del sector geográfico en el que uno se encuentre, variando este según su posición con respecto a la costa, la depresión intermedia o la cordillera. En este caso y considerando las condiciones de geología y relieve mencionadas anteriormente se observa un clima templado cálido con estación seca de 4 a 5 meses. En el sector cordillerano de la Región, por sobre los 800 m, el ascenso del relieve provoca grandes variaciones en el clima, ya que las temperaturas medias en el invierno se aproximan a 0° y 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 a 5 meses con precipitación inferior a 40 mm. Las temperaturas medias son del orden de 4° C más bajas que en el valle y la diferencia entre el mes más cálido y el más frío también desciende a unos 11°C. [DMC, 2006].

3.4 USO DE SUELO

Según la información proporcionada por la literatura, el área de estudio de ambas cuencas corresponde a suelos que no presentan una variación de su estado natural y que no se encuentran habitadas ni modificadas debido a actividades agropecuarias. Los usos de suelo presentes en la cuenca corresponden principalmente a áreas sin vegetación, nieves y glaciares y en un porcentaje menor, en general cercano a los valles por donde fluyen los ríos, praderas y matorrales, tal como se observa en la Figura 3-3.

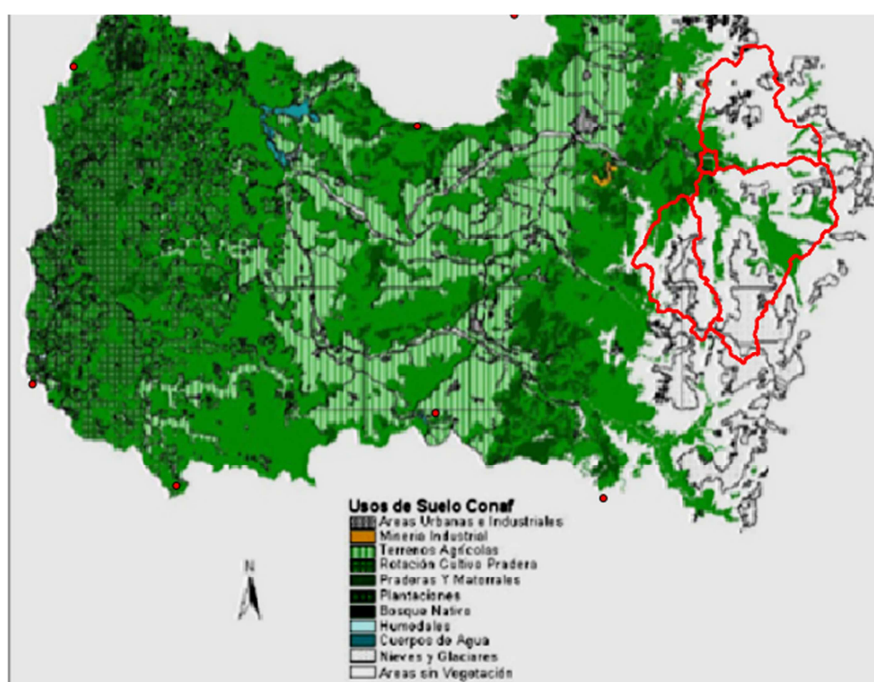


FIGURA 3-3. USOS DE SUELO DE LA VI REGIÓN.
FUENTE: DNP (2006), MODIFICADA PARA ESTE ESTUDIO

3.5 RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA

3.5.1 RECURSOS SUPERFICIALES

El río principal de la cuenca corresponde al río Cachapoal, el cual nace en la Cordillera de Los Andes a los pies de las cumbres Pico del Barroso (5.160 ms.n.m.) y Nevado de Los Piuquenes (4.440 m.s.n.m.). Desde su nacimiento corre en dirección oeste desde donde recibe el aporte de varios cajones cordilleranos tributarios, entre lo que se destacan el de Las Vegas, de Don Manuel, de La Fortuna y el Estero de los Cipresitos. Luego, su avance continua hacia el noroeste recibiendo el aporte de tributarios importantes entre los que se destacan los ríos Las Leñas, Cortaderal y Los Cipreses. [Figueroa,2008].

Otro río de importancia resulta ser el río Pangal, que posteriormente aporta como río tributario al río Cachapoal. Este río nace en altas cumbres de la cordillera y cuenta con un afluente relativamente importante que es el río Blanco.

3.5.2 RECURSOS SUBTERRÁNEOS

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. Este estrato aflora en gran parte del área 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.

3.6 INSTALACIONES HIDROELÉCTRICAS

Dentro de la cuenca es posible encontrar proyectos hidroeléctricos con diferentes propiedades y distintos años de utilización, aunque todos éstos comparten la característica de ser del tipo de centrales hidroeléctricas de paso.

En primer lugar, se tienen las centrales Coya y Pangal, que se encuentran en operación desde los años 1911 y 1921 respectivamente. Ambas centrales en conjunto presentan una capacidad instalada de 76 MW y representan una generación anual promedio de 511 GWh. Cada una de las centrales cuenta con una única bocatoma propia: la central Coya y su bocatoma se ubica en el cauce del río Cachapoal, aproximadamente 12 kilómetros aguas abajo de la estación fluviométrica *río Cachapoal 5 km. bajo río Cortaderal*, con una capacidad de aducción de 22.5 m³/s; la central Pangal se ubica en el cauce del río Pangal y su bocatoma, de capacidad máxima 10 m³/s está localizada aproximadamente 3 kilómetros aguas abajo de la estación *río Pangal en Pangal*. La devolución del caudal de la central Coya tras ser utilizado en la casa de máquinas para la generación se realiza aguas arriba del pueblo Coya, mientras que para la central Pangal, parte del caudal es trasvasijado desde el cauce del río Pangal al río Cachapoal por medio de un acueducto de capacidad máxima 7,5 m³/s, hasta la central Coya para una reutilización de este recurso. El excedente de la capacidad del acueducto, en caso de existir, es liberado aguas abajo de la casa de máquinas de la central Pangal.

En segundo lugar, también se encuentra en la cuenca la central Chacayes, relativamente nueva, ya que su puesta en funcionamiento se realizó tan solo en el mes de Noviembre del año 2011 y que presenta una capacidad instalada de 111 MWh, con una generación promedio anual esperada de 560 GWh. Esta central presenta dos obras de captación de caudales:

- bocatoma Chacayes (capacidad 52,5 m³/s)
- bocatoma Cipreses (capacidad 20 m³/s).

La primera se ubica en el cauce del río Cachapoal, prácticamente justo aguas abajo de la estación fluviométrica *río Cachapoal 5 km. bajo junta río Cortaderal*, mientras que la segunda se encuentra aproximadamente 3 kilómetros aguas arriba del punto de confluencia entre el estero Cipreses y el río Cachapoal. Parte del caudal utilizado por esta central es entregado directamente a la central Coya para su funcionamiento (con una capacidad máxima de 22.5 m³/s). La restitución del caudal utilizado por esta central ocurre parcialmente aguas abajo de su casa máquinas. Presenta dos turbinas de tipo Francis.

Debido a las propiedades de las centrales y la forma en que opera el mercado energético de Chile, es posible considerar que estas centrales siempre se encuentran en operación satisfaciendo demandas energéticas de base, dado el bajo costo marginal asociado que tienen gracias a su modo de generación. Esto se traduce en la práctica en que las centrales, a no ser por alguna decisión operacional, se encuentran siempre en funcionamiento generando energía.

3.7 DELIMITACIÓN DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO

La definición de las cuencas se realiza en función de algún punto de interés, pudiendo ser éste un lugar donde se cuente con información fluviométrica donde es posible contrastar la modelación con la información real con el fin de calibrar o bien alguna ubicación donde resulta beneficioso contar con información como podría ser la ubicación de una obra de toma.

La modelación por medio de WEAP requiere que la cuenca sea representada por medio de una serie de subcuencas consecutivas, pudiendo ser éstas diferentes subáreas de ella o alguna otra definición morfológica como por ejemplo bandas de elevación comprendidas entre ciertas cotas o bandas que presenten igual área. Estas captaciones requieren que cada una de éstas cuente con un conjunto de parámetros físicos representativos, así como también de información meteorológica. Según la definición anterior sobre puntos que pudiesen resultar de interés para el desarrollo de esta memoria se reconocen los puntos de interés que se muestran en la Tabla 3-1. Adicionalmente, se presenta un esquema representativa de las ubicaciones respectivas de cada uno de los puntos en la Figura 3-4.

TABLA 3-1. COORDENADAS DE PUNTOS DE INTERÉS⁹.

Punto	Tipo Punto	Coordenada E	Coordenada N
Estación Pangal en Pangal	Estación de registro	377703 m E	6209636 m S
Bocatoma Pangal	Punto de Captación	375332 m E	6208611 m S
Estación Cachapoal 5 km. bajo Cortaderal	Estación de Registro	373401 m E	6198518 m S
Bocatoma Chacayes	Punto de Captación	373265 m E	6198541 m S
Bocatoma Cipreses	Punto de Captación	370555 m E	6198552 m S
Bocatoma Coya	Punto de Captación	366389 m E	6206178 m S

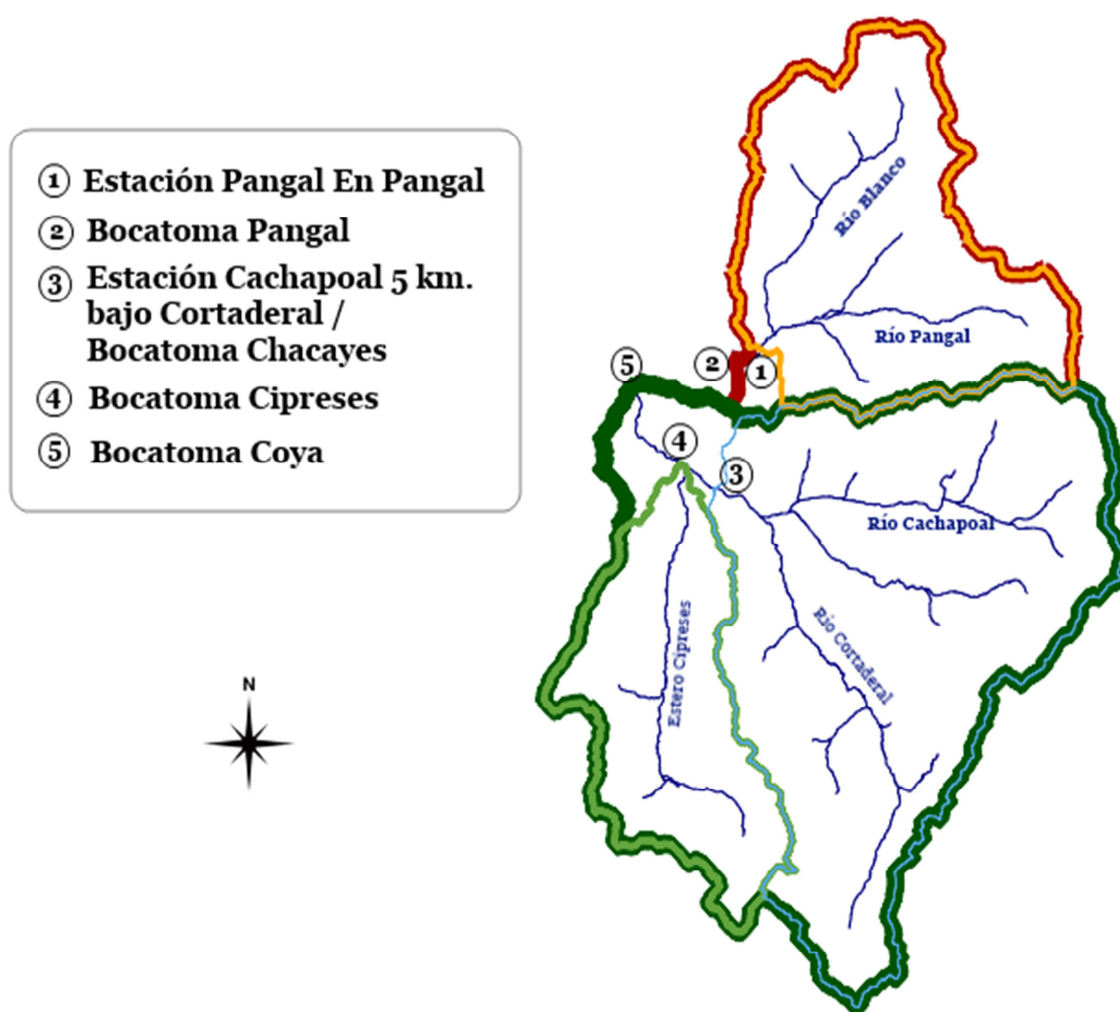


FIGURA 3-4. DIAGRAMA DE LAS CUENCAS DEFINIDAS POR LOS PUNTOS DE INTERÉS.
 FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA

⁹ Coordenadas definidas con respecto al huso 19 Sur.

A partir de cada uno de estos puntos se definen cuencas que se deberían modelar para el desarrollo de este estudio. Sin embargo, se utilizaron las siguientes simplificaciones que permiten obtener resultados adecuados sin tener una pérdida de información que pudiese alterar los resultados finales.

a. La cuenca definida por el punto de captación Bocatoma Pangal es representable través de la creación de un modelo hidrológico en el punto definido por la estación de registro fluviométrico *Estación Pangal en Pangal*. La intercuenca definida entre ambos puntos corresponde a un área de 18 km², lo que representa aproximadamente solo un 3% del área de la cuenca definida por el punto de captación. Adicionalmente, la altura máxima de la intercuenca es solo de 3.500 metros de altura, y solo un 20% de la cuenca se encuentra sobre los 3.000 metros que es el sector de acumulación de nieves. Considerando que la cuenca presenta un comportamiento principalmente nival, su aporte no es particularmente relevante y se puede considerar marginal con respecto a los caudales provenientes del resto de la cuenca por lo que se puede omitir y considerar que la estación Pangal en Pangal es representativa de los caudales en la bocatoma.

b. Las cuencas definidas por los puntos de interés *Estación Cachapoal 5 km. bajo Cortaderal* y *Bocatoma Chacayes* son homologables debido a que definen la misma hoya hidrográfica aguas arriba y están separadas por tan solo 140 metros aproximadamente.

c. La cuenca definida por el punto de captación Bocatoma Cipreses no cuenta con un registro fluviométrico y resulta difícil realizar alguna aproximación de sus caudales a nivel diario, por lo que para su representación se utilizarán los parámetros obtenidos del modelo desarrollado para el punto de la estación Cachapoal 5km. bajo Cortaderal, pero usando la información geomorfológica de la cuenca. Esto se basa en la similitud geomorfológica y de ubicación que presentan ambas cuencas, punto desarrollado anteriormente en este capítulo.

d. La cuenca definida por el punto de captación Bocatoma Coya no requiere del desarrollo de un modelo hidrológico, ya que en este punto se recibe directamente la descarga de la central Chacayes. La intercuenca entre ambos puntos de captación no representa aportes significativos, habiéndose ya considerado el estero Cipreses en el punto de captación de la bocatoma Chacayes. Se considera que los caudales obtenidos del modelo hidrológico para la central Chacayes resultan lo suficientemente representativo de los caudales que se reciben en esta bocatoma.

Una vez definidas las cuencas sobre las que se deberá realizar un modelo hidrológico, se desarrolla un análisis geomorfológico de cada una de ellas, a través de la utilización de imágenes de elevación digital.¹⁰ Se presentan a continuación cada una de las cuencas con sus respectivas propiedades geomorfológicas en la

Tabla 3-2 , así como también las curvas hipsométricas de cada una de las cuencas expuestas en la Figura 3-5.

¹⁰ Imágenes obtenidas del proyecto conjunto ASTER GDEM, entre el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japon (MEI) y la Administración Espacial y Aeronáutica de Estados Unidos (NASA)

Se incluye los resultados de la delimitación de las cuencas por medio de los modelos de elevación digital en el anexo B.

TABLA 3-2. PROPIEDADES GEOMORFOLÓGICAS DE LAS CUENCAS.

Parámetro	Unidad	Estación Pangal En Pangal	Cachapoal 5 km. Bajo Cortaderal	Bocatoma Cipreses
Altura Mínima	[m]	1456	1104	1055
Altura Media	[m]	3067.3	2930.7	2685
Altura Máxima	[m]	5104	5150	4662
Desnivel Máximo	[m]	3648	4046	3607
Pendiente	[%]	62	61.4	55
Largo de cauce principal	[km]	23.99	42.56	33.05

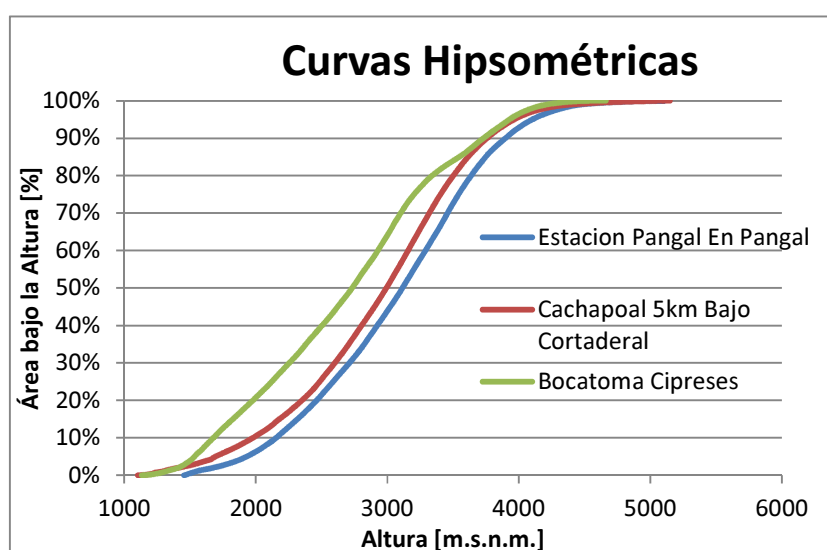


FIGURA 3-5. CURVAS HIPSOMÉTRICAS DE LAS CUENCAS EN ESTUDIO.

Otro antecedente importante de analizar es la orientación de la cuenca, así como también el número de cauces principales, que se presentan en la Tabla 3-3:

TABLA 3-3. PARAMETROS HIDROLÓGICOS ADICIONALES DE LAS CUENCAS.

Cuenca	Orientación	Número de cauces principales
Estación Pangal En Pangal	Noroeste-sureste	2
Estación Cachapoal 5 km bajo Cortaderal	Sureste – noroeste	3
Bocatoma Cipreses	Sur – norte	1

Es importante notar que de estos factores el que potencialmente podría tener más influencia resulta ser el de orientación ya que afecta directamente el ángulo en que los sectores nivales reciben la radiación incidente, así como también el resultado que podrían tener efectos orográficos sobre las precipitaciones.

3.8 INFORMACIÓN DISPONIBLE

3.8.1 TEMPERATURA

La información de temperaturas disponibles se obtiene de los registros de estaciones meteorológicas, controladas por la Dirección General de Aguas, cuyos detalles se presentan en la Tabla 3-4. Adicionalmente, se muestra una imagen referencial de sus ubicaciones en la Figura 3-6. En esta figura, es posible observar que de las estaciones que toman mediciones de las temperaturas sinópticas utilizadas para el estudio, ninguna se encuentra dentro de la cuenca, por lo cual esta información no es utilizable directamente. Los registros de estas temperaturas se encuentran en la carpeta I del Anexo Digital. Esta información es procesada en el capítulo 4, donde se generan gradientes de temperatura en función de la altura a nivel mensual que permiten estimar los valores de esta variable al interior de las cuencas. Para las temperaturas se utilizará como base de información la estación Rengo.

TABLA 3-4. ESPECIFICACIONES DE ESTACIONES DE REGISTRO DE TEMPERATURA.

Estación	UTM E [m]	UTM N [m]	Altura [m.s.n.m.]	Inicio registro	Fin de registro
Convento Viejo	304772	6150426	250	Abril de 1980	Marzo de 2005
Rengo	328455	6189449	310	Mayo de 1980	Marzo de 2005
Termas del Flaco	378490	6138164	2650	Agosto de 1999	Marzo de 2006

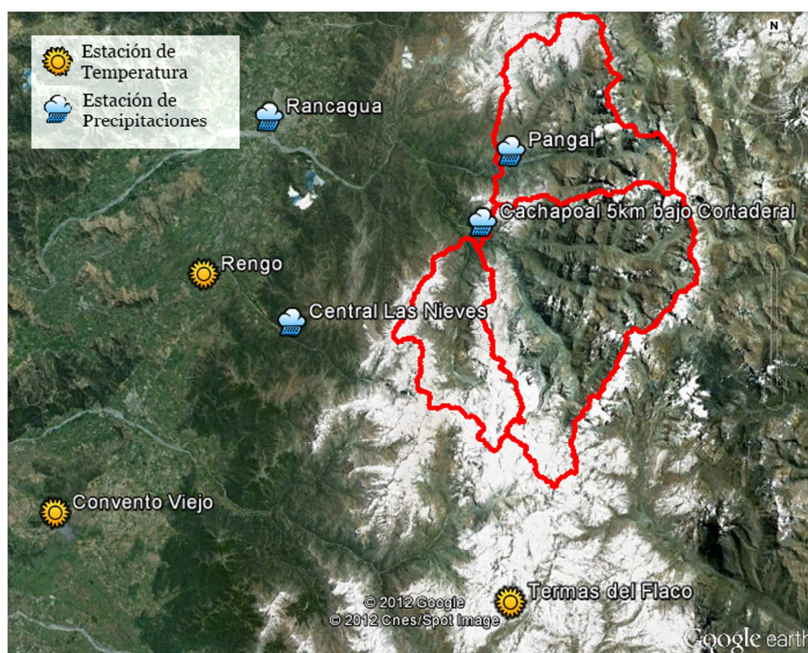


FIGURA 3-6. UBICACIÓN DE ESTACIONES DE REGISTRO DE LA DGA

3.8.2 PRECIPITACIONES

Se cuenta con la información de series hidrometeorológicas de precipitaciones también de estaciones controladas por la Dirección General de Aguas de donde es posible obtener

los registros diarios, para el periodo de modelación para la cuenca en estudio, tanto en ubicaciones relativamente cercanas a la cuenca como dentro de ella. La longitud del registro, si bien no es muy extensa, es suficiente para que no sea necesario realizar ningún procesamiento especial de la información tales como relleno o extensión de series.

La ubicación de las estaciones de registro de precipitaciones utilizadas, así como un esquema de su posición en la región y su posición con respecto a la cuenca, se muestra en la Figura 3-6. Sus coordenadas exactas, así como la longitud de registro se muestran en la Tabla 3-5.

TABLA 3-5. ESPECIFICACIONES ESTACIONES DE PRECIPITACIONES

Estaciones meteorológicas de precipitación	UTM Norte	UTM Este	Inicio de registro	Fin de Registro
Rancagua dcp	6215240	338660	Enero de 1980	-
Central Las Nieves	6181879	343037	Junio de 1974	Mayo de 2005
Cachapoal 5 km bajo Cortaderal	6198518	373401	Marzo de 1999	-
Pangal en Pangal	6209636	377703	Noviembre de 2001	-

Análogamente al caso de las temperaturas, esta información es procesada en el capítulo 4, donde se generan gradientes de precipitación en función de la altura a nivel mensual, lo que permite estimar los valores de esta variable al interior de las cuencas. Para las precipitaciones se utilizará la estación Rancagua DCP como base de información.

En la Figura 3-7 se presenta un climograma definido en función de las estaciones base seleccionadas para el desarrollo del proceso de calibración, validación y proyecciones a través de escalamiento.

La información pluviométrica de estas estaciones a escala diaria se encuentra en la carpeta II del anexo digital.

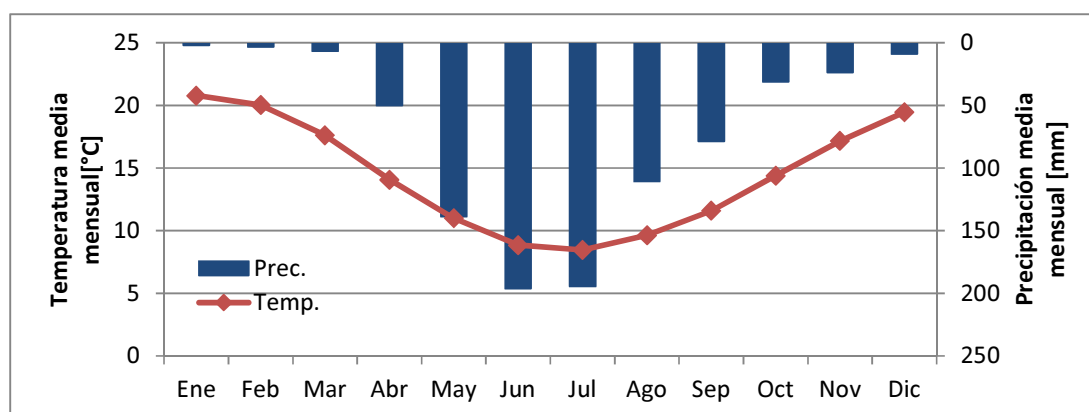


FIGURA 3-7. CLIMOGRAMA SEGÚN ESTACIONES BASE SELECCIONADAS

3.8.3 REGISTRO DE CAUDALES

El registro disponible de caudales es un dato fundamental ya que es lo que permite el contraste entre lo que el proceso de calibración entrega con los caudales que

realmente debieran observarse. Como se especificó en las ubicaciones de los sitios de interés en la sección 3.7, estas estaciones son las que definen las cuencas en proceso de modelación. Adicionalmente, sus ubicaciones pueden ser observadas en la Figura 3-6 bajo las estaciones del mismo nombre que las especificadas en registros pluviométricos (en la práctica corresponden a la misma estación). Se presenta en la Tabla 3-6 la longitud y la calidad de registro de las estaciones del estudio:

TABLA 3-6. LONGITUDES DE REGISTRO DE LAS ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS.

CAUDALES	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Pangal en Pangal	53	179	249	356	353	320	296	181	50	365	365	366	319	365	365	347	321	365	365	366	365	317	365	366	365	111	174
Cachapoal 5 km Bajo Cortaderal					188	318	146	304	82	297	346	366	256	351	365	366	365	364	364	311	344	365	358	121	165	0	42

Se encuentran destacados los periodos de calibración (años hidrológicos 2000 a 2004 en ambas cuencas) y el periodo de validación (años hidrológicos 1987, 1989 y 1990 en el caso de la cuenca Pangal; años 1989, 1990 y 1992 en el caso de la cuenca Cachapoal.). Si bien en una primera inspección esto parece una forma incompleta de proceso de calibración considerando la información disponible de caudales, esta elección se sustenta en los siguientes hechos:

- Durante el periodo 1994 y 1998 los registros de temperatura de la estación base Rengo utilizada para el gradiente no presentan una continuidad de registro completa, habiendo grandes espacios de tiempo que carecen de datos. Al intentar corregir esto por medio de procesos de extensión y relleno de registro con respecto a otras estaciones, no se lograron correlaciones con una representatividad adecuada para los fines de modelación y se perjudicaban drásticamente los resultados. Esto inhabilita los años hidrológicos comprendidos en este periodo de falta de datos para ser utilizados como periodo de calibración.
- El año 2006 y posteriores no pueden ser utilizados en el proceso de calibración ya que no se encuentra información disponible de temperatura para este periodo.
- En el caso de la estación Pangal en Pangal entre los años 1985, 1986 y 1988 los valores observados presentan irregularidades en el registro y al ser tan pocos es poca la continuidad al estudio que pueden aportar. Eso mismo sucede con otros años que se encontraban muy separados de los periodos como para poder agregarlos al proceso.

Se presenta en las Figura 3-8y la Figura 3-9 información sobre los caudales observados basándose en los registros que se tienen. Los registros de los caudales en detalle se pueden ver en la carpeta VI. Caudales del Anexo Digital.

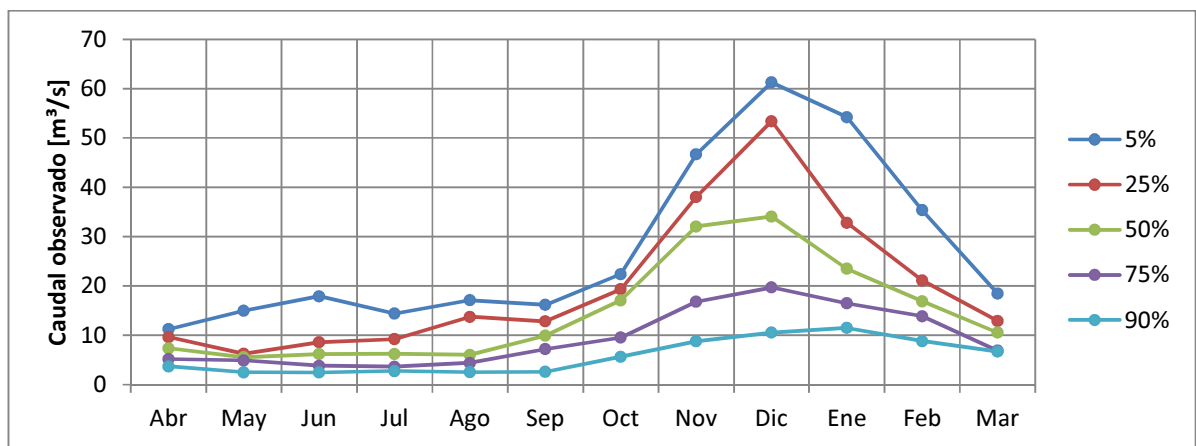


FIGURA 3-8. CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL RÍO PANGAL EN PANGAL.

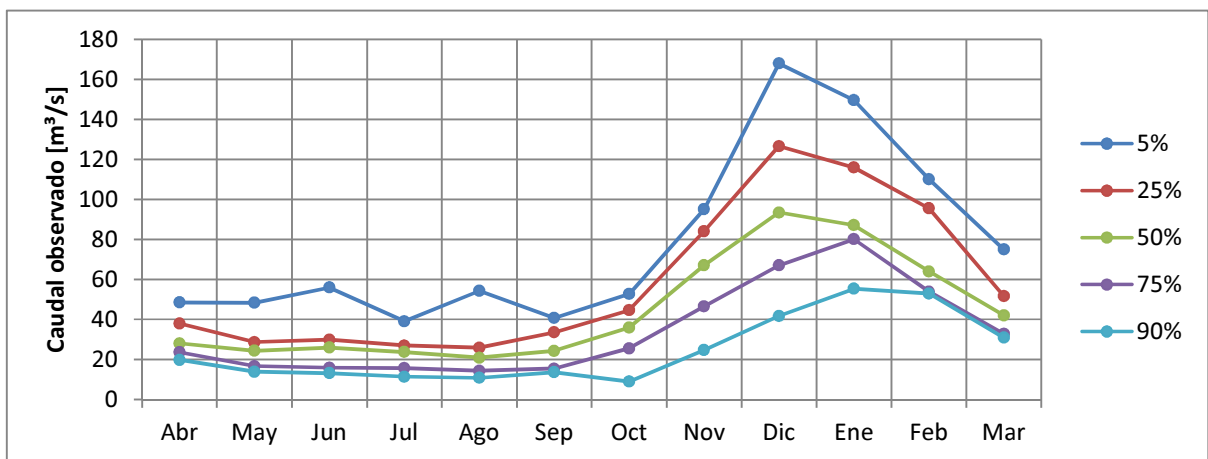


FIGURA 3-9. CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL RÍO CACHAPOAL 5 KM. BAJO CORTADERAL.

Se observa que ambas cuencas presentan un régimen nival, presentando sus caudales máximos en general para todas las probabilidades de excedencia en el mes de Diciembre, con algunos incrementos importantes en los meses de invierno solo en el caso de los años más húmedos.

4. PROCESAMIENTO DE DATOS

4.1 DATOS CALIBRACIÓN

Para llevar a cabo el proceso de calibración de los modelos hidrológicos es necesario realizar cierto procesamiento previo a la información meteorológica disponible que se requiere como información de entrada, de manera que ésta sea acorde con las necesidades del modelo y de forma tal que sea representativa de las bandas de elevación utilizadas como captaciones.

4.1.1 TEMPERATURAS

Debido a lo explicado en el punto 3.8.1 sobre la disponibilidad de información, se elaboran gradientes de temperatura. Para esto se grafican los valores medios mensuales de cada estación en función de la altura sobre el nivel del mar a la que está se encuentra. A este conjunto de puntos se les ajusta una regresión logarítmica la cual permite extrapolar una variación de temperatura en función de la diferencia de altura entre un punto de interés y una estación base, siempre que se cuente con la información requerida en esta última ubicación nombrada. Una regresión logarítmica resulta más apropiada que otras alternativas ya que debido a la magnitud de la diferencia entre las elevaciones a las que se requiere estimar esta variable y las en las que se tiene información se obtendrían valores que carecerían de sentido físico. Esta metodología ha sido utilizada anteriormente en otros estudios con relativo éxito en la misma cuenca y demuestra por tanto su aplicabilidad al estudio [Figuroa, 2010]. Es importante también destacar que esta metodología hace una diferenciación entre los días que presentan eventos de precipitación y los días sin lluvias, al separar los datos en dos conjuntos diferentes, y que a su vez estos datos son separados por mes para crear gradientes mensuales.

El registro de temperaturas de la estación Rengo fue extendido para completar la información del periodo requerido a través de correlaciones mensuales con la estación Convento Viejo, el cual es posible observar en el capítulo I del anexo digital

En la Figura 4-1 es posible observar un ejemplo de los gradientes obtenidos para la temperatura en función de la altura, utilizando un ajuste logarítmico. Se adjuntan en el Anexo C las figuras de los otros gradientes, así como también sus coeficientes.

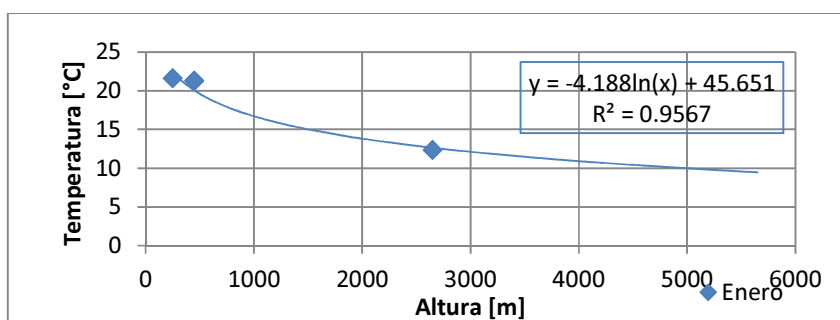


FIGURA 4-1. EJEMPLO DE GRADIENTE DE TEMPERATURA GENERADO PARA DÍAS SIN PRECIPITACIÓN PARA EL MES DE ENERO.

4.1.2 *PRECIPITACIONES*

Según lo observado en el punto 3.8.2 se cuenta con escasos registros de precipitaciones al interior de la cuenca, especialmente en los sectores con mayor elevación, por lo que se desarrollan gradientes de precipitación con respecto a la altura, al igual que en el caso de la temperatura. El objetivo de esto es lograr a través de ellos extrapolar información para cada una de las bandas de elevación de cada una de las subcuencas que son utilizadas en el proceso de calibración.

Para realizar estos gradientes, se aplica una metodología similar a la de las temperaturas, pero solo considerando los días que presentan precipitaciones. Se utiliza una aproximación de perfil logarítmico sugerida por la literatura [Vicuña et al, 2010], obteniéndose resultados similares a lo mostrado en la Figura 4-1 pero para las precipitaciones (los resultados se pueden observar con más detalle en el Anexo D). En el caso de esta variable, se utiliza como base la estación Rancagua DCP, controlada por la Dirección General de Aguas.

4.1.3 *HUMEDAD RELATIVA*

Para el cálculo de la humedad relativa se utiliza un registro a nivel diario de esta variable de estaciones de propiedad de CODELCO, ubicadas en una cuenca contigua, para el periodo 2005-2009. Si bien esta información no es utilizable directamente en el proceso de calibración y validación ya que escapa del periodo en el que se estos se realizan, es utilizada de forma indirecta por medio de los siguientes procedimientos:

- a. Se genera un gradiente de variación de humedad relativa en función a la altura a nivel mensual, similar al proceso realizado para las temperaturas y las precipitaciones, de manera de obtener valores a alturas representativas utilizando solo este gradiente y una estación base.
- b. Se realiza un proceso de escalamiento y corrección de tendencias de los valores entregados por los modelos MK3.6 y PRECIS-ECHAM5 en sus escenarios de línea base comprendidos desde el año 1970 a 2009 para la variable de humedad relativa con respecto a los registros disponibles (según lo especificado en la sección 4.2). Al realizar este proceso, no solo se ajustan los valores para las proyecciones futuras en los escenarios respectivos sino también para la línea base, de manera que se utilizan estos valores entregados para el periodo de línea base como información para el proceso de calibración.

Dado que de este procedimiento se obtienen dos conjuntos de datos distintos provenientes de distintos modelos, será necesario calibrar y revisar cada uno de los modelos en función de éstos. El detalle de cada uno los gradientes obtenidos se puede observar en la carpeta III del anexo digital.

4.1.4 VELOCIDAD DE VIENTO

Dado que no existe información referencial de velocidades de viento para la cuenca, para obtener una velocidad del viento estimada en cada una de las bandas, se utilizó la información entregada por el programa desarrollado por Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile conocido como Explorador Eólico¹¹. El Explorador de Energía Eólica forma parte de un avanzado sistema de modelación computacional de la atmósfera, dentro del cual su función fundamental es la divulgación facilitada de información relevante para la caracterización del recurso viento [DGF,2012].

Este modelo es una simulación numérica que simula los valores de velocidad de viento durante el año 2010 en todo el territorio nacional y cuyos resultados han sido validados con registros de valores en más de 350 puntos. Este modelo permite obtener las distribuciones mensuales de valores de viento a una cota que se define por la elección de un punto. Si bien se reconoce que esta información resulta insuficiente para el tipo de calibración y la escala a la que se quiere realizar, representa de todas formas un valor referencial que permite tener una mejor aproximación general.

Para obtener valores representativos de cada una de las bandas de elevación se utilizó el explorador eólico en al menos 4 puntos de una altura similar a la altura media de las bandas definidas para la calibración modelos de manera de obtener un valor promedio para cada una de ellas. Estos puntos fueron seleccionados desde diversas ubicaciones, tomándose como mínimo uno al interior de cada cuenca de interés, para abarcar otras variables que pudiesen afectar su valor (como por ejemplo la orientación del punto). Sin embargo, no se observan diferencias significativas entre los valores obtenidos para cada uno de los puntos. En la Figura 4-2 se pueden observar los valores obtenidos para cada banda a nivel mensual.

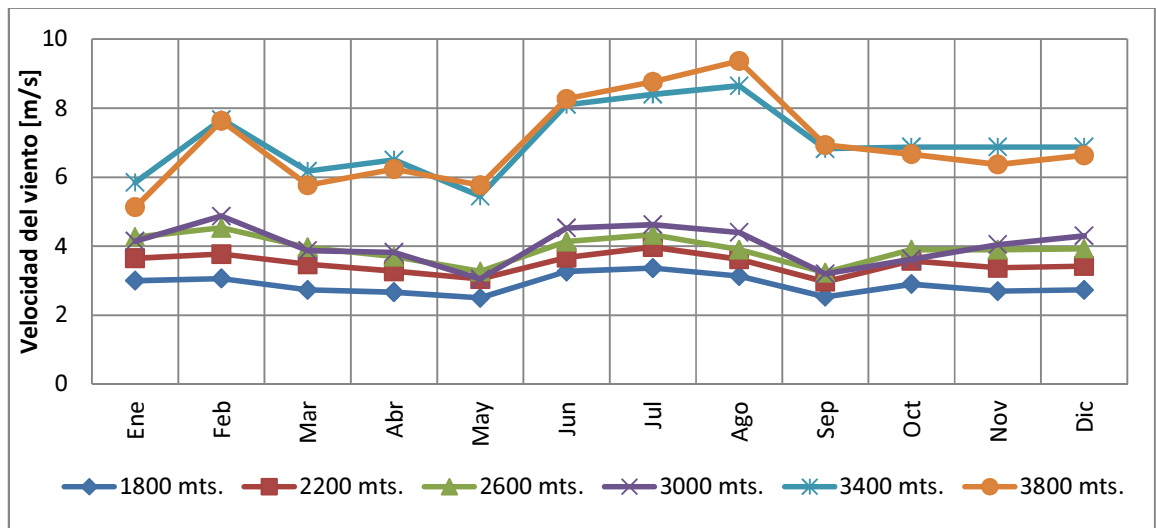


FIGURA 4-2. VELOCIDADES DE VIENTO PARA CADA BANDA DE ELEVACIÓN A NIVEL MENSUAL
FUENTE: EXPLORADOR EÓLICO.

¹¹ <http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>

Para utilizar esta aproximación, se realiza el supuesto de que el valor mensual estimado para cada banda es una buena representación del valor diario de velocidad de viento en esa altitud. Si bien este supuesto conlleva una disminución de la desviación estándar de los valores que se presentan, se considera una mejor opción que la otra alternativa propuesta por el modelo WEAP que supone dejar en un valor por defecto de 2 m/s el valor del viento en cada banda, lo cual, como se puede observar en la Figura 4-2 corresponde a una subestimación de al menos 50% con respecto a lo estimado por el valor referencial del explorador eólico. El detalle de los valores utilizados se puede ver en en la carpeta IV del Anexo Digital..

4.1.5 *ÍNDICE DE NUBOSIDAD*

El índice de nubosidad corresponde a la fracción de cielo cubierto por nubes en promedio durante un lapso de tiempo específico. En este caso, la obtención de información de índice de nubosidad fue posible solo a escala temporal mensual desde los anuarios meteorológicos de la Dirección Meteorológica en la estación de Quinta Normal, de la Región Metropolitana. Si bien esto pudiera parecer un poco alejado de la ubicación de la cuenca, en el caso de una variable como es el índice de nubes y considerando que ambos sectores presentan el mismo tipo de clima, no resulta tan mala aproximación como pudiese parecer a primera vista. Adicionalmente, al ser una variable medida a nivel mensual, la variabilidad diaria de los valores que pudiese haber entre un sitio y otro es reducida.

Con el fin de darle una mayor veracidad a los valores de este índice, para cada día donde se registra un evento de precipitación dentro de la cuenca se asigna arbitrariamente el valor correspondiente a “cielo totalmente cubierto”.

Los valores utilizados en el proceso de calibración se pueden observar en la carpeta V del Anexo Digital.

4.2 DATOS DE PROYECCIONES

Para realizar estimaciones del posible impacto del cambio climático sobre los valores esperados de los caudales y la disponibilidad hídrica es necesario hacer estimaciones de las variables meteorológicas del lugar basándose en los modelos globales de circulación que permiten estimar estos valores

Para realizar esto, se utilizan los dos modelos globales climáticos abordados en la sección 2 de revisión bibliográfica en el punto 2.2.2.:

- a. El modelo ECHAM5, escalado al territorio nacional por medio de la metodología de escalamiento dinámico PRECIS, desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Se utiliza el escenario A1B, que corresponde a una categoría en que la generación de energía proviene desde una diversidad de fuentes convencionales y no convencionales, el aumento demográfico es moderado y el planeta presenta una tendencia más enfocada al desarrollo económico que a la preservación ambiental. Esta elección se basa en las proyecciones que se tienen actualmente viendo el contexto global.

- b. El modelo MK3.6, desarrollado por el instituto australiano CSIRO. Dado que el modelo MK3.6 no utiliza estos escenarios de emisión como forzantes sino que las vías representativas de concentración – escenarios RCP -, se decide utilizar las proyecciones realizadas bajo condiciones forzantes correspondientes a las pautas que muestra el RCP6.0, el cual resulta similar en condiciones de emisión de gases a la atmósfera al escenario A1B.

Sin embargo, si bien la utilización de estos datos supone una gran ventaja frente a otras metodologías propuestas como aumentos arbitrarios de la serie de valores de temperatura en una suma fija o variaciones porcentuales de la serie de precipitaciones, debido a que incorpora la modelación física de estas variables, es necesario realizar un procesamiento previo de la información de manera que ésta se adapte de la forma más cercana a la realidad de lo que está tratando de representar.

Existe un lapso suficiente de tiempo con información disponible tanto para el reanálisis como para los datos observados como para poder considerar que los valores estadísticos medios de ambas muestras debiesen representar las mismas condiciones, pero sin embargo difieren. Es por esto que deben realizarse correcciones a través de funciones de transferencia que permitan representar adecuadamente los registros locales.

Considerando que la metodología de trabajo utiliza gradientes para estimar los valores a determinadas alturas con respecto a un punto base, es necesario realizar los procesos de escalamiento y corrección de sesgo con respecto a esos puntos, es decir, con respecto a las estaciones bases utilizadas, para obtener los valores de temperatura, precipitación y humedad relativa representativos en aquellas ubicaciones y posteriormente extrapolar esta información a las cuencas.

4.2.1 ESCALAMIENTO DE DATOS PRECIS-ECHAM5

Los datos disponibles obtenidos por medio de la simulación PRECIS usando como condiciones de borde los resultados globales del modelo ECHAM5 en su escenario A1B presentan una muy buena resolución: cada celda queda definida por un cuadrado de 25x25 km. Esto en la práctica se traduce en que al trabajar en esta escala e incorporar información del relieve de cada uno de los puntos, es posible considerar que la modelación de cada uno de ellos presenta información muy precisa con respecto a su localización por lo que no es necesario aplicar un escalamiento espacial como los descritos en la parte b del punto 2.3.1 de este trabajo..

La información de cada uno de los puntos de interés es comparado entonces con los cuatro puntos que definen la celda en la que se encuentra contenido, por medio de la comparación de los valores ordenados en curvas de excedencia. Para cada punto se elige entonces el que presente la mejor correlación en general al comparar cada uno de los meses, al mismo tiempo que se toma en consideración que se observen similitudes entre los relieves y la topografía de cada uno de ellos. Las coordenadas de los puntos seleccionados se detallan en la Tabla 4-1.

TABLA 4-1. SELECCIÓN DE PUNTOS REPRESENTATIVOS DE PRECIS

Estación	Variable	Punto seleccionado
Rengo	Temperatura	-34.5°S -70.75°W
Rancagua DCP	Precipitación	-34.25°S -70.75°W
Maitenes	Humedad relativa	-34.5°S -70.25°W

Posteriormente a la selección del punto para cada una de estas variables, se realiza un ajuste de funciones que establecen relaciones entre el valor de la variable estimada por el modelo y el valor real observado en el punto de interés. Este proceso es considerado tanto una función de transferencia como una remoción del sesgo que presenta el modelo, al realizar al mismo tiempo la estimación del valor esperado en el punto de interés y la corrección de los valores constantemente subestimados o sobrestimados por el modelo.

Este proceso se realiza haciendo una diferenciación a nivel mensual para cada una de las variables en análisis (un ejemplo de esto se muestra en la Figura 4-3).

En particular en este ejemplo, se observa que el modelo tiene dificultades para representar de manera adecuada valores menores a 7°C o mayores a 12°C al no registrar estos valores jamás, aunque éstos efectivamente son registrados en la estación de referencia. Sin embargo, se tiene una buena correlación entre las curvas de excedencia de las temperaturas, por lo que se puede aceptar que el modelo representa bien los procesos y dinámicas física, pero que sin embargo, falla al momento de evaluar las magnitudes de esta y por lo tanto es necesario corregir.

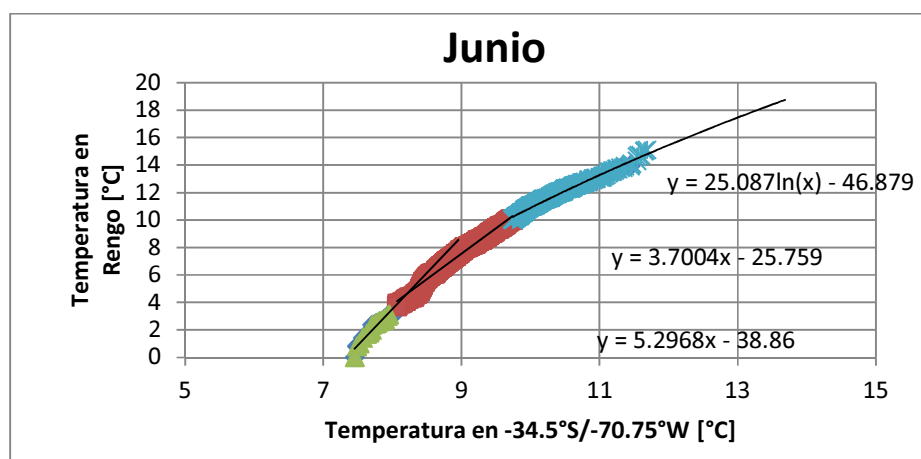


FIGURA 4-3. PROCESO DE ESCALAMIENTO Y REMOCIÓN DE SESGO.

Una vez que se tienen estas funciones definidas para cada una de las variables, y bajo el supuesto de que estas relaciones son invariantes en el tiempo, se generan dos conjuntos de datos a utilizar:

a. Reanálisis de datos

Se aplican las funciones de transferencia a todo el periodo comprendido entre los años 1970 y 2009 entregados por los modelos. Esta información será utilizada en la definición de valores de línea base para comparaciones posteriores con sus

respectivas proyecciones. Debido a que se utilizan dos modelos diferentes, se obtendrán dos líneas bas que diferirán en sus resultados. Esto se debe a que en el proceso de generación de las funciones de transferencia no se realiza con el periodo completo sino que solamente con el periodo en el que se tiene información.

- b. Proyecciones para el periodo 2040-2070
Obtenidas directamente de utilizar las funciones de transferencia a los datos que entrega cada uno de los modelos de proyección

Es importante destacar que la finalidad de realizar el proceso descrito en el punto a de esta sección es que las variaciones de las proyecciones sean comparables. no cambian, se aplican las mismas funciones de transferencia para los datos de las proyecciones para obtener la información de las variables meteorológicas en el periodo futuro 2040-2070.

Los detalles del escalamiento de cada una de las variables por modelo que requieren de este proceso se encuentran respectivamente en su carpeta en el anexo digital.

4.2.1.1 Generación de series sintéticas

Dado que el escenario A1B en el modelo PRECIS-ECHAM5 provee solo una serie de proyecciones, resulta difícil realizar un análisis de incertidumbre debido al error inherente al modelo asociado a los caudales esperados en periodos futuros. Para compensar esta limitación, se propone la generación de series sintéticas alternativas de precipitación y temperaturas de forma estocástica, reconociendo que son las variables de mayor relevancia en el modelo hidrológico.

La utilización de estas series es una práctica común en el campo de estudio agrícola, ya que permite la generación de múltiples escenarios que permiten una buena evaluación de potenciales proyectos al entregar rangos de incertidumbre con respecto a los productos esperados. Múltiples metodologías han sido desarrolladas y se encuentran disponibles en la literatura según los requerimientos que se tienen y operan según distintas directrices, trabajando sobre distintas variables tales como la precipitación y temperaturas, llegando incluso a desarrollarse programas que realizan estas funciones, como el llamado LARS-WG [Semenov, 2009]. Para la generación de estas series, se proponen las siguientes metodologías:

- a. Generación de series de precipitación y temperatura mediante el programa LARS-WG.
Este programa genera series basándose en una distribución empírica de los datos que determina en base a un criterio de separación por intervalos, desde donde obtiene diversas relaciones probabilísticas.
- b. Generación de series de precipitación y temperaturas utilizando ajustes de distribuciones estadísticas del conjunto de datos que definen las proyecciones.
- c. Generación de series de precipitación con ajustes estadísticos y series de temperatura por análisis de promedios y desviaciones móviles de los valores de las proyecciones.

En el caso de los puntos b y c, resulta de particular interés la generación de las series de precipitación, para la cual es necesario modelar tanto su ocurrencia como la magnitud de ésta.

La ocurrencia de eventos de precipitación puede ser modelada con un buen ajuste como una cadena de eventos de Markov de orden 1, que corresponde a un proceso estocástico donde la ocurrencia de precipitación en un determinado estado queda condicionada por el estado anterior [Caskey, 1963]. En el caso de la precipitación, esto significa que la ocurrencia de precipitación presenta diferentes probabilidades dependiendo de si hubo o no precipitación en el periodo anterior (en este caso, se habla de periodo diario). Se utiliza esta metodología para la creación de las series sintéticas que representen el periodo de interés (2040-2070) tomando como base para determinar las probabilidades de la cadena de Markov en cada estado las probabilidades empíricas de los datos proyectados desde el modelo PRECIS. Estas probabilidades empíricas son calculadas a nivel mensual para mantener la estacionalidad original de la serie y así incorporar esta información.

La cantidad de agua precipitada es el siguiente punto a modelar, para lo cual se generan distribuciones empíricas para representar las distintas funciones de densidad de probabilidad para cada mes. Se toma esta medida como consecuencia de que la muestra no se logra representar por ninguna distribución estadística. Las funciones de probabilidad de densidad ajustadas para los datos de temperatura para generar las series del punto b se muestran en la Tabla 4-2.

TABLA 4-2. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD AJUSTADAS PARA LA GENERACIÓN DE TEMPERATURAS.¹²

	Día Seco	Día Húmedo
Enero	Modelo Gaussiano Mezclado	Normal
Febrero	Modelo Gaussiano Mezclado	
Marzo	Modelo Gaussiano Mezclado	
Abril	Modelo Gaussiano Mezclado	
Mayo	Modelo Gaussiano Mezclado	
Junio	Modelo Gaussiano Mezclado	
Julio	Modelo Gaussiano Mezclado	Normal
Agosto	Modelo Gaussiano Mezclado	
Septiembre	Modelo Gaussiano Mezclado	
Octubre	Modelo Gaussiano Mezclado	
Noviembre	Modelo Gaussiano Mezclado	
Diciembre	Modelo Gaussiano Mezclado	

En el caso de las temperaturas se realiza un proceso de sobre-generación de series sintéticas, de las cuales se seleccionan aquellas que presentan un menor error al comparar ya sea los valores de ocurrencia de eventos o los histogramas unitarios de las series de precipitación generadas y observados, como medida de corrección,

¹² En aquellos meses donde solo se especifica un solo tipo de distribución se ajustan de todas formas dos sets de parámetros distintos para cada uno de los conjuntos muestrales que se tienen.

comparando los histogramas unitarios generados y el observado a través de un ponderador de error simple. Este proceso de ajuste se realiza en consideración al hecho de que las distribuciones ajustadas en algunos casos no representan perfectamente el conjunto de datos y por tanto se busca una forma de hacer que las series generadas presenten distribuciones con una mayor similitud a la empírica que a la ajustada. Adicionalmente, se hace la distinción entre días con y sin precipitación al ajustarles distribuciones diferentes.

En el caso del punto c, la metodología utilizada consiste en generar las series de precipitación según lo expuesto en el punto b pero las series de temperaturas son calculadas al generar un valor aleatorio por medio de una distribución normal cuya media es generada por el promedio de cinco días consecutivos en la serie original de proyecciones y cuya desviación estándar es también la de estos mismos valores, siendo el valor central el que se pretende estimar. Esto se basa en reconocer que las condiciones de un día cualquiera están condicionado por fenómenos meteorológicos que operan a una escala mayor tanto espacial como temporalmente y que esto a su vez se ven reflejado tanto en los valores pasados como en los que están por venir. Dado que en las proyecciones es posible tener tanto los valores antecedentes como posteriores, es posible utilizarlos para entonces generar un valor aleatorio factible y representativo de las condiciones. Este procedimiento incorpora la tendencia que presentan los valores, por lo que es posible obtener una mejor representación de la serie original, así como una cierta secuencialidad de los valores lo que no se obtiene por medio de metodologías estocásticas como la planteada en el punto b.

Tras utilizar estos tres procedimientos para generar series sintéticas, finalmente se utilizan solo las series generadas a través de la metodología c, al ser la única que logra replicar de manera adecuada las condiciones meteorológicas en los nuevos conjuntos alternativos de datos. En el caso de la primera metodología, a pesar de las buenas experiencias internacionales expuestas como evidencia de que el programa LARS-WG [Semenov, 1998], en este caso el programa falla no logrando concretar una adecuada representación de las temperaturas, tendiendo a generar valores sobreestimados en los meses de primavera y subestimados en el periodo de otoño; por otro lado, si bien la utilización de distribuciones estadísticas ajustadas en base a la muestra original de las proyecciones logran generar conjuntos que presentan las mismas medias e incluso los mismos histogramas de frecuencia a nivel mensual, el hecho de que los datos sean generados estocásticamente por separado, independientes un valor de otro, genera que la variabilidad interna de las series sea muy grande y que no se logren representar bien las tendencias y comportamientos que involucran periodos de representados en un lapso de tiempo mayor. Esto no ocurre en el caso de la metodología c donde adicionalmente a utilizar un rango consecuentes a cada mes, sí se incluye de cierta forma la tendencia que tiene la serie al momento de generar un nuevo valor.

Una comparación de los valores generados por medio de la metodología seleccionada con los valores sobre los cuales fueron generados se puede ver en la sección 4.3, donde además se revisan varios estadísticos y gráficos que ayudan a ver que tan bien se generan estas variables meteorológicas. Los valores en detalle de las series generadas pueden ser consultados en la carpeta VI del Anexo Digital.

4.2.2 ESCALAMIENTO DE DATOS MK3.6

Los datos disponibles desde el modelo MK3.6 en el escenario de emisiones RCP6.0 corresponden a los resultados de la simulación de un modelo global climático y por lo tanto, la resolución a la que se encuentran es inferior a la del modelo PRECIS que es un modelo regional. Cada punto de la grilla está definido por celdas de aproximadamente $1.87^{\circ} \times 1.87^{\circ}$. Al considerar la geografía de Chile y las dimensiones de la resolución, para procesar los datos que entrega el modelo de manera que estos sean representativos de los puntos de interés en este caso es necesario realizar, aparte de los procedimientos que se muestran en el punto 4.2.1, un escalamiento espacial, según lo revisado en el punto b de la sección 2.3.1 de este informe.

Para elegir finalmente cuál de los métodos de escalamiento espacial será aplicado se utilizará como criterio el índice de correlación generado al relacionar las curvas de duración de información en el punto con las generadas por las distintas ponderaciones. Este modelo entrega diez series de proyecciones diferentes para cada una de las variables que son generadas utilizando los mismos principios de modelación pero diferentes condiciones de inicio lo que genera escenarios alternativos.

Las tres ponderaciones propuestas – punto más cercano, inverso de la distancia e inverso cuadrático de la distancia - son aplicadas para las proyecciones realizadas por el modelo para cada dato a nivel diario con respecto a la línea base. Dado que este modelo ofrece diez series diferentes que corresponden a distintas simulaciones del mismo modelo ejecutadas bajo condiciones diferentes, se obtienen entonces un total de treinta ponderaciones. Es necesario comparar todas estas con los valores que se registran en la línea base de valores históricos para elegir la que resulte más adecuada.

Como primer criterio de elección, se elige aquella ponderación que funciona mejor en la mayoría de los meses al hacer una correlación directa a nivel mensual con respecto a los valores. En general se observa que las tres opciones presentaban valores de correlación altos pero finalmente se opta por la ponderación inversa de la distancia ya que es la que entrega un mejor ajuste en el caso de los valores extremos de la precipitación. Luego, al hacer un análisis de los ajustes con respecto a las precipitaciones y que tan bien se ajustaban, se elige la serie número siete como la situación base con respecto a la que se crean las funciones de transferencia y eliminación del sesgo.

Una vez que generadas las funciones de transferencia para las variables de temperatura, precipitación y humedad relativa en un proceso análogo al expuesto en el punto 4.2.1, se aplican a la diez series que entrega el modelo como resultado al ser ejecutado bajo condiciones de un escenario RCP6.0 Se reconoce que las diferentes series de datos generados por esta metodología resultan más confiables que potenciales escenarios estocásticos adicionales de series sintéticas para analizar el rango de incertidumbre de este modelo, aunque esto implique una menor cantidad de resultados que los que se podrían generar por la otra metodología.

4.2.3 PROYECCIONES DE ÍNDICE DE NUBOSIDAD Y VIENTO

Debido a que la información base que se tiene para estas dos variables, no es posible realizar un escalamiento como en el caso de las otras forzantes meteorológicas (temperatura, precipitación y humedad relativa). En el caso del índice de nubosidad, esta variable no es un parámetro de salida de los modelos de circulación global; en el caso de la velocidad de viento, no se cuenta con información suficiente para realizar un proceso de escalamiento equivalente al hecho para las otras variables. Sin embargo, el modelo requiere de esta información para poder proyectar valores de caudales por lo que se deben abordar de alguna forma a través de supuestos razonables, lo que se expone a continuación en las secciones 4.2.3.1 y 4.2.3.2.

4.2.3.1 Índice de nubosidad

Un análisis de tendencia muestra que el índice de nubosidad no muestra ningún patrón determinado de comportamiento pero que sin embargo los valores observados en cada mes presentan en general una distribución no muy dispersa con respecto al promedio. Debido a que los modelos globales climáticos no entregan datos de esta variable ni directa ni indirectamente (no se lograron establecer correlaciones ni con parámetros de temperatura ni de precipitaciones), es necesaria la creación de datos sintéticos para las proyecciones, tomando como base la información del periodo de línea base.

Para esto, se obtienen los estadísticos mensuales de la muestra del registro histórico, que se presentan en la Tabla 4-3. Con esta información es posible ajustar una distribución normal que representa adecuadamente los valores observados de nubosidad para cada mes, la cual es utilizada en conjunto con una serie de números aleatorios para generar series sintéticas de índices de nubosidad que sirven como información de entrada para el periodo futuro. Los valores en detalle utilizados para las proyecciones de esta variable se pueden revisar en la carpeta V del Anexo Digital.

TABLA 4-3. ESTADISTICOS DE INDICE DE NUBOSIDAD.

Mes	Promedio	Desviación Estándar
Enero	0.87	0.08
Febrero	0.85	0.10
Marzo	0.77	0.10
Abril	0.61	0.12
Mayo	0.44	0.10
Junio	0.37	0.12
Julio	0.43	0.12
Agosto	0.45	0.10
Septiembre	0.47	0.09
Octubre	0.56	0.11
Noviembre	0.69	0.10
Diciembre	0.79	0.09

4.2.3.2 Velocidad del viento

El análisis de los valores de velocidad de viento se ve bastante limitado por el hecho de carecer de información base detallada. Si bien los datos obtenidos del explorador eólico para el periodo de calibración permiten una aproximación gruesa de los valores y evita tener que usar un valor por defecto y arbitrario, éstos no son suficientes para establecer relaciones entre los datos proyectados y la supuesta línea base. Sin embargo, al momento de analizar los datos de velocidad de viento entregados por los modelos, tanto en periodo de línea base como en las proyecciones, no se observa una tendencia al aumento o disminución (como en el caso de las temperaturas y las precipitaciones) por lo que se decide mantener los valores de línea base constantes para el periodo futuro de manera de no generar ruido adicional al intentar hacer aproximaciones demasiado gruesas que pudiesen repercutir de manera negativa.

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PROCESO DE ESCALAMIENTO

En base al proceso de escalamiento respectivo de cada uno de los modelos que se realiza para obtener la información base, se comentan a continuación las dos principales variables asociadas al ciclo hidrológico de las que se encuentran incorporadas al modelo: temperatura y precipitación. La humedad relativa no es estudiada en gran detalle debido a que se puede considerar como una variable dependiente de las otras dos y un factor secundario dentro del proceso de modelación.

Para todas las proyecciones se incorpora un margen de seguridad debido a la incertidumbre de las predicciones de las variables en estudio, asociada a la metodología escogida para cada uno de los modelos de circulación global explicados anteriormente en los puntos 4.2.2 y 4.2.3. Este rango queda definido por la desviación estándar de los valores con respecto al promedio de la muestra que se tiene para cada una de las distintas series de variables. Esto debería asegurar que, suponiendo que la variable en estudio sigue una distribución normal, el margen representado comprende el rango donde debiese encontrarse al menos el 70% de los valores posibles. Esta notación se mantiene para todo el resto de los capítulos a no ser que se indique lo contrario y se utiliza no solo para las precipitaciones sino también para valores de temperatura y caudales, en los casos en que sea factible.

Se analizan a continuación los procesos de escalamiento tanto a nivel de las estaciones base para los gradientes como a nivel de las cuencas en estudio, para tener conocimiento de los efectos esperados sobre las variables meteorológicas debido a las variaciones inducidas por el cambio climático.

4.3.1 TEMPERATURAS

Según lo nombrado anteriormente, las proyecciones para las precipitaciones son obtenidas desde dos fuentes diferentes: desde un modelo regional climático – PRECIS – el cual entrega información climatológica de diversas variables a nivel diario, en ciertos puntos que definen una grilla de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ que cubren todo el territorio nacional, bajo un escenario de emisión SRES A1B; y desde un modelo climático global – MK3,6, bajo un escenario de emisiones RCP6.0 – que presenta una resolución menor y que deben ser adaptados.

Es necesario verificar que las funciones de escalamiento representen bien los datos reales, para lo cual se grafican para igual probabilidad los datos reales con respecto a los datos modelados, como se aprecia en la Figura 4-4, donde es posible observar que las correlaciones presentan valores de R^2 cercanos a 1. En este caso, el error promedio inducido por las funciones de transferencia correspondería a una subestimación de $0.14^{\circ}\text{C}/10^{\circ}\text{C}$ en el caso del modelo MK3.6, bajo un escenario RCP6.0 y de $0.11^{\circ}\text{C}/10^{\circ}\text{C}$ en el modelo PRECIS-ECHAM5 bajo un escenario A1B aproximadamente, lo cual resulta un valor marginal con respecto a los valores de temperaturas. Considerando esto, se considera a estos conjuntos de funciones adecuadas para el proceso de escalamiento.

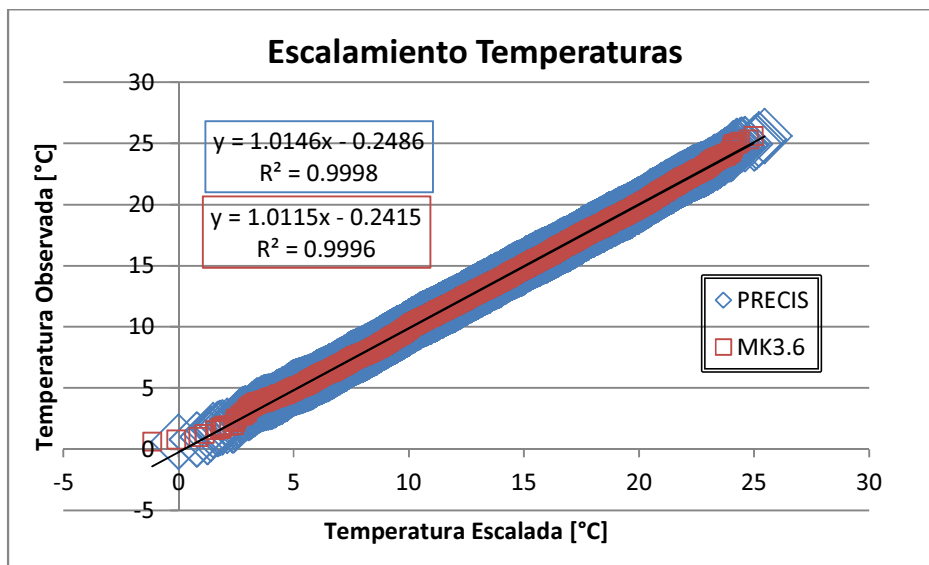


FIGURA 4-4. VERIFICACIÓN DE LAS FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE LA TEMPERATURA.

Una vez aceptadas como válidas las funciones de transferencia, como se menciona en la sección 4.2.1 por primera vez, éstas son utilizadas a lo largo de todo el periodo definido como línea base, el periodo 1971-2009, para obtener un reanálisis de los datos con el fin de generar un conjunto de datos comparables con las proyecciones de cada uno de los modelos. Es importante destacar que debido a que el periodo de reanálisis incorpora información adicional no utilizada en el proceso de las funciones de transferencia, los valores obtenidos a partir de los diferentes modelos pueden presentar valores diferentes.

En la Figura 4-5 se presentan las curvas de duración diarias, mensuales y anuales de la temperatura para el periodo futuro y el de línea base, según las proyecciones realizadas por cada uno de los modelos.

Se observa que la variabilidad de las líneas base planteadas por cada modelo son significativamente distintas: si bien a una escala diaria los valores de ambas proyecciones se encuentran en un rango similar, a medida que la escala temporal se hace mayor los pronósticos de temperatura del escenario RCP6.0/MK3.6 tienden a presentar una menor dispersión que los predichos por el escenario A1B/PRECIS-ECHAM. Es así como por ejemplo, en el caso de la curva de duración anual los valores para el modelo australiano varían entre los 14°C y los 15°C , mientras que en el caso del modelo alemán, la variación está comprendida en el rango entre los 12°C y los 17°C . Sin embargo, es

importante notar que en ambos casos la probabilidad de excedencia del 50% presenta un valor proyectado de 14.5°C.

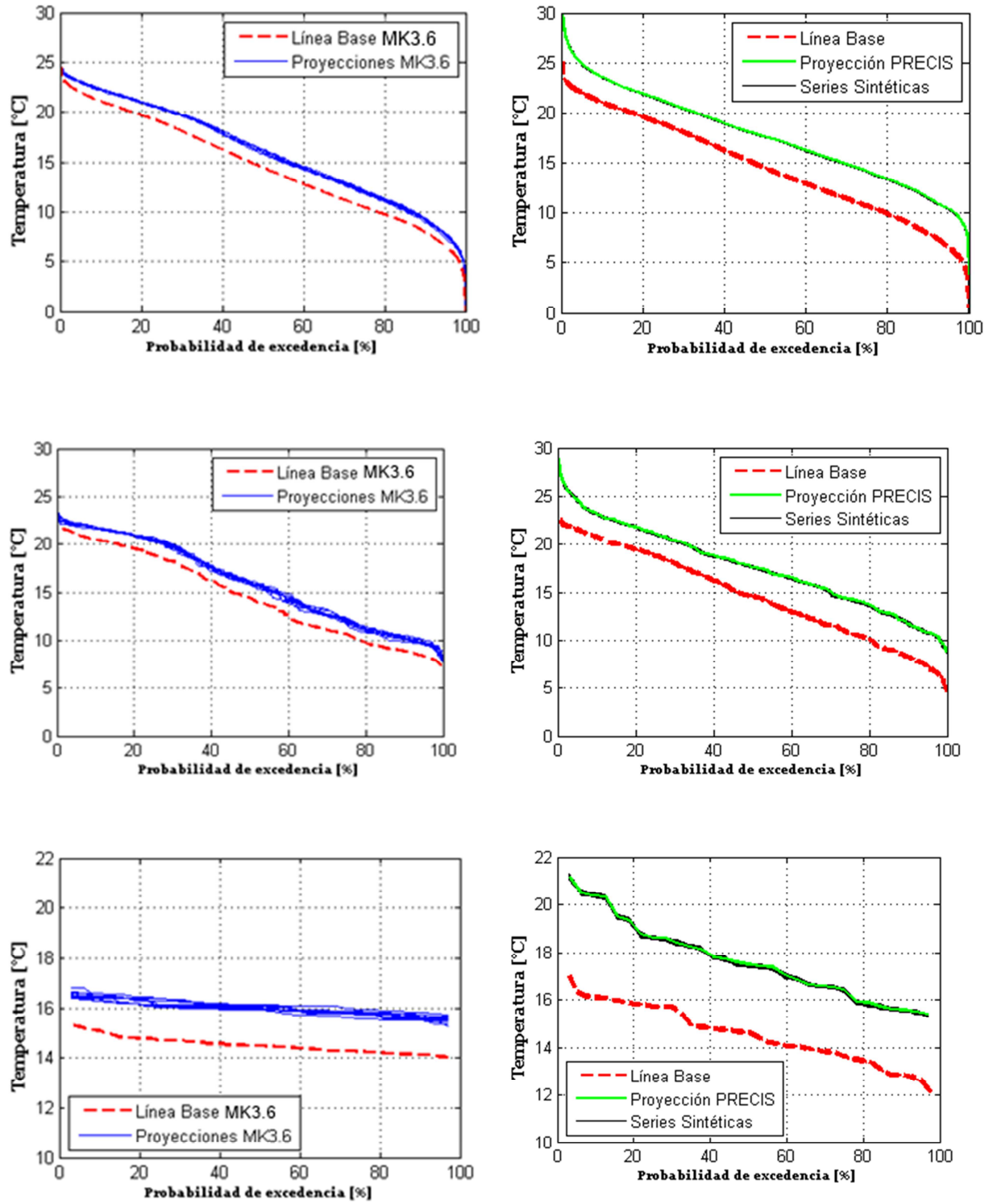


FIGURA 4-5. CURVAS DE DURACIÓN DIARIAS (ARRIBA), MENSUALES (CENTRO) Y ANUALES (ABAJO) DE LA TEMPERATURA EN LÍNEA BASE Y PROYECCIONES.

Esto lleva a concluir que esta discrepancia en los valores de la variabilidad de temperatura promedio anual se interpreta como una diferencia inducida principalmente por el planteamiento físico de los modelos. En el caso de las proyecciones, cada escenario asociado a su modelo respectivo mantiene su comportamiento: el escenario RCP6.0 presenta un aumento sostenido de entre 1.6°C a 2°C para todas las probabilidades de excedencia, es decir, tanto para años cálidos como fríos; por otro lado, el escenario A1B presenta un aumento promedio de las temperaturas que varía entre 3°C y 4° dependiendo de la probabilidad de excedencia. El valor observado de temperatura media anual no se aleja mucho de los 16°C en el escenario RCP6.0 del modelo MK3.6, presentando una baja variabilidad entre las diversas series que se tienen como información de entrada ($\pm 0.3^\circ\text{C}$), mientras que en el caso del escenario A1B del modelo PRECIS-ECHAM5 el valor promedio de temperatura anual asciende a casi 18°C y presenta al igual que el otro modelo una variación baja con respecto a sus escenarios alternativos a través de las series sintéticas.

Con respecto a los aumentos proyectados para el periodo futuro, se observa que ambos modelos proyectan un aumento de las temperaturas para todas las probabilidades de excedencia y en cada una de las escalas temporales analizadas. Sin embargo, es posible observar diferencias en la magnitud y sector de impacto de los pronósticos hechos por cada modelo. En el caso del escenario escogido para el modelo MK3.6, el aumento esperado para probabilidades mayores a 90% o menores al 10% bordea aproximadamente es de $\Delta 2^\circ\text{C}$. Este valor se hace menor para las probabilidades comprendidas fuera del intervalo nombrado, donde habría un incremento de aproximadamente solo 1°C. En el caso del escenario seleccionado para el modelo PRECIS-ECHAM5 en la misma escala temporal, se observan incrementos de temperatura que bordean los $\Delta 5^\circ\text{C}$ en el caso de las probabilidades de excedencia altas, es decir, un aumento de las temperaturas mínimas en mayor magnitud, mientras que para valores de probabilidad de excedencia baja, es decir, las temperaturas máximas esperadas el incremento resulta menor, siendo de solo $\Delta 2^\circ\text{C}$. Para las probabilidades de excedencia medias se observan aumentos que varían entre los 2°C y los 5°C siendo menor el incremento a media que se tiene una menor disminución de la probabilidad de excedencia. Las curvas de duración mensual presentan tendencias similares a las observadas a escala diaria en ambos modelos, con la excepción de que los valores extremos presentan una menor variación, como es de esperarse en una escala temporal mayor.

Con respecto a la representatividad de las series sintéticas con respecto a la serie PRECIS bajo condiciones de escenario A1B se observa que mantienen una adecuada relación con los valores originales en todas las escalas temporales, presentando un índice de correlación alto. Esto supone un indicador adicional de que las series fueron correctamente generadas y efectivamente pueden ser utilizadas como una herramienta de evaluación de incertidumbre en estudios de impacto de variación climática como éste.

En la Figura 4-6 es posible observar los valores de las temperaturas medias mensuales promedio, de los periodos de línea base y futuro. En el caso del escenario RCP6.0 es posible observar que el comportamiento estacional se mantiene presentándose un aumento relativamente constante a lo largo de todos los meses. Además, la variabilidad de las diferentes series entregadas por el modelo como era de esperarse presentan una adecuada correspondencia y por tanto la variación es poca. Considerando esto, resulta

lógico observar como a nivel anual el aumento de las temperaturas también es cercano a los 2°C como se muestra en la parte inferior de la misma figura.

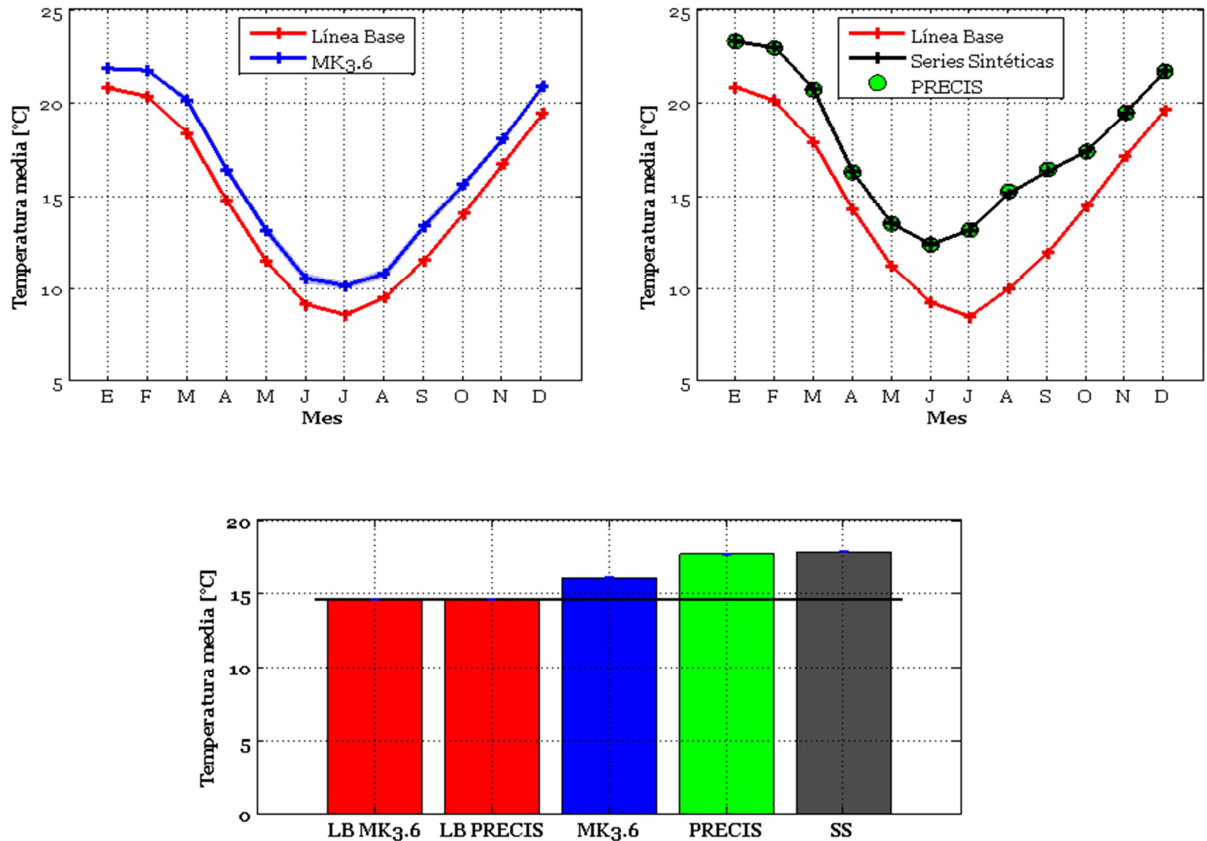


FIGURA 4-6. PROMEDIOS MENSUALES MODELO MK_{3.6} (ARRIBA IZQUIERDA), PRECIS (ARRIBA DERECHA) Y PROMEDIOS ANUALES (ABAJO)

Con respecto a las predicciones del escenario A1B, bajo el modelo PRECIS y sus escenarios estocásticos alternativos es posible observar que se logra representar exitosamente el valor promedio mensual de cada mes por medio de los promedios de las series generadas utilizando la metodología expuesta en la sección 4.2.1 y se procede a utilizarlas como una metodología que permita agregar bandas de incertidumbre asociadas a las proyecciones de caudales asociados a este contexto.

Toda la información del escalamiento y proyección de las temperaturas se encuentra en la carpeta I del Anexo Digital.

4.3.2 PRECIPITACIONES

Las precipitaciones al pasar por un proceso de escalamiento similar al de las temperaturas, requieren de una verificación similar a lo presentado en la Figura 4-4, la cual en este caso se presenta en la Figura 4-7. En este caso, el error promedio inducido por las funciones de transferencia correspondería a una subestimación de

aproximadamente 1.5 % en el caso del escenario del modelo PRECIS y de 1.6% en el caso del escenario del modelo MK3.6.

Si bien las correlaciones tienden a subestimar un poco el valor escalado, se observa que la cifra significativa es de la milésima de valor, lo cual se traduce en una subestimación de 1.5 para un evento de 100 [mm] en el caso del escenario A1B y de 1.4 [mm] en el caso del escalamiento de los datos del escenario RCP6.0, lo que resulta un error aceptable. Hacia el final de la curva se observan tres puntos considerablemente subestimados bajo el escenario A1B planteado por el modelo PRECIS, los cuales fueron considerados valores “outliers” al momento de establecer las funciones de transferencia debido al potencial error que significaba su incorporación.

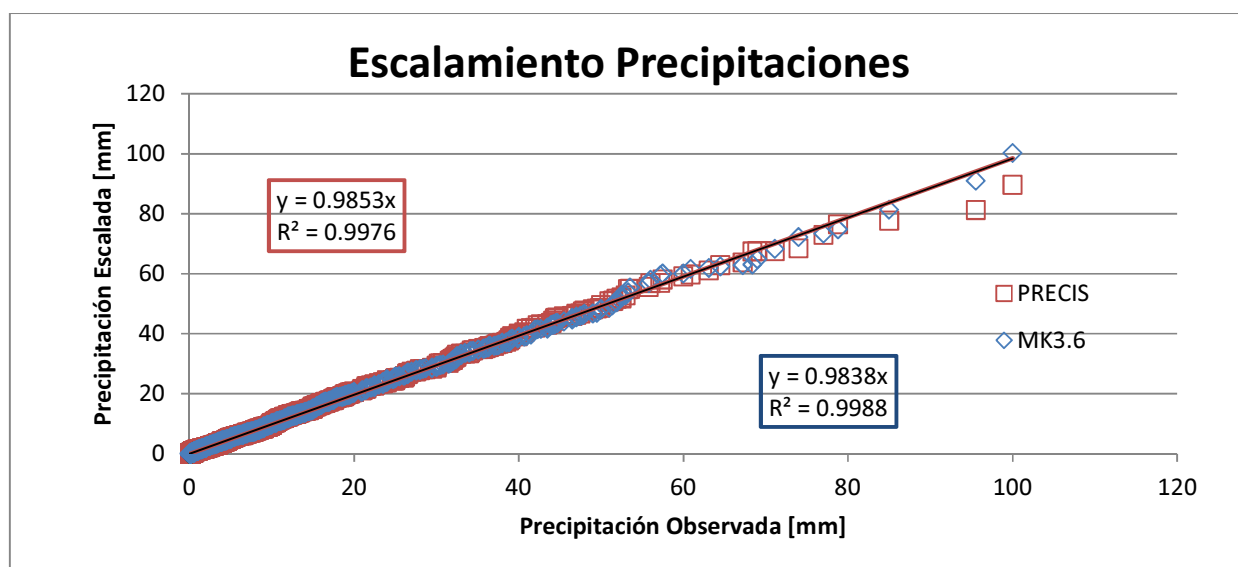


FIGURA 4-7. VERIFICACIÓN DEL ESCALAMIENTO DE PRECIPITACIONES

Luego de verificar los procesos de escalamiento nombrados en la sección 4.2, se utilizó desde este punto en adelante los valores del periodo de reanálisis como valores de comparación, comprendido en el periodo entre el 1 de Enero de 1971 y el 31 de Diciembre del 2009. Nuevamente, y en particular para esta variable, es importante notar que este periodo cubre lapsos de tiempos no utilizados en la generación de las funciones de transferencia, por lo cual los valores obtenidos para los dos modelos difieren producto de esta información adicional agregada.

La Figura 4-8 muestra un comportamiento general de ambos modelos de proyecciones a una disminución de las magnitudes de los eventos a una misma probabilidad de excedencia a medida que la escala temporal se hace mayor, lo que refleja una disminución generalizada de las precipitaciones.

Las curvas de duración diaria de las proyecciones futuras de ambos modelos mantienen sus valores con respecto al periodo de línea base dentro del intervalo comprendido entre las probabilidades de excedencia del 20% al 100%. Para valores menores a 20%, los valores de las proyecciones futuras superan en algunos casos los valores de línea base, lo que representa que se esperan valores de precipitación más extremos en el caso de eventos de tormentas infrecuentes. Los valores de las series sintéticas presentan una

mayor variabilidad que el escenario del modelo MK3.6. Comparativamente, las proyecciones del escenario RCP6.0 del modelo MK3.6 presentan precipitaciones mayores para una misma probabilidad de excedencia que las del escenario A1B del modelo PRECIS.

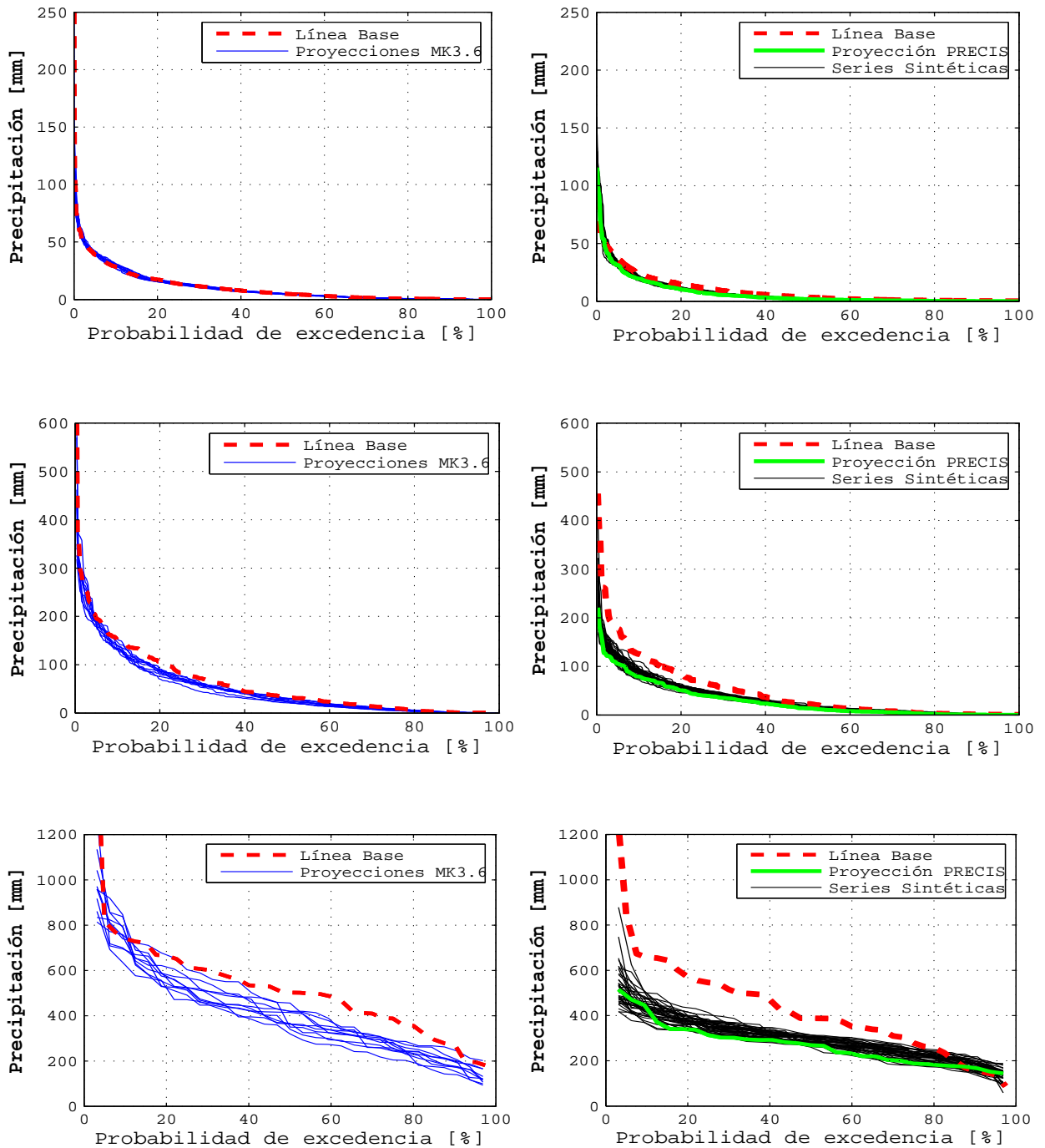


FIGURA 4-8. CURVAS DE DURACIÓN DE PRECIPITACIONES DIARIA (ARRIBA), MENSUAL (MEDIO) Y ANUAL (ABAJO).

A escala temporal mensual, las proyecciones realizadas por el modelo MK3.6 en su escenario RCP6.0 presentan valores menores que en el periodo de línea base, siendo la excepción a esto los valores esperados en el caso de probabilidades menores al 5%.

Las curvas de duración anuales de ambos modelos muestran una clara disminución de todos los valores, tanto los de baja probabilidad de ocurrencia como los de alta, lo cual se interpreta como una disminución general de la precipitación anual total observada en periodos futuros. Los años húmedos presentan una disminución mayor en el modelo PRECIS (así como una tendencia a disminuir la variabilidad de los años) mientras que el modelo MK3.6 presenta una disminución más uniforme para todo el rango de probabilidades

En la Figura 4-9 es posible ver los promedios anuales de precipitación. Se observan disminuciones de las medias anuales, apreciándose que las disminuciones proyectadas son similares entre los escenarios del modelo MK3.6 y del modelo PRECIS, cercanas a 120 [mm] ambas. Además es posible ver las diferencias entre las proyecciones de ambos modelos, presentando las proyecciones del escenario RCP6.0 aproximadamente 100 [mm] más de lluvia anual que el escenario A1B, tanto en el periodo de línea base como en el futuro.

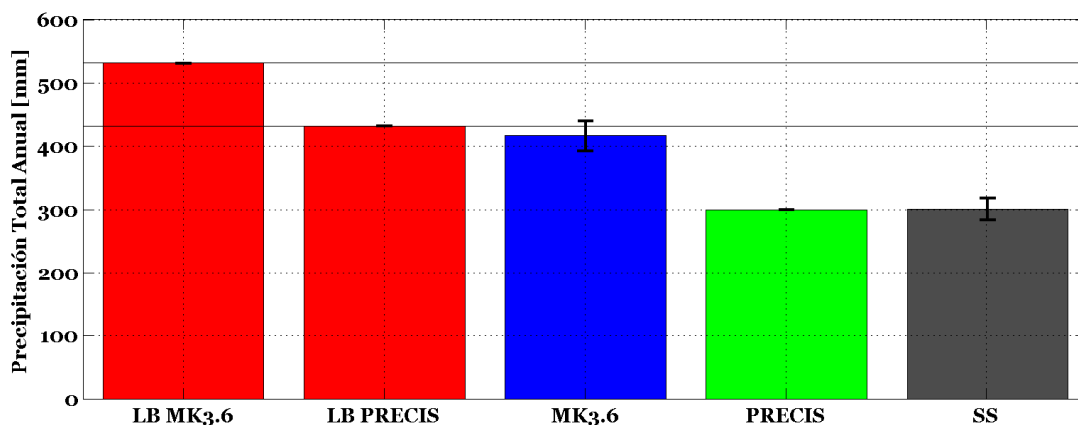


FIGURA 4-9. VALORES MEDIOS ANUALES DE PRECIPITACIÓN POR PERIODO Y MODELO.

Estas disminuciones podrían ser el resultado de una o más variaciones en el régimen de precipitaciones, tales como alteraciones de la intensidad o de la frecuencia, por lo que resulta interesante analizar qué cambios proyectan los modelos que hacen variar los montos anuales de precipitación. En la Figura 4-10 se analizan estos factores: precipitación media mensual y el número de eventos de tormenta promedio mensual, considerados en la estación pluviométrica Rancagua DCP, que es la utilizada como base para la extrapolación en altura a través de la utilización del gradiente generado para esta variable.

Se observa en la Figura 4-10 que el escenario RCP6.0 del modelo MK3.6 presenta una mayor consistencia en lo referente a su régimen hidrológico, presentando una distribución similar en las proyecciones a la de línea base pero que sin embargo reducen tanto sus magnitudes como su frecuencia. Adicionalmente, se observan algunos cambios

menores tales como un aumento de la precipitación en el mes de Abril con respecto a línea base, o un cambio en la figura del hietograma en los meses de Octubre y Noviembre pero no se observan cambios significativos. Las disminuciones de precipitaciones en la temporada invernal son concluyentes al observar que incluso incorporando la incertidumbre de las proyecciones éstas siguen siendo significativas en el mes de Junio y Julio, y muy cercanas a ser concluyentes en los meses de Mayo y Agosto.

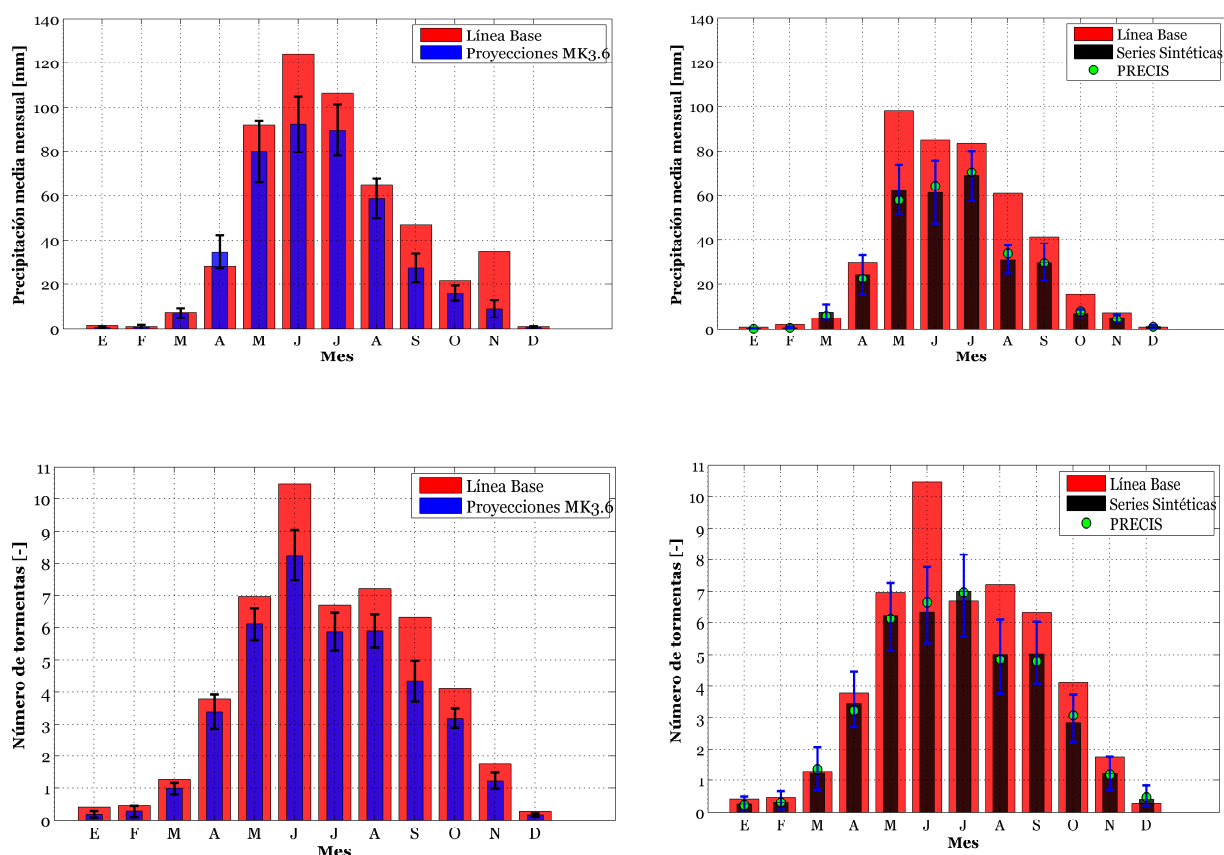


FIGURA 4-10. PROMEDIOS MENSUALES DE PRECIPITACIÓN (ARRIBA) Y NÚMERO MEDIO DE DÍAS CON PRECIPITACIÓN MAYOR A CERO (ABAJO) SEGÚN MODELO.

El escenario A1B del modelo PRECIS presenta cambios más drásticos en la forma de su hietograma: el mes de mayor precipitación en el periodo de línea base – Mayo – ya no lo es en las proyecciones, entregándole este lugar al mes de Julio. Las disminuciones de la precipitación media en el periodo de invierno y primavera resultan concluyentes, aún con el margen de incertidumbre de las proyecciones, lo cual es consecuente con lo observado en la curva de duración mensual. En el caso de los meses de Marzo y Abril no se proyectan cambios concluyentes. Con respecto a la ocurrencia de tormentas, las proyecciones no muestran una disminución certera en los meses de Abril, Mayo y Julio, pero sí en el resto de los meses, lo cual una vez más da cuenta de los cambios proyectados en el régimen hidrológico por este modelo.

Se concluye que el régimen de precipitaciones proyectado para el periodo futuro en análisis difiere en ambos modelos: mientras que el modelo MK3.6 presenta

disminuciones uniformes porcentualmente tanto de sus precipitaciones media como de la ocurrencia de éstas, el modelo PRECIS presenta cambios severos con respecto al periodo de línea base.

A pesar de esto, en ambos casos, los promedios totales de precipitación anual tienden a una disminución, debido a cambios tanto en la ocurrencia como en la magnitud de las tormentas, lo cual repercute directamente sobre la disponibilidad de recurso hídrico. Esto se traduce en una mayor ocurrencia de años secos en comparación con la situación de línea base.

Un análisis adicional que resulta interesante de ver es el cambio en los histogramas de frecuencia de la intensidad de las precipitaciones. Si bien esta información se encuentra disponible en la Figura 4-8 en el gráfico de las curvas de duración diarias, el acceso a ella no es tan directo debido a las dimensiones de los cambios. En la Tabla 4-4 se presenta el peso relativo de cada uno de los rangos de intensidad de precipitaciones para cada periodo y modelo, de forma que las variaciones sean comparables.

TABLA 4-4. VARIACIÓN DE LAS INTENSIDADES DE LAS PRECIPITACIONES SEGÚN MODELO.

Rango Pp [mm]	LB-MK3.6	MK3.6	Variación MK3.6	LB-PRECIS	PRECIS	Variación PRECIS
0 a 10	66.1%	67.1%	1.0%	71.7%	76.6%	4.9%
10 a 20	18.5%	17.3%	-1.2%	15.4%	13.2%	-2.1%
20 a 30	6.7%	5.9%	-0.8%	5.6%	4.2%	-1.4%
30 a 40	4.1%	4.5%	0.4%	3.2%	3.3%	0.1%
40 a 50	2.5%	2.6%	0.2%	2.1%	0.9%	-1.2%
50 a 60	0.9%	1.2%	0.3%	1.1%	0.6%	-0.5%
60 a 70	0.6%	0.5%	-0.1%	0.5%	0.4%	-0.1%
70 a 80	0.2%	0.4%	0.2%	0.2%	0.2%	0.0%
80 a 90	0.1%	0.2%	0.1%	0.3%	0.2%	-0.1%
90 a 100	0.2%	0.1%	-0.1%	0.0%	0.2%	0.2%
100 a 110	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.2%	0.2%
110 a 120	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
120 a 130	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%
130 a 140	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
140 a 150	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
150 a 160	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
160 a 170	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
170 a 180	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
180 a 190	0.1%	0.0%	-0.1%	0.0%	0.0%	0.0%
190 a 200	0.1%	0.0%	-0.1%	0.0%	0.0%	0.0%
Mayor a 200	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%

De la Tabla 4-4 es posible observar como los dos modelos a utilizar presentan tendencias a una variación diferente entre ellos. En las proyecciones realizadas por el modelo MK3.6 existe un aumento del peso relativo que presentan las precipitaciones entre 0 y 10 [mm], así como también en las comprendidas entre los 30 [mm] y los 90 [mm] en

general, al mismo tiempo que disminuye la cantidad relativa de las lluvias entre 10 [mm] y 30 [mm]. Bajo este modelo entonces se pronostica una variación más extrema de las precipitaciones, donde se tiende a hacerlas de una mayor intensidad o bien eventos muy menores, en desmedro de valores intermedios.

Por otro lado, el modelo PRECIS proyecta una disminución de la intensidad de las precipitaciones en general, aumentando en un porcentaje importante la participación relativa del intervalo menor (0 a 10[mm] por evento de precipitación) en desmedro de los eventos más intensos (sobre 20 [mm]) donde en todos los intervalos se observa una reducción de la participación relativa.

Toda la información del escalamiento y proyección de las precipitaciones se encuentra en la carpeta II del Anexo Digital.

5. PLANTEAMIENTOS DE MODELOS

5.1 MODELOS HIDROLÓGICOS

La modelación de las cuencas se realizará mediante el programa WEAP, debido a las buenas capacidades que presenta con este fin según lo expuesto en el capítulo 2. Se plantea la realización de tres modelos: río Pangal, río Cachapoal y río Cipreses. De éstos, serán calibrados y validados solo los primeros dos, mientras que para el último nombrado se transferirán los parámetros calibrados del modelo del río Cachapoal y se realizará una verificación de resultados con el escaso registro disponible, en base a los supuestos planteados en el punto 3.7 de este trabajo. Esta transferencia de parámetros se basa en la similitud de las cuencas, según los antecedentes planteados en la misma sección anterior de este trabajo. Los periodos de calibración y validación de cada uno de los modelos se presenta en la Tabla 5-1.

TABLA 5-1. PERIODOS DE CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS.

	Pangal	Cachapoal
Calibración	01/04/2000 a 31/03/2004	01/04/2000 a 31/03/2004
Validación¹³	01/04/1987 a 31/03/1991	01/04/1989 a 31/03/1993

La definición de las captaciones y sus áreas se realiza por medio de la curva hipsométrica, definiendo bandas de elevación delimitadas por aumentos de altura de 400 metros. Con el fin de aplicar los gradientes realizados durante el proceso de calibración según lo desarrollado en el punto 4.1, se calcula además la elevación del centro de gravedad de cada banda. Esta altura se definirá como la elevación representativa de cada banda y será el punto utilizado como referencia en la aplicación de los gradientes. Esta información se puede ver en la Tabla 5-2.

TABLA 5-2. VALORES DE PROPIEDADES GEOMORFOLÓGICAS DE LAS BANDAS.

Cachapoal 5 km. Bajo Cortaderal				
ID	Rango de altura	Altura representativa	Área	Ponderación
	[m]	[m]	[km²]	[%]
1	Sobre 4000	4264.7	42.2	4
2	Entre 3601 y 4000	3772.0	107.9	11
3	Entre 3201 y 3600	3386.5	210.2	22
4	Entre 2801 y 3200	3009.2	220.7	23
5	Entre 2401 y 2800	2611.6	174.8	18
6	Entre 2000 y 2400	2214.1	107.7	11
7	Entre 1600 y 2000	2551.8	65.8	7
8	Entre 1104 y 1600	1386.0	34.9	4

¹³ Se excluye de este periodo el año hidrológico 1988/89 para el modelo Pangal y el año 1991/92 para el modelo Cachapoal respectivamente debido a la pobreza e irregularidades que presenta el registro en este lapso de tiempo.

Pangal en Pangal				
ID	Rango de altura	Altura representativa	Área	Ponderación
	[m]	[m]	[km²]	[%]
1	Sobre 4000	4247.8	37.4	7
2	Entre 3601 y 4000	3774.9	76.6	15
3	Entre 3201 y 3600	3400.3	121.2	23
4	Entre 2801 y 3200	3007.0	110.0	21
5	Entre 2401 y 2800	2606.9	83.8	16
6	Entre 2001 y 2400	2216.2	59.9	11
7	Entre 1455 y 2000	1765.8	32.7	6

Bocatoma Cipreses				
ID	Rango de altura	Altura representativa	Área	Ponderación
	[m]	[m]	[km²]	[%]
1	Sobre 4000	4158.1	12.1	4
2	Entre 3600 y 4000	3789.1	35.2	10
3	Entre 3200 y 3600	3377.4	39.4	11
4	Entre 2800 y 3200	3000.7	73.7	21
5	Entre 2400 y 2800	2610.8	61.1	18
6	Entre 2000 y 2400	2207.6	51.9	15
7	Entre 1600 y 2000	1797.2	46.6	14
8	Entre 1134 y 1600	1460.0	24.9	7

Si bien las cuencas presentan alturas máximas que permiten la definición de más intervalos, el valor de área comprendido en valores de elevación mayores a 4.000 metros resulta en general muy pequeño, por lo que se integran todos estos valores en una sola banda de elevación. Se realiza un proceso análogo para la banda de menor altura de cada, que debido a la cercanía en valores con el rango siguiente es integrada a este último. Una vez que se cuenta con esta información, en conjunto con la información recolectada y procesada previamente y utilizando los gradientes de elevación para las variables de temperatura, precipitación y humedad relativa, es posible realizar el proceso de calibración de cada uno de los modelos.

Debido a que se trata de una cuenca de régimen nival, es posible reconocer que a partir de cierta elevación se acumula nieve por sobre una cota (línea de nieves). Además, considerando los antecedentes geomorfológicos, geológicos y de uso de suelo, se determina que lo más apropiado es generar dos sets de parámetros diferentes orientados según altura de banda de elevación para los rangos de menores y mayores cotas respectivamente.

Para evaluar el desempeño de la calibración realizada para las cuencas, se utilizan los índices presentados en el punto 2.2.1.1. Estos índices son aplicados a los modelos en fase de calibración y validación. Además, debe considerarse que en cada modelo se debe evaluar su desempeño bajo dos conjuntos de información de humedad relativa diferente debido a que esta información fue obtenida a través de los diferentes modelos globales como se explicó en el punto 4.1.3. Adicionalmente, se incorpora un criterio de inspección visual, con el fin de poder orientar la calibración según los objetivos perseguidos por el estudio.

Los valores de los parámetros obtenidos para cada uno de los modelos y sobre que bandas fue utilizado cada uno se presentan en la Tabla 5-3.

TABLA 5-3. PARÁMETROS CALIBRADOS PARA CADA CUENCA

Parámetro	Unidad	Cachapoal		Pangal	
		Valor	Banda de aplicación	Valor	Banda de aplicación
Temperatura de derretimiento	[°C]	9	Todas	6	Todas
Temperatura de congelamiento	[°C]	5.5	Todas	3.5	Todas
Radiación Incidente	[W/m ²]	12	Todas	10	Todas
Variación Radiación	[-]	4	Todas	2	Todas
Capacidad zona de raíces baja	[mm]	5500	5 a 8	3000	5 a 7
Capacidad zona de raíces alta	[mm]	5500	1 a 4	3200	1 a 4
Conductividad zona de raíces baja	[mm/día]	60	5 a 8	30	5 a 7
Conductividad zona de raíces alta	[mm/día]	150	1 a 4	45	1 a 4
Capacidad zona profunda baja	[mm]	2000	5 a 8	2500	4 a 7
Capacidad zona profunda alta	[mm]	3000	1 a 4	2000	1 a 3
Conductividad zona profunda baja	[mm/día]	10	5 a 8	5	4 a 7
Conductividad zona profunda alta	[mm/día]	12	1 a 4	5	1 a 3
Dirección Preferida de Flujo	[-]	0.25 - 0.85	Todas	0.1 - 0.95	Todas
Factor de precipitación 1	[-]	1.6	Todas	0.7	6,7
Factor de precipitación 2	[-]	-	n/a	1	5
Factor de precipitación 3	[-]	-	n/a	1.3	3,4
Factor de precipitación 4	[-]	-	n/a	1.6	1,2
Factor de resistencia al flujo bandas bajas	[-]	2.3	5 a 8	3	5 a 7
Factor de resistencia al flujo bandas altas	[-]	2	1 a 4	2.8	1 a 4
Coefficiente de evaporación	[-]	1.7	Todas	0.95 - 3	Todas

Estos parámetros entregan los resultados de indicadores de modelación hidrológica presentados en la Tabla 5-4. Se observa que los valores del índice de Nash-Sutcliffe presentan valores mayores o iguales a 0.66 para ambos modelos con ambos conjuntos de datos de humedad relativa. El índice logarítmico de Nash-Sutcliffe también presenta buenos valores, en especial para el periodo de calibración en ambos casos. Sin embargo, en el caso del modelo Pangal, disminuye a un valor inferior a 0.66 y 0.63 según el conjunto de datos utilizados. Sin embargo, se observa que en aquel caso se tiene un valor de N-S relativamente alto, cercano a 0.73 y 0.75 respectivamente, en ambos casos lo cual compensa en cierta manera estos valores.

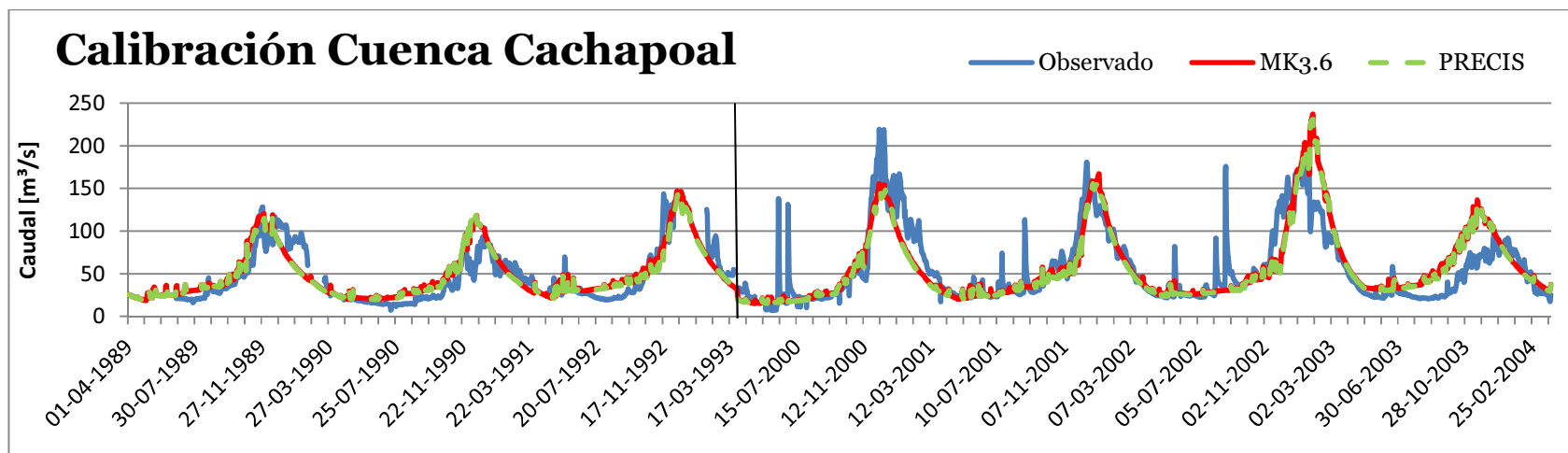
Este punto, sumado a los valores relativamente altos de los coeficientes de correlación que se presentan entre los valores modelados y los observados hacen que estos valores sean permisibles.

TABLA 5-4. VALORES DE LOS INDICADORES DE MODELACIÓN HIDROLÓGICA.

Humedad Relativa desde modelo PRECIS-ECHAM5	Cachapoal		Pangal	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
Coef. de Nash-Sutcliffe	0.66	0.69	0.7	0.73
Coef. logaritmico Nash-Sutcliffe	0.75	0.74	0.78	0.66
Coeficiente de correlación	0.83	0.84	0.86	0.87
Humedad Relativa desde modelo MK3.6	Cachapoal		Pangal	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
Coef. de Nash-Sutcliffe	0.67	0.69	0.7	0.75
Coef. logaritmico Nash-Sutcliffe	0.75	0.73	0.78	0.63
Coeficiente de correlación	0.84	0.84	0.86	0.87

En las páginas siguientes se presentan un conjunto de gráficos que ayudan a observar visualmente el desempeño de los modelos calibrados. En la Figura 5-1 es posible observar el contraste entre la serie de registro histórico y las series que se tienen como resultado del proceso de calibración (diferenciadas según la fuente de información que se tiene para los valores de humedad relativa). En general ambas calibraciones presentan una gran consecuencia, siendo en los meses de deshielos donde es posible observar una mayor variación de los caudales debido a las diferencias entre las series. Se observa que la modelación realizada logra una buena representación de los ciclos de derretimiento de nieve al interior de la cuenca lo que es fundamental debido a su carácter nival.

La modelación de crecidas pluviales no logra representar eventos extremos registrados en las estaciones correspondientes (por ejemplo, Julio de 2000 y Agosto de 2002). Sin embargo, dado el enfoque que presenta este estudio en que se apunta a una actividad de carácter permanente como es la generación hidroeléctrica y que ante crecidas de tal magnitud (como las que no se logran representar en el modelo) el funcionamiento de las centrales se ve limitado por otros factores (como por ejemplo la cantidad de sedimentos que trae el caudal) se reconoce que esta deficiencia del modelo no representa un impacto significativo sobre los resultados. Esto, dado que la escala temporal a la que ocurren estos fenómenos (horas, como máximo días) resulta mucho menor que el periodo de análisis que corresponde a análisis de nivel anual e incluso mayores como por ejemplo al considerar el intervalo futuro que se pretende analizar.



14

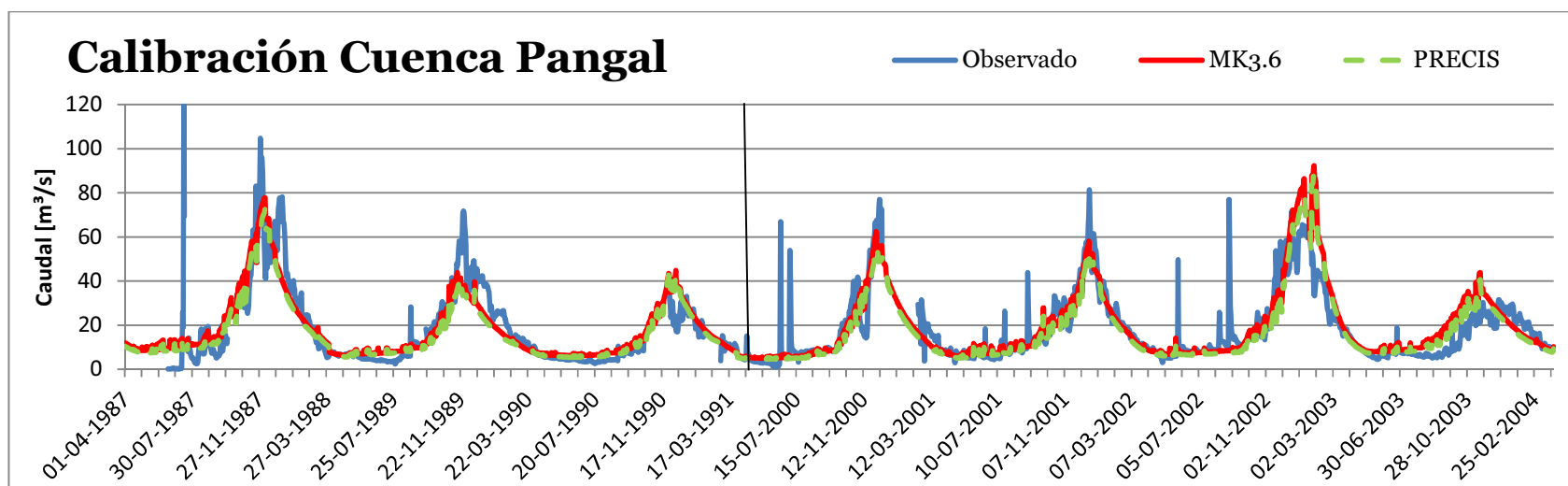


FIGURA 5-1. SERIE DE CAUDALES OBSERVADOS Y MODELADOS PARA LAS CUENCAS DEL ESTUDIO.

¹⁴ Notar que los procesos de calibración presentan dos series distintas en función de los dos conjuntos de datos diferentes de humedad relativa utilizados según lo especificado en el punto 4.1.3 de este informe.

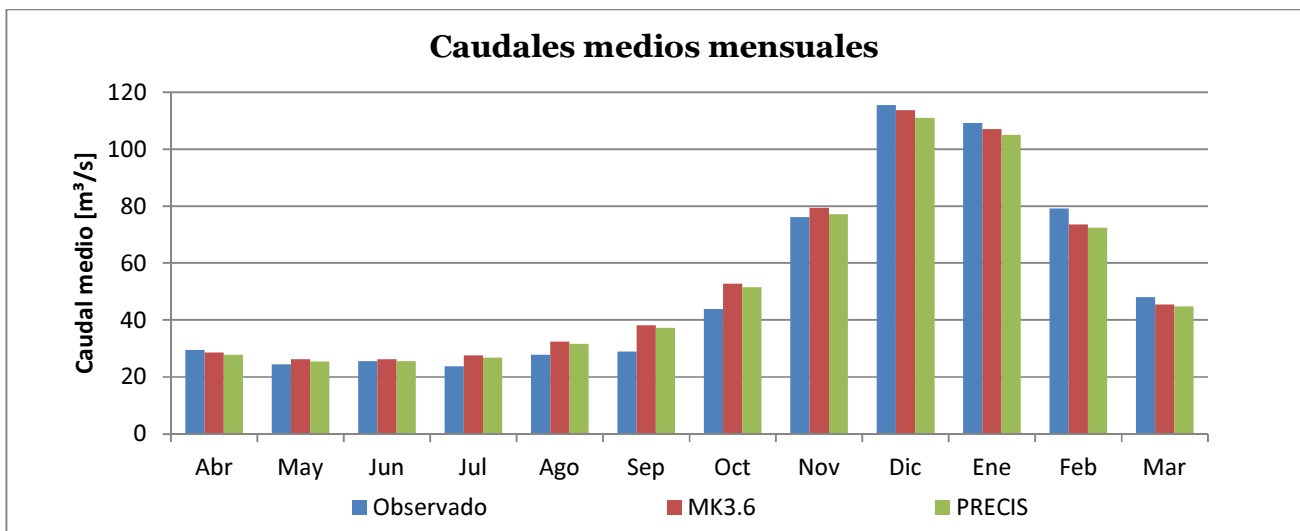
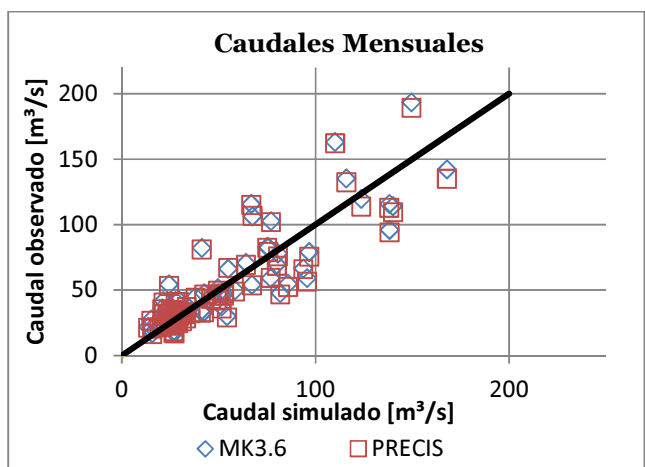
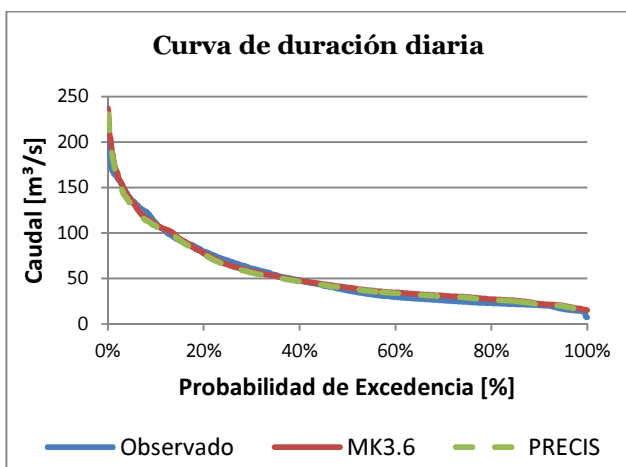
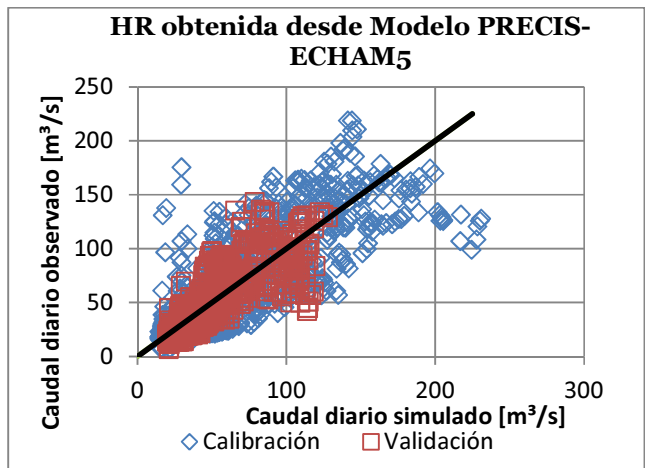
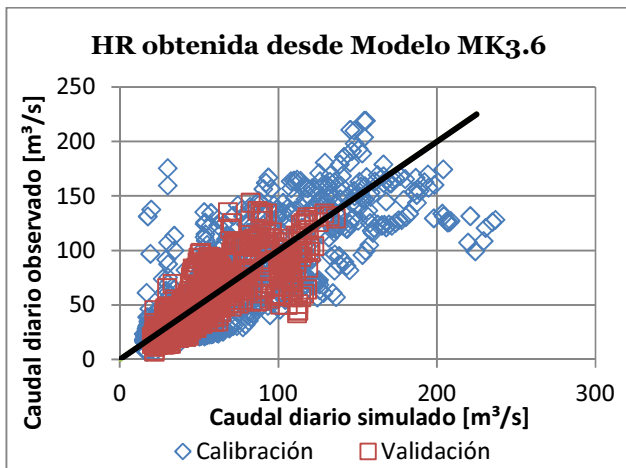


FIGURA 5-2. COMPARACIÓN DE CAUDALES SIMULADOS CON OBSERVADOS (ARRIBA), CURVA DE DURACIÓN DIARIA (CENTRO IZQUIERDA), COMPARACIÓN DE VALORES MENSUALES (CENTRO DERECHA) Y VALORES DE CAUDAL MEDIO (INFERIOR) PARA LA CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL.

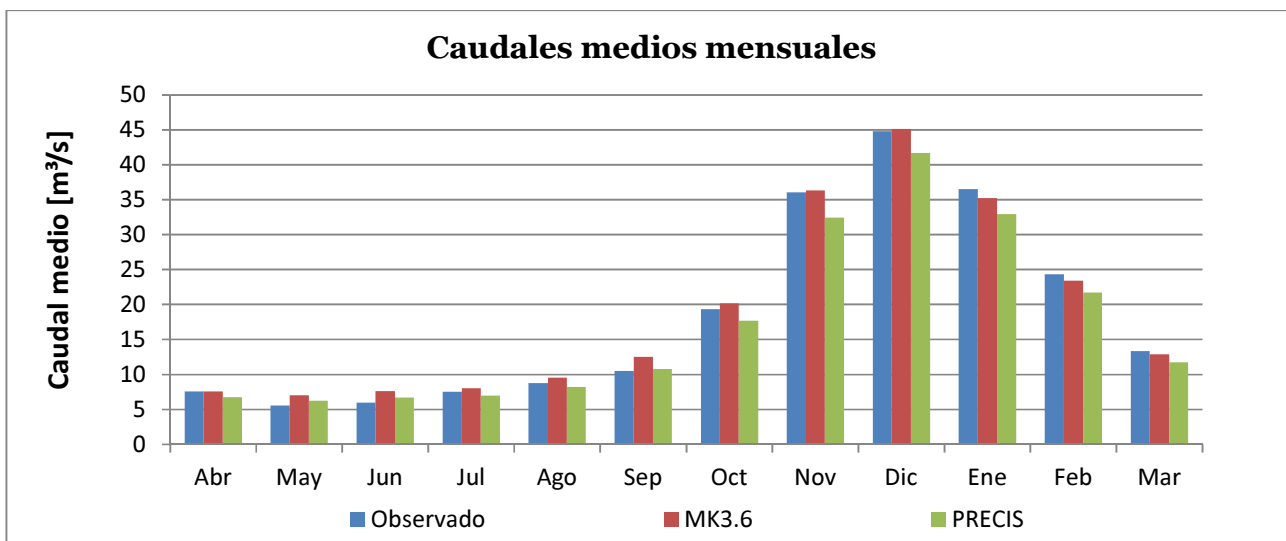
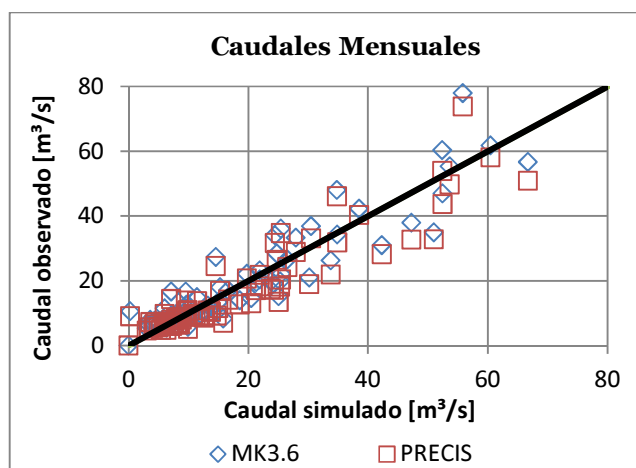
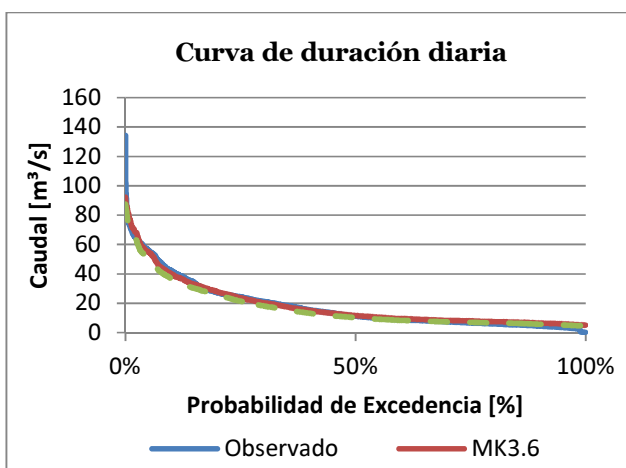
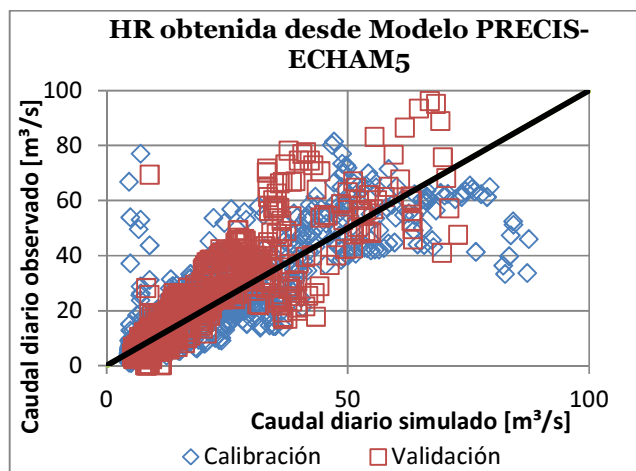
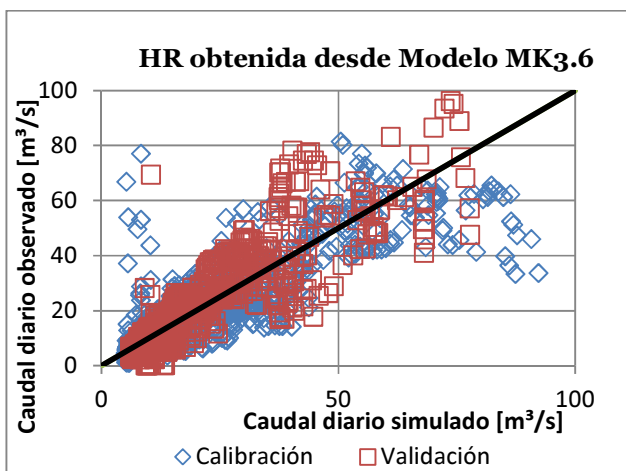


FIGURA 5-3. COMPARACIÓN DE CAUDALES SIMULADOS CON OBSERVADOS (ARRIBA), CURVA DE DURACIÓN DIARIA (CENTRO IZQUIERDA), COMPARACIÓN DE VALORES MENSUALES (CENTRO DERECHA) Y VALORES DE CAUDAL MEDIO (INFERIOR) PARA LA CUENCA DEL RÍO PANGAL.

En la Figura 5-2 es posible encontrar una gran cantidad de información con respecto a la calibración del modelo definido para la cuenca del río Cachapoal. En los dos gráficos de la parte superior de la figura se observa la comparación entre los valores simulados y los valores observados. Si el modelo tuviera una representación perfecta, los valores deberían ubicarse todos sobre la recta identidad graficada por la línea negra. Si bien no se ubican exactamente sobre la línea negra, la modelación entrega valores que se acercan a esta tendencia de manera aceptable. Gráficamente, se observa que para caudales menores la variabilidad con respecto a esta recta es menor, es decir, aquellos valores más pequeños son representados con una mayor certeza, al contrario de lo que sucede con los valores de mayor magnitud, donde la variabilidad observada es mayor.

No se observan mayores diferencias entre los valores predichos por los dos set distintos de datos de humedad relativa utilizados en el proceso de calibración. Dentro del mismo gráfico, es posible observar una nube de puntos que quedan bastante alejados de la recta, lo cual quiere decir que no son bien representados. Si su posición es bajo la recta, esto se interpreta como que son valores subestimados con respecto a lo que se observa en el registro histórico. La existencia de este conjunto no es de extrañar, considerando la baja habilidad del modelo de representar eventos de crecidas pluviales.

Otro gráfico importante a comentar corresponde a la curva de duración desarrollada a escala diaria. Este gráfico tiene la capacidad de mostrar con una mayor claridad si es que el modelo logra representar bien los caudales en su totalidad. En el caso del modelo del río Cachapoal, se observa que existe una alta consecuencia entre los valores simulados y los valores observados al utilizar el conjunto de datos del modelo MK3.6 en el intervalo de probabilidades de excedencia de valor menor al 50%, es decir, a los caudales de mayor valor, lo cual es consecuente a la habilidad del modelo para representar adecuadamente los procesos de deshielos. En el caso del uso de los datos del modelo PRECIS-ECHAM5 es posible observar una subestimación de los valores con respecto a lo que se esperaría. Sin embargo, para el intervalo de probabilidades de excedencia sobre el 50% es posible observar claramente un sesgo en la capacidad del modelo para representar los caudales de menor magnitud al presentar una sobrestimación constante para todo este rango y donde ninguno de los dos conjuntos de datos resulta mejor que el otro.

A nivel mensual, no se observan tendencias de subestimación o sobrestimación de valores, sino que más bien un valor de dispersión constante con respecto a lo que debiese representar el modelo sin una tendencia clara. Donde se puede ver más claramente que la incapacidad de los modelos para estimar correctamente los caudales de alta probabilidad excedencia es en el gráfico de caudales medios mensuales: entre los meses de Julio y Octubre ambos modelos presentan proyecciones mayores de lo que se observa en el registro histórico, para luego en los meses subsiguientes disminuir sus proyecciones en los meses estivales, en particular el modelo PRECIS, como ya se indicaba desde la curva de duración.

Con respecto a los resultados obtenidos para el modelo Pangal, es posible observar en los primeros dos gráficos que presenta una variabilidad mayor que el modelo anterior, al presentar una mayor dispersión. Adicionalmente, una mayor concentración de puntos sobre la recta indica que el modelo presenta tendencia a subestimar los caudales. Esto es particularmente observable en el periodo de validación y se da en ambos conjuntos de datos utilizados para calibrar sin diferencia alguna. Esta tendencia se puede apreciar también en el

gráfico de la curva de duración diaria dentro de la misma Figura 5-3, en la cual si bien se deja ver una adecuada representación de los valores de probabilidad de excedencia no extremas, se observa claramente como para valores de ocurrencia bajos, es decir, altos caudales, no se logran una modelación adecuada. Lo mismo sucede para el caso de los caudales bajos, los cuales al igual que en el modelo del río Cachapoal, son sobrestimados constantemente, no lográndose una adecuada representación de ellos. Al comparar los datos simulados con los registrados a nivel de promedio mensual, es posible observar que no hay una tendencia clara a la subestimación o sobrestimación general, si no que los valores (al igual que en el caso del río Cachapoal) presentan una variabilidad con respecto a la proyección no muy alta pero constante. Es finalmente en el gráfico de caudales medios mensuales donde se puede ver como existe una subestimación constante en particular de los valores obtenidos al utilizar los datos del modelo PRECIS, observándose las mayores diferencias en los meses de verano, donde el modelo MK3.6 presenta un mejor desempeño, logrando en los meses de mayor caudal una adecuada representación con diferencias de magnitud prácticamente despreciables.

En conclusión, es posible observar que el procedimiento de calibración entrega una buena aproximación a pesar de presentar algunas tendencias estacionales de sobrestimación en el caso de los meses invernales y la subestimación en el caso de los meses con deshielo, esperándose un mejor desempeño al utilizar el conjunto de datos de humedad relativa entregados por el modelo MK3.6. Aun considerando lo anterior, es importante notar que las diferencias entre las medias mensuales de los valores simulados y los observados en general presentan una diferencia de valor que varía entre aproximadamente un 5% del valor registrado en la mayoría de los casos y en un 10% en los casos que presentan diferencias más extremas por lo cual es posible calificar el proceso de calibración exitosamente y confirmar la utilización de estos modelos para realizar la evaluación de proyecciones futuras en base a los datos meteorológicos escalados según lo presentado en el capítulo 4.

5.1.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS MODELOS

En el planteamiento de modelos hidrológicos como los utilizados, donde existe un conjunto de múltiples parámetros que se deben calibrar, resulta evidente que no existe una única solución al problema sino que es posible encontrar múltiples conjuntos de parámetros que representan soluciones aceptables. Con la finalidad de demostrar que los modelos calibrados utilizan parámetros que pudiesen ser considerados como una de las mejores soluciones dentro de todas las posibilidades factibles, se realiza un análisis de sensibilidad de los parámetros haciéndolos variar en un porcentaje con el fin de demostrar que un cambio en su valor se traduce o bien en una mejora no significativa en los resultados o en una disminución del desempeño general del modelo.

En este caso se utilizarán variaciones porcentuales de los valores asignados para poder evaluar y demostrar que el conjunto seleccionado es una alternativa válida y óptima al menos de manera local para cumplir con la finalidad de modelación que se busca. Las variaciones conceptuales corresponderán a disminuciones y aumentos de 5%, 10% y 25% y se aplican a todas las variables que fueron obtenidas por medio del proceso de calibración. Para evaluar el desempeño se utiliza el índice Nash-Sutcliffe, tanto en su versión normal como logarítmica. Se presentan en la Tabla 5-5 los desempeños generales de cada uno de los modelos a modo de

antecedente. Estos valores difieren de los presentados en la sección anterior ya que incorporan la totalidad de los caudales involucrados en los procesos de calibración y validación. Los resultados de los indicadores generales reafirman el buen desempeño de los modelos calibrados.

TABLA 5-5. DESEMPEÑO GENERAL DE LOS MODELOS.

Modelo	Cachapoal		Pangal	
	N-S	Ln(N-S)	N-S	Ln(N-S)
MK3.6	0.72	0.82	0.72	0.69
PRECIS	0.68	0.75	0.72	0.71

En el caso del modelo Cachapoal, en la mayoría de las variables estudiadas no se observan variaciones significativas del desempeño general del modelo (variaciones menores a un 1% del valor de los índices). Sin embargo, hay algunos parámetros que sí muestran una mayor influencia sobre el desempeño al incorporar las variaciones mencionadas, los cuales se observan la Figura 5-4.

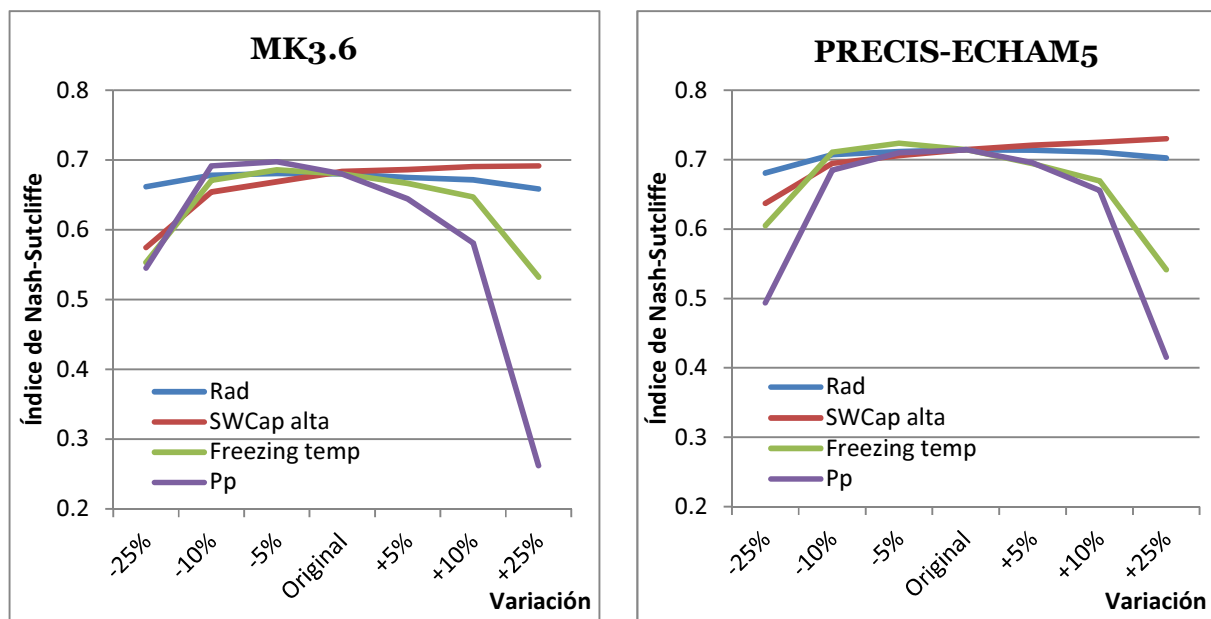


FIGURA 5-4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES DE MAYOR VARIACIÓN DEL MODELO CACHAPOAL.

Estos parámetros son:

- a. Radiación base incidente -Rad
- b. Capacidad del estanque superior de las bandas altas -SWCap alta-
- c. Temperatura de congelamiento - Freezing temp
- d. Factor de precipitación -Pp.

De éstas, la más crítica resulta ser el factor de precipitación el cual para variaciones de un 25% hace disminuir el índice de Nash-Sutcliffe incluso a valores cercanos a 0.25 en el caso de la calibración realizado con los datos del modelo MK3.6. Si bien se observa que en algunos casos el valor final del índice aumenta con algunas pequeñas variaciones, estos aumentos no son significativos y en la práctica no traen variaciones. Además, si bien el valor del índice de Nash-Sutcliffe puede que aumente en algunos casos con cierta variación, al observar lo que pasa con la versión logarítmica ésta presenta una disminución, por lo que se es posible argumentar en contra de dicha variación.

Sin embargo, resulta más interesante analizar en que se traduce que el modelo sea sensible en particular a estas variables. Por ser la variable que genera una mayor alteración, el factor de precipitación es el que llama más la atención: que el modelo sea sensible respecto a esta variable resulta lógico al pensar que modifica el gradiente de precipitaciones calculado según el registro con la finalidad de lograr que los volúmenes calibrados y registrados coincidan. Sus efectos y consecuencias de aplicación se pueden ver tanto en periodos invernales como estivales y afecta directamente la cantidad de nieve que se cae en las bandas superiores y con esto por lo tanto los caudales de deshielo de los meses de verano. Esto a su vez deja entrever lo importante que resulta tener información representativa y correcta de las precipitaciones al interior de la cuenca para poder lograr un proceso de calibración exitoso, además de que esta variable resulta de gran importancia en el modelo y que variaciones de ella generan cambios importantes al interior de la cuenca.

Luego del factor de precipitación, le sigue en magnitud de variación del índice los cambios provocados por alteraciones en el parámetro de la temperatura de congelamiento. En este mismo punto resulta interesante integrar a la discusión la variable de radiación base incidente pues ambas tienen que ver con el mismo fenómeno dentro de la modelación: el punto temporal de inicio de los deshielos y por consecuencia, del inicio de las crecidas de los caudales que se presentan en los periodos estivales. Como es posible observar en la Figura 4-6, las temperaturas medias mensuales tienen una tendencia a aumentar entre los meses de Julio y Diciembre. Observando que este parámetro es utilizado en la Ecuación A-2 (anexo A), en un parámetro asociado a la precipitación efectiva (que considera tanto las precipitaciones como los derretimientos de nieve) donde funciona como condición de borde para calcular si es que existe derretimiento o no, resulta evidente entonces que mientras antes se alcance su valor antes comenzarán a existir mayores o menores caudales productos de deshielo. En la misma línea, el parámetro de radiación base incidente está involucrado también en el balance energético y participa en el proceso de derretimiento de las nieves a través de la Ecuación A-3, aunque en menor relevancia como es posible observar en los cambios del desempeño de la calibración en función de las variaciones aplicadas a esta variable.

Finalmente, se tiene el parámetro de capacidad del estanque superior de las bandas altas. Este parámetro representa la capacidad de almacenar agua del estanque superior, el cual se involucra directamente en múltiples procesos tales como el flujo sub-superficial y la percolación al estanque inferior, como se observa en la Figura 2-3. El hecho de que esta variable genere grandes variaciones en el desempeño del modelo es una muestra de la influencia que posee ésta dentro de las dinámicas que se dan en la simulación de la cuenca: al ser la capacidad del estanque superior y no la inferior la que presenta una mayor relevancia, los flujos provienen principalmente de los estratos superiores y por tanto muestran una mayor dependencia de las precipitaciones efectivas que de los niveles del acuífero inferior. Así

mismo, el hecho de que sea solo la variación en el parámetro de las bandas altas (y no el de bandas bajas) el que genera una variación significativa en el índice de Nash-Sutcliffe da cuenta de que están son las que aportan mayor cantidad de agua a nivel sub-superficial al cauce de río principal.

En el caso del modelo del río Pangal, se obtiene un diagnóstico similar pero con un menor número de parámetros involucrados y con una diferencia menor en los desempeños obtenidos, como se observa en la Figura 5-5.

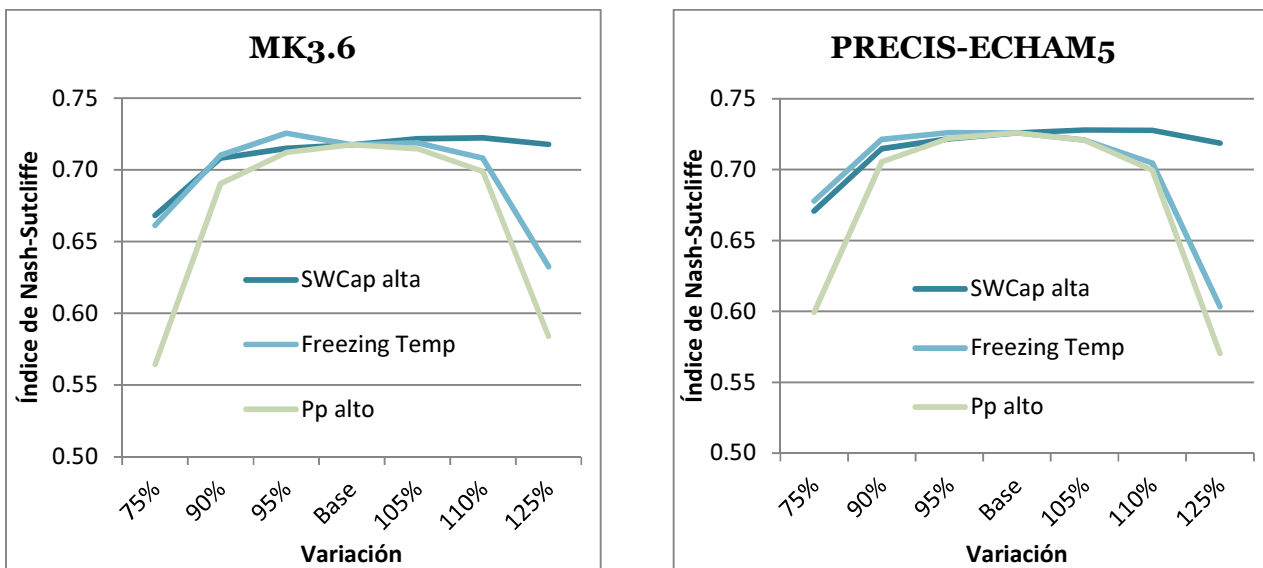


FIGURA 5-5. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LAS VARIABLES DE MAYOR VARIACIÓN DEL MODELO PANGAL.

En el caso de este modelo se observa que, a diferencia del modelo Cachapoal, el factor de radiación base incidente no resulta una de las variables de mayor influencia en el modelo. Por otro lado, para este modelo el factor de precipitación fue separado en diferentes valores para las bandas de elevación y solo el de las dos bandas más altas genera variaciones relevantes, lo cual confirma una vez más el comportamiento de carácter nival de la cuenca. Considerando las variaciones observadas, se acepta que el análisis hecho anteriormente para el río Cachapoal es también válido para el modelo del río Pangal, pero con una menor magnitud, ya que en este caso el valor de los indicadores en poco casos disminuye por bajo el valor de 0.6, teniéndose un valor máximo de variación de 21% con respecto al valor original, valor considerablemente menor que el caso más extremo del modelo Cachapoal donde la disminución llega un 63%. De esto se desprende que este modelo presenta una menor dependencia a estos parámetros que el modelo Cachapoal aunque sin embargo su influencia es evidente y por tanto, se concluye nuevamente que la información meteorológica a utilizarse debe ser adecuada y de buena calidad para obtener resultados de buena calidad.

5.2 MODELOS OPERACIONALES

Según los antecedentes entregados en el punto 2.4 sobre generación eléctrica y como se asigna cuales centrales entran en operación para proveer suministros al sistema de distribución al cual se encuentran conectados es correcto considerar que una central hidroeléctrica de paso como las que se presentan en este estudio se encuentra generando a su máxima capacidad en todo momento debido a que los costos marginales de su operación son siempre los menores y a que no presenta una capacidad de reserva de agua que pudiese complicar su operación como en el caso de las centrales hidroeléctricas de embalse, a no ser que el operador de las centrales determinara lo contrario.

Sin embargo, pese a esta propiedad que las hace relativamente menos complejas de representar, es necesario realizar algunos supuestos y simplificaciones que permitan realizar un análisis apropiado, así como comparaciones válidas entre los resultados. Estos supuestos corresponden a los siguientes:

- a. **Los equipos de generación ubicados en la casa de máquinas presentan eficiencias de generación constantes, que no decrecen en el tiempo.** En la práctica, los equipos tales como turbinas, generadores y transformadores con el uso tienden a disminuir la eficiencia a la que trabajan, generando para un mismo caudal una menor potencia eléctrica. Esta simplificación se hace debido a la falta de antecedentes sobre la disminución de rendimiento de los equipos en un determinado lapso temporal.
- b. **No se realizan actividades de mantención a los equipos de generación.** En general, dentro de la programación anual se determinan fechas en las cuales a los equipos se les realiza mantenimiento en las cuales los equipos no se encuentran disponibles para generar electricidad. Debido a que estas fechas son arbitrarias, dependiendo del momento en que se elija para hacerla podrían tener un mayor o menor impacto sobre la generación total esperada. Además, estas fechas son factibles de modificación también arbitraria, de manera irregular, adaptándose a las condiciones de cada momento y dependen del criterio del tomador de decisiones a cargo de la operación de las centrales por lo que establecerlas en una única fecha invariante para todo el periodo de estudio resulta poco probable. Por otro lado, fijar fechas establecidas en los criterios de utilización actual puede resultar contraproducente para las proyecciones, ya que estos plazos están basados en las condiciones actuales de funcionamiento, los cuales pueden o no presentar cambios, siendo este uno de los puntos en estudio. Esto se traduce en un factor de planta de 100%.
- c. **No se permite una variación intradiaria de los caudales con los cuales se genera electricidad.** Si bien este tipo de centrales no presenta una capacidad de almacenamiento de agua, si tiene un pequeño estanque de regulación que le permite un cierto manejo de los caudales a nivel intradiario con el fin de maximizar las utilidades generadas por producción hidroeléctrica al generar una mayor cantidad de energía en las horas de mayor demanda. A efectos prácticos, esta variación provocaría que la altura bruta de caída varíe generando una mayor o menor generación. Al considerar

este supuesto, se considera que el estanque de regulación se encuentra siempre en su cota máxima y que por lo tanto siempre se tiene la misma altura bruta de caída.

- d. **No se consideran consumos propios de las centrales.** En general, las centrales generadoras de electricidad utilizan parte de su producción para autoabastecimiento. Esta cuota de consumo resulta pequeña frecuentemente con la cantidad total de energía generada por lo que se considera despreciable.
- e. **Aducción de caudales en acueducto Pangal-Coya es instantáneo.** No existe un tiempo de demora debido a que el transporte del caudal se realiza por medio de un acueducto en presión entre las centrales Pangal y Coya.

Es importante reconocer que los modelos que se plantean son una simplificación de los complejos procesos de toma de decisiones a los que se ven enfrentados los operadores a cargo de las centrales. Al ser una simplificación a través de un modelo de funcionamiento que responde a una única variable de entrada – el caudal disponible – el dinamismo en tiempo real que se tiene en el manejo de las centrales no queda bien representado: por ejemplo, en el caso de eventos de crecida pueden llevarse a cabo algunas medidas de protección de los equipos debido a la alta concentración de sedimentos que trae el agua o bien, es posible definir opciones como poder generar una misma cantidad de energía mediante el uso de dos turbinas en conjunto en vez de una sola para no sobre exigir un equipo, o quizás el cambio de generación usando una turbina a otra por el mismo tema del uso. Se reconoce entonces que el problema de la operación de las centrales hidroeléctricas, a pesar de ser un caso relativamente sencillo como es el de las de paso, resulta un problema complejo que se debería modelar como un problema no lineal el cual presenta múltiples alternativas de operación, y para el cual se obtiene una única solución – dentro de un conjunto de múltiples opciones - cuya cercanía al manejo óptimos se determina en función de los supuestos realizados para la determinación del modelo.

La utilización de estos modelos se realizará a escala diaria gracias a que las proyecciones entregadas por los modelos así lo permiten.

5.2.1 MODELO CHACAYES

El modelo operacional de la central hidroeléctrica Chacayes resulta relativamente simple debido a que su única prioridad es generar electricidad para suministro del Sistema Interconectado Central. Esta propiedad se traduce en la práctica en que la central se encuentra en proceso de generación eléctrica permanente trabajando a la máxima capacidad que entregue la máxima energía producible. Para el cálculo de la potencia generada se cuenta con los siguientes antecedentes:

- a. **Caudales ecológicos**
Existen restricciones con respecto a la utilización de los caudales afluentes provenientes de los ríos Cachapoal y Cipreses. Debido a las restricciones de caudal necesarias que tienen como objetivo la preservación del medio ambiente es necesario dejar a libre paso a un caudal de al menos 2 [m³/s] y 1,3 [m³/s] en los ríos Cachapoal y Cipreses respectivamente.

b. Caudales de aducción máxima

Como ya se había especificado en la sección 3.6, esta central considera dos aducciones de capacidad máxima 52,5 [m³/s] y 20 [m³/s] para los ríos Cachapoal y Cipreses respectivamente. En el caso de tener caudales mayores a estas capacidades una vez descontados los valores de caudal ecológico, estos no pueden ser captados y deben ser descargados inmediatamente de vuelta al río.

c. Altura bruta de caída

Se considera una altura bruta de caída $H_b=179$ [m]. Esta diferencia de cotas es medida desde el espejo de agua de cámara de carga hasta la cota donde se ubica la pileta de descarga.

d. Pérdidas de Carga

Para realizar una estimación de las pérdidas de carga que se generan al transportar el caudal afluente a las unidades generadoras, se utiliza la metodología propuesta en estudios realizados previamente [Hatch, 2012] que proponen estimar estas pérdidas mediante una relación empírica en relación al caudal turbinado. Esta relación viene dada por la Ecuación 5-1 y fue obtenida en base a un ensayo realizado específicamente con este fin.

$$\Delta H(Q) = 0.001687 * Q^2$$

ECUACIÓN 5-1

e. Eficiencia general de la planta y de las unidades generadoras

La eficiencia con que son capaces de funcionar las componentes de la planta encargadas de generar electricidad depende del caudal con el que sean utilizados. De los equipos utilizados en el proceso de generación el que presenta una mayor variación es la turbina, que es la componente que interactúa directamente con el caudal. Del mismo estudio nombrado en el punto anterior, es posible obtener las eficiencias de cada una de las componentes involucradas – turbina, generador y transformador -, para un mismo caudal, las que al multiplicarse permiten obtener una eficiencia representativa del equipo de generación en su totalidad.

Dado que la planta presenta dos unidades generadoras es necesario elaborar un plan de manejo que entregue el máximo de energía posible para un determinado caudal. Utilizando la metodología propuesta por el estudio, que desarrolla un plan de manejo que cumple con el objetivo nombrado, se obtiene la curva de eficiencia general de la planta completa en función del caudal turbinable que se muestra en la Figura 5-6.

Considerando los cinco puntos anteriores, es posible aspirar a determinar la producción de energía máxima teórica generable en condiciones óptimas ideales donde los valores usados como parámetros se mantienen constantes (en particular la eficiencia general de la planta) y no se interrumpe en ningún momento el proceso de generación.

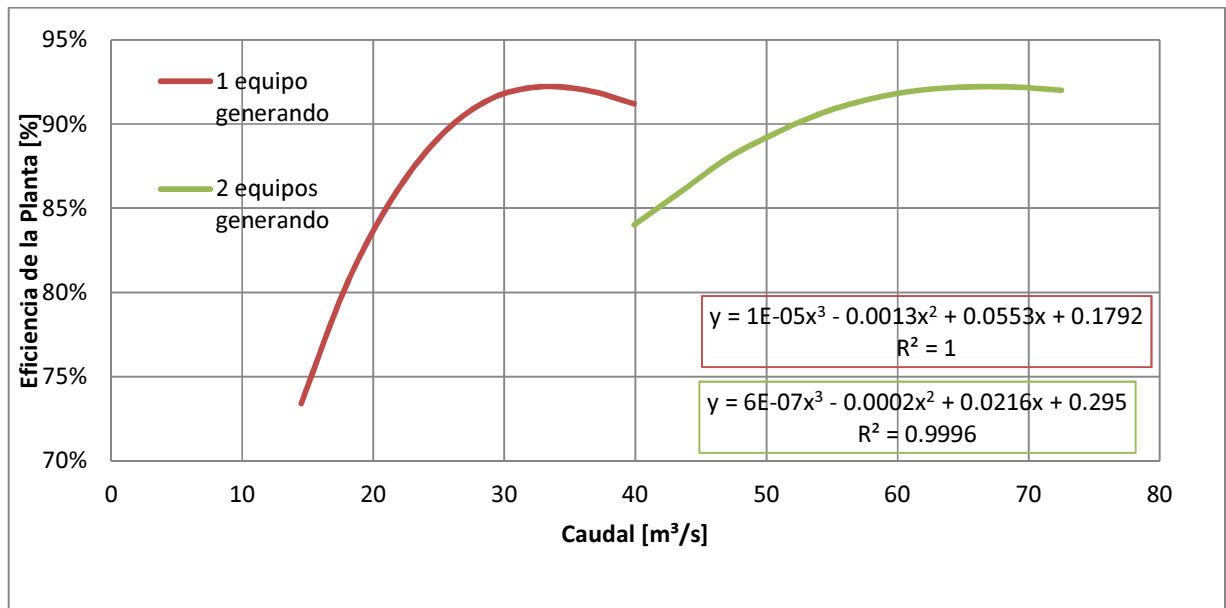


FIGURA 5-6. EFICIENCIA CONJUNTA PARA LA CENTRAL CHACAYES EN EL RANGO DE CAUDALES FACTIBLES.

5.2.2 MODELO CONJUNTO COYA-PANGAL

El modelo operacional de las centrales Coya y Pangal resulta un caso diferente de estudio al caso de la central Chacayes debido a que su operación se rige no solo por las demandas del Sistema Interconectado Central sino que además debe responder a contratos de suministro para la minera CODELCO que se ubica en el sector y cuyos requisitos se cumplen por medio de la generación en estas dos centrales. Adicionalmente, a diferencia de la central Chacayes que opera de forma independiente, estas dos centrales se consideran un conjunto debido a que como se indicó anteriormente existe un acueducto que permite el transporte de caudales desde el río Pangal hasta la central Coya para complementar su caudal de generación y a que ambas generan electricidad para responder a un mismo conjunto de demandas. Este conjunto de demandas queda definido por contratos existentes que condicionan la forma de operación de las centrales, determinando un esquema de prioridades en cascada que debe ser cumplido en un determinado orden. Si bien estas restricciones pudiesen variar en el tiempo (como ya han variado varias veces desde la inauguración de estas centrales por allá a principios de siglo XX), se utilizarán estos ejes como caso de estudio. El esquema de asignación de caudales para generación se rige según las prioridades que se muestran en la Figura 5-7. En esta figura se observa el esquema de prioridad de generación de las centrales en conjunto. Este ordenamiento de las prioridades de generación implica que no es posible generar para la siguiente si es que no se han cumplido los requerimientos de las anteriores.

Como primera prioridad se tiene la demanda de energía de CODELCO que varía entre los 18MW y los 22MW de potencia, dependiendo de las demandas de la minera según sus procesos productivos. Se consideró este valor promedio en base a información levantada en terreno en entrevista con los operadores. Es importante destacar que esta potencia debe generar energía a una frecuencia de 60hz, la cual es diferente de la que se utiliza en el SIC. Los equipos de generación instalados en las casas de máquinas tienen la capacidad de generar la

energía ya sea en una frecuencia de 50hz o 60hz, pero una misma unidad no puede generar al mismo tiempo en ambos valores. Esto se traduce en la práctica en que una unidad que se utilice para generar energía a 60hz no puede generar simultáneamente a 50hz.

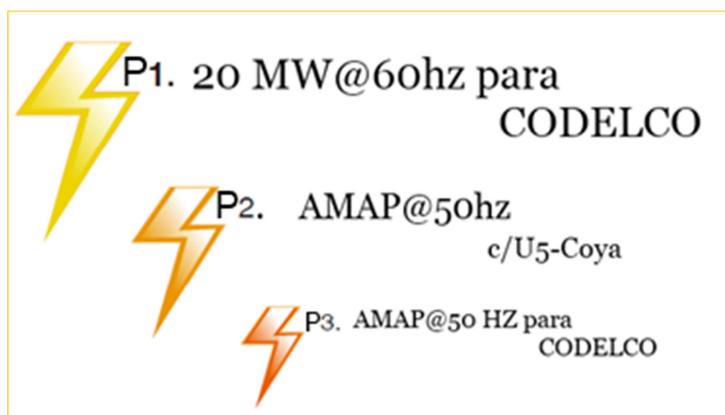


FIGURA 5-7. ESQUEMA DE PRIORIDADES DE GENERACIÓN DEL SISTEMA COYA-PANGAL.¹⁵

La segunda prioridad la tiene la unidad 5 de la Central Coya, para generar al máximo de la capacidad factible. Esto es debido a que esta unidad es la única que presenta conexión al SIC y los retornos económicos generados de este hecho la fijan como segunda prioridad.

La tercera prioridad la ocupa también una demanda de la minera CODELCO, esta vez en una frecuencia de 50hz y donde se pide toda la potencia posible que pudiese generarse luego de satisfacer las dos prioridades anteriores.

En conjunto las centrales presentan actualmente ocho unidades generadoras, cinco de las cuales se encuentran en funcionamiento en la central Pangal (numeradas desde la unidad 1 a la 5) y tres en la central Coya (unidades 2, 3 y 5). Las unidades 1 y 4 de la central Coya no se encuentran actualmente en funcionamiento: la unidad 1 dejó de funcionar hace ya un tiempo y la unidad 4 fue dada de baja debido a un desperfecto técnico que sufrió y cuyo costo de reparación supera los retornos esperados de ponerla en funcionamiento otra vez por lo cual se decidió dejarla fuera del sistema. Sin embargo, para efectos de este modelo, se utiliza la unidad 4 de todas formas debido a que si no está presente los caudales de operación requeridos son muy bajos y por tanto no es posible realizar una evaluación del impacto de la variación de los recursos hídricos debido al cambio climático, lo que es el objetivo de este trabajo. La unidad 1 de la central Coya no es incorporada al modelo debido a que nunca formó parte del sistema de prioridades nombrados, a diferencia de la unidad 4 y a que además no existen antecedentes sobre su rendimiento de generación. Todas las unidades de las centrales son capaces de generar tanto en frecuencias de 50hz como de 60hz con la excepción de la unidad 5 de Coya que solo es capaz de generar energía en una frecuencia de 50hz.

Las propiedades de caudal de diseño de cada una de las unidades, así como su potencial máximo de generación se pueden ver en la Tabla 5-6.

¹⁵ AMAP se entiende por sus siglas en inglés “As Much As Possible”, es decir, lo máximo que se pueda generar

TABLA 5-6. PROPIEDADES DE LAS UNIDADES EN FUNCIONAMIENTO DE LAS CENTRALES COYA Y PANGAL.

Central	Potencia	Caudal	Central	Potencia	Caudal
Pangal	[MW]	[m ³ /s]	Coya	[MW]	[m ³ /s]
Unidad 1	8	2.2	Unidad 2	10.2	10.2
Unidad 2	8	2.2	Unidad 3	8	8
Unidad 3	8	2.2	Unidad 5	12	12
Unidad 4	8	2.2			
Unidad 5	5	1.4			

Para cada una de las unidades de ambas centrales se cuenta con información del rendimiento de potencia generada en función del caudal asignado a cada una de ellas. Esto permite que el modelo operacional pueda plantearse como una serie secuencial de planteamientos de problemas no lineales multivariado (debido a la naturaleza que presentan estas relaciones y la cantidad de variables involucradas) donde la resolución de cada uno de ellos represente asignaciones de caudales a las unidades de generación con la finalidad de cumplir con las prioridades demandadas en el orden correcto. Esto permite que la generación en cada unidad se pueda representar de la forma

$$MW_{unidad} = f_{unidad}(Q)$$

y por lo tanto pueda plantearse un problema de optimización donde se integren las prioridades expuestas anteriormente como restricciones del problema. Este problema es de naturaleza no lineal debido a que las relaciones entre caudal y potencia son del tipo polinomial de grado 2 y multivariado debido a que cada caudal asignado a una unidad es una variable. Adicionalmente se tiene una variable de decisión binaria para cada una de las variables de asignación de caudal, que representen si la unidad está generando energía a una frecuencia de 50hz, 60hz o no está generando. Se presenta a continuación el problema planteado en su forma algebraica:

$$F. O. = \max \sum_{i=2}^4 \delta_{50C_i} * f(Q_{C_i}) + \sum_{i=1}^5 \delta_{50P_i} * f(Q_{P_i}) + \alpha * \delta_{50C_5} * f(Q_{C_5})$$

$$s. a. \sum_{i=2}^5 \delta_{50C_i} * f_{C_i}(Q_{C_i}) + \sum_{i=1}^5 \delta_{60P_i} * f_{P_i}(Q_{P_i}) = 20$$

Restricción asociada a la primera prioridad

$$\delta_{50C_5} \geq \delta_{50X} \quad \forall X \in [C_i, P_j] \text{ con } i = \{2,3,4,5\}, j = \{1,2,3,4,5\}$$

Restricción asociada a la segunda prioridad

$$\sum_i Q_{Xi} \leq Q_{X_{dia}}$$

Suma de caudales de asignados a una central no puede superar el caudal disponible para su generación.

$$Q_{X_i} \leq Q_{X_i,MAX}$$

El caudal asignado a una unidad X_i debe respetar su capacidad máxima.

$$\delta_{50X_i} + \delta_{60X_i} \leq 1$$

Una unidad X_i solo puede funcionar generando en una frecuencia o en ninguna.

$$Q_{X_i} \geq 0$$

Los caudales en cualquier unidad X_i debe ser mayor o igual a 0.

Variables del problema:

Q_{YCi} = caudal asignado en la central Coya a la unidad i para generar en frecuencia Y

Q_{Ypj} = caudal asignado en la central Pangal a la unidad i para generar en frecuencia Y

δ_{YXi} = variable binaria. 1 si la unidad i de la central X genera a Y hz

$$Y = \{50; 60\} \quad ; \quad i = \{2,3,4,5\} \quad ; \quad j = \{1,2,3,4,5\}$$

α es un factor de peso para darle prioridad a la generación en la unidad Coya-5 debido a la restricción impuesta.

La resolución de este problema no lineal presenta una alta complejidad y escapa de los alcances de esta memoria. Sin embargo, gracias a información levantada en terreno (obtenida desde el principal tomador de decisiones en una visita a las instalaciones) sobre las prácticas habituales con las que operan es posible realizar algunas aproximaciones y asignaciones arbitrarias que permitan llegar a una de las múltiples soluciones posibles, la cual se espera se encuentre dentro del conjunto de soluciones óptimas del problema general o por lo menos dentro del conjunto de soluciones relativamente cercanas al conjunto de soluciones más eficientes factibles. Además, para enfrentar el problema de una manera más abordable, se propone afrontar el problema no de una manera integral simultáneamente si no que fragmentarlo en varias partes que presenten una menor dificultad a la hora de su resolución utilizando como base para esto la priorización entregada por las demandas comprometidas.

Una representación gráfica de esta propuesta se observa en el diagrama de flujos que se presenta en la Figura 5-8. En este diagrama se reconocen diferentes conectores y tipos de nodos. Sobre los conectores se tienen aquellos que representan procesos que se dan secuencialmente y por otro lado aquellos que son nexos de respuesta de alguna de las preguntas, cuya asignación dependerá de los caudales disponibles en cada una de las plantas luego de cada asignación.

Con respecto a los nodos, por un lado se tienen aquellos en forma de rombo que representan preguntas: dependiendo de las respuestas de estas se van tomando las decisiones de asignación de caudales a seguir; por otro lado se tienen los nodos rectangulares que son puntos de asignación, donde se les asigna caudales a cada unidad, a través de la solución de

un problema de programación no lineal, y que depende del caudal disponible en cada una de las centrales y de las unidades que se encuentren disponibles; finalmente, los nodos ovalados representan procesos que suceden independientemente de lo que suceda con la asignación de variables del problema. Se reconoce que la resolución de los nodos rectangulares donde se plantean los PNL¹⁶ en conjunto en toda la malla presenta un conjunto de soluciones con múltiples elementos no triviales y que su resolución tiene asociada una dificultad que escapa de los alcances de esta memoria.

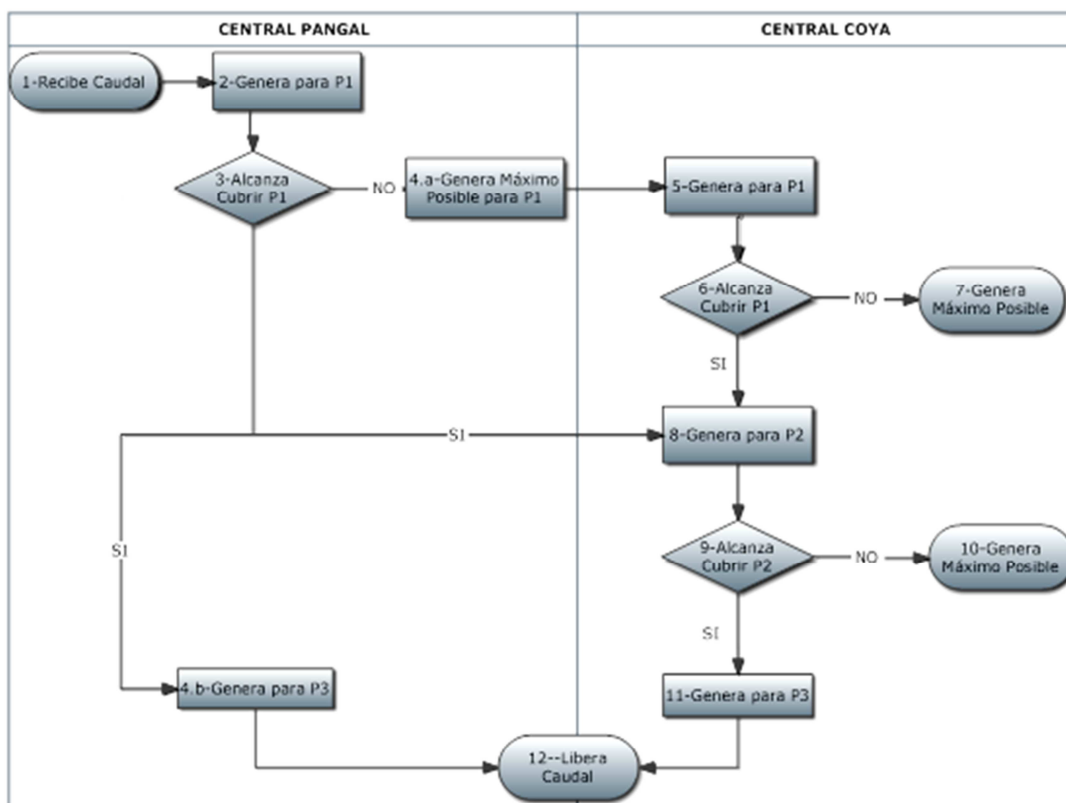


FIGURA 5-8. DIAGRAMA DE FLUJO DEL MODELO OPERACIONAL COYA-PANGAL.

Se procede a explicar cada uno de los nodos del diagrama de flujo para presentar los sub-problemas planteados que permiten dar la solución del problema general, así como las variables involucradas. Es en este punto donde se incorpora la información levantada en terreno a través de la utilización arbitraria de variables en cada uno de los nodos lo que simplifica la resolución de los problemas.

Nodo 1 – Pangal y Coya/Recibe Caudal

Si bien está ubicado en el sector del actor Central Pangal, hace referencia a obtener los valores de caudales disponibles tanto para el río Pangal como el caudal afluente a la central Coya desde el río Cachapoal (que técnicamente lo recibe directamente desde las descargas del acueducto y de la central Chacayes).

¹⁶ PNL: problema no lineal

Nodo 2 – Pangal/Genera para P1

La central Pangal genera electricidad para cumplir la primera prioridad de 20MW@60hz. Para esto utilizan las unidades 1,2 y 3 de esta central y se busca la solución del problema no lineal que tiene como función utilizar la menor cantidad de caudal con la restricción de cumplir con la potencia solicitada.

Nodo 3 – Pangal/¿Alcanza para cubrir P1?

Si la central Pangal encuentra una solución factible al problema planteado en el Nodo 2, continúa por el nexo correspondiente sin ningún cambio a las otras variables. Por otro lado, si no se cumplieran las restricciones del Nodo 2 y por lo tanto las demandas de la prioridad 1, se continua por el nexo de respuesta negativa y se le asigna a todas las otras unidades aún no utilizadas de la central Pangal un caudal nulo, en ambas frecuencias de generación.

Nodo4.a- Pangal/ Genera máximo posible P1

A pesar de no contar con los recursos para cumplir con la prioridad 1 en su totalidad, se utiliza todo el recurso hídrico disponible para intentar cumplir con este fin, distribuyéndolo de manera tal que se maximice la potencia generada entre las variables involucradas (se utilizan solo las unidades 1, 2 y 3 de Pangal según levantamiento de información en terreno).

Nodo4.b – Pangal/ Genera para P3

En este nodo con los caudales aún disponibles para la central Pangal, se resuelve el problema de asignación para las unidades 4 y 5 (únicas unidades disponibles si es que se llega a este nodo del diagrama de flujos por el planteamiento que se hace de la asignación en el nodo anterior) de tal manera que se obtenga la mayor generación eléctrica posible en una frecuencia de 50hz, según lo estipulado en la prioridad 3.

Nodo5 – Coya/Genera para P1

La central Coya genera tanto como es posible y/o necesario para cumplir con los requisitos faltantes de las restricciones impuestas por la prioridad 1. Se utilizan en este nodo en una primera instancia la unidad Coya 2 y luego de ser necesario la unidad Coya 3. No se involucran las otras unidades.

Nodo6 – Coya/¿Alcanza para cubrir P1?

Si la central Coya encuentra una solución factible al problema planteado en el Nodo 5, continúa por el nexo correspondiente sin ningún cambio a las otras variables más que las asignaciones hechas en el nodo anterior. Por otro lado, si no se cumplieran las restricciones del Nodo 2 y por lo tanto las demandas de la prioridad 1, se continua por el nexo de respuesta negativa y se le asigna a todas las otras unidades aún no utilizadas de la central Coya un caudal nulo, en ambas frecuencias de generación.

Nodo 7 – Coya/ Genera máximo posible.

A pesar de no contar con los recursos para cumplir con la prioridad 1 en su totalidad, se utiliza todo el recurso hídrico disponible para intentar cumplir con este fin distribuyéndolo de manera tal que se maximice la potencia generada entre las variables involucradas (unidades 2 y 3 de central Coya).

Nodo 8 – Coya/ Genera para P2

En este nodo, la central Coya asigna caudal exclusivamente a la unidad 5, buscando que ésta funcione al máximo de su capacidad según lo estipulado en la prioridad 2.

Nodo 9 – Coya/¿Alcanza para cubrir P2?

Si la central Coya logra alcanzar los objetivos de la prioridad 2 en el nodo 8, continúa por el nexo correspondiente sin ningún cambio a las otras variables. Por otro lado, si no se cumplieran las restricciones del Nodo 8 y por lo tanto las demandas de la prioridad 2, se continúa por el nexo de respuesta negativa y se le asigna a todas las otras unidades aún no utilizadas de la central Coya un caudal nulo, en ambas frecuencias de generación.

Nodo 10 – Coya/ Genera máximo posible.

A pesar de no contar con los recursos para cumplir con la prioridad 2 en su totalidad, se utiliza todo el recurso hídrico disponible para intentar cumplir con este fin distribuyéndolo de manera tal que se maximice la potencia generada entre las variables involucradas (unidad 5 de central Coya).

Nodo 11 – Coya / Genera para P3

En este nodo con los caudales aún disponibles para la central Coya, se resuelve el problema de asignación para las unidades 2,3 y/o 4 (dependiendo de las asignaciones previas variará cuales se encuentran disponible) de tal manera que se obtenga la mayor generación eléctrica posible en una frecuencia de 50hz, según lo estipulado en la prioridad 3.

Nodo 12 – Coya y Pangal / Libera caudal

Luego de utilizar el caudal para la generación de electricidad o si bien se tuvieran excedentes de caudal, estos se devuelven al cauce del río.

Es así como por medio de esta asignación secuencial es posible obtener una solución al problema original través de integrar un análisis del cumplimiento de las prioridades en el orden en que son asignadas con algunas aproximaciones que toman como base antecedentes de la operación actual. Al aplicar esta metodología para cada uno de los días se obtendrá así la matriz de generación energética para los periodos en análisis. Si bien este modelo representa la solución de una operación que potencialmente pudiese variar en una fecha comprendida entre la línea base y el periodo futuro de estudio debido a alteraciones en las condiciones que lo definen (negociación o cumplimiento de los contratos, nuevas demandas, etc.), se utilizará de todos modos en estos dos últimos periodos nombrados para evaluar el impacto del cambio climático en la generación al comparar la línea base con el periodo proyectado futuro.

6. RESULTADOS DE PROYECCIONES

En este capítulo, una vez desarrollados los modelos del capítulo 5, se analizan los resultados de todas las proyecciones para las cuencas en base a los pronósticos climáticos escalados a la cuenca desde los modelos de circulación global. Con éstas, se corren los modelos hidrológicos para realizar proyecciones de caudales. Esta información es utilizada posteriormente en los modelos operacionales, lo que permite realizar proyecciones de generación hidroeléctrica.

Estas proyecciones son contrastadas con los datos generados a través de un proceso análogo del periodo de reanálisis de línea base que se define como el intervalo comprendido entre los años hidrológicos 1971 a 2009. Los valores de línea base difieren según el modelo que se utilice puesto que si bien se usó un periodo común de escalamiento, el proceso de reanálisis considera años no incluidos en el registro.

6.1 PROYECCIONES METEOROLÓGICAS Y SUS IMPLICANCIAS

Si bien en capítulos anteriores se establecieron los valores de temperatura y precipitación proyectados para las estaciones base, para que estos valores puedan ser analizados deben ser trasladados al área de estudio, siendo en este caso las cuencas el punto donde se deberían focalizar los esfuerzos. Para calcular el valor representativo de las variables meteorológicas para cada una de las cuencas es necesario ponderar los valores estimados para cada una de las bandas según una distribución que represente adecuadamente la parte que representan de ésta. Es por esta razón, que si bien se utiliza el mismo gradiente en las tres cuencas en estudio, los valores representativos pueden ser diferentes al tener una dependencia del relieve particular de cada una de ellas.

Para el desarrollo de las proyecciones de caudales se utilizan las proyecciones de los escenarios RCP6.0 del modelo MK3.6 y el escenario A1B del PRECIS-ECHAM5 como se ha nombrado a lo largo del estudio. Cada uno de estos modelos aporta con una determinada cantidad de series de precipitación y temperatura, según la distribución de la Tabla 6-1.

TABLA 6-1. ESPECIFICACIONES DE SERIES DE ENTRADA PARA LAS PROYECCIONES.

Modelo/Escenario	Series entregadas
MK3.6/RCP6.0	10 series de variables meteorológicas escalada
PRECIS-ECHAM5/ SRES A1B	1 serie de variables meteorológicas escalada 250 series sintéticas generadas.

El uso de múltiples series para generar un conjunto de proyecciones diferentes de caudal permitirá la generación de rangos de incertidumbre inherentes al modelo que se utiliza como fuente de información de entrada de los modelos. Estos rangos de incertidumbre no solo se tendrán en las proyecciones de caudal sino también en las proyecciones de potencial generación eléctrica.

Esta incertidumbre será evaluada utilizando como valor referencial el promedio de los resultados de cada variable en estudio y como margen el valor de la desviación estándar, al asumir una distribución normal de los resultados. Según la definición de la distribución normal, se tienen los rangos de seguridad asociados a lo que se muestra en la Tabla 6-2. Rangos de seguridad según margen comprendido. Tabla 6-2.

TABLA 6-2. RANGOS DE SEGURIDAD SEGÚN MARGEN COMPRENDIDO.

Intervalo	Valores comprendidos
$\mu \pm \sigma$	Se encuentran incluidos el 70% de los valores de la muestra
$\mu \pm 2^* \sigma$	Se encuentran incluidos el 95% de los valores de la muestra

El hecho de considerar esta variación de los valores según las distintas series de proyecciones de forzantes meteorológicas permite establecer una seguridad estadística de los valores. Para representar esto, en los gráficos que se presentan en las secciones 6.2 y 6.3 se incorporaran los límites de confianza por medio de dos bandas de seguridad con densidades de color distintas.

Esta información permite discernir de manera diferenciada que tan certera es una proyección. Se define como una alteración significativa cuando se observa que los márgenes de error de un valor de proyectado no incorpora el valor original de referencia..

Un detalle de la hipsometría de las cuencas se puede ver en la Tabla 5-2, mientras que los cambios en las temperaturas se muestran en la Tabla 6-3. Las precipitaciones se encuentran específicas para cada cuenca se muestran en las Tabla 6-4, Tabla 6-5 y Tabla 6-6 incluyendo el margen de variabilidad con un rango de seguridad estadístico de aproximadamente el 70%, según lo que se muestra en la Tabla 6-2.

TABLA 6-3. TEMPERATURAS MEDIAS EN GRADOS CELSIUS PONDERADAS EN LAS CUENCAS.

Periodo Modelo	1970-2009 MK3.6			2040-2070 RCP6.0-MK3.6			1970-2009 PRECIS			2040-2070 A1B-PRECIS		
	Pa	Cac	Cip	Pa	Cac	Cip	Pa	Cac	Cip	Pa	Cac	Cip
Enero	11.9	11.8	12.6	13.0	12.9	13.8	12.0	11.9	12.7	14.6	14.4	15.4
Febrero	12.7	12.5	13.4	14.2	14.0	14.9	12.5	12.3	13.2	15.5	15.3	16.2
Marzo	10.2	10.1	10.9	12.0	11.9	12.7	9.6	9.5	10.3	12.6	12.5	13.4
Abril	7.3	7.3	7.9	9.1	9.0	9.7	6.8	6.8	7.4	9.0	8.9	9.6
Mayo	5.9	5.9	6.4	7.8	7.7	8.3	5.6	5.6	6.1	8.0	7.9	8.5
Junio	1.9	2.0	2.4	3.8	3.9	4.3	2.0	2.1	2.5	5.7	5.7	6.2
Julio	0.3	0.5	0.8	2.1	2.2	2.6	0.2	0.4	0.8	5.3	5.3	5.9
Agosto	1.2	1.4	1.8	2.8	2.9	3.3	1.8	2.0	2.4	7.4	7.4	8.1
Septiembre	2.7	2.8	3.3	4.7	4.8	5.4	3.2	3.3	3.8	7.9	7.8	8.5
Octubre	3.4	3.6	4.2	5.2	5.3	5.9	3.9	4.1	4.7	7.1	7.1	7.9
Noviembre	5.2	5.3	6.0	6.7	6.8	7.6	5.7	5.8	6.6	8.2	8.3	9.1
Diciembre	9.2	9.2	10.0	10.8	10.7	11.6	9.4	9.4	10.2	11.6	11.5	12.4
Promedio	6.0	6.0	6.7	7.7	7.7	8.4	6.1	6.1	6.7	9.4	9.3	10.1

NOTA: PA – PANGAL; CAC – CACHAPOAL; CIP - CIPRESES

TABLA 6-4. PRECIPITACIONES MEDIAS EN MM PONDERADAS A LA CUENCA DEL RÍO PANGAL.

Pangal	1970-2009 MK	2040-2070 RCP6.0-MK3.6			1970-2009 PRECIS	2040-2070 A1B-PRECIS	Series Sintéticas		
			±					±	
Enero	45.3	19.0	±	10.8	47.4	22.8	27.0	±	8.7
Febrero	0.6	0.6	±	0.9	1.9	0.3	0.5	±	0.4
Marzo	34.3	28.2	±	6.0	26.5	34.0	35.0	±	6.3
Abril	87.9	90.7	±	15.1	96.4	73.1	77.9	±	10.1
Mayo	340.6	297.9	±	31.2	360.0	270.1	280.3	±	19.3
Junio	419.7	324.1	±	34.7	324.9	248.2	239.3	±	18.7
Julio	254.2	218.1	±	23.4	243.3	212.3	210.2	±	15.1
Agosto	319.8	269.2	±	26.0	297.9	202.1	200.6	±	14.9
Septiembre	329.9	220.0	±	33.2	309.4	241.3	252.7	±	18.6
Octubre	52.1	38.9	±	6.1	42.7	28.0	25.6	±	2.8
Noviembre	112.2	58.0	±	12.7	80.4	50.9	53.3	±	8.6
Diciembre	12.5	7.4	±	2.6	28.9	20.7	19.7	±	5.2
Total	2009.1	1572.0	±	202.6	1859.6	1403.9	1421.9	±	128.7

TABLA 6-5. PRECIPITACIONES MEDIAS PONDERADAS EN MM SOBRE LA CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL.

Cachapoal	1970-2009 MK	2040-2070 RCP6.0-MK3.6			1970-2009 PRECIS	2040-2070 A1B-PRECIS	Series Sintéticas		
			±					±	
Enero	54.9	23.0	±	13.1	57.3	27.6	32.7	±	10.5
Febrero	0.8	0.8	±	1.1	2.5	0.5	0.6	±	0.5
Marzo	42.1	34.7	±	7.4	32.5	41.7	43.0	±	7.7
Abril	108.9	113.0	±	18.9	119.4	90.5	96.6	±	12.7
Mayo	420.5	367.7	±	39.0	444.5	331.9	344.7	±	24.0
Junio	519.3	400.7	±	43.1	400.9	306.1	295.1	±	23.4
Julio	317.6	272.3	±	29.3	302.1	263.4	260.7	±	18.9
Agosto	392.7	330.9	±	32.2	365.8	247.5	245.4	±	18.3
Septiembre	403.2	268.4	±	40.7	377.8	294.5	308.2	±	22.8
Octubre	65.1	48.6	±	7.7	53.2	34.6	31.6	±	3.5
Noviembre	139.0	70.9	±	15.6	97.8	61.9	64.9	±	10.5
Diciembre	15.3	9.0	±	3.1	35.0	25.1	23.9	±	6.4
Total	2479.2	1940.0	±	251.2	2288.8	1725.4	1747.2	±	159.2

TABLA 6-6. PRECIPITACIONES MEDIAS PONDERADAS EN MM SOBRE LA CUENCA DEL RÍO CIPRESES.

Cipreses	1970-2009 MK	2040-2070 RCP6.0-MK3.6			1970-2009 PRECIS	2040-2070 A1B-PRECIS	Series Sintéticas		
			±					±	
Enero	54.0	22.6	±	12.9	56.4	27.1	32.1	±	10.3
Febrero	0.8	0.8	±	1.2	2.6	0.5	0.7	±	0.5
Marzo	42.0	34.7	±	7.4	32.4	41.5	42.9	±	7.8
Abril	109.7	114.3	±	19.2	120.1	91.0	97.1	±	13.0
Mayo	421.7	368.7	±	39.6	445.8	331.5	344.5	±	24.1
Junio	521.7	402.2	±	43.5	401.7	306.7	295.6	±	23.8
Julio	322.0	275.9	±	29.8	304.6	265.4	262.6	±	19.2
Agosto	391.8	330.6	±	32.4	365.1	246.3	244.0	±	18.3
Septiembre	400.4	266.2	±	40.4	375.0	292.0	305.5	±	22.7
Octubre	66.0	49.3	±	7.9	53.7	34.7	31.7	±	3.6
Noviembre	139.9	70.5	±	15.6	96.8	61.2	64.2	±	10.4
Diciembre	15.1	8.9	±	3.1	34.5	24.8	23.6	±	6.3
Total	2485.0	1944.6	±	253.0	2288.6	1722.8	1744.4	±	160.0

En las Tabla 6-4, Tabla 6-5 y Tabla 6-6 se observa que las precipitaciones promedio en el mes de Enero superan los 45 [mm] en cada una de las cuencas lo cual es un valor anómalo con respecto al registro observado en la estación. Estos valores que se tienen representan un error sistemático producto de la utilización de un gradiente de precipitaciones para estimar la cantidad de agua que cae sobre las cuencas, en particular para el mes de Enero donde se obtienen estos valores fuera de rango. Al respecto de esto se pueden hacer dos comentarios:

- a. Dada la naturaleza sistemática de este error y que se incorpora desde el proceso de calibración, es posible considerar que su efecto no representa una alteración mayor.
- b. Los valores medios de precipitación sobre las cuencas presentan valores concordantes con los que se observan en el Balance Hídrico Nacional, desarrollado por la Dirección General de Aguas, lo que permite validar estas estimaciones.

En el caso de las temperaturas se puede ver en los datos presentados en la Tabla 6-3 que las cuencas de los ríos Pangal y Cachapoal presentan temperaturas medias similares, mientras que las del río Cipreses son un poco más altas, consecuencia de presentar una mayor área en las bandas de elevación más bajas. Las variaciones de ambos modelos son uniformes para todas las cuencas, proyectando un aumento de la temperatura media anual en 1.7°C en el caso del escenario RCP6.0 y en 3.3°C en el caso del escenario A1B. No se presentan los rangos de variabilidad de esta variable debido a que no presentan variaciones significativas.

En el caso de las precipitaciones se observa una disminución significativa (es decir, incluyendo en la variabilidad calculada que asegura un rango de al menos el 70% de los valores) en todos los meses del año salvo en el mes de Abril en el escenario RCP6.0 donde no se tiene una tendencia concluyente y en el mes de Marzo en el escenario A1B donde se espera un aumento de las precipitaciones. En la temporada de lluvias donde se concentra la mayor

cantidad de precipitación (Abril a Septiembre, donde cae cerca del 90% del total anual) se proyectan disminuciones alrededor del 20%.

A nivel anual, las disminuciones son significativas también: en el caso del escenario RCP6.0 disminuye el monto total anual promedio en alrededor de 340 [mm], siendo las más afectadas las cuencas del río Cachapoal y Cipreses, mientras que en el caso del escenario A1B la reducción es del promedio anual varía entre los 350 y los 360 [mm] siendo este valor uniforme en todas las cuencas.

Estos cambios en las temperaturas y precipitaciones sobre las cuencas tendrán implicancias sobre los procesos del ciclo hidrológico que tiene el agua en ellas: por un lado, el aumento de temperaturas proyectado tiene consecuencias en el proceso de congelamiento de la nieve, reduciendo el área que recibirá precipitaciones en forma sólida y favoreciendo el escurrimiento inmediato por sobre el almacenamiento, así como también los procesos evaporativos.

Adicionalmente, es posible hacer un análisis de la cobertura de nieve en cada una de las cuencas, resultado que se obtiene directamente desde el programa. Se analiza la altura de nieve ponderada según bandas para el promedio de todos los años comprendidos en los periodos respectivos de línea base y del periodo de proyección(Figura 6-1) .

Se observan comportamientos diferentes según el modelo: en el caso del escenario RCP6.0 se observa una disminución de las alturas medias y un pequeño adelantamiento en el centro de gravedad de la figura, lo que representa derretimientos más tempranos. El factor principal de la diferencia en este caso parece ser la disminución de precipitaciones en la cuenca más que el aumento de temperaturas, ya que si bien se adelantan un poco los derretimientos, su perfil se mantiene similar y resulta de mayor impacto la disminución de precipitaciones lo que se traduce en una menor altura de nieves.

Al contrario, las proyecciones del escenario A1B presentan una deformación considerable en el perfil de alturas de nieves en los ríos Cachapoal y Cipreses donde se pierde la forma de acumulación-derretimiento y se cambia por un perfil que presenta pendientes no tan pronunciadas, donde el nivel de nieves se mantiene relativamente constante. En el caso del río Pangal la deformación con respecto a la forma original no es tanta pero sí existe un adelanto considerable en el centro de gravedad del perfil. En todos los casos la altura de nieve máxima disminuye en **al menos** un 50% con respecto al periodo de línea base.

El centro de gravedad de cada uno de los perfiles de la Figura 6-1 se presenta en la Tabla 6-7. El cambio más drástico se observa en la cuenca Cipreses bajo el escenario A1B del modelo PRECIS, adelantando su centro de gravedad en 36 días, además de ser la cuenca que reduce la cantidad media de nieve más drásticamente bajo las proyecciones del mismo modelo. Los valores de las alturas de nieve medias e históricas se encuentran en el capítulo VII del Anexo Digital, bajo el periodo y cuenca correspondiente.

TABLA 6-7. CENTRO DE GRAVEDAD DE LOS PERFILES DE ELEVACIÓN DE NIEVE. VALOR EN DÍA JULIANO

Cuenca	Pangal		Cachapoal		Cipreses	
	RCP6.0	A1B	RCP6.0	A1B	RCP6.0	A1B
Línea Base	173	171	178	174	176	172
2040-2070	149	150	162	155	160	136

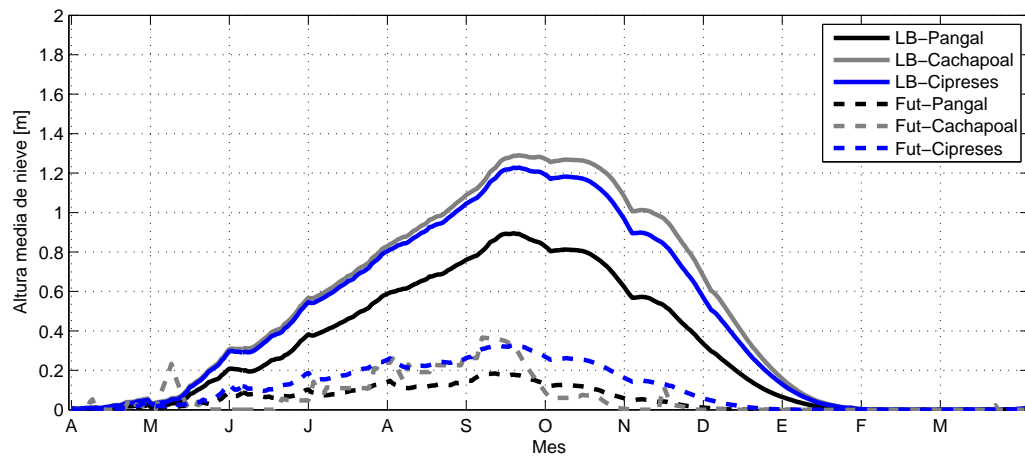
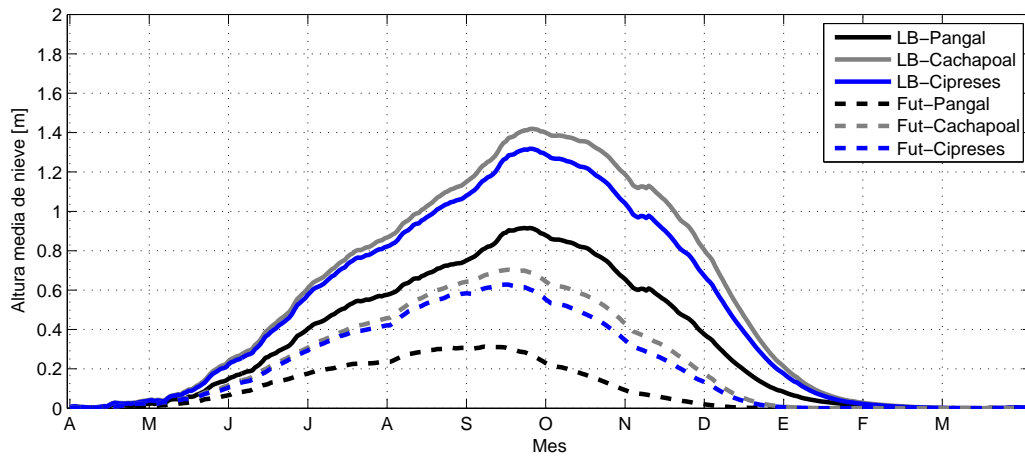


FIGURA 6-1. ALTURA DE NIEVES PROMEDIO PARA EL MODELO MK3.6 (ARRIBA) Y PARA EL MODELO PRECIS (ABAJO).

Otros parámetros que funcionan como buenos indicadores de los cambios que sufre la cubierta nival de las diferentes cuencas son el almacenamiento máximo anual equivalente en agua en cada cuenca y el día en que éste ocurre.

Con respecto al almacenamiento nival se observa una tendencia conjunta de las tres cuencas a disminuir el almacenamiento máximo en un año promedio (Tabla 6-8), así como también la

variabilidad entre ellos. Las disminuciones varían aproximadamente entre un 50% y un 70% del valor original en el modelo MK3.6 y en el modelo PRECIS respectivamente, alcanzando la máxima reducción a 74% (modelo Pangal con proyecciones PRECIS). Además, la variabilidad de este variable se reduce considerablemente, reduciéndose entre un 70% y un 80% en todas las cuencas y en ambos modelos, (salvo en el caso del modelo Pangal bajo condiciones PRECIS), lo cual apunta a un almacenamiento similar tanto en años húmedos como secos.

TABLA 6-8. VARIACIÓN DE ALMACENAMIENTO NIVAL MÁXIMO EN EQUIVALENTE DE AGUA.

Almacenamiento Máximo [Mm ³] ¹⁷		Pangal		Cachapoal		Cipreses	
		MK3.6	PRECIS	MK3.6	PRECIS	MK3.6	PRECIS
Línea Base	Promedio	179.6	171.1	503.0	451.5	162.7	148.3
	Variabilidad	78.9	105.5	199.9	241.2	67.1	84.3
Proyecciones	Promedio	79.1	45.0	266.6	139.7	84.6	48.5
	Variabilidad	17.1	37.6	55.4	55.4	17.4	39.1

Por otro lado, la fecha de ocurrencia de este almacenamiento máximo varía significativamente también: en el caso de las proyecciones del modelo MK3.6 se tienen adelantos de entre 20 y 34 días, variando según cuenca mientras que en el modelo PRECIS se tienen valores más radicales que varían entre los 54 y los 73 días de diferencia, lo cual representa un valor alto (Tabla 6-9). En el caso del primer modelo la variabilidad de estos valores disminuye en todos los casos entre un 35% y un 45% mientras que en el caso del segundo modelo aumenta en más de un 100% en dos de las cuencas (Cachapoal y Cipreses) y en un 50% en la otra (Pangal). Al observar la forma del perfil de altura media de nieve en las dos primeras cuencas nombradas se observa que las fases de acumulación y derretimiento no están tan marcadas y que presenta máximos locales. Este cambio con respecto a la línea base genera que el máximo almacenamiento no quede tan definido en un punto y pueda variar significativamente y por tanto, aumentar la variabilidad.

TABLA 6-9. VARIACIÓN DE DÍA DE MÁXIMO ALMACENAMIENTO NIVAL.

Fecha Almacenamiento Máximo [día Juliano]		Pangal		Cachapoal		Cipreses	
		MK3.6	PRECIS	MK3.6	PRECIS	MK3.6	PRECIS
Línea Base	Promedio	164.9	162.3	171.9	174.0	170.8	169.9
	Variabilidad	21.6	28.3	22.2	26.2	21.4	22.1
Proyecciones	Promedio	130.2	89.1	150.4	109.3	146.0	117.4
	Variabilidad	13.7	44.1	12.2	52.6	12.6	48.9

Otro buen indicador asociado a las variables meteorológicas resulta el coeficiente de escorrentía de las cuencas, el cual muestra la proporción que se da entre el agua precipitada

¹⁷ Si bien la densidad de la nieve varía según la edad que tenga ésta y otros múltiples factores, se utiliza como valor de referencia de su densidad una aproximación de 350 kg/m³/

sobre la cuenca y el agua que sale superficialmente de esta última. Los valores obtenidos con las proyecciones realizadas se muestran en la Tabla 6-10.

TABLA 6-10. VALORES DE COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA.

Cuenca	Pangal		Cachapoal		Cipreses	
Escenario	RCP6.0	A1B	RCP6.0	Escenario	RCP6.0	A1B
Línea Base	0.56	0.51	0.75	0.73	0.71	0.69
2040-2070	0.52	0.38	0.75	0.65	0.71	0.61
%Variación	-7%	-25%	0%	-11%	0%	-12%

Estos valores permiten ver una diferencia fundamental de cambios a nivel de los procesos hidrológicos asociados a cada cuenca según el modelo y escenario que se está utilizando. En el caso del escenario RCP6.0 planteado por el modelo MK3.6 se puede ver que se tiene una ligera disminución del rendimiento en las proyecciones del periodo futuro en la cuenca del río Pangal, mientras que en los ríos Cachapoal y Cipreses no se observan variaciones. Por otro lado, el modelo PRECIS-ECHAM5 en el escenario A1B presenta disminuciones no menores cercanas al 26% en el modelo del río Pangal y 16% en los modelos de los ríos Cachapoal y Cipreses.

Según el planteamiento semi-físico del modelo WEAP (punto 2.2.1.2.) que utiliza dos estanques sobre los cuales realiza los cálculos, las únicas posibilidades de salida de agua desde cada uno de los “catchment” corresponde a una de las siguientes cuatro alternativas:

- i. Escorrentía superficial
- ii. Escorrentía subsuperficial,
- iii. Flujo base
- iv. Evapotranspiración

De éstas, las primeras tres son integradas al cauce del río dentro del periodo de evaluación, por lo que son consideradas dentro del volumen de caudal medido. Sin embargo, la evapotranspiración es una componente no considerada en el factor de escorrentía y en este caso representa la única salida opcional de agua desde los estanques del modelo que no se integra al río. Esto permite asociar entonces la disminución de los coeficientes de escorrentía con esta variable, que a su vez se asocia directamente con el valor de las temperaturas que se tienen dentro de las proyecciones, ya que el modelo ocupa las ecuaciones de Penmann-Monteith (Allen et al., 1998) para este cálculo. Dado que el incremento de las temperaturas es mayor en las proyecciones del escenario A1B del modelo PRECIS que en el escenario RCP6.0 del modelo tiene sentido que las alteraciones se vean mayormente en el primero, mientras que el segundo muestra una mayor consistencia en los valores de adaptabilidad de la evapotranspiración (que no depende únicamente de la temperaturas sino también de otras variables) ante los cambios proyectados de las condiciones meteorológicas.

6.2 PROYECCIONES DE CAUDALES

Debido a la importante diferencia que se observa entre los dos reanálisis de los periodos de línea base realizados (comprendido entre los años 1970 a 2009) provenientes de los diferentes modelos, es necesario contrastar los valores de caudal obtenidos desde éstos con los valores simulados para confirmar que efectivamente ambos logran representar las condiciones meteorológicas de forma representativa al ser escalados y validarlos por tanto como alternativas que representan adecuadamente la hidrología de la cuenca.

En la Figura 6-2 se observan los promedios mensuales de los caudales generados en base a ambos modelos en conjunto con los valores simulados-aquellos caudales obtenidos a través del modelo utilizando los modelos hidrológicos desarrollados en este trabajo - considerando el periodo comprendido entre los años hidrológicos 1980 y 2004.

Se observa que con los dos modelos se obtiene una buena representación del comportamiento siendo las curvas en los dos conjuntos de datos consecuentes con el régimen hidrológico y otros hitos como mes de caudal máximo. Sin embargo, se puede apreciar una leve subestimación sistemática de los caudales en el modelo Cachapoal donde la curva simulada con los datos de reanálisis es subestimada levemente en los meses de primavera, tanto con los del modelo MK3.6 como el modelo PRECIS.

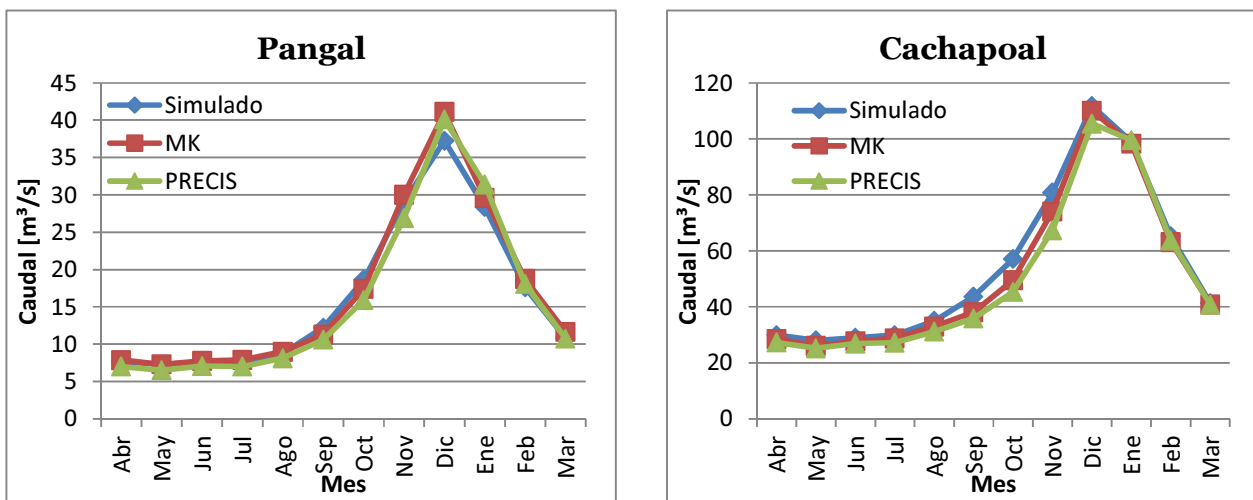


FIGURA 6-2. COMPARACIÓN DE VALORES SIMULADOS CON LOS DIFERENTES REANÁLISIS.

Los valores asociados a cada uno de estos gráficos se presentan en la Tabla 6-11 y Tabla 6-12 respectivamente. Cabe señalar que este periodo fue escogido con este fin debido a la disponibilidad de datos meteorológicos que estaban disponibles en las estaciones utilizadas como base para obtener la información con las cuencas, así como también con cumplir el requisito de tener un periodo de longitud lo suficientemente extenso como para ser calificado de apropiado para los fines de comparación que se tienen.

En las páginas a continuación se muestra la información de todos los caudales simulados y proyectados comprendidos en el periodo de línea base así como futuro en forma de gráficos y

herramientas de análisis. Sin embargo, los valores medios mensuales de las series históricas de cada uno de los escenarios para cada una de las ventanas de tiempo se encuentran en el Anexo E¹⁸. Las series completas de caudales, tanto de valores de reanálisis como de proyecciones se encuentran a escala diaria en el capítulo VII del Anexo Digital organizado por cuenca y periodo correspondiente.

TABLA 6-11. COMPARACIÓN DE CAUDALES SIMULADOS Y DE REANÁLISIS RÍO PANGAL.

	Simulados			RCP6.0			A1B		
Abril	7.6	±	2.4	7.9	±	1.6	7.0	±	1.9
Mayo	7.3	±	2.3	7.3	±	1.5	6.5	±	1.3
Junio	7.6	±	2.1	7.8	±	1.8	7.1	±	1.5
Julio	7.6	±	1.8	7.9	±	1.8	7.0	±	1.3
Agosto	8.7	±	2.0	9.0	±	2.1	8.1	±	2.5
Septiembre	12.2	±	2.9	11.3	±	2.7	10.6	±	5.8
Octubre	18.6	±	4.3	17.4	±	4.1	15.9	±	8.6
Noviembre	29.0	±	9.2	30.0	±	7.3	26.9	±	15.7
Diciembre	37.2	±	19.0	41.1	±	17.4	40.1	±	26.6
Enero	28.4	±	19.2	29.6	±	13.3	31.4	±	24.3
Febrero	17.6	±	9.7	18.8	±	6.8	18.1	±	9.6
Marzo	10.8	±	4.0	11.6	±	3.2	10.7	±	4.2
Año	16.1	±	5.0	16.6	±	4.3	15.8	±	6.6

TABLA 6-12. COMPARACIÓN DE CAUDALES SIMULADOS Y DE REANÁLISIS RÍO CACHAPOAL.

	Simulados			RCP6.0			A1B		
Abril	29.9	±	11.2	28.5	±	6.5	27.3	±	8.3
Mayo	28.0	±	9.1	26.0	±	5.9	25.2	±	5.8
Junio	28.9	±	7.9	27.7	±	7.0	26.8	±	5.6
Julio	29.9	±	7.3	28.8	±	7.1	27.2	±	5.4
Agosto	34.9	±	7.1	33.0	±	8.1	31.1	±	7.9
Septiembre	43.7	±	8.3	38.1	±	8.9	35.9	±	13.9
Octubre	57.1	±	11.0	49.5	±	11.1	45.3	±	18.5
Noviembre	80.8	±	18.3	74.1	±	14.3	67.4	±	28.7
Diciembre	111.7	±	39.3	110.1	±	33.0	105.4	±	52.5
Enero	98.9	±	55.6	98.3	±	40.0	99.5	±	61.9
Febrero	65.2	±	35.9	63.2	±	22.8	63.7	±	32.5
Marzo	41.3	±	16.5	40.9	±	11.9	40.8	±	15.7
Año	54.2	±	13.0	51.5	±	11.1	49.6	±	15.2

¹⁸ En el caso del escenario RCP6.0 planteado por el modelo MK3.6 se entrega el promedio histórico de las diez series de caudales entregados por las diferentes simulaciones del modelo. Las series en particular de cada una de ellas se encuentran en el anexo digital. En el caso del escenario A1B, planteado por el modelo PRECIS, se presenta solo la serie de proyecciones original.

6.2.1 RÍO PANGAL

Los resultados de las proyecciones para el río Pangal muestra una disminución del caudal promedio anual de 16.1 m³/s a 12.5 m³/s según el escenario RCP6.0 del modelo MK3.6 y de 13.5 m³/s a 8.1 m³/s según el escenario A1B del modelo PRECIS, lo que representa disminuciones porcentuales de 22% y 40% respectivamente, centrándose las disminuciones de caudal en los meses de deshielo. Se observa un cambio en el régimen hidrológico de la cuenca al desplazarse la ocurrencia del caudal medio mensual máximo desde el mes de Diciembre al de Noviembre, así como también una menor variabilidad de los caudales de la época estival (Figura 6-3).

Los efectos de esta disminución se pueden apreciar en las curvas de duración en los distintos niveles temporales (Figura 6-3). A escala diaria y mensual, se observan disminuciones en todo el rango siendo estas más drásticas en la medida que la probabilidad de excedencia disminuye, particularmente para valores de 40% de excedencia o menores. A nivel anual, se observa una disminución general de los caudales proyectados para todos los rangos de probabilidades de excedencia, acercándose las curvas de línea base de ambos modelos a sus proyecciones solo en el caso de años muy secos, donde la diferencia no resulta tan significativa en ambas modelos

En la Figura 6-4 se observa que ambos modelos presentan un comportamiento similar en las variaciones de los caudales en el periodo comprendido entre Noviembre y Abril. El comportamiento en el resto de los meses difiere entre ambos escenarios: el escenario A1B del modelo PRECIS presenta proyecciones de disminuciones para todo el resto del año, aunque el valor de éstas no resulta mayormente significativo en los meses entre Julio y Agosto y de magnitud pequeña en Mayo, Junio y Octubre; por otro lado, el escenario RCP6.0 del modelo MK3.6 no presenta una tendencia concluyente para los meses de Mayo a Julio, y presenta aumentos en el periodo entre Agosto y Octubre. Si bien estos aumentos son leves, son consistentes aún al incorporar la incertidumbre de las proyecciones y son un indicio del cambio de régimen hidrológico proyectado en la cuenca.

Al enfocar el análisis en las disminuciones que se observan en el periodo de verano, se puede ver que tanto las magnitudes como el porcentaje que representan (Figura 6-5) las disminuciones son consecuentes entre ambos modelos, y podrían representar el mismo valor al considerar el rango de incerteza de cada una de ellas o al menos muy cercanos entre ellos.

Es interesante notar como las disminuciones menos drásticas (e incluso aumentos en algunos casos) ocurren en los meses de primavera. Si bien los valores de caudales se mantienen en rangos similares en este periodo, se ven altamente disminuidos en los otros meses. Es posible inferir que este fenómeno se debe a que el proceso de deshielo comienza antes influenciado por el aumento de temperaturas lo que provoca mayores caudales en los primeros meses pero que dada la reducción general de precipitación en todos los meses termina por derretir la nieve en fechas más tempranas, como se analizó en la sección 6.1. Esto produce el cambio en el régimen hidrológico en la cuenca que se mencionó anteriormente y que también es posible ver sin excepción en ambos modelos y en todas las probabilidades de excedencia.

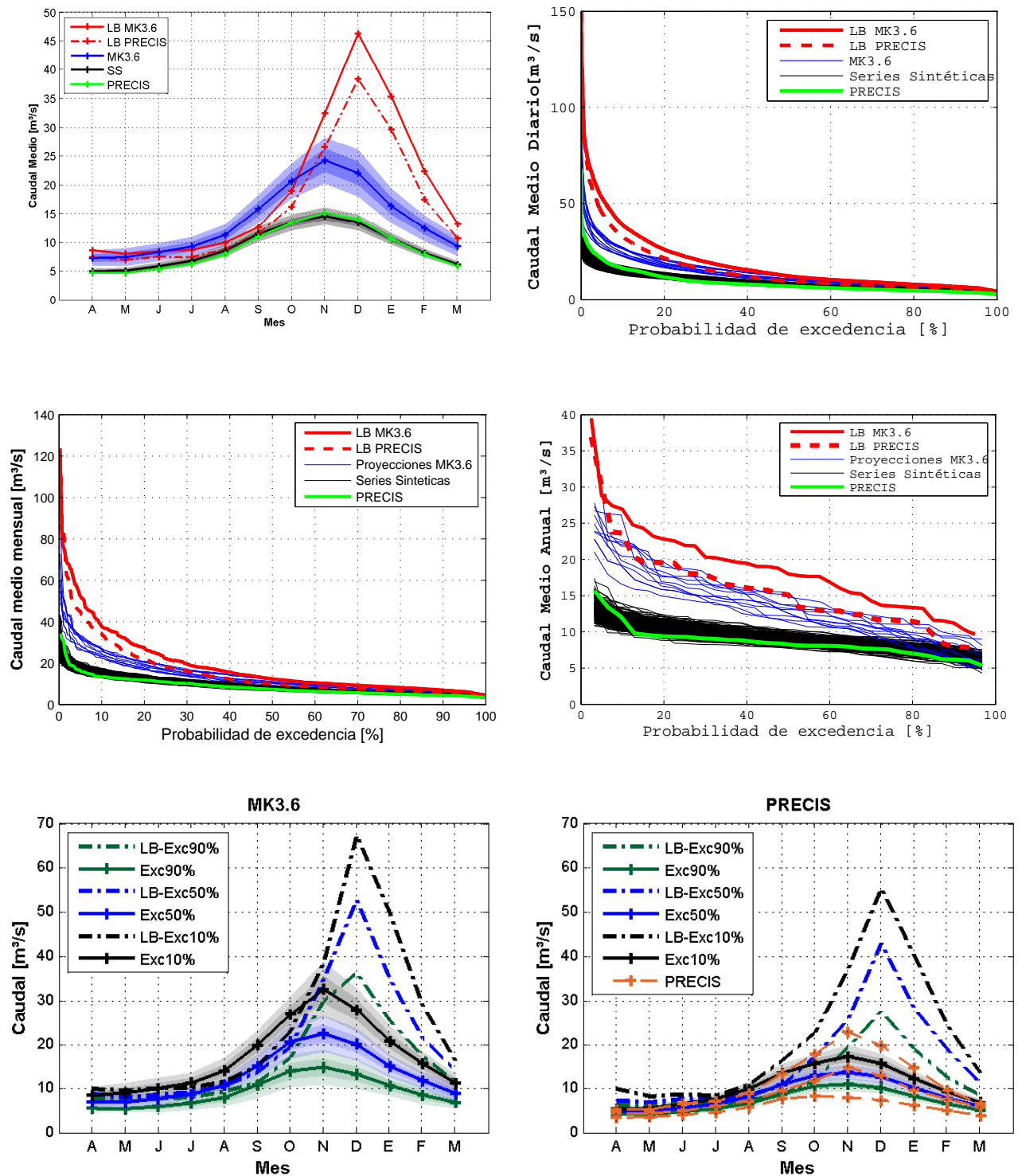


FIGURA 6-3. ANÁLISIS DE CAUDALES GENERADOS PARA EL RÍO PANGAL: CAUDALES MEDIOS (SUPERIOR DERECHA), CURVA DE DURACIÓN DIARIA (SUPERIOR IZQUIERDA), CURVAS DE DURACIÓN MENSUAL Y ANUAL (CENTRO) Y CURVAS DE VARIACIÓN ESTACIONAL SEGÚN MODELO (INFERIOR).

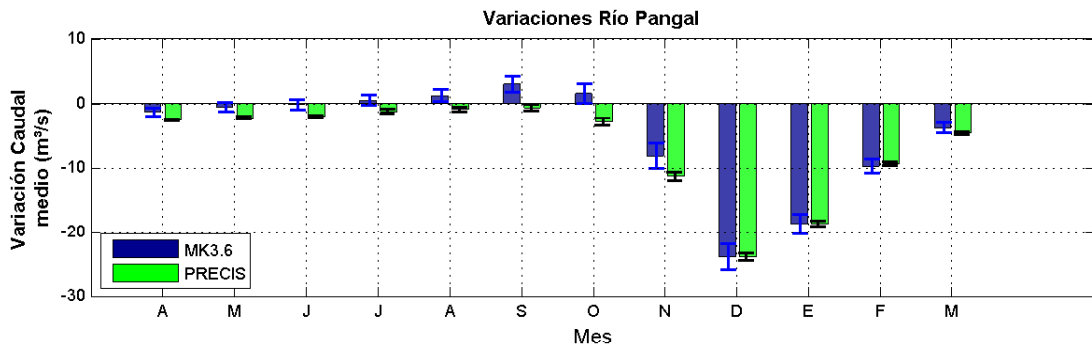


FIGURA 6-4. VARIACIONES DE CAUDALES MENSUALES EN EL RÍO PANGAL.

Si bien el valor de las disminuciones en los meses de Abril a Junio en el escenario A1B son valores pequeños, en la Figura 6-5 se aprecia que a nivel porcentual estos representan una disminución importante con respecto al periodo de línea base y que a la vez las proyecciones para estos meses resultan más variables que las hechas para los periodos de deshielo.

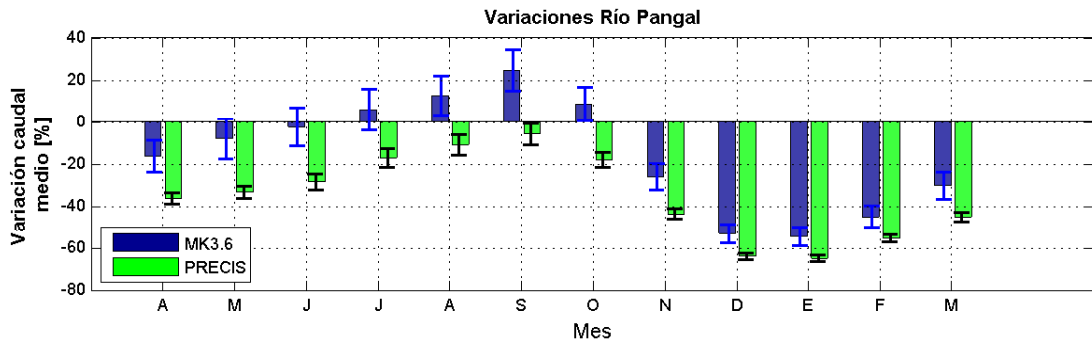


FIGURA 6-5. VARIACIONES PORCENTUALES DE LOS CAUDALES PARA EL RÍO PANGAL.

Las curvas de variación estacional presentan grandes diferencias entre ambos modelos: mientras el escenario RCP6.0 presenta disminuciones alrededor del 50% a 60% para las distintas probabilidades de excedencia, el escenario A1B proyecta reducciones de los valores que varían entre 60% y 80% aproximadamente.

Se observa que las proyecciones de las series sintéticas no logran representar bien los valores de los meses de deshielo en probabilidades extremas (tanto de años secos como húmedos), con una tendencia a presentar una variación menor que la proyectada por la serie original del escenario A1B sobre el que fueron planteadas. Esto se asocia con la metodología de generación de las series de forzantes meteorológicas que al ser estocástica no logra representar bien los procesos físicos que las determinan y que, como consecuencia, altera los valores extremos. Esto se refleja claramente en las curvas de duración donde en los valores de probabilidades de excedencia muy bajas la serie original presenta valores mayores que los generados por medio de las series sintéticas. A la vez, se da el fenómeno inverso a esto en las probabilidades altas donde los valores son menores que los generados con las series sintéticas, lo cual confirma una variabilidad mejor. Esto se traduce en que la metodología de generación de series sintéticas se vea limitada a ser una buena herramienta de los valores medios de los caudales estimados, pero no de los valores extremos de estos.

Ambas curvas presentan comportamientos similares en la forma del hidrograma, pero en el primer escenario se presentan disminuciones de menor intensidad que el segundo. De esto, es posible concluir que en el caso del escenario RCP6.0 del modelo MK3.6 existe una mayor variabilidad en los valores de los caudales, mientras que para el escenario A1B del modelo PRECIS se tienen proyecciones mucho más uniformes y con un menor rango de dispersión en sus valores (esto se puede ver también claramente en la curva de duración mensual). Se observa una mayor incertidumbre asociada a las proyecciones en los periodos de deshielo, pudiendo llegar a ser esta variabilidad de hasta un 15% del valor proyectado.

El hecho de que sea el periodo de deshielo y no el de lluvias el que presenta mayores márgenes de incertidumbre apunta a que la cuenca presenta una mayor sensibilidad a posibles variaciones que se tengan en los parámetros que rigen su comportamiento hidrológico, como por ejemplo las temperaturas que rigen el proceso de deshielo, pero a su vez también se añade incertidumbre desde la variabilidad de las precipitaciones, cuya variación resulta visible recién esta época que es cuando el agua precipitada escurre efectivamente por la cuenca.

6.2.2 RÍO CACHAPOAL

El análisis del río Cachapoal presenta comportamientos similares entre las predicciones realizadas por los distintos modelos. En el caso del modelo MK3.6 con su escenario RCP6.0 el caudal medio anual presenta una disminución de 48.5 [m³/s] a 40.1 [m³/s], correspondiendo esto a una diferencia de 8.4 [m³/s], es decir, una disminución cercana al 17% del valor original; por otro lado, en las proyecciones del modelo PRECIS en el escenario A1B se observa una reducción del caudal futuro modelado de 42.8 [m³/s] a 30.7 [m³/s], lo que representa una diferencia de 12.1[m³/s], lo que equivale a una disminución cercana al 28%.

Existe consecuencia entre los modelos en las tendencias esperadas de variación de los caudales a nivel mensual (Figura 6-6 y Figura 6-7). Se observan incrementos significativos en los caudales de Septiembre y Octubre en las proyecciones de ambos escenarios e incluso podría decirse que también en el mes de Agosto ya que si bien el rango de incertidumbre no permite tener un resultado concluyente, se observa que en general el rango de variabilidad apuntaría a un incremento de los caudales.

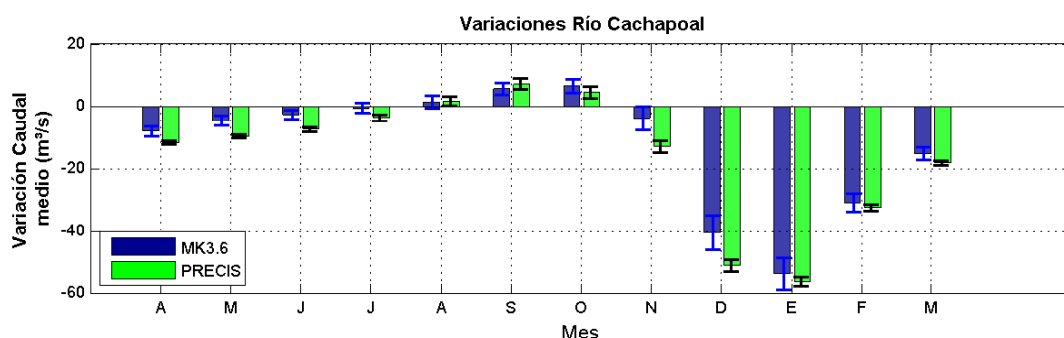


FIGURA 6-6. VARIACIONES DE CAUDALES MENSUALES EN EL RÍO CACHAPOAL.

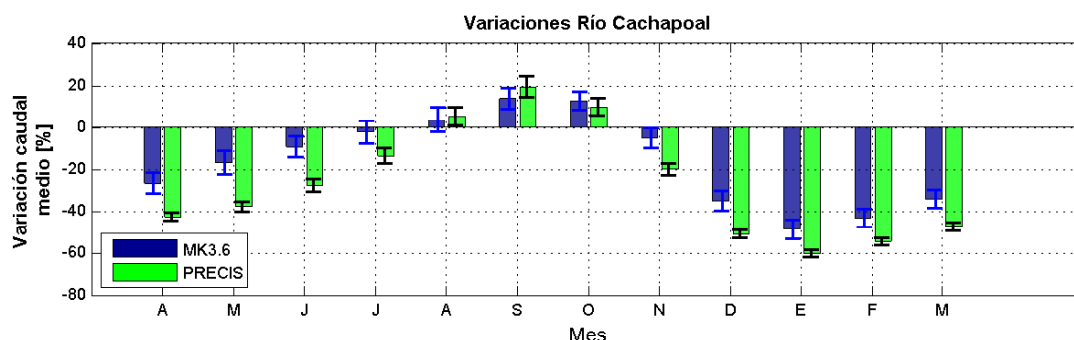


FIGURA 6-7. VARIACIÓN PORCENTUAL DE LOS CAUDALES EN EL RÍO CACHAPOAL

Ambos modelos proyectan un cambio en el régimen hidrológico, como se puede ver en la Figura 6-8: en el caso del escenario RCP6.0 se producen disminuciones de 30 a 50% de los caudales medios con respecto al periodo de línea base y el caudal máximo se adelanta en un mes; en el modelo PRECIS las disminuciones son de 30% hasta 70% y el caudal máximo se adelanta en dos meses con respecto al periodo de línea base.

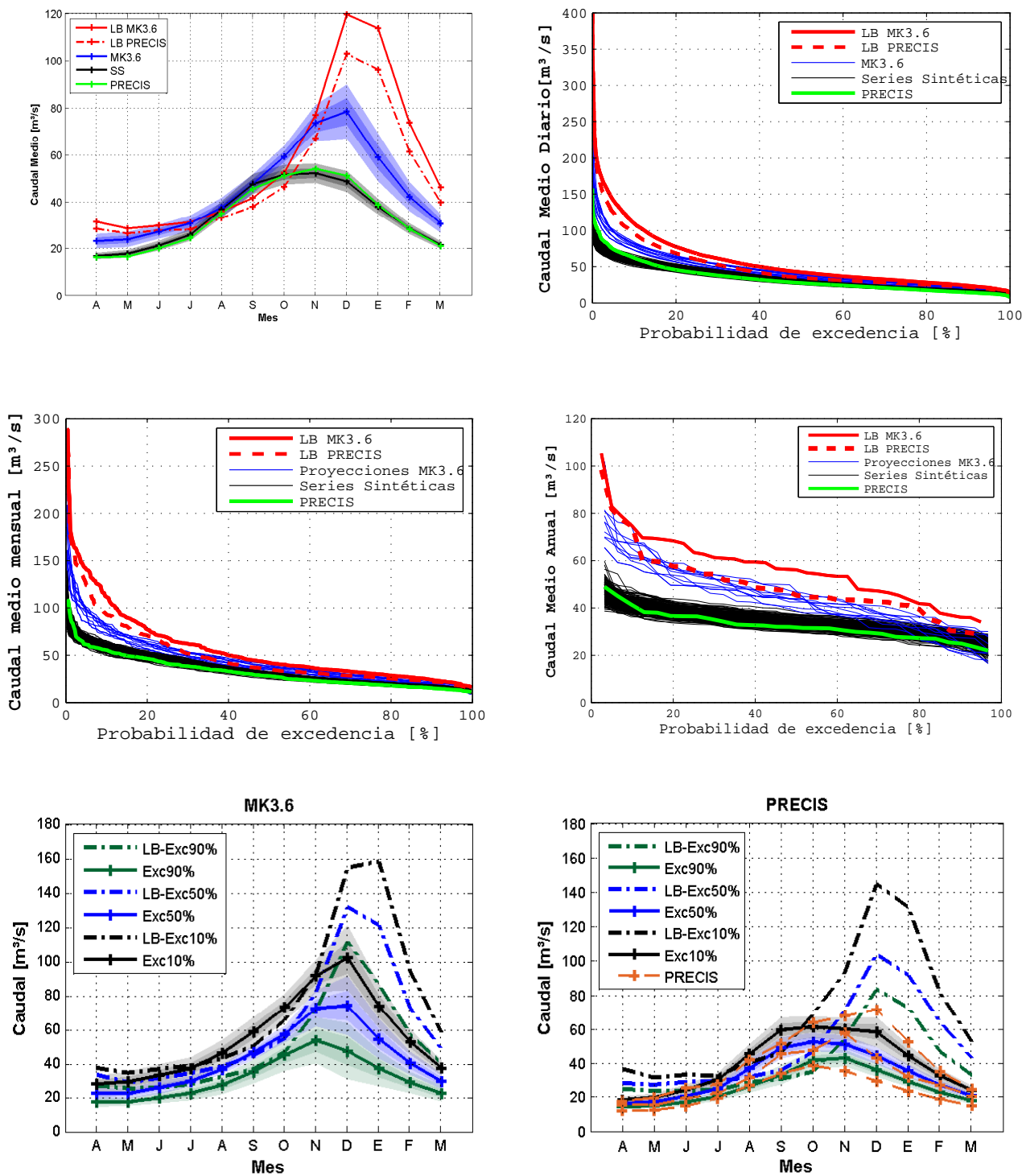


FIGURA 6-8. ANÁLISIS DE CAUDALES GENERADOS PARA EL RÍO CACHAPOAL: CAUDALES MEDIOS (SUPERIOR DERECHA), CURVA DE DURACIÓN DIARIA (SUPERIOR IZQUIERDA), CURVAS DE DURACIÓN MENSUAL Y ANUAL (CENTRO) Y CURVAS DE VARIACIÓN ESTACIONAL SEGÚN MODELO (INFERIOR).

Al observar la tendencia de los cambios en los caudales medios mensuales se observa nuevamente un inicio de los deshielos en una fecha más temprana, trasladando volúmenes de agua que en la línea base fluyen en los meses de verano hacia los meses de primavera. Se observan caudales más parejos, donde se carece de un caudal máximo más pronunciado, aunque esto es especialmente notorio en el caso del escenario A1B, donde el mes con el caudal máximo se desplaza fuera de los meses de verano para probabilidades de excedencia altas y medias y se observa un cambio drástico en el régimen hidrológico de la cuenca (Figura 6-8, parte inferior).

Estas discrepancias en comportamiento donde todos los meses son consecuentes, a diferencia de lo que ocurre en el modelo del río Pangal, podrían explicarse en parte debido a las propiedades hipsométricas de la cuencas y la diferencia de ubicación de la isoterma cero debido a las diferencias en las magnitudes de los incrementos proyectados, según lo visto en el punto 6.1. Al observar los parámetros de calibración del modelo, es posible ver que la temperatura de congelamiento en este modelo resulta ser 2 [°C] mayor que en el modelo anterior, lo que indica en la dirección de que este modelo debiese presentar una menor variación de los caudales, aunque en la práctica se observa lo contrario. Esto nuevamente apunta en la dirección de que la razón de este comportamiento es la diferencia de cotas que presentan ambas cuencas, puesto que los parámetros de los modelos son tales que el comportamiento debiese ser el contrario.

Las disminuciones porcentuales para el periodo de verano y otoño entre las proyecciones realizadas por ambos modelos presentan valores similares, siendo equivalentes en algunos casos al considerar los márgenes de incertidumbre obtenidos del análisis de las múltiples series utilizadas. Se tienen disminuciones del orden de un 45% en los meses de Diciembre, Enero y Febrero en el escenario RCP6.0 del modelo MK3.6 y aún mayores en el escenario A1B del modelo PRECIS, que presenta reducciones más severas en un mayor número de meses (lo cual es esperable debido a los cambios en el coeficiente de escorrentía de la cuenca).

Las curvas de duración en sus distintas escalas temporales no hacen más que reflejar lo comentado anteriormente: los caudales proyectados son en todo el rango de probabilidades menores que los de línea base, aunque de forma más notoria para probabilidades de excedencia menores al 40%, es decir, en los caudales de los días y meses más húmedos, que en este caso son los del periodo de verano y que efectivamente son los más afectados. Las disminuciones en este último rango bordean un valor de 50%, siendo este cada vez mayor a medida que la probabilidad disminuye. A nivel anual en esta cuenca, las disminuciones resultan concluyentes y las curvas de las proyecciones no logran alcanzar los valores originales bajo ninguno de las múltiples posibilidades dadas por los diferentes conjuntos de proyecciones obtenidos tanto de las diferentes simulaciones planteadas para el escenario RCP6.0 por el modelo MK3.6 como de las diferentes series sintéticas generadas en base a las proyecciones del escenario A1B del modelo PRECIS.

Adicionalmente, se observa que en las curvas de variación estacional del escenario A1B ocurre el mismo fenómeno que se observa en las del modelo Pangal, donde las series sintéticas presentan dificultades para representar los valores de probabilidades de excedencia muy altos o muy bajos en los meses comprendidos entre Noviembre y Enero.

6.2.3 RÍO CIPRESES

El comportamiento del río Cipreses presenta un alto nivel de similitud con lo observado en el río Cachapoal pero manteniendo una escala de valores de caudal distinta debido a las diferencias de área entre ambas cuencas. Al igual que en los resultados para el río anterior, se observan diferencias concluyentes entre las proyecciones realizadas por ambos modelos de circulación global en lo referente a las predicciones del caudal. El escenario RCP6.0 planteado por el modelo MK3.6 presenta una disminución de su caudal medio anual desde un valor de 16.7 [m³/s] a 13.6 [m³/s], lo que representa una disminución porcentual cercana al 17%. Por otra parte, el escenario A1B escalado por el modelo PRECIS es consecuente con el escenario RCP6.0 en las proyecciones de disminución ya que su caudal medio presenta una disminución de 14.5 [m³/s] observados en su línea base a 10.3 [m³/s], una disminución de un 27%.

Las proyecciones de ambos modelos tienen en común que pronostican disminuciones de caudal medio mensual consecuentes entre los meses de Noviembre a Junio, una proyección de aumento en el mes de Septiembre y un resultado no concluyente de tendencia para el mes de Agosto (Figura 6-9 y Figura 6-11).

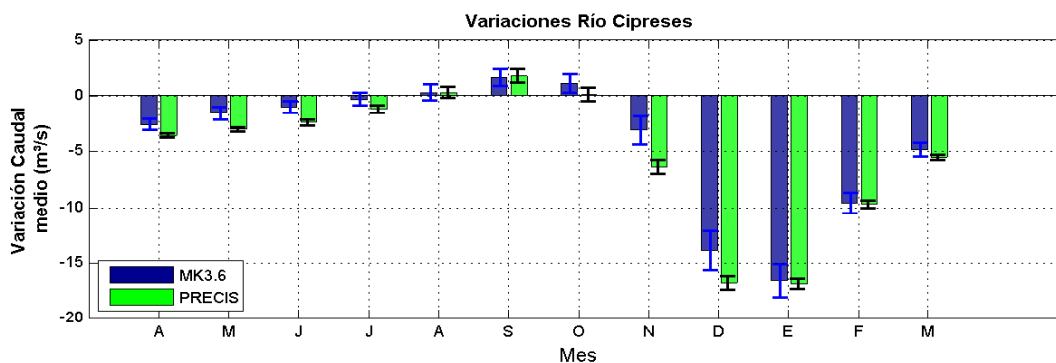


FIGURA 6-9. VARIACIONES ABSOLUTAS DE CAUDALES MENSUALES DEL RÍO CIPRESES

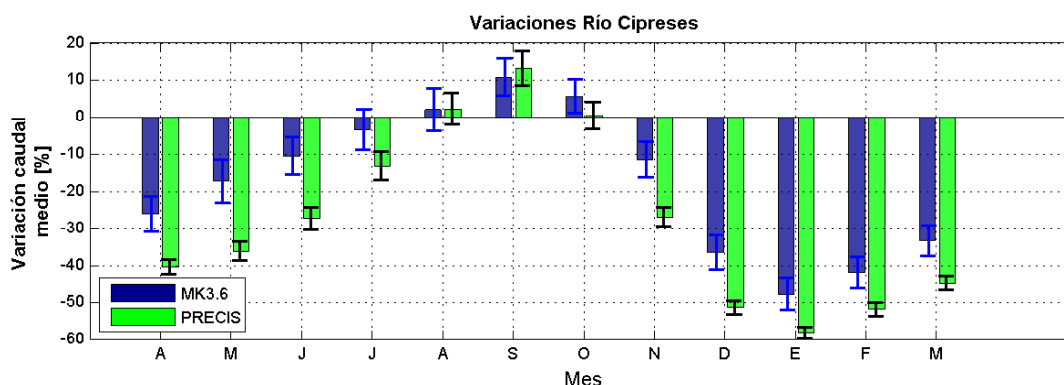


FIGURA 6-10. VARIACIÓN PORCENTUAL DE LOS CAUDALES DEL RÍO CIPRESES.

Se presentan en la Figura 6-11 diversos gráficos que ayudan a discutir los resultados obtenidos.

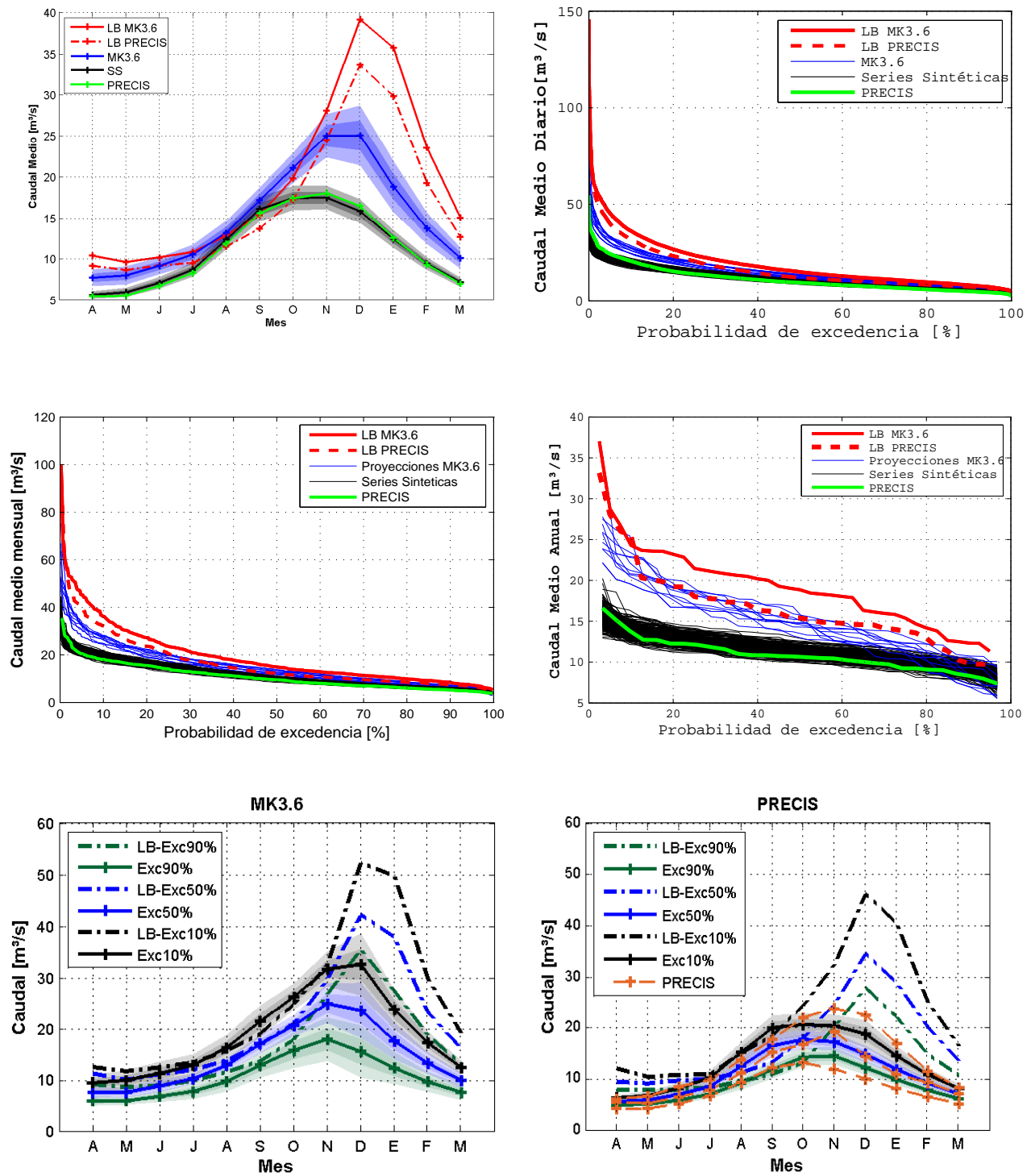


FIGURA 6-11. ANÁLISIS DE CAUDALES GENERADOS PARA EL RÍO CIPRESES: CAUDALES MEDIOS (SUPERIOR DERECHA), CURVA DE DURACIÓN DIARIA (SUPERIOR IZQUIERDA), CURVAS DE DURACIÓN MENSUAL Y ANUAL (CENTRO) Y CURVAS DE VARIACIÓN ESTACIONAL SEGÚN MODELO (INFERIOR).

Si bien ambos escenarios presentan tendencias similares en lo que respecta a valores absolutos de reducción de los caudales (Figura 6-9), es importante notar que las proyecciones de ambos se diferencian en la severidad que estas disminuciones representan respecto a sus valores de línea base, donde nuevamente se puede ver el efecto no solo de la disminución de las precipitaciones sino también de las temperaturas, que potencian el efecto de evapotranspiración fuertemente (como se vio en el punto 6.1 en el análisis del coeficiente de escorrentía). En todos aquellos meses donde se proyectan reducciones, estas resultan ser más severas en las proyecciones de PRECIS que de MK3.6 y en solo uno de los meses estas resultan menor que 25% del valor original en el primer modelo.

Se observa el mismo cambio de régimen hidrológico proyectado en los dos casos anteriores, con una tendencia a un proceso de deshielo más temprano y un adelantamiento del centro de gravedad del hidrograma. Las curvas de duración diaria y mensual presentan comportamiento similares a los anteriores, que evidencian una disminución severa de los caudales más altos, que en este caso se corresponden con los del periodo estival. La curva de duración anual permite ver que la reducción de los caudales medios anuales ocurre tanto en años húmedos como secos, siendo entonces un fenómeno generalizado.

Las predicciones del escenario A1B nuevamente escapan del rango de las predicciones realizadas por las series sintéticas que no logran representar bien la variabilidad de las curvas de variación estacional, como se observa en los gráficos de la parte inferior de la Figura 6-11. El periodo que presenta problemas es consecuente con lo observado en los dos modelos anteriores siendo el principal problema en magnitud el mes de Noviembre, y luego los meses de Diciembre y Enero. Sin embargo, y a pesar de que las razones de esta mala representación sean las mismas que en los modelos anteriores, en este caso los valores se aproximan más que en los dos anteriores.

6.3 PROYECCIONES DE GENERACIÓN

Utilizando como información base las series de caudal diarias obtenidas desde cada uno de los modelos para cada uno de los ríos de interés en conjunto con el planteamiento de los modelos operaciones vistos en la sección 6 de las centrales hidroeléctricas en estudio es posible generar series de proyecciones de la potencia máxima generable según los caudales modelados.

La elección de analizar la potencia máxima potencial generable, en desmedro de otras alternativas como pudiese ser la energía máxima potencial generable se justifica en que la primera representa una variable estable independiente que siempre estará disponible, es decir, no presenta restricciones, mientras que la segunda está sujeta a que su utilización depende de su demanda o consumo, lo que deja a esta variable con una limitación cuya incorporación es innecesaria. De todas formas, se muestran los valores calculados equivalentes en energía para los valores medios a modo de referencia.

Para el análisis de las proyecciones de potencia se utilizan dos gráficos, los cuales consisten en:

1. Gráfico de potencia media en el periodo 2040-2070.
En este gráfico se muestra el valor promedio del periodo en estudio obtenido al promediar cada mes comprendido en él, agregándole un rango de incertidumbre al incorporar la información de las diversas proyecciones realizadas y la variabilidad que se observa entre éstas.
2. Curva de variación estacional de potencia.
Se realiza un gráfico similar a la curva de variación estacional donde se muestran la potencia esperada para una cierta probabilidad de excedencia. Para cada probabilidad se utilizará como valor representativo el promedio de los valores obtenidos para ella en cada una de las series, agregándole además un valor de incertidumbre obtenido de la variación que se observa de estos valores

Utilizando estas dos representaciones se realiza un análisis comparativo a la situación de línea base para obtener los potenciales impactos que se tendrán producto de los efectos del cambio climático y las alteraciones que este producirá en los recursos hídricos de las cuencas en estudio. Todo el detalle de los valores de proyección se encuentra en la carpeta VIII del Anexo Digital

6.3.1 MODELO CHACAYES

El modelo operacional de la central Chacayes requiere como parámetros entrada los caudales de los modelos hidrológicos Cipreses y Cachapoal. Una variación en las proyecciones de éstos genera cambios directos sobre la potencia esperada en la generación. Sin embargo, es importante notar que estos cambios no son tan evidentes al considerar que existen factores limitantes tales como el valor máximo de captación de cada una de las bocatomas, o la potencia máxima generable por la planta.

A pesar de estas potenciales limitaciones, se observa en la Figura 6-12 como la forma de las curvas proyectadas de generación presentan similitudes a las variaciones observadas en las curvas de los caudales de los que son dependientes: en ambos modelos se observa que la potencia proyectada aumenta con una cierta seguridad en los meses comprendidos entre Agosto y Octubre, que son aquellos meses en que se presentan posibles aumento de caudal o al menos la mantención de sus valores. Este incremento es más notorio en el caso de las proyecciones realizadas bajo el escenario A1B del modelo PRECIS, ya que en el caso del escenario RCP6.0 del modelo MK3.6 el margen de incertidumbre incorpora algunos de estos valores en su rango inferior por lo que los resultados no resultan concluyentes. Otro caso interesante de analizar es el mes de Julio, el cual presenta en ambos modelos proyecciones de potencia que se mantienen dentro de los valores observados para el periodo de línea base.

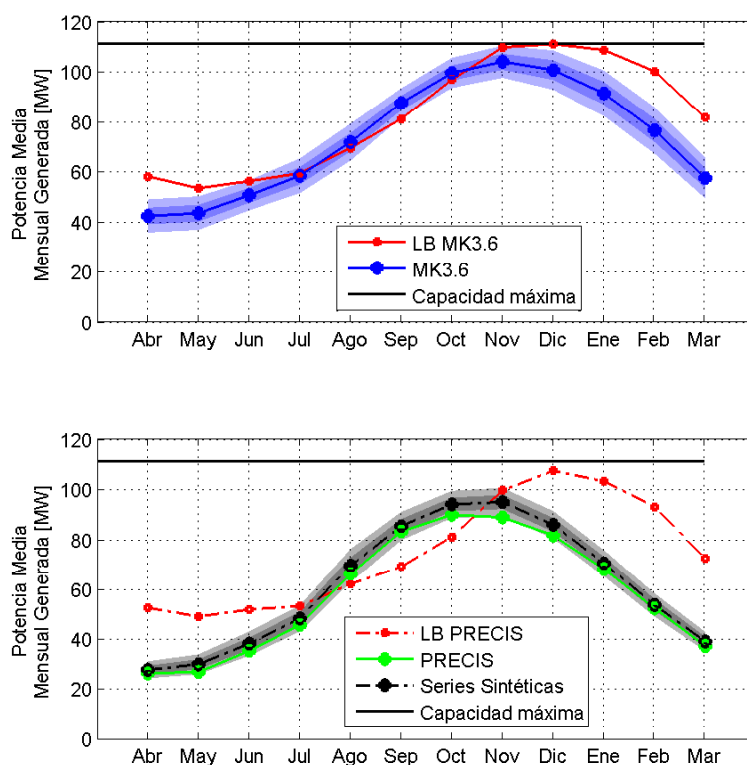


FIGURA 6-12. PROYECCIONES DE GENERACIÓN MEDIA EN LA CENTRAL CHACAYES

Los valores de generación mensual media para cada uno de los escenarios de análisis se presentan en la Tabla 6-13:

TABLA 6-13. POTENCIA MEDIA GENERABLE DE LA CENTRAL CHACAYES

Potencia [MW]	Escenario RCP6.0			Escenario A1B			
	LB	Futuro	Desv. Est.	LB	Futuro	SS	Desv. Est.
Abril	58.0	42.3	3.3	52.6	26.5	27.9	1.7
Mayo	53.3	43.4	3.3	49.1	27.1	30.1	2.0
Junio	56.1	50.5	3.0	51.9	35.4	38.3	2.4
Julio	59.3	58.3	3.5	53.3	45.7	48.4	2.6
Agosto	69.3	71.7	3.7	62.1	66.2	69.5	3.3
Septiembre	80.9	87.3	3.0	69.1	83.1	85.2	2.8
Octubre	96.6	99.3	3.0	81.0	89.8	93.9	2.7
Noviembre	109.5	103.8	3.2	99.4	88.7	94.8	2.8
Diciembre	110.9	100.4	3.9	107.2	81.5	85.8	2.7
Enero	108.4	91.1	4.6	103.0	68.1	70.4	2.6
Febrero	100.0	76.3	4.6	92.9	52.4	53.7	2.3
Marzo	81.4	57.3	4.0	72.3	37.4	39.2	1.9
Anual	82.0	73.5	3.6	74.5	58.5	61.4	2.5

La potencia media anual de ambas proyecciones pasa de ser:

- De 82.0 MW a 73.5 MW, en el caso del escenario RCP6.0 lo que representa una disminución del 11% en promedio, con un margen de error proyectado de ± 3.6 MW basándose en las diferentes series del modelo
- De 74.5 MW a 58.5 MW en el escenario A1B, lo que representa porcentualmente una disminución de un 22%, con un margen de error proyectado de ± 2.4 MW basado en la generación potencial de las series sintéticas generadas para evaluar el impacto.

Se observa claramente un cambio en la forma de la curva de generación media, siendo este cambio consecuente con los observados para los caudales. Resulta evidente un adelantamiento del centro de gravedad de la curva, el cual es particularmente más visible en las proyecciones bajo condiciones del escenario A1B propuesto por el modelo PRECIS.

Resulta interesante notar que si bien en los meses de otoño las disminuciones de caudal son menores tanto en valor como en porcentaje que las proyectadas para los meses de los deshielos, la reducción en términos de potencia resulta ser más severas en el primer periodo que en el segundo. Esto tiene una relación directa con el factor limitante que es el caudal de diseño de la planta: mientras que en los meses de verano en el periodo de línea base los caudales medios exceden a los de diseño lo que produce una cierta holgura, en los meses de otoño esto no se da por lo cual cualquier cambio produce inmediatamente un efecto sobre la generación en dicho periodo. Parte de esta holgura de la relación entre los caudales medios y los caudales de diseño de cada una de las plantas se mantiene en los meses de verano en las proyecciones del escenario RCP6.0 del modelo MK3.6 pero no en las del escenario A1B del modelo PRECIS, lo cual se condice adecuadamente con las disminuciones más drásticas que

presenta este último modelo a diferencia del primer. Un factor adicional que contribuye a las disminuciones más severas que se ven en el escenario A1B es que su línea base presenta valores de caudal menores, lo cual facilita la ocurrencia de este fenómeno. Los efectos de estos factores se ven claramente en la variación porcentual a nivel mensual que se aprecia en la Figura 6-13, donde se muestra como aún al incorporar el margen de incertidumbre de ambos modelos las variaciones son significativamente diferentes.

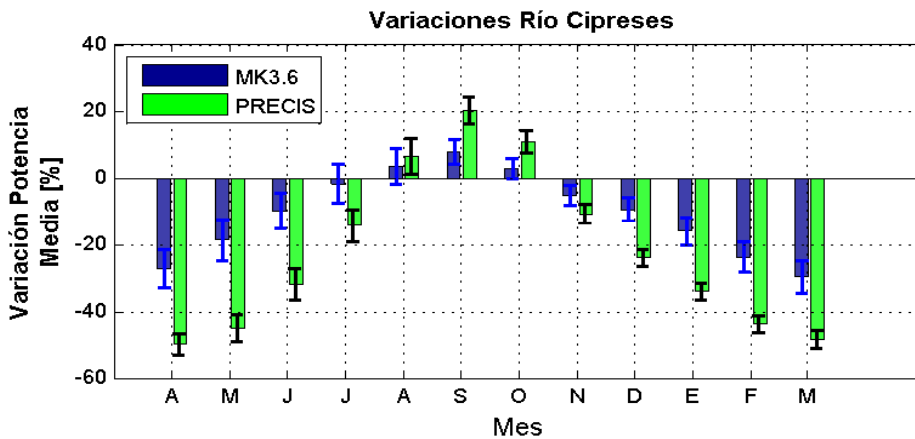


FIGURA 6-13. VARIACIÓN PORCENTUAL DE LA POTENCIA PROYECTADA.

A modo referencial se entregan los resultados de energía media total generable a nivel mensual, como valores complementarios a los resultados de potencia, reconociendo la relación directa que existe entre ellas, en particular en este caso, donde por los planteamientos de operación la central se debiese encontrar generando a plena capacidad en todo momento. Estos resultados se pueden ver en la Figura 6-14 y el detalle de sus valores en la Tabla 6-14.

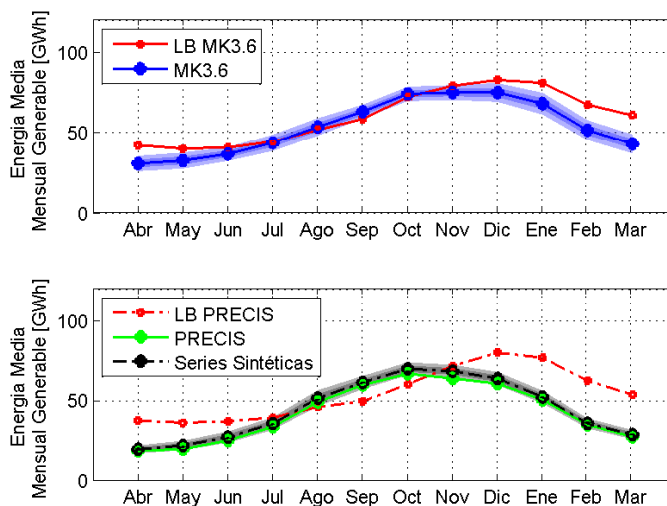


FIGURA 6-14. ENERGÍA MEDIA MENSUAL GENERABLE EN LA CENTRAL CHACAYES.

TABLA 6-14. ENERGÍA TOTAL MEDIA MENSUAL GENERABLE EN LA CENTRAL CHACAYES

Energía [GWh]	Escenario RCP6.0			Escenario A1B			
	LB	Futuro	Desv. Est.	LB	Futuro	SS	Desv. Est.
Abril	41.8	30.4	2.4	37.9	19.1	20.1	1.2
Mayo	39.6	32.3	2.5	36.5	20.1	22.4	1.5
Junio	40.4	36.4	2.1	37.3	25.5	27.6	1.7
Julio	44.1	43.4	2.6	39.7	34.0	36.0	1.9
Agosto	51.6	53.3	2.7	46.2	49.2	51.7	2.5
Septiembre	58.3	62.9	2.1	49.7	59.8	61.4	2.0
Octubre	71.9	73.9	2.2	60.3	66.8	69.9	2.0
Noviembre	78.9	74.7	2.3	71.6	63.9	68.3	2.0
Diciembre	82.5	74.7	2.9	79.8	60.7	63.8	2.0
Enero	80.7	67.8	3.4	76.7	50.6	52.4	2.0
Febrero	67.2	51.3	3.1	62.4	35.2	36.1	1.6
Marzo	60.6	42.7	3.0	53.8	27.8	29.1	1.4
Anual	717.4	643.8	31.4	651.8	512.8	538.7	21.9

Al realizar un análisis de las curvas de variación estacional de potencia, se observan grandes diferencias entre las proyecciones de ambos modelos.

En el caso de años húmedos el escenario RCP6.0 (Figura 6-15) presenta valores en algunos meses que superan a los del periodo de línea base, siendo estos los meses de primavera. La planta funciona con capacidad máxima en el periodo comprendido entre Septiembre y Febrero prácticamente en el caso de estas proyecciones, superando en esto también la situación de línea base, pero presenta disminuciones en los meses de Marzo y Abril, donde la potencia media se reduce en casi 20 MW.

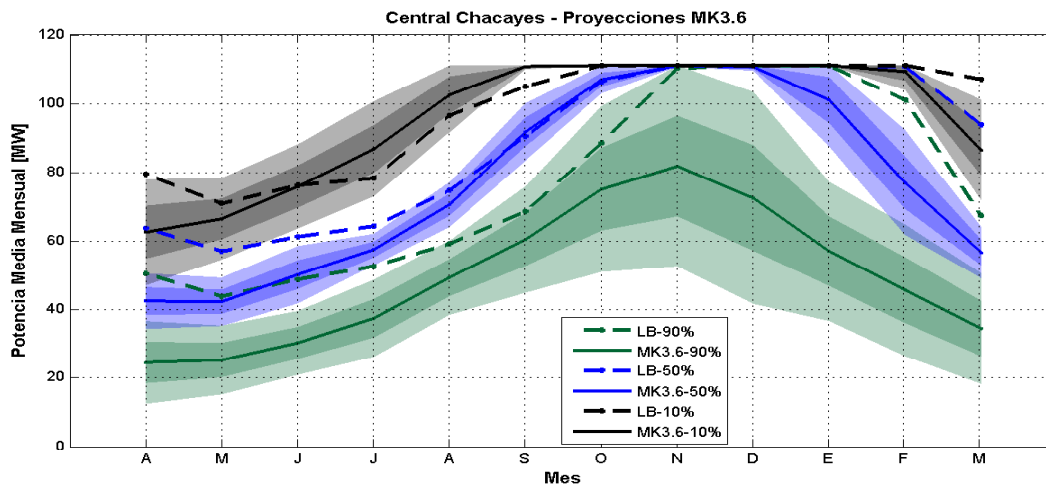


FIGURA 6-15. CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL DE POTENCIA PROYECTADA SEGUN EL ESCENARIO RCP6.0-MODELO MK3.6

Las proyecciones de caudales en probabilidades de excedencia media mantienen su valor en el periodo temprano de deshielo pero disminuyen fuertemente en los otros meses. La variabilidad que se observa en este caso es baja.

Esto no ocurre en el caso de probabilidades de excedencia altas, donde se observa un rango de incertidumbre más amplio y donde solo se observan reducciones de la potencial generación. En general en el periodo de línea base, sin importar la probabilidad de excedencia se lograba en algún mes utilizar la planta a máxima capacidad. Sin embargo, bajo las proyecciones, en el caso de años secos no se alcanza nunca un funcionamiento de la planta a plena capacidad, y todos los meses muestran disminuciones con respecto al periodo de línea base. Un caso de interés resultan las proyecciones de generación con un 90% de probabilidad de excedencia debido al gran margen de incertidumbre que presentan. Esto es una muestra de la correlación directa que se da entre la generación y el rango de caudales al cual la generación es particularmente sensible, debido a las características de los equipos.

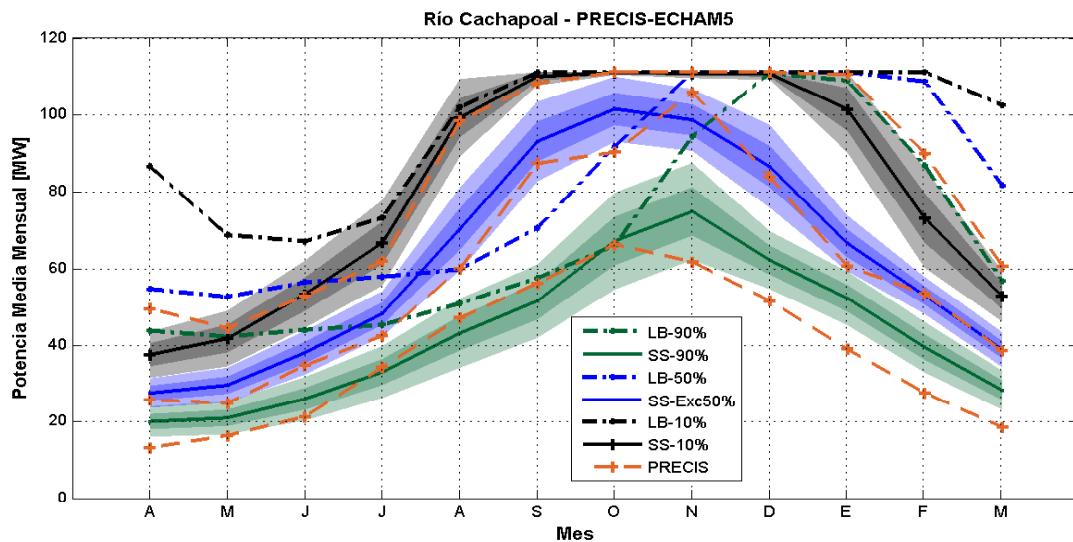


FIGURA 6-16. CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL DE POTENCIA PROYECTADA SEGÚN EL ESCENARIO A1B DEL MODELO PRECIS-ECHAM5.

Por otra parte, el escenario A1B (Figura 6-16) presenta algunas diferencias a nivel estacional con lo proyectado por el escenario RCP6.0. En el caso de los años húmedos, el comportamiento es similar y la planta funciona a capacidad completa entre Septiembre y Diciembre, pero presenta disminuciones en los otros meses, comportamiento relativamente similar al del modelo anterior. Sin embargo, para probabilidades de excedencia media, se observa un cambio importante: bajo las proyecciones de este modelo, y en estas condiciones, ya no se alcanza la máxima capacidad de generación de la planta en ninguno de los meses, aun cuando en los valores de línea base si se alcanzaba (aunque de forma más tardía). En el caso de los años secos, se observa que la diferencia con respecto a los valores proyectados por el escenario RCP6.0 no es muy alta, siendo más bien similares. Estas similitudes entre los valores de probabilidades de excedencia alto son consecuentes con lo visto en las curvas de variación estacional de los caudales, donde se apreciaba como para el escenario A1B modelo

PRECIS los caudales presentaban una variación mucho menor en comparación con los del escenario RCP6.0.

Al igual que en el caso de los caudales, se observa que las series sintéticas no logran representar totalmente el rango de la generación: en las probabilidades de excedencia baja, es decir los años húmedos, donde se proyecta un caudal menor que lo esperado por la serie original obtenida desde el escenario A1B, la generación resulta levemente menor en las series sintéticas en el periodo comprendido entre Febrero y Abril; en las probabilidades de excedencia altas, las series sintéticas tienden a sobrestimar la generación con respecto a la proyección original de la que fueron generadas.

6.3.2 MODELO COYA-PANGAL

El efecto del cambio climático sobre el modelo operacional Coya-Pangal resulta de mayor dificultad al momento del análisis, debido a que la función que transforma caudales en potencia no es una función continua como es el caso del modelo anterior. Esto se debe al planteamiento original de este modelo de operación y la solución propuesta como óptima a través de lo presentado en el punto 5.2.2. Dicho lo anterior, en este caso no corresponde analizar según probabilidades de excedencia puesto que este elemento tiene como principio básico interacciones entre dos distintas componentes que responden a las restricciones planteadas por el modelo operacional desarrollado para este conjunto y por tanto una posible potencia mayor no necesariamente responde a caudales mayores. Se presentan gráficamente los resultados de generación media de ambas centrales bajo los escenarios de línea base como de proyecciones de los distintos modelos en la Figura 6-17 y Figura 6-18, con su valores respectivos especificados en la Tabla 6-15 y la Tabla 6-16.

TABLA 6-15. POTENCIA MEDIA GENERABLE DE LA CENTRAL PANGAL.

Potencia [MW]	Escenario RCP6.0			Escenario A1B			
	LB	Futuro	Desv. Est.	LB	Futuro	SS	Desv. Est.
Abril	25.3	25.7	0.4	26.0	24.0	25.2	0.5
Mayo	25.8	25.7	0.5	26.4	24.1	25.1	0.5
Junio	25.5	25.3	0.5	26.3	25.0	26.0	0.4
Julio	25.0	24.8	0.4	26.4	25.8	26.4	0.3
Agosto	24.2	23.9	0.4	25.6	25.8	25.6	0.4
Septiembre	23.4	23.3	0.3	24.7	24.7	24.0	0.3
Octubre	22.7	23.0	0.2	23.6	24.1	23.1	0.2
Noviembre	22.7	22.9	0.2	22.8	24.1	23.0	0.2
Diciembre	22.7	23.0	0.2	22.7	24.2	23.1	0.2
Enero	22.7	23.2	0.3	22.8	24.7	24.0	0.3
Febrero	22.8	23.6	0.4	23.3	24.9	25.8	0.4
Marzo	23.6	24.7	0.5	24.5	25.2	26.6	0.3
Anual	23.9	24.1	0.4	24.6	24.7	24.8	0.3

TABLA 6-16.POTENCIA MEDIA GENERABLE DE LA CENTRAL COYA

Potencia [MW]	Escenario RCP6.0			Escenario A1B			
	LB	Futuro	Desv. Est.	LB	Futuro	SS	Desv. Est.
Abril	31.4	29.3	0.9	30.3	23.6	25.2	0.9
Mayo	31.0	29.1	0.8	30.1	23.7	25.6	0.9
Junio	31.3	30.3	0.7	30.8	26.9	28.3	0.8
Julio	31.5	31.1	0.5	31.0	29.7	30.2	0.5
Agosto	31.8	31.7	0.3	31.4	31.1	31.4	0.3
Septiembre	32.0	32.0	0.1	31.6	31.8	31.9	0.1
Octubre	32.1	32.1	0.0	31.9	31.9	32.1	0.0
Noviembre	32.1	32.1	0.0	32.1	31.9	32.1	0.0
Diciembre	32.1	32.1	0.0	32.1	31.8	32.1	0.0
Enero	32.1	32.0	0.1	32.1	31.3	32.0	0.1
Febrero	32.1	31.7	0.3	32.0	30.1	31.4	0.3
Marzo	32.0	31.1	0.7	31.6	27.4	29.2	0.6
Anual	31.8	31.2	0.4	31.4	29.3	30.1	0.4

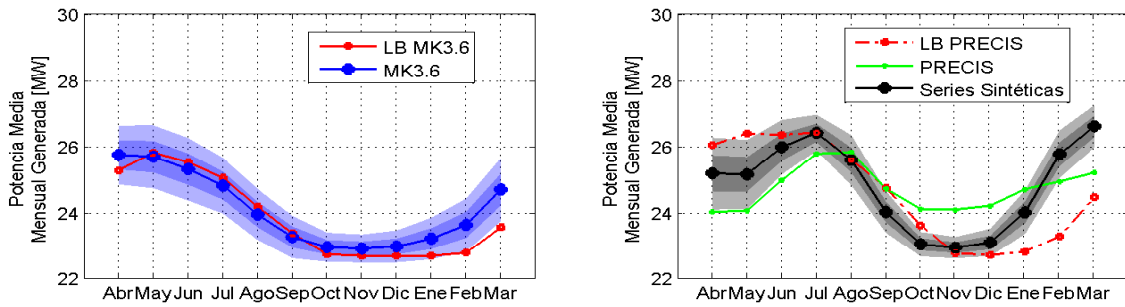


FIGURA 6-17. PROYECCIONES DE POTENCIA DE LA CENTRAL PANGAL.

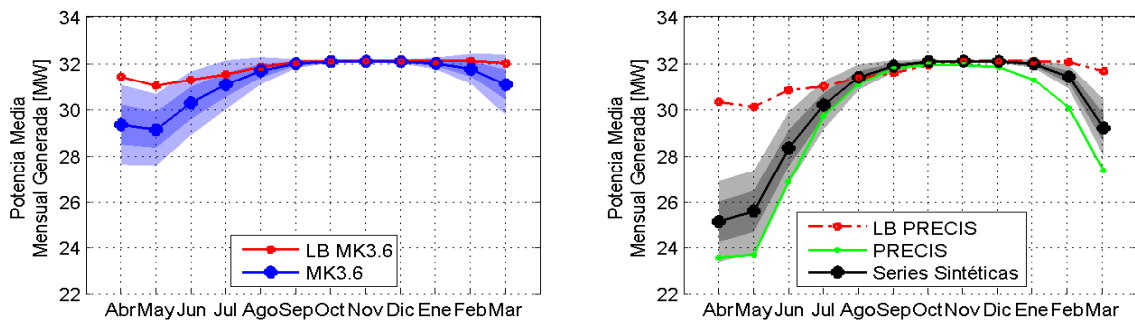


FIGURA 6-18. PROYECCIONES DE POTENCIA DE LA CENTRAL COYA.

En el caso de la central Coya, los meses de otoño resultan ser los más afectados, presentando mayores disminuciones en la generación potencial, pero no se esperan cambios significativos

en el periodo comprendido entre los meses de Septiembre a Enero. Para los otros meses los resultados tienden a mostrar una disminución, pero varían según el modelo: en el caso del escenario RCP6.0 las disminuciones son significativas solo en los meses de Abril y Mayo, donde los valores de línea base quedan fuera del margen de incertidumbre de las proyecciones mientras que en los otros queda dentro de este rango pero donde el valor de línea base representa un valor fuera del rango del 70% de seguridad. Por otro lado, las disminuciones en el caso del escenario A1B resultan más severas en la medida que las proyecciones no incorporan dentro de su margen de error al valor de línea base original en cinco de los seis meses que presentan esta tendencia.

Por otro lado, las proyecciones de generación en la central Pangal presentan comportamientos que difieren en tendencia bastante de lo observado en la central Coya y entre ellas. En general, de las proyecciones que entrega el escenario RCP6.0 es poco lo que se puede asegurar debido a que la incertidumbre de las proyecciones incorpora los valores de línea base. A pesar de esto se realizara un análisis enfocándose principalmente en la tendencia a aumentos o disminuciones según corresponda. Ambos modelos presentan en común que en los meses entre Noviembre y Marzo la generación aumenta, de manera significativa en el escenario A1B y casi completamente significativa en el escenario RCP6.0 del modelo MK3.6 ya que a pesar de encontrarse dentro del rango de incertidumbre del modelo, se encuentra al margen de este.

Fuera de este rango de meses, en la central Pangal en el escenario RCP6.0, las proyecciones presentan disminuciones o bien mantienen un valor cercano con respecto a los valores que se tienen como línea base, salvo en el mes de Abril (aunque éste no resulta concluyente debido al margen de incertidumbre). Por otro lado, las proyecciones del escenario A1B pronostica disminuciones más severas en los meses de Abril a Julio. El resto de los meses no tienen un resultado concluyente, en el marco de que se mantienen muy cercanos a los valores originales. Se observa que las proyecciones de la serie original del escenario A1B no logran ser representadas adecuadamente por los valores de potencia media generadas en función de las proyecciones de caudales que se basan en las series sintéticas, lo cual se comenta un poco más adelante en este mismo capítulo.

Se presentan gráficamente a modo referencial los resultados de energía media generable bajo los distintos escenarios en la Figura 6-19 para la central Pangal y Figura 6-20 para la central Coya. Así mismo, sus valores específicos se pueden encontrar respectivamente en las Tabla 6-17 y Tabla 6-18

TABLA 6-17. ENERGÍA TOTAL MEDIA MENSUAL GENERABLE EN LA CENTRAL PANGAL.

Energía [GWh]	Escenario RCP6.0			Escenario A1B			
	LB	Futuro	Desv. Est.	LB	Futuro	SS	Desv. Est.
Abril	18.2	18.5	0.3	18.7	17.3	18.1	0.4
Mayo	19.2	19.1	0.4	19.6	17.9	18.7	0.4
Junio	18.4	18.2	0.4	18.9	18.0	18.7	0.3
Julio	18.6	18.5	0.3	19.6	19.2	19.6	0.2
Agosto	18.0	17.8	0.3	19.0	19.2	19.0	0.3
Septiembre	16.8	16.8	0.2	17.8	17.8	17.3	0.2
Octubre	16.9	17.1	0.1	17.6	17.9	17.2	0.1
Noviembre	16.3	16.5	0.1	16.4	17.4	16.6	0.1
Diciembre	16.9	17.1	0.1	16.9	18.0	17.2	0.1
Enero	16.9	17.3	0.2	17.0	18.4	17.9	0.2
Febrero	15.3	15.9	0.3	15.7	16.7	17.3	0.3
Marzo	17.6	18.4	0.4	18.2	18.7	19.8	0.2
Total Anual	209.1	211.1	3.1	215.5	216.5	217.4	2.9

TABLA 6-18. ENERGÍA TOTAL MEDIA MENSUAL GENERABLE EN LA CENTRAL COYA.

Energía [GWh]	Escenario RCP6.0			Escenario A1B			
	LB	Futuro	Desv. Est.	LB	Futuro	SS	Desv. Est.
Abril	22.6	21.1	0.6	21.8	17.0	18.1	0.6
Mayo	23.1	21.7	0.6	22.4	17.6	19.0	0.7
Junio	22.5	21.8	0.5	22.2	19.4	20.4	0.6
Julio	23.4	23.1	0.4	23.1	22.1	22.5	0.4
Agosto	23.7	23.6	0.2	23.4	23.1	23.4	0.2
Septiembre	23.0	23.0	0.1	22.8	22.9	23.0	0.1
Octubre	23.9	23.9	0.0	23.7	23.7	23.9	0.0
Noviembre	23.1	23.1	0.0	23.1	23.0	23.1	0.0
Diciembre	23.9	23.9	0.0	23.9	23.7	23.9	0.0
Enero	23.9	23.8	0.1	23.9	23.3	23.8	0.1
Febrero	21.6	21.3	0.2	21.5	20.2	21.1	0.2
Marzo	23.8	23.1	0.5	23.5	20.4	21.7	0.4
Total Anual	278.5	273.5	3.2	275.2	256.4	263.9	3.3

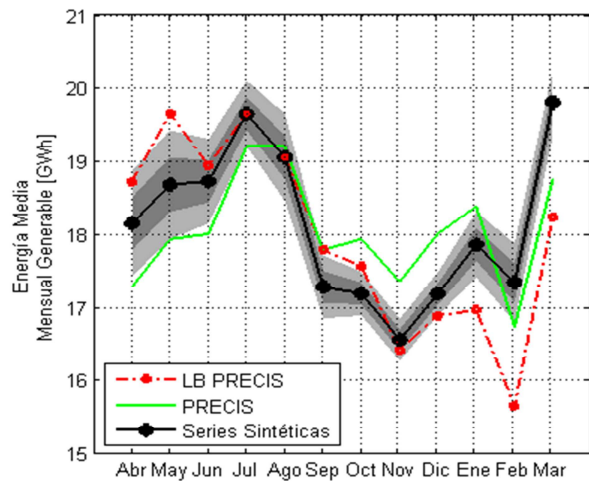
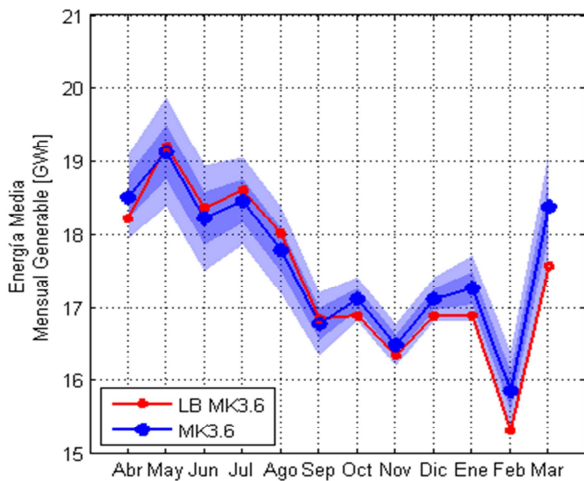


FIGURA 6-19. ENERGÍA MEDIA MENSUAL GENERABLE EN LA CENTRAL PANGAL.

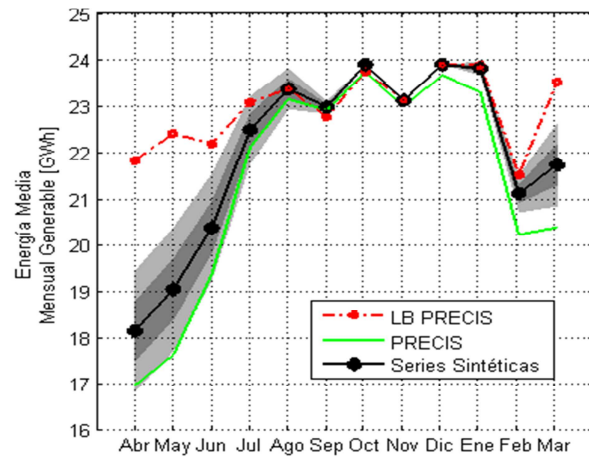
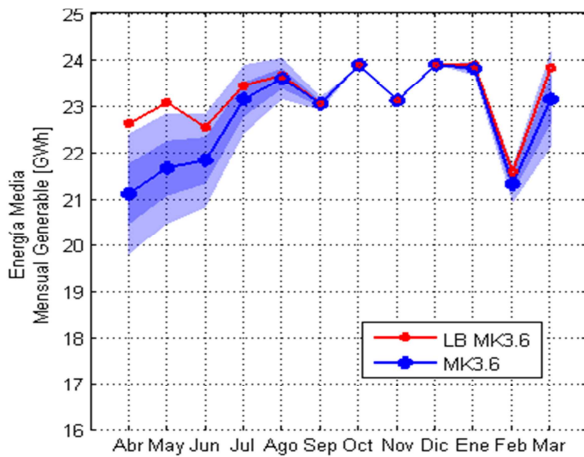


FIGURA 6-20. ENERGÍA MEDIA MENSUAL GENERABLE EN LA CENTRAL COYA.

De las proyecciones de generación de estas dos centrales, lo que más llama la atención es claramente lo que se muestra en la Figura 6-17, en la central Pangal, donde se observa un patrón de generación muy diferente entre ambos escenarios. Para poder hacer un análisis más en profundidad de las razones de este desempeño de las centrales, resulta necesaria la Figura 6-21 que representa el conjunto de soluciones que se obtienen de resolver el modelo operacional de las centrales Coya-Pangal, planteado en el punto 6.3.2 para todas las combinaciones de caudales factibles posibles de ser utilizados por los equipos de generación considerando sus limitaciones de capacidad.

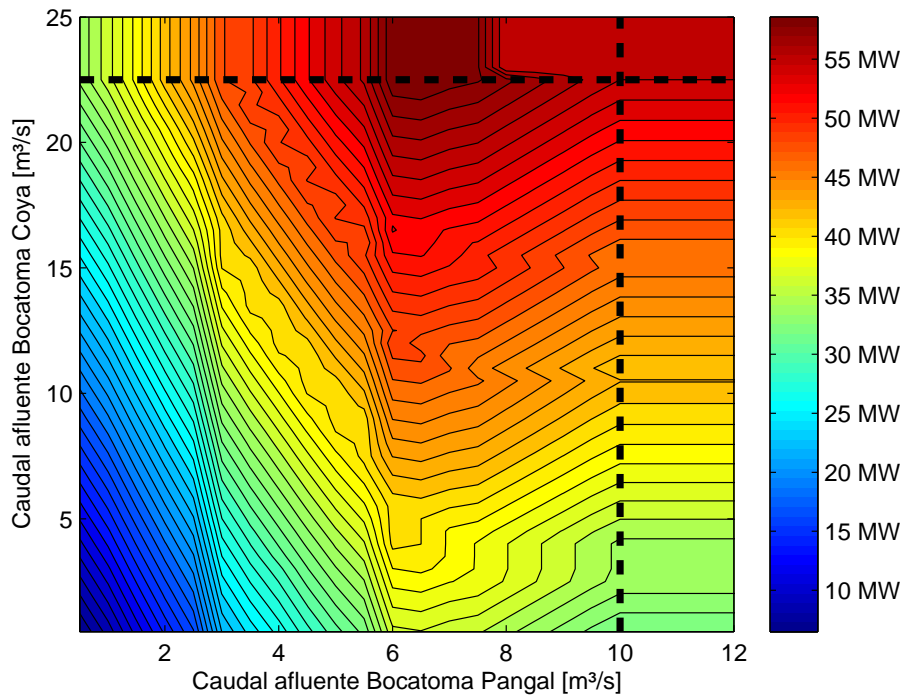


FIGURA 6-21. SOLUCIÓN GRÁFICA DEL TOTAL DE POTENCIA GENERABLE SEGÚN LA COMBINACIÓN DE CAUDALES AFLUENTES A LAS BOCATOMAS.¹⁹

En esta figura es posible observar un supuesto realizado durante el planteamiento del modelo operacional: que si bien la solución planteada por el modelo pudiese no ser la óptima en términos de generación total, sí se acerca bastante a ésta. En general, el modelo a mayores caudales presenta una mayor generación de potencia final total. Sin embargo, a medida que aumenta el caudal en la bocatoma de la Central Pangal se llega hasta un punto máximo cuando el caudal afluente es de 7 m³/s y luego comienza a descender. Este fenómeno se debe exclusivamente a la definición arbitraria de operación de la central basada en la información levantada en terreno más algunos supuestos adicionales realizados y representa gráficamente el patrón de soluciones definidas arbitrariamente como modelo operacional.

De la sección 6.2 es posible observar que los caudales afluentes a la bocatoma Coya, compuestos por la combinación de los ríos Cachapoal y Cipreses en conjunto siempre superan la capacidad de aducción según los valores obtenidos para el periodo de línea base en el reanálisis. Por otro, el rango en el que varían los caudales en la bocatoma de la central Pangal genera que se observe un mayor impacto sobre la generación, al estar comprendidos entre los valores que generan diferencias significativas. Al observar esto, y considerando las diferencias en las proyecciones de caudal expuestas en la sección 6.2.1, parece lógico que se observen tales disimilitudes, en particular al notar que en aquellos meses de mayor diferencia en el comportamiento son cuando los caudales en el río Pangal son menores, en la época de Otoño.

¹⁹ Las líneas punteadas representan los caudales máximos de aducción de cada una de las correspondientes bocatomas.

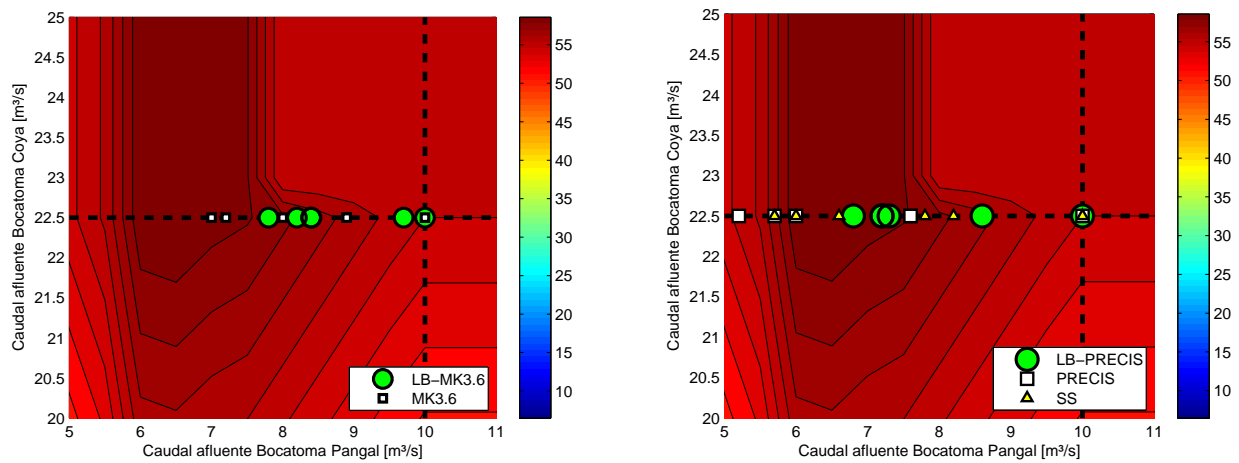


FIGURA 6-22. COMPARACIÓN DE LOS VALORES DE CAUDALES MENSUALES MEDIOS Y SU POTENCIAL GENERACIÓN.

En la Figura 6-22 se encuentran graficados y amplificados al sector correspondiente los caudales medios mensuales observados de cada uno de los escenarios, de manera referencial, ya que al analizar en esta escala temporal se generaliza los valores y se pierde el rango de variabilidad que se observa a escala diaria. Se observa claramente los resultados de lo comentado anteriormente: por un lado, el caudal medio del afluente a la bocatoma Coya se encuentra siempre en su tope; por otro lado, la variabilidad de los caudales afluentes a la bocatoma de la central Pangal generan variaciones sobre el modo en que se resuelve el problema de operación de la central, haciendo que se varíen las decisiones que se toman en cada uno de los nodos de decisión del modelo operacional plantado en el punto 5.2.2. Esto genera variaciones en el funcionamiento de cada de una de las plantas como se puede ver en la Figura 6-17 y Figura 6-18. Los caudales menores del escenario A1B del modelo PRECIS favorecen una mayor generación en la central Pangal. Adicionalmente, al considerar la gran sensibilidad que se tiene a pequeñas variaciones sobre el valor de caudal del río Pangal, se explica entonces que las variaciones de los caudales generados por las series sintéticas no logran representar bien lo que sucede con este fenómeno, en especial al considerar que presentan una variabilidad reducida con respecto a los valores medios en comparación a la serie planteada originalmente por el escenario A1B del modelo PRECIS, como se vio en la Figura 6-3.

7. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Luego del trabajo realizado y en función de los resultados obtenidos es posible obtener las siguientes conclusiones:

1. Se logran calibrar exitosamente modelos hidrológicos de las cuencas de los ríos Pangal y Cachapoal a escala diaria por medio de la utilización de WEAP, a pesar de varias dificultades principalmente de la falta de datos representativos al interior de la cuenca. La utilización de gradientes para estimar las temperaturas, precipitaciones y humedades relativas resulta una buena alternativa para solucionar este problema. Sin embargo, considerando que el modelo es altamente sensible en particular a las primeras dos variables meteorológicas nombradas, esta fase se considera un punto crítico dentro del estudio. Estos modelos suponen una herramienta efectiva para encontrar una relación entre las proyecciones de variables meteorológicas y los caudales de cada cuenca. Se acepta como una buena aproximación de los caudales del periodo futuro la estimación de éstos por medio de la utilización de los modelos hidrológicos calibrados incorporando la información meteorológica provista por los modelos globales climáticos.
2. Se observa una consecuencia entre las tendencias de las proyecciones meteorológicas descritas en la literatura para el sector en estudio, en el que se pronostican aumentos de las temperaturas medias y disminuciones de las precipitaciones y los pronósticos de los dos modelos de circulación global analizados para este trabajo bajo sus respectivos escenarios. Las temperaturas medias proyectadas para el periodo de estudio (2040-2070) presentan aumentos que varían entre 2°C y 4°C variando según el mes y modelo, siendo mayores los incrementos en el caso del escenario A1B utilizando el modelo PRECIS-ECHAM5 que en el escenario RCP6.0 del modelo MK3.6. Las precipitaciones muestran en general bajas significativas de alrededor del 20% (aun considerando los márgenes de incertidumbre) con respecto a los valores de línea base. Se cumple el objetivo de presentar escenarios de emisión similares bajo diferentes planteamientos como son las condiciones socio-económicas definidas por los SRES – escenario A2 – y las versiones más actualizadas, los Patrones de Concentración Representativo – RCP6.0 – para evaluar su impacto sobre los recursos hídricos y su aprovechamiento en la cuenca de estudio.
3. La utilización de dos modelos globales climáticos en escenarios de emisión similares – A1B/PRECIS-ECHAM5 y RCP6.0/MK3.6 - para realizar proyecciones futuras entrega una mayor consistencia a los resultados, al incorporar información de diferentes maneras y así reducir la incertidumbre debido a variables no consideradas en los planteamientos de cada uno de ellos: el modelo PRECIS-ECHAM5 permite incorporar de manera indirecta información a una escala más detallada de la topografía al trabajar en una escala espacial más fina, mientras que el modelo MK3.6 incorpora dentro de sus planteamientos físicos procesos más complejos como los de química atmosférica. Al mismo tiempo, el hecho de tener puntos de comparación permite evaluar el efecto de las limitaciones de cada uno de los modelos: en el caso del modelo PRECIS esto corresponde a una mala representación de la estacionalidad de las precipitaciones

mientras; en el MK3.6 su principal debilidad es la baja resolución espacial a la que entrega los resultados, lo cual es un punto a considerar si es que se toma en cuenta el particular relieve del territorio nacional.

4. Se definen dos metodologías que permiten evaluar el rango de incertidumbre de las proyecciones realizadas, una por cada uno de los modelos que se utilizan. En el caso del modelo PRECIS, se desarrolla una aproximación estocástica a través de la creación de series sintéticas en base a los valores de las proyecciones, lo que permite tener un rango de error asociada la única proyección disponible; en el caso del modelo MK3.6 la proyección del margen de incertidumbre surge de la utilización de las diversas series de variables meteorológicas que se tienen como insumo producto de múltiples simulaciones del modelo con diferentes condiciones de inicio. Es importante destacar que si bien ambas metodologías entregan rangos de incertidumbre comparables para las proyecciones tanto de caudales como de potencia, los fundamentos de cada una son diferentes: mientras que la primero es producto de una metodología estocástica que resulta práctica ante el contexto de carecer de mayor información para realizar análisis más complejos, la segunda tiene su base en los procesos físicos que sustentan el modelo y por tanto presentan un escenario más comprensivo, al representar las relaciones entre las variables de una manera física y no empírica como la primera.

De la utilización conjunta de las proyecciones de variables meteorológicas, los modelos hidrológicos y los modelos operacionales, es posible concluir lo siguiente:

1. El régimen hidrológico de las cuencas se mantiene en su condición inicial de tipo nival, aunque en todos los casos se puede observar un adelantamiento de la fecha en que ocurren los caudales máximos de cada año hidrológico. Esta tendencia se puede observar en las proyecciones realizadas por las dos proyecciones meteorológicas diferentes y en las tres cuencas con resultados significativos aun al incorporar el margen de incertidumbre calculado tanto por el rango de series provenientes del modelo MK3.6 como por la proyección del escenario A1B del modelo PRECIS-ECHAM5.
2. Los caudales medios proyectados para el periodo 2040-2070 en general disminuyen con respecto a los valores de línea base, principalmente por las disminuciones en las precipitaciones en el periodo futuro, lo cual se observa en las proyecciones de ambos escenarios planteados por sus respectivos modelos, aunque en el caso del escenario A1B se tiene también una disminución adicional debido a los procesos evaporativos que suceden al interior de la cuenca, lo que se traduce en reducciones aún más drásticas de los caudales, fenómeno que no se observa en el escenario RCP6.0. Una excepción a esta reducción la constituyen en algunos casos los meses de primavera donde, influenciados por el aumento de las temperaturas medias que producen un adelantamiento de la época de deshielos, los caudales se mantienen en el rango de los valores de línea base o incluso en algunos casos aumentan un poco. Sin embargo, debido a esto y a la mezcla entre el ascenso de la isoterma cero y una menor cantidad de precipitación los mayores efectos a nivel de disminución de caudal se observan en los meses de verano, donde los caudales se reducen en promedio a la mitad con respecto al valor de línea base. Comparando las proyecciones realizadas por los dos modelos de circulación global, se

observa consecuencia entre las tendencias, así como también en las disminuciones a nivel porcentual, siendo estas en general un poco mayores en el escenario RCP6.0 del modelo PRECIS-ECHAM5 que en el escenario A1B del modelo MK3.6.

3. La variabilidad de las caudales en los periodos futuros se ve altamente disminuida con respecto a lo que se observa en el periodo de línea base. Esto, sumado al punto anterior, apunta a una disminución generalizada de los caudales, no tan solo a nivel de caudal anual sino en la variabilidad que tiene este parámetro, lo cual indica años en general más secos. Otro punto a considerar en esto es la alteración de las cuencas en su capacidad de almacenamiento de agua a través de nieve, ya que esta última presenta valores mucho menores producto de una menor proporción de lluvia cayendo en forma sólida.
4. El análisis de incertidumbre de las proyecciones resulta positivo en el caso de la metodología realizada para escenario RCP6.0 planteado por el modelo MK3.6 a través de la utilización de múltiples simulaciones obtenidas directamente desde la utilización de este último bajo diversas condiciones iniciales. Este procedimiento entrega un margen de error de las proyecciones con fundamentos robustos, al basarse en los procesos físicos que se plantean como ejes directores del modelo y que a través de múltiples simulaciones permite analizar la incertidumbre inherente a la utilización misma del modelo. Por otro lado, la utilización de series sintéticas generadas de forma estocástica para generar una banda de incertidumbre para el escenario A1B planteado por el modelo PRECIS-ECHAM5 resulta en valores poco confiables, que si bien logra representar adecuadamente los valores medios esperados de las series de caudales, no consigue reproducir la variabilidad de la serie original, disminuyendo su rango de variabilidad. Esto resulta perjudicial ya que esta reducción en el rango de los valores no permite una correcta evaluación sobre el impacto que se tiene sobre la variación de potencia generable debido a los efectos del cambio climático.
5. En base al comentario anterior, una sugerencia para próximos trabajos que decidieran abordar el tema de la incertidumbre de proyecciones climatológicas es la utilización de múltiples Modelos de Circulación Global, los cuales presenten diversas series equiprobables para un mismo escenario, como es el caso del modelo MK3.6. Si bien estos modelos presentan una escala geográficamente mucho mayor que las áreas de estudio en general, existen metodologías de trabajo que permiten abordar esta problemática de maneras aceptables – como por ejemplo el escalamiento espacial realizado en este trabajo -y que evitarían abordar el tema de la incertidumbre desde un enfoque estocástico como el utilizado en este trabajo.
6. El modelo operacional de la central Chacayes representa de manera adecuada el comportamiento operacional esperado para este tipo de central bajo el marco de funcionamiento del mercado eléctrico de Chile. Las proyecciones de generación para la central Chacayes muestran una disminución consecuente con las variaciones de los caudales que la alimentan, alterando la distribución referencial del periodo de línea base. Si bien en general el efecto de la disminución de los caudales tiene consecuencias negativas, en aquellos meses en que se modelan aumentos estos resultan de gran ayuda para compensar debido a que permiten aprovechar los equipos de generación de mejor

manera al acercar el caudal disponible al de diseño de la planta. Una observación que hacer es que, si bien no fueron abordadas dentro de este trabajo debido a los supuestos del modelo operacional planteado para esta central, los planes de mantenimiento de los equipos debiesen ser cambiados a periodos donde el tener que sacar de funcionamiento alguno de los equipos de generación tuviese el menor de los efectos, considerando los escenarios alterados de generación con respecto a lo observado en el periodo de línea base.

7. Las proyecciones de generación para el conjunto de las centrales Coya-Pangal resultan difíciles de analizar debido a las complicadas relaciones que se dan en su funcionamiento y al planteamiento del modelo operacional. A pesar de esto, es posible ver una tendencia a la disminución de la potencia generable en el periodo futuro en ambos modelos, a pesar de presentar algunos meses cuyos valores apuntan a proyecciones de aumento. Sin embargo, este análisis se basa en un modelo operacional que tiene como fundamento condiciones hidrológicas actuales que se asumen invariantes y cuya solución representa una solución local en ese contexto. Sin embargo, existe además la dificultad adicional de que resulta difícil evaluar el impacto del cambio climático sobre las variaciones de potencia generable en comparación al periodo de línea base, ya que los caudales que se observan son en general en el caso de la bocatoma de la central Coya mucho mayores, aun considerando las disminuciones proyectadas de los caudales.
8. Al observar los resultados de las proyecciones, surge inmediatamente una reflexión sobre los potenciales cambios generales asociados a la variación en la disponibilidad de los recursos hídricos sobre infraestructura y como se usa actualmente al agua en nuestra sociedad. En este caso de estudio, donde se trata de generación hidroeléctrica y al ver las proyecciones de crecimiento del país fijan como una de las grandes fuentes de energía la energía hidráulica, cabe preguntarse si es que actualmente se está considerando con la suficiente seriedad y alcance de miras las dificultades asociadas al cambio climático. Un ejemplo de esto es la manera en que se desarrollan actualmente los proyectos hidrológicos, que se basan en el registro histórico hidrológico desde el cual se diseñan las características de éstos, y cuyos valores dependen directamente en muchos casos de los recursos hídricos disponibles (en estudio, un buen ejemplo resulta el caudal de diseño de la planta). Dadas las alteraciones proyectadas en el sistema, las condiciones de estacionareidad sobre las que se basa el desarrollo del proyecto resultan falsas y podrían terminar en valores que quizás resulten adecuados para una situación invariante pero no para un sistema alterado como el que se proyecta desde diferentes fuentes. Esto, como se ve en este estudio, puede resultar en condiciones de sobredimensionamiento y donde difícilmente se logra aprovechar al máximo las capacidades de generación del equipo debido a que las condiciones para las cuales fueron calculadas dentro de un tiempo más verán su posibilidad de ocurrencia cada vez más disminuida. Sin embargo, para considerar estas variaciones de las condiciones hidrológicas, sería necesario reevaluar el periodo en el que se realizan las proyecciones, ya que económicamente este tipo de proyectos se suelen a evaluar a un plazo de 30 años, y por lo tanto un horizonte de mediano plazo como el utilizado no resultaría efectivo.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. ,1998, Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 92-5-104219-5.

Brown, E., Vargas, X., Salas, J.P., 1983, Selección de modelos ARIMA para series de tiempo hidrológicas,

Caskey, James E., 1967, A markov chain model for the probability of precipitation occurrence in intervals of various length, *Monthly Weather Review* 95:298-301

Collier M.A., Jeffrey S.J., Rotstayn L.D., Wong K.K-H., Dravitzki S. M. , Moeseneder C., Hamalainen C., Syktus J.I., Suppiah R., Antony J., El Zein A., Atif M., 2011, The CSIRO-Mk3.6.0 Atmosphere-Ocean GCM: participation in CMIP5 and data publication, 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, Australia, 12–16 December 2011, <http://mssanz.org.au/modsim2011>

CONAMA, 2007, Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI.

Cortés G., 2010, Evaluación de un modelo hidrológico semi distribuido para la estimación de la escorrentía de deshielo en el río Juncal, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

DGF (Departamento de Geofísica, Universidad de Chile), 2012, El explorador eólico. Descripción y Manual de Uso. <http://ernc.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/info/Documentacion_Explorador_Eolico_V2_Full.pdf>

DNP (Dirección Nacional de Planeamiento), 2006, Informe de síntesis de regional, VI región del libertador Bernardo O'Higgins.

DGA (Dirección General de Aguas), 2005, 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.

DMC (Dirección Meteorológica de Chile), 2006, Climas de Chile, Sexta región. <http://www.meteochile.gob.cl/climas/climas_sexta_region.html>

Falvey y Garreaud, 2009, Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006), *J.Geophys. Res.*, 114, D04102, doi:10.1029/2008WR006802

Figueroa R., 2008, Efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos anivel de cuenca – Implementación de un modelo integrado a nivel superficial y subterráneo. *Tesis para optar al grado de magister en ciencias de la ingeniería.*

Gordon, H.B., O'Farrel S.I, Collier M., Dix M., Rotstayn L., Kowalczyk E., Hirst T., Watterson I., 2010, The CSIRO Mk3.5 Climate Model. CAWCR Technical Report No. 21, 74pp.

Hatch Ltd., 2012, Chacayes Hydroelectric Project – Independent Engineer's Report on Hydrology and Energy Generation.

Hedison B.C., Crane R.G., 1996, Climate downscaling: techniques and application, *Climate Research* 7 85-95, 1996

IPCC (Panel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático), 2007, Cuarto informe de evaluación del Cambio Climático, <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf>.

Krause P., 2005, Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97, 2005

Lagos, M.A., Vargas, X. (2009). Vulnerabilidad de los recursos hídricos afluentes al Embalse El Yeso. XIX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.

Mardones, G., 2009, Implementación y uso del modelo WEAP en cuencas nivales de la IV región para el análisis del cambio climático. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile*.

Max-Planck Institute fur Meteorologie, 2003, The atmospheric general circulation model ECHAM5, Model Description <http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/publikationen/Reports/max_scirep_349.pdf>

Mena, D., 2009, Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca andina del Rio Teno usando el modelo WEAP. *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile*.

MMA, (Ministerio del Medio Ambiente), 2011, Segunda Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático.

Moss, R. H., Edmonds, J.A. Hibbard, K.A. Manning, M.R. Rose, S.K. van Vuuren, D.P. Carter, T.R. Emori, S. Kainuma, M. Kram, T., Meehl, G. A., Mitchell, J. F. B. Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S. J., Stouffer, R. J., Thomson, A. M., Weyant J. P. & Wilbanks, T. J. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature* 463, 747–756.

Muñoz, M., 2008, Simulación de los rasgos climáticos en el sector de Sudamérica Pacífico Sureste en modelos globales acoplados, *Postulación al título de Meteorólogo, Universidad de Valparaíso*.

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Yong Jung, T., Kram, T., Lebre La Rovere, E., Michaelis, L., Mori S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher H., Price L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor N., Dadi, Z., 2000, Special Report

on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, U.K., 599 pp.

Parrot, P., 1988, Experimentación modelos tipo ARIMA en el pronóstico de series de caudales y precipitaciones, *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile*.

Rackso P., Szeidl L., Semenov M.A., 1991, A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling*, 57 :27-41

Rosenzweig C., Karoly D., Vicarelli M., Neofotis P., Wu Q., Casassa G., Menzel A., Root T.L., Estrella N., Seguin B., Tryjanowski P., Liu C., Rawlins S. & Imeson A. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change, *Nature* 453, 353-357 (15 May 2008) | doi:10.1038/nature06937; Received 28 January 2008; Accepted 19 March 2008

Salgado, B., 2011, Disponibilidad y Demanda Futura del Recurso Hídrico. Análisis del Escenario A2 en una Cuenca Agrícola de la VI Región, *Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile*.

SEI, 2010, WEAP user manual. <http://weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf>

Semenov M., Brooks R., Barrow E., Richardson C., 1998, Comparison of the WGEN and LARS stochastic weather generators for diverse climates, *Climate Research*, Vol.10: 95-107, 1998

Taylor K., Stouffer R., Meehl G. et al, 2009, A Summary of the CMIP5 Experiment Design.

Turner, J., Connolley, W.M., Lachtan-Cope, T.A., Marshall, G.J., 2005, The performance of the Hadley Centre Climate Model in high southern latitudes, *International Journal of Climatology* 26, pp. 91-112.

Vicuña S., Garreaud R. D., McPhee J., 2010, Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile, *Climatic Change* DOI 10.1007/s10584-010-9888-4

Xu, C., ,2002, Textbook of Hydrologic Models. Universidad de Upsala, Departamento de Ciencias de la Tierra, Hidrología. <<http://folk.uio.no/chongyux/textbook1.htm>>

Santer B.D., Taylor K. E., Wigley T. M. L., Penner J. E., Jones P. D., Cubasch U., 1995, Towards the detection and attribution of an anthropogenic effect on climate *Climate Dynamics* (1995) 12: 77–100 q Springer-Verlag 1995

Young, C. A., Escobar-Arias, M., Fernandes, M., Joyce, B., Kiparsky, M. , Mount, J.F., Mehta,V.L., Purkey, D., Viers, J.H., and Yates, D. (2009). Modelling the Hydrology of Climate Change in California's Sierra Nevada for Subwatershed Scale Adaptation. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 45(6):1409-1423. DOI: 10.1111 / j.1752-1688.2009.00375.x

ANEXOS

A. ECUACIONES DEL MODELO WEAP

$$Precipitación\ Efectiva = P_i * M_C + M_i$$

ECUACIÓN A-1

Donde P_i corresponde la precipitación en el paso de tiempo i ; M_C y M_i son términos que corresponden al derretimiento de nieve, que se definen en las ecuaciones 8 y 9.

$$M_C = \begin{cases} 0 & \text{si } T_i < T_S \\ 1 & \text{si } T_i > T_d \\ \frac{T_i - T_S}{T_d - T_S} & \text{si } T_S < T_i < T_d \end{cases}$$

ECUACIÓN A-2

Donde T_i corresponde a la temperatura de derretimiento, T_S corresponde a la temperatura de congelamiento y T_D corresponde a la temperatura de derretimiento.

$$M_i = \min(AC_i * M_C, Em)$$

ECUACIÓN A-3

E_m es la energía disponible para derretimiento convertida en un equivalente de profundidad/tiempo (ecuación 10). AC_i corresponde al acumulación de nieve en el periodo de tiempo i .

$$Em = R_{Net} + E_{other}$$

E_{other} representa parámetros energéticos agrupados en un solo término (Young et al, 2009), y R_{Net} representa la radiación neta sobre las captaciones de acuerdo a la latitud y al día del año, la cual es automáticamente calculada por el modelo.

ECUACIÓN A-4

$$E_{other} = R_{netO} * (Cloudiness\ Fraction)$$

Donde R_{netO} es un ponderador a calibrar (planteado en la ECUACIÓN 2-4) y $Cloudiness\ Fraction$ corresponde a las horas del día libre de nubes, 0 completamente nublado y 1 totalmente despejado.

ECUACIÓN A-5

$$AC_i = AC_{(i-1)} + (1 - M_i) * P_i - M_{(i-1)}$$

ECUACIÓN A-6

$$Escorrentía\ Superficial = (Precipitación\ Efectiva + Irrigación) * Z_1^{RRF}$$

ECUACIÓN A-7

La escorrentía superficial (ES) ocurre a partir de la precipitación

efectiva y la irrigación (la última es o en todo este trabajo), y depende de la humedad que tenga la primera capa de suelo.

$$\text{Escorrentía directa} = \text{Ocurre sólo si } Z_1 > 100\% \quad \text{ECUACIÓN A-8}$$

La escorrentía directa ocurre cuando se sobrepasa el 100% de humedad en la primera capa de suelo.

$$\text{Flujo subsuperficial} = (RZC * PFD) * Z_1^2 \quad \text{ECUACIÓN A-9}$$

Se calcula utilizando el cuadrado del porcentaje de humedad de la primera capa de suelo (Z_1), y es directamente proporcional a la conductividad de esa capa (RZC) y al porcentaje de flujo que va desde la capa superior a la inferior (PFD).

$$\text{Percolación} = (RZC * (1 - PFD)) * Z_1^{SSRC_1} \quad \text{ECUACIÓN A-10}$$

La percolación desde la primera capa de suelo a la profunda se calcula a partir de la conductividad de la primera y al porcentaje de flujo asignado a la segunda.

$$\text{Flujo base} = DC * Z_2^2 \quad \text{ECUACIÓN A-11}$$

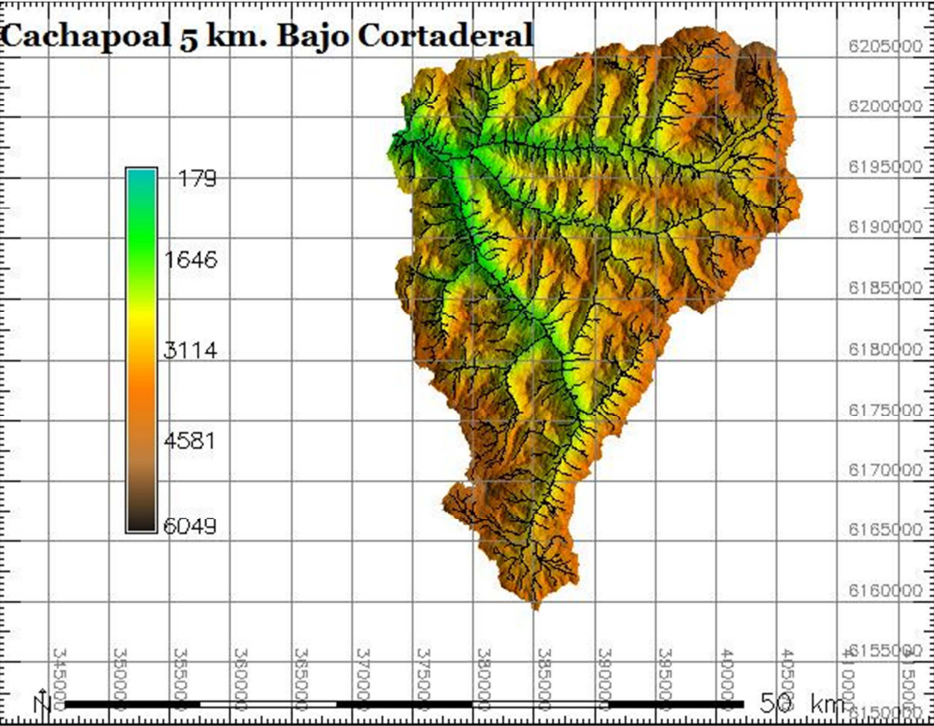
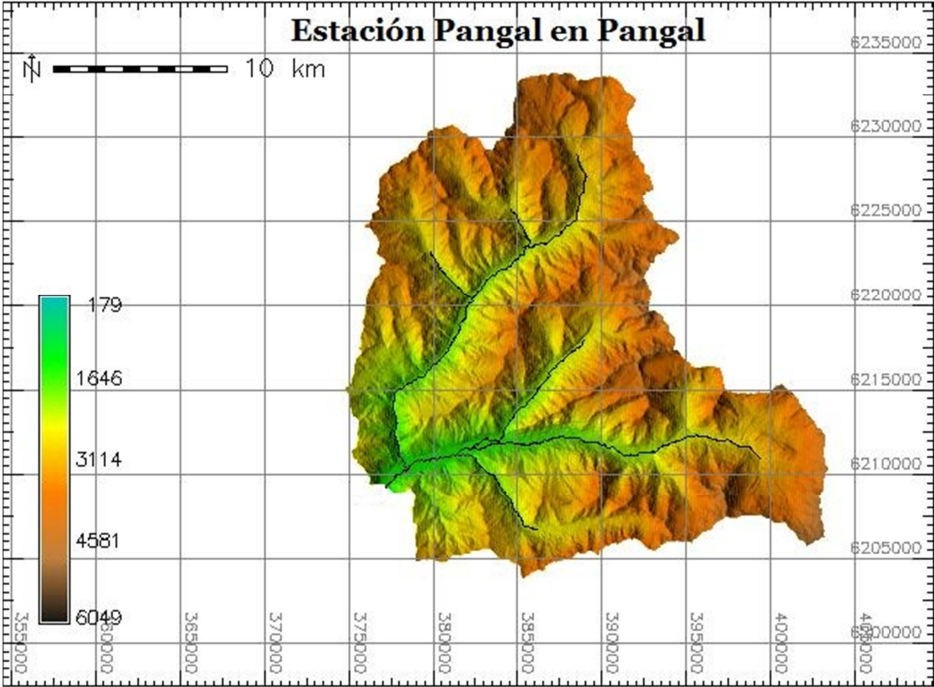
El flujo base (FB) tiene una dependencia similar al flujo subsuperficial, siendo calculado con el cuadrado del porcentaje de humedad de la segunda capa y directamente proporcional a la conductividad de ésta.

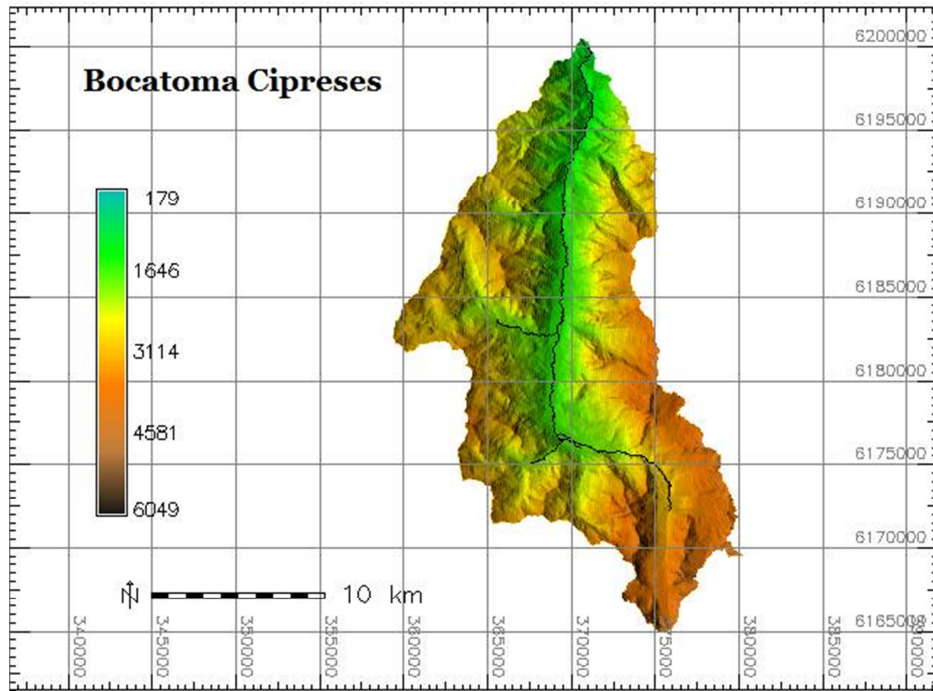
$$\text{Evapotranspiración} = PET * \frac{5 * Z_1 - 2 * Z_1^2}{3} \quad \text{ECUACIÓN A-12}$$

PET corresponde a la ecuación de Penman-Monteith utilizada por la FAO (Allen et al., 1998) para calcular evapotranspiración y utiliza la humedad relativa y el viento observados o estimados en el área.

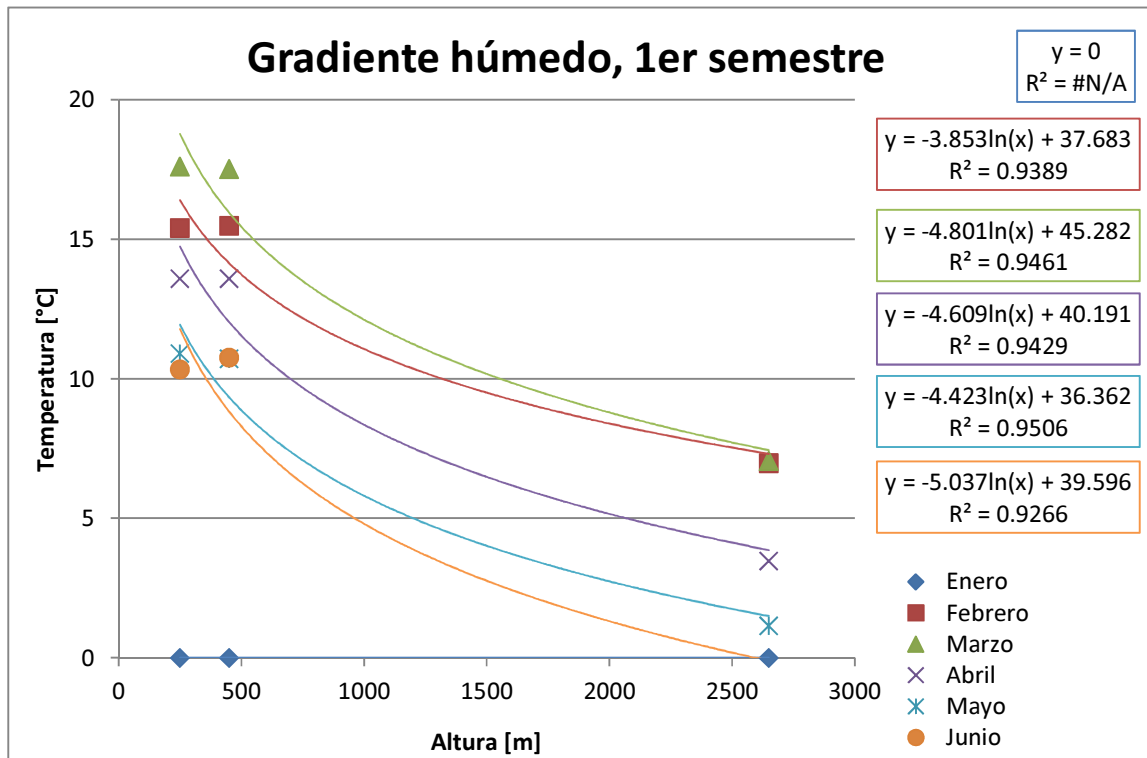
$$\begin{aligned} \text{Aporte total de cada área} \\ = \text{Esc. superficial} + \text{Esc. directa} \\ + \text{Flujo subsuperficial} + \text{Flujo base} \end{aligned} \quad \text{ECUACIÓN A-13}$$

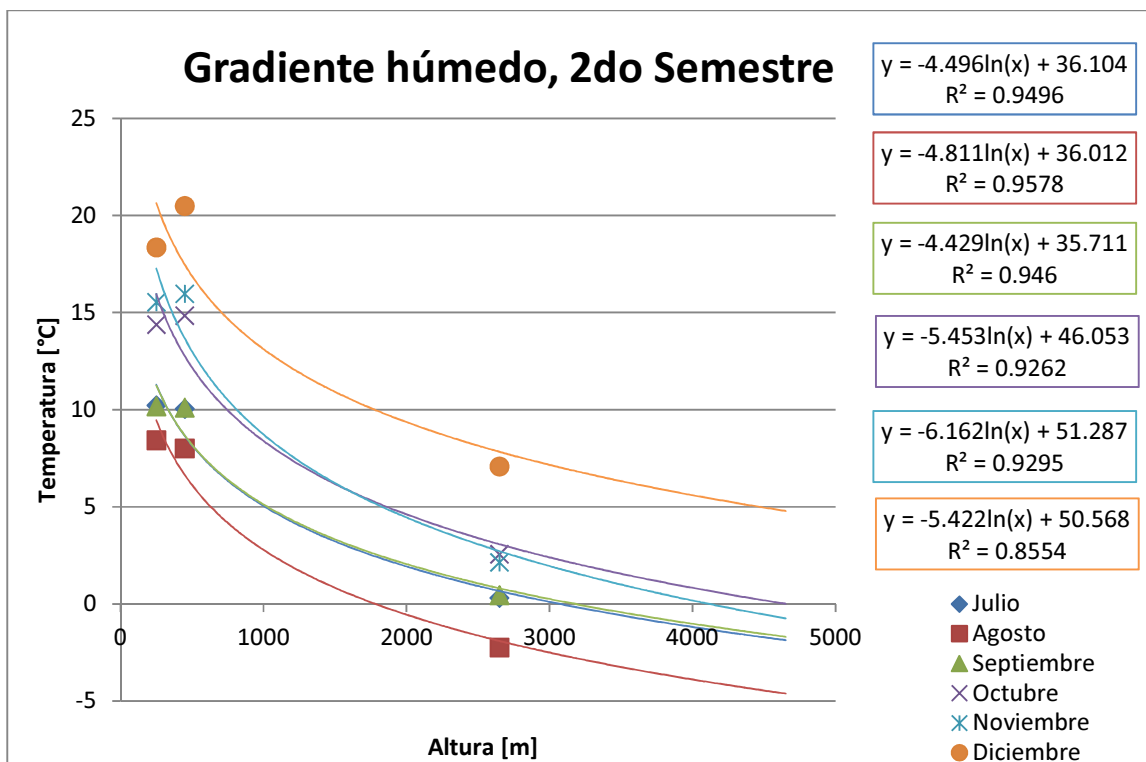
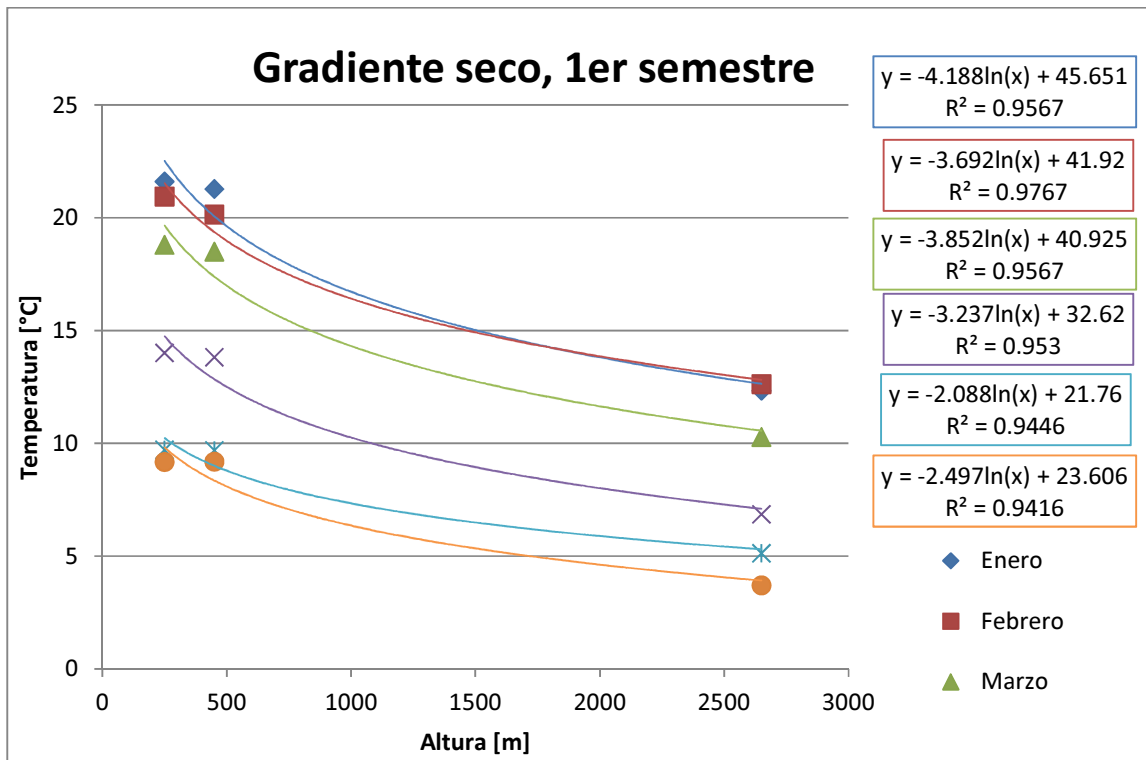
B. DELIMITACIÓN DE CUENCA MEDIANTE MODELOS DE ELEVACIÓN DIGITAL.

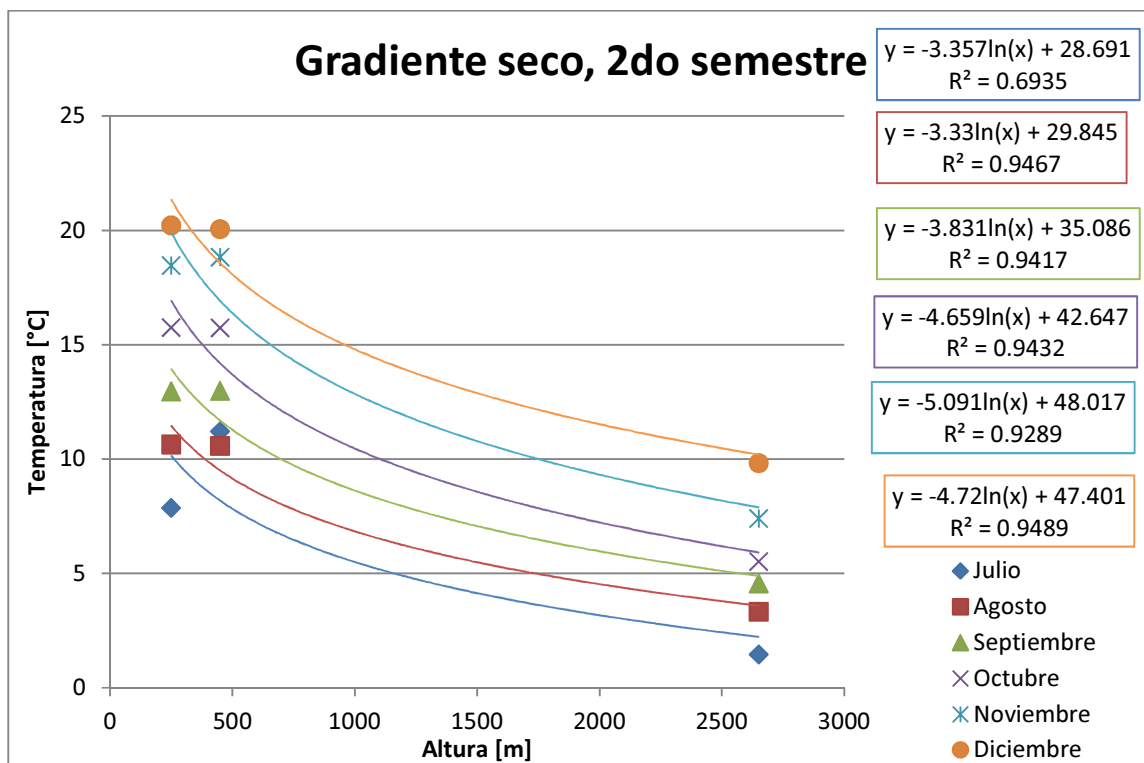




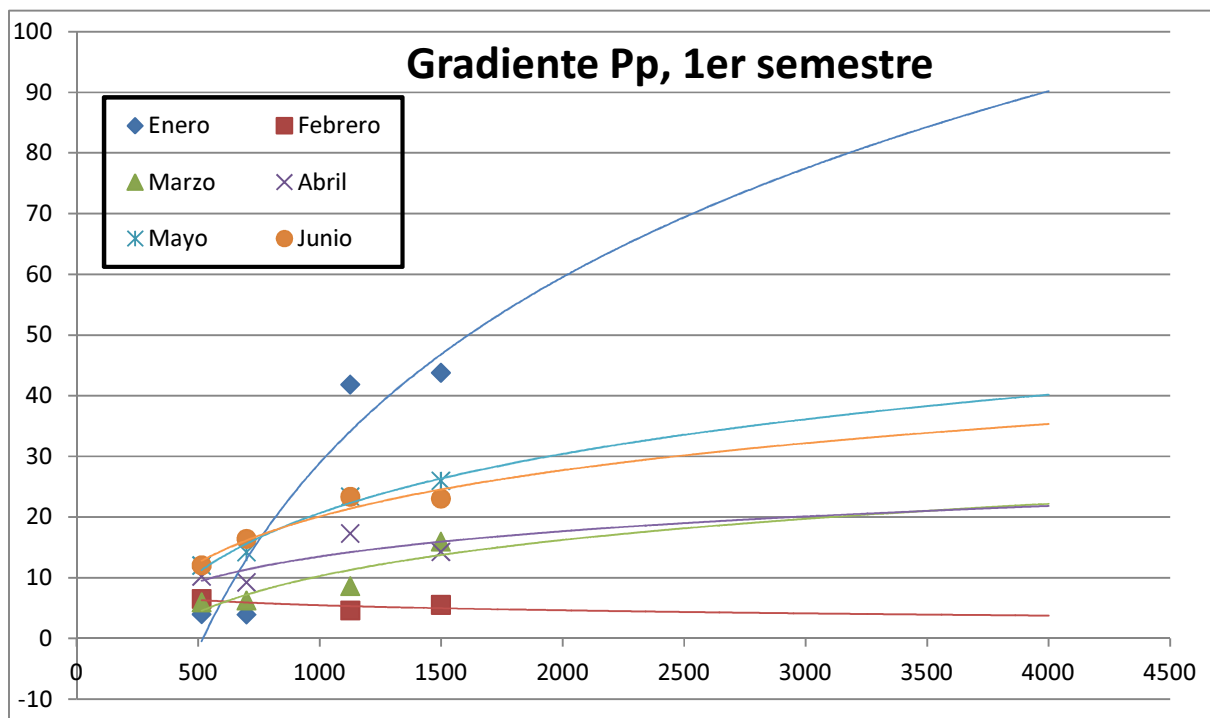
C. GRADIENTES DE TEMPERATURAS

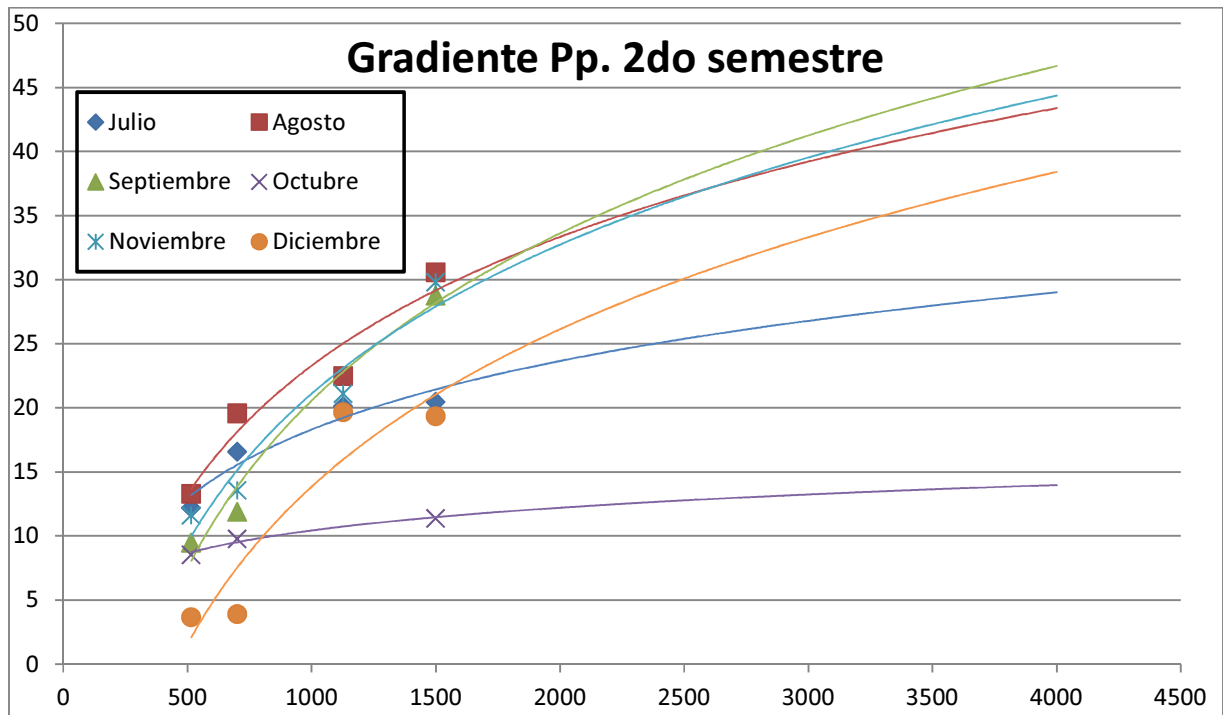






D. GRADIENTES DE PRECIPITACIONES





Mes	m	c	R ²	Mes	m	c	R ²
Enero	44.222	-276.6	0.8862	Julio	7.719	-35.013	0.9162
Febrero	-1.236	14.019	0.5161	Agosto	14.49	-76.803	0.9311
Marzo	8.5901	-49.07	0.7717	Septiembre	18.824	-109.47	0.9721
Abril	6.0083	-28.008	0.5917	Octubre	2.5577	-7.2327	0.9725
Mayo	14.091	-76.696	0.9742	Noviembre	16.768	-94.722	0.9379
Junio	10.996	-55.864	0.9271	Diciembre	17.712	-108.5	0.8696
$y = m * \ln(x) + c$							

TABLA D-1. COEFICIENTES DE GRADIENTE DE PRECIPITACIONES

E. VALORES DE CAUDALES OBTENIDOS DE LAS PROYECCIONES
 TABLA E-1. CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN LINEA BASE DE RÍO PANGAL BAJO MODELO MK3.6

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Año
1971/72	12.2	9.5	8.1	9	10.3	14.5	25.3	46.1	68.8	67.2	34.1	18	26.9
1972/73	10.1	10.3	10.2	10.1	11.3	14.6	22.9	33.7	35.4	24.5	16.7	11.9	17.6
1973/74	8.1	7.8	8.2	9	11.3	17.5	23.4	48.7	87.2	70.8	34.3	18.8	28.8
1974/75	10.8	10.7	12.9	12.2	14.3	16.4	23.1	31.4	79	124.7	102.6	39.2	39.8
1975/76	18.1	17.2	16.2	15.6	16.5	17.4	22	45.6	71.6	43.9	27.4	17.4	27.4
1976/77	11.8	10.5	10.4	10.6	11.3	15.5	21.7	33.2	67.1	57.5	30.3	17.2	24.8
1977/78	10.5	9.7	9.3	9.5	10.4	12.2	17.1	38.5	77.1	52	28.8	16.1	24.3
1978/79	9.8	8.8	9.3	10.2	11.8	15.2	25.4	39.7	40.2	25.9	17.6	11.6	18.8
1979/80	8	8.6	9.2	9.3	10.3	12.4	19.3	38.4	57.4	33.9	21.4	14.1	20.2
1980/81	10.8	9.7	9.8	10.5	11.4	12.9	22	36.5	50.9	31	20	13.2	19.9
1981/82	8.6	7.1	6.7	6.7	6.9	8.2	12.5	20.3	25.1	17.4	11.9	8	11.6
1982/83	6.1	6.3	7.3	7.3	8.5	10.7	16.8	34.8	56.6	41.7	30.6	17.7	20.4
1983/84	9.3	8.4	8.4	8.9	10.1	11.4	19	33.1	36.1	25.4	18.8	13.4	16.9
1984/85	8.5	7.7	7.9	7.9	9.1	11.4	19.5	37.2	62.2	49.7	27	15	21.9
1985/86	8.9	9.9	10	9.9	11	13.6	19.3	36.9	65.9	44.5	25.6	14.9	22.5
1986/87	9.6	9.3	10.5	10.3	11.2	14.2	16.8	21.1	21.3	15.9	11.8	9.1	13.4
1987/88	7.6	7.8	8	8.7	10	12.4	17.7	38.2	45.9	27.4	17.8	11.5	17.8
1988/89	7.6	6.8	6.9	7	7.7	9	15	27.6	31.7	20.5	13.9	9	13.6
1989/90	6.1	6.2	6.2	6.3	6.9	8.7	13.9	23.3	21.9	17.5	12.7	8.4	11.5
1990/91	5.9	5.1	5	5.1	5.4	7.2	10.3	30	40.8	24.3	14.9	9.7	13.7
1991/92	5.8	4.7	4.7	4.9	5.8	8	15.3	21.2	17.5	12.6	9	6.2	9.6
1992/93	4.6	4.3	4.7	4.9	5.9	7.5	12.5	26.8	57.6	61.4	29.4	15.5	19.6
1993/94	9.3	7.5	9.1	9.1	11.8	13.8	19.3	33	32.4	21.6	14.7	10.6	16
1994/95	8.3	7.6	8.4	8.3	9.5	11.8	16.7	25.2	49.8	33.3	20.4	12.3	17.6
1995/96	7.7	6.3	6.3	6.3	7	8.4	14	29.6	44.8	26.9	17	10.5	15.4
1996/97	7.3	6.7	6.5	6.7	7.5	10.1	14.1	19.4	16.8	12.4	9.2	6.9	10.3
1997/98	5.3	5.6	6.1	6.4	7.5	11	19	24.2	20.7	24.8	17.3	11	13.3
1998/99	7.3	6.8	8.5	8.2	8.6	9.5	13.6	29.9	52.6	40.4	28	15	19.1
1999/0	9.1	7.6	7.6	7.8	8.7	10.9	16.8	44	67.2	42.7	25.7	14.5	21.9
2000/1	8.7	8.1	8.6	9.3	10.8	14.8	25.3	35.1	44.8	34.3	21	12.8	19.5
2001/2	8.3	9.6	11	10.6	13.1	18.5	29.2	45.6	57.7	36.6	23.3	14.4	23.2
2002/3	9.7	8.6	10.4	9.8	11.7	14.1	18.4	31.4	68	48.4	27.1	15.7	22.8
2003/4	9.5	8.1	8.9	9.5	10.2	12.8	20.7	25	20.6	15.3	11.4	8.3	13.4
2004/5	7.1	6.3	6.3	6.7	8.4	11.5	17.2	21.4	18.8	13.6	10	7.3	11.2
2005/6	5.9	6.5	7.2	7.8	10.1	12.6	16	28.9	52.7	34.9	20.6	12.4	18
2006/7	8.5	7.7	8.8	10.4	12.9	20.1	26.4	38	36.3	28.2	18.3	12.7	19
2007/8	9	7.7	8.1	9	10.1	13.8	19.7	29.9	30.9	20.7	14.3	9.7	15.3
2008/9	7	6.8	7.4	9.1	11.3	14.2	21.5	29.8	25.4	17.6	12.3	8.9	14.3
Promedio	8.6	8.0	8.4	8.7	9.9	12.6	18.9	32.4	46.2	35.3	22.3	13.1	18.7
Desv. Est.	2.4	2.2	2.2	2.1	2.4	3.1	4.3	7.8	19.7	21.4	15.2	5.5	6.0

TABLA E-2. CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN LINEA BASE DE RÍO PANGAL BAJO MODELO PRECIS

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Año
1971/72	11.2	9.2	7.1	7.1	7.5	8.6	12.1	17.1	49.8	60.9	29.8	15.3	19.6
1972/73	8.0	6.9	6.9	6.7	6.8	7.1	8.8	17.1	36.0	28.6	17.4	10.5	13.4
1973/74	6.4	5.8	6.3	6.0	7.6	13.7	18.3	25.1	24.5	16.2	10.9	8.2	12.4
1974/75	6.9	7.1	7.2	7.3	11.5	14.7	17.4	24.4	22.3	15.9	11.6	8.4	12.9
1975/76	6.5	6.7	6.4	6.5	6.9	8.7	12.8	26.6	46.3	33.9	18.9	12.5	16.1
1976/77	7.8	7.3	10.1	13.3	22.4	30.9	35.4	46.2	47.9	29.2	19.5	13.2	23.6
1977/78	10.1	9.1	10.1	9.5	9.7	9.7	11.3	23.7	37.7	25.4	16.4	10.5	15.3
1978/79	7.4	6.9	6.7	6.5	6.5	6.5	6.9	17.6	29.1	18.7	12.4	8.0	11.1
1979/80	5.4	5.3	5.6	5.4	6.8	9.7	13.1	14.2	12.5	9.4	7.2	5.5	8.3
1980/81	4.5	4.5	4.9	4.9	5.1	5.4	7.9	21.2	63.5	65.6	31.0	15.4	19.5
1981/82	7.6	6.2	5.7	5.7	5.9	5.9	6.2	11.6	46.7	44.1	28.2	15.5	15.8
1982/83	8.0	7.6	7.8	7.7	8.1	8.7	14.2	37.2	84.4	109.4	45.8	22.7	30.1
1983/84	12.3	8.8	8.8	8.4	8.5	8.6	9.6	9.7	15.7	22.5	16.6	10.6	11.7
1984/85	7.0	6.3	6.1	6.0	6.0	5.9	6.9	12.9	13.9	10.3	7.6	5.9	7.9
1985/86	4.6	4.5	5.5	5.6	5.8	8.6	11.8	11.6	10.0	9.3	9.2	6.4	7.7
1986/87	5.6	5.6	7.1	6.7	9.3	13.5	23.0	25.6	23.2	16.1	11.4	8.0	12.9
1987/88	5.9	5.1	5.5	5.3	5.4	5.4	7.3	28.0	41.3	25.2	15.5	9.3	13.3
1988/89	6.6	5.2	5.2	6.3	11.0	18.3	17.6	17.8	18.5	13.9	10.1	7.2	11.5
1989/90	5.4	6.3	7.6	7.6	8.8	10.0	15.6	37.6	47.5	26.6	15.9	9.5	16.5
1990/91	6.3	5.5	5.4	5.3	5.3	5.9	12.3	46.4	76.0	40.2	23.3	13.6	20.4
1991/92	10.5	7.5	8.0	7.8	8.1	8.9	17.4	34.1	60.7	38.1	20.5	12.0	19.5
1992/93	8.9	7.0	6.4	6.4	6.4	6.6	10.2	19.4	22.7	24.7	24.3	13.5	13.0
1993/94	8.1	7.0	8.3	9.2	15.8	31.4	32.0	32.9	27.5	19.0	13.3	11.7	18.0
1994/95	10.4	8.4	8.0	7.8	7.8	7.9	9.0	17.6	50.2	37.8	20.3	11.0	16.3
1995/96	6.7	6.1	5.8	5.7	5.7	6.1	10.5	14.4	12.8	9.3	6.7	5.0	7.9
1996/97	4.0	3.9	4.6	5.5	6.0	7.9	15.5	25.7	34.8	20.7	12.6	7.4	12.4
1997/98	5.6	8.3	9.9	8.5	9.4	12.3	22.7	40.1	55.3	33.1	18.9	11.0	19.6
1998/99	7.3	6.6	7.3	7.0	7.4	11.2	17.6	25.2	20.8	14.2	9.9	7.5	11.8
1999/0	6.0	5.5	9.0	8.5	9.0	9.9	16.7	22.0	21.0	14.4	10.0	7.2	11.6
2000/1	6.0	6.4	7.9	7.4	12.1	17.4	29.5	36.7	27.8	18.4	12.5	8.5	15.9
2001/2	6.5	7.0	8.8	8.3	8.6	8.9	11.4	22.9	43.0	26.5	18.2	11.2	15.1
2002/3	7.2	7.5	8.1	7.9	8.3	8.9	11.1	18.9	47.3	50.7	25.2	13.6	17.9
2003/4	7.9	7.1	7.5	7.7	10.3	14.9	19.5	17.9	16.4	12.1	8.9	7.2	11.4
2004/5	6.5	8.6	7.8	8.0	9.1	16.4	42.1	85.1	121.8	82.6	35.8	17.9	36.8
2005/6	11.9	16.1	17.7	15.2	16.0	16.6	21.3	41.6	57.8	36.1	21.6	13.4	23.8
2006/7	10.3	9.4	8.9	8.7	8.7	11.0	17.4	35.2	41.1	28.1	17.8	10.7	17.3
2007/8	7.5	7.0	7.3	7.1	7.8	10.7	13.4	15.8	14.1	10.5	7.9	6.1	9.6
2008/9	5.1	5.9	6.6	8.1	13.0	24.7	29.9	31.8	32.7	27.8	19.1	11.6	18.0
Promedio	7.4	7.0	7.5	7.4	8.8	11.5	16.2	26.6	38.3	29.6	17.4	10.6	15.7
Desv. Est.	2.1	2.0	2.2	2.0	3.5	6.3	8.4	13.9	23.0	21.1	8.6	3.8	6.0

TABLA E-3. CAUDALES MEDIOS MENSUALES PROMEDIOS PROYECTADOS PARA EL RÍO PANGAL BAJO EL ESCENARIO RCP6.0, MODELO MK3.6

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Año
2040/41	8.8	9.2	10.4	12.2	15.2	20.7	28.0	33.3	31.3	22.9	16.8	12.0	18.4
2041/42	9.3	10.7	12.2	12.6	15.1	23.2	31.6	39.2	37.8	24.7	17.7	12.7	20.5
2042/43	9.6	10.3	11.4	12.2	14.7	20.4	25.9	30.7	27.5	19.9	15.1	11.3	17.4
2043/44	8.8	8.6	9.7	10.6	12.7	17.7	23.5	28.9	25.8	18.9	14.4	10.6	15.9
2044/45	8.0	7.9	8.7	10.1	11.8	17.7	24.2	30.0	27.9	20.7	15.2	10.9	16.1
2045/46	8.0	7.7	8.5	9.9	12.1	16.8	22.8	25.2	21.3	16.6	12.9	9.7	14.3
2046/47	7.5	8.0	8.8	9.7	11.7	17.0	20.8	25.3	24.6	17.7	13.4	10.0	14.5
2047/48	7.9	7.7	8.8	9.8	12.4	16.9	21.6	24.5	23.8	17.2	12.9	9.9	14.5
2048/49	7.7	7.7	8.7	10.2	12.1	16.1	22.0	28.0	25.4	18.2	13.6	10.0	15.0
2049/50	7.7	7.6	8.2	9.2	11.2	16.5	21.7	26.5	23.6	17.5	13.4	10.1	14.4
2050/51	8.0	7.8	8.9	9.6	12.0	17.8	23.0	25.8	24.3	17.5	13.3	10.1	14.8
2051/52	7.5	7.2	8.4	9.8	12.1	18.9	25.2	29.4	25.7	18.8	14.2	10.3	15.6
2052/53	7.9	8.4	9.4	10.2	12.3	16.0	20.7	24.3	21.1	15.7	12.2	9.4	14.0
2053/54	7.3	7.6	8.4	9.3	11.3	16.3	21.2	23.9	20.2	15.3	11.7	9.0	13.5
2054/55	7.2	7.4	7.8	8.7	10.2	13.5	16.8	18.4	16.0	12.5	10.0	7.8	11.3
2055/56	6.5	7.0	8.0	8.6	10.4	14.0	17.5	19.4	17.2	16.2	12.2	9.0	12.2
2056/57	6.8	7.1	7.4	8.2	10.4	14.0	18.4	21.1	18.9	14.1	10.8	8.2	12.1
2057/58	6.6	7.2	7.8	8.5	10.5	14.3	19.9	25.8	24.8	16.9	12.4	9.0	13.6
2058/59	6.9	7.0	7.6	8.5	10.1	12.9	16.7	21.7	19.4	13.9	10.5	7.9	11.9
2059/60	6.2	6.4	7.9	8.4	10.0	12.2	14.5	15.6	14.1	12.0	9.6	7.5	10.4
2060/61	6.4	6.5	6.6	7.9	10.1	13.4	16.6	18.9	16.9	12.9	10.1	7.7	11.2
2061/62	5.9	5.7	6.4	7.6	9.9	16.1	21.0	26.3	24.1	16.9	12.9	9.2	13.5
2062/63	6.7	6.6	7.9	8.7	11.1	17.3	22.1	23.7	20.6	16.0	12.9	9.6	13.6
2063/64	7.3	7.1	7.4	8.2	9.9	13.3	17.2	18.7	17.1	13.2	10.3	7.8	11.5
2064/65	6.1	5.9	6.9	8.1	9.9	14.1	18.4	21.3	20.9	15.0	11.2	8.2	12.2
2065/66	6.4	6.1	6.8	7.8	9.3	11.9	15.2	16.3	13.8	10.9	8.7	7.1	10.0
2066/67	5.7	5.4	6.0	6.4	7.7	10.4	14.5	16.9	15.3	11.7	9.3	6.9	9.7
2067/68	5.4	7.2	7.5	8.9	11.2	16.0	21.9	25.1	22.4	16.4	12.6	9.2	13.7
2068/69	7.0	6.9	7.6	8.8	9.9	13.0	17.4	20.4	18.0	13.7	10.6	8.2	11.8
2069/70	6.5	6.6	7.5	8.3	9.9	14.3	18.8	22.1	20.1	15.2	11.0	8.1	12.4
Promedio	7.3	7.4	8.3	9.2	11.2	15.8	20.6	24.2	22.0	16.3	12.4	9.2	13.7
Desv. Est.	1.0	1.2	1.4	1.4	1.7	2.8	4.0	5.3	5.2	3.2	2.2	1.4	2.5

TABLA E-4. CAUDALES MEDIOS MENSUALES PROYECTADOS PARA EL RÍO PANGAL BAJO EL ESCENARIO A1B, MODELO PRECIS

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Año
2040/41	7.1	6.4	7.6	7.4	7.8	12.2	16.9	15.4	13.0	10.0	7.9	6.2	9.8
2041/42	5.0	4.8	4.8	5.8	8.8	13.4	15.1	16.4	15.9	11.7	8.7	6.5	9.8
2042/43	5.0	5.4	6.8	10.0	11.1	15.5	18.1	18.1	16.7	12.7	9.6	7.2	11.4
2043/44	5.8	5.7	6.0	6.5	6.6	8.9	17.9	27.5	22.7	16.9	12.7	8.1	12.1
2044/45	5.4	4.9	6.1	6.2	6.8	7.8	12.0	23.7	22.2	14.7	9.8	6.6	10.5
2045/46	4.9	4.6	5.4	5.5	5.9	9.7	19.3	22.8	19.8	15.2	10.3	6.7	10.8
2046/47	4.7	4.2	4.2	4.4	5.6	10.8	12.4	12.9	11.3	8.5	6.4	5.1	7.5
2047/48	4.4	4.7	7.6	7.4	8.0	13.0	20.6	21.7	17.5	12.5	9.1	6.5	11.1
2048/49	5.2	5.0	6.4	7.0	9.4	8.9	8.8	8.2	7.4	6.3	5.4	4.7	6.9
2049/50	4.1	4.0	5.1	6.6	13.4	15.1	15.6	16.8	16.1	11.9	8.8	9.2	10.6
2050/51	6.9	7.7	8.5	9.7	12.8	15.0	22.5	31.9	26.8	19.9	14.3	9.4	15.5
2051/52	7.2	6.6	6.7	6.8	8.1	8.9	8.8	8.8	8.1	6.8	5.8	5.1	7.3
2052/53	4.6	5.1	5.2	6.0	6.4	6.1	6.0	6.1	6.3	5.3	4.6	3.9	5.5
2053/54	3.5	5.0	5.3	8.1	13.3	28.5	34.5	33.4	27.1	22.2	14.8	9.9	17.1
2054/55	7.8	6.9	7.0	8.1	8.6	11.1	11.2	10.9	11.4	9.3	7.4	5.9	8.8
2055/56	4.9	4.6	4.6	5.2	5.9	9.6	9.8	8.9	10.8	9.1	6.9	5.3	7.1
2056/57	4.4	3.8	4.2	5.1	7.0	8.4	8.4	7.8	7.0	5.7	4.7	3.9	5.9
2057/58	3.4	3.6	4.6	6.2	7.4	7.5	11.5	27.3	35.3	20.8	12.9	8.3	12.4
2058/59	5.9	5.6	6.6	7.1	7.8	8.8	8.8	8.0	7.3	6.7	5.6	4.7	6.9
2059/60	4.1	3.8	4.0	4.5	4.6	5.5	6.1	6.2	5.6	4.7	3.9	3.3	4.7
2060/61	2.9	2.7	3.3	4.8	5.8	12.4	17.0	16.3	13.5	9.7	7.1	5.3	8.4
2061/62	4.0	4.5	4.7	4.5	6.8	15.5	15.5	15.7	15.3	12.2	9.7	6.6	9.6
2062/63	4.6	4.0	4.5	4.8	6.1	8.5	8.1	8.0	7.5	6.2	5.0	4.0	5.9
2063/64	3.6	3.7	4.5	5.2	8.1	8.7	9.6	9.3	8.3	6.6	5.2	4.2	6.4
2064/65	3.6	3.6	3.6	4.4	6.7	13.1	20.6	24.5	22.1	15.1	9.8	6.7	11.2
2065/66	4.5	5.0	4.9	5.0	5.8	6.4	6.5	6.0	5.4	4.6	4.0	3.5	5.1
2066/67	3.2	3.4	3.6	4.4	6.5	6.8	7.5	9.2	8.3	6.4	4.9	4.0	5.7
2067/68	3.4	3.4	3.3	4.2	4.4	7.4	8.5	8.6	9.5	7.4	5.5	4.0	5.8
2068/69	3.3	3.7	7.3	9.5	12.2	15.6	15.4	14.8	13.9	10.4	7.8	6.0	10.0
2069/70	4.8	4.4	5.1	6.3	9.0	8.5	8.0	8.3	7.8	7.0	8.0	5.8	6.9
Promedio	4.7	4.7	5.4	6.2	7.9	10.9	13.4	15.1	14.0	10.6	7.9	5.9	8.9
Desv. Est.	1.3	1.1	1.4	1.6	2.5	4.5	6.3	8.1	7.5	4.9	3.0	1.8	3.1

TABLA E-5. CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN LINEA BASE DE RÍO CACHAPOAL BAJO MODELO MK3.6

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Año
1971/72	56.5	34.0	25.9	28.3	32.7	39.6	46.9	69.9	162.9	222.7	113.3	63.0	74.6
1972/73	36.3	37.8	38.3	38.1	43.2	50.2	63.3	82.3	103.5	85.1	56.3	41.0	56.3
1973/74	27.9	27.5	28.5	32.2	39.7	49.5	55.0	93.3	181.1	212.8	126.4	70.2	78.7
1974/75	41.6	38.8	45.1	43.3	50.5	52.7	63.1	70.0	146.9	296.4	285.5	140.5	106.2
1975/76	71.4	65.9	62.2	61.2	64.6	64.1	67.1	99.7	154.4	138.5	86.9	58.1	82.8
1976/77	40.4	34.8	33.8	34.6	37.3	44.8	51.9	65.2	142.1	179.3	103.4	60.6	69.0
1977/78	37.7	35.0	34.0	35.0	38.3	41.7	49.1	84.3	173.0	158.1	91.1	55.7	69.4
1978/79	36.2	33.2	32.8	35.2	40.8	47.3	65.8	94.6	131.6	93.7	60.7	40.5	59.4
1979/80	27.1	28.0	29.5	30.6	34.0	38.5	49.8	83.4	149.6	120.9	72.6	48.7	59.4
1980/81	38.9	35.8	37.0	40.6	44.7	47.9	65.7	92.0	125.7	99.3	63.7	43.6	61.2
1981/82	28.7	23.0	21.7	21.8	24.1	28.0	37.1	48.1	69.8	60.2	40.9	27.9	36.0
1982/83	20.8	21.3	24.6	25.4	29.6	33.7	42.3	72.8	130.9	146.2	101.2	61.4	59.2
1983/84	35.4	31.2	30.2	32.8	38.4	40.0	55.7	83.3	111.5	87.6	61.6	45.2	54.4
1984/85	30.2	27.8	27.0	27.4	30.6	35.0	46.9	73.5	142.9	161.2	94.0	55.5	62.7
1985/86	34.9	35.3	34.1	34.8	39.4	45.2	54.3	79.7	161.1	156.6	89.7	54.7	68.3
1986/87	35.6	33.9	38.7	39.0	42.6	51.2	61.0	71.5	71.0	52.6	38.6	29.6	47.1
1987/88	24.5	27.2	26.3	28.3	32.3	36.3	46.7	88.7	131.6	96.4	60.6	40.1	53.3
1988/89	26.2	23.4	24.3	25.1	27.9	31.3	42.1	62.3	84.4	74.4	48.4	32.0	41.8
1989/90	21.4	21.4	22.4	23.3	26.6	31.0	40.1	58.9	74.2	61.8	43.2	29.3	37.8
1990/91	21.2	17.7	17.9	18.4	20.5	24.6	31.4	77.4	110.4	75.1	48.6	34.0	41.5
1991/92	21.7	17.6	18.3	20.1	24.7	30.3	45.6	63.3	63.1	46.9	33.5	23.8	34.1
1992/93	17.2	15.6	17.0	17.7	21.6	24.7	34.3	54.5	116.0	172.3	108.3	60.9	55.0
1993/94	39.7	33.5	38.5	39.6	48.6	52.3	59.2	86.8	104.7	78.4	53.0	38.8	56.1
1994/95	30.7	28.0	31.2	31.5	35.3	39.2	44.8	54.7	126.2	109.3	66.5	42.5	53.3
1995/96	27.5	21.9	22.5	22.9	25.8	29.8	40.9	67.9	123.1	84.3	54.0	35.8	46.4
1996/97	26.6	25.3	25.8	26.8	30.5	36.9	42.8	58.2	60.1	44.1	32.3	23.6	36.1
1997/98	17.9	17.8	18.6	20.0	23.9	32.6	49.3	78.4	82.4	86.5	57.3	37.6	43.5
1998/99	26.0	23.6	29.0	28.7	31.4	32.9	41.6	71.0	129.5	126.4	87.2	52.9	56.7
1999/0	34.5	28.1	27.6	29.1	32.7	36.4	45.2	96.1	166.2	134.6	81.1	49.8	63.4
2000/1	32.0	29.3	31.8	34.6	40.9	50.5	71.3	90.5	121.0	114.1	70.3	44.9	60.9
2001/2	29.9	31.5	35.2	35.0	41.4	53.6	72.7	103.7	146.1	144.8	88.3	53.3	69.6
2002/3	34.9	30.7	39.8	39.1	45.8	50.4	54.3	76.2	158.2	141.0	83.5	52.1	67.2
2003/4	33.7	29.1	32.2	35.4	38.6	44.9	64.4	80.3	70.0	50.4	37.0	27.0	45.2
2004/5	23.1	20.3	20.5	21.7	26.2	34.7	47.9	61.4	73.2	52.4	36.5	25.4	36.9
2005/6	19.6	22.3	23.6	26.0	34.1	40.4	43.0	64.7	135.5	121.0	70.0	43.9	53.7
2006/7	31.1	28.8	32.1	38.9	47.2	62.3	69.9	93.0	116.4	100.9	62.6	44.7	60.7
2007/8	30.7	25.8	28.5	30.9	35.3	44.3	55.7	78.2	99.1	68.0	46.1	31.7	47.9
2008/9	22.3	22.3	25.9	31.7	43.0	49.5	66.4	92.8	86.0	58.9	41.0	30.0	47.5
Promedio	31.4	28.5	29.8	31.2	35.9	41.5	52.2	76.9	119.4	113.5	73.6	46.1	56.7
Dev. Est.	10.4	8.7	8.6	8.4	9.2	9.8	11.0	14.0	33.9	55.2	43.0	20.0	14.8

TABLA E-6. CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN LINEA BASE DE RÍO CACHAPOAL BAJO MODELO PRECIS

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Año
1971/72	50.5	37.4	25.3	25.7	29.0	29.8	30.0	32.4	92.7	167.0	97.5	54.9	56.0
1972/73	31.3	24.1	23.5	23.7	25.4	25.9	27.8	40.0	82.1	101.0	64.1	40.0	42.4
1973/74	25.5	21.3	21.8	21.6	25.6	35.4	46.8	73.1	100.3	69.8	45.1	33.2	43.3
1974/75	27.5	27.6	29.3	29.6	40.6	45.9	50.2	68.1	81.7	60.7	41.9	30.0	44.4
1975/76	22.3	22.2	20.5	21.2	23.2	26.5	31.6	56.0	129.2	113.6	66.0	44.7	48.1
1976/77	28.6	28.3	35.7	42.0	72.6	88.2	100.0	125.7	144.5	113.4	68.7	44.7	74.4
1977/78	31.6	28.7	30.9	29.9	31.7	31.4	32.7	51.3	93.2	89.2	56.6	37.1	45.3
1978/79	26.0	24.4	23.1	23.1	24.6	24.6	24.7	47.7	80.7	56.1	39.1	27.1	35.1
1979/80	18.7	17.9	20.5	20.3	25.3	35.3	51.3	55.0	43.7	32.8	25.0	18.9	30.4
1980/81	14.8	15.7	15.7	16.2	17.6	18.1	20.9	39.5	117.3	177.6	100.9	55.4	50.8
1981/82	32.0	26.0	23.9	24.6	26.5	26.5	25.7	32.8	99.3	127.7	85.9	53.2	48.7
1982/83	32.4	31.3	29.2	29.8	32.2	32.8	39.1	73.6	177.4	269.2	156.1	81.4	82.0
1983/84	48.0	37.5	35.2	34.9	36.2	36.1	35.2	32.6	47.0	74.8	56.1	38.2	42.7
1984/85	27.0	24.6	23.2	23.2	24.4	24.2	25.8	41.2	48.1	36.0	27.1	21.2	28.8
1985/86	16.4	16.7	22.0	23.9	25.6	30.8	40.7	47.2	38.6	35.1	32.2	23.8	29.4
1986/87	21.5	20.6	24.1	23.9	29.3	37.4	59.6	71.0	83.4	71.9	46.6	31.1	43.4
1987/88	21.0	17.0	17.4	17.3	18.4	18.6	22.6	70.2	123.2	81.2	51.3	33.8	41.0
1988/89	26.1	20.2	21.5	24.4	44.6	72.3	69.0	63.8	66.2	47.7	34.2	24.6	42.9
1989/90	18.0	22.8	28.0	28.1	32.0	34.6	46.4	95.0	133.5	88.5	57.0	37.1	51.7
1990/91	25.1	21.7	21.7	22.0	23.5	24.8	33.8	89.8	175.5	126.6	77.4	48.3	57.5
1991/92	40.6	31.8	29.3	29.9	31.8	32.3	42.6	70.3	149.7	130.9	76.7	50.1	59.7
1992/93	38.6	29.6	27.5	27.7	29.0	29.7	34.2	47.8	72.1	78.2	74.2	47.4	44.7
1993/94	32.5	29.4	33.8	38.4	49.5	73.6	84.1	95.8	108.1	74.1	50.0	43.1	59.4
1994/95	36.9	28.4	26.6	26.6	27.8	27.7	28.8	42.2	99.5	115.7	70.4	43.2	47.8
1995/96	27.0	23.5	21.8	22.0	23.1	24.2	35.1	51.6	48.0	36.6	27.1	20.1	30.0
1996/97	14.7	14.7	19.0	21.9	24.3	28.0	39.1	58.8	102.5	72.5	46.8	30.4	39.4
1997/98	23.7	27.9	31.2	29.9	33.1	37.5	51.5	74.4	147.7	137.5	79.6	48.0	60.2
1998/99	30.4	27.4	29.5	28.6	30.8	39.2	52.1	76.5	80.0	56.5	39.8	30.3	43.4
1999/0	23.7	22.2	34.8	32.9	35.8	37.0	48.0	73.3	72.9	50.8	36.6	26.9	41.2
2000/1	22.3	24.3	29.5	28.4	39.9	46.1	72.3	109.1	101.3	67.8	46.2	31.7	51.6
2001/2	22.9	26.3	35.1	33.0	35.4	35.5	37.7	54.6	104.7	82.4	60.1	41.5	47.4
2002/3	27.5	27.0	28.8	28.5	30.7	31.0	32.1	41.8	103.8	154.9	90.2	56.1	54.4
2003/4	34.4	31.7	33.5	34.5	44.4	55.3	71.1	68.8	59.0	43.7	33.0	27.0	44.7
2004/5	24.0	32.2	28.9	29.9	32.8	43.8	84.6	163.5	276.9	250.3	136.3	76.1	98.3
2005/6	51.4	58.4	64.6	59.1	61.8	60.1	64.2	94.3	146.9	131.0	81.1	52.6	77.1
2006/7	38.8	35.9	32.7	32.5	33.5	37.0	46.0	77.8	123.0	91.7	61.5	40.5	54.2
2007/8	27.8	26.3	26.9	26.3	29.0	34.4	37.9	48.4	55.7	41.4	30.6	23.1	34.0
2008/9	17.8	23.7	27.0	33.8	52.9	68.5	82.3	93.2	101.4	87.2	61.8	40.4	57.5
Promedio	28.4	26.5	27.7	28.1	33.0	37.9	46.3	67.1	102.9	95.9	61.3	39.7	49.6
Desv. Est.	9.1	7.7	8.1	7.6	11.4	15.9	19.7	27.5	46.0	54.5	28.8	14.2	14.7

TABLA E-7. CAUDALES MEDIOS MENSUALES PROMEDIOS PROYECTADOS PARA EL RÍO CACHAPOAL
BAJO EL ESCENARIO RCP6.0, MODELO MK3.6

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Año
2040/41	29.0	30.7	35.1	38.6	47.7	58.7	73.4	92.2	110.0	83.9	57.3	39.9	58.0
2041/42	29.5	33.9	37.3	40.6	48.5	63.0	80.5	104.1	121.4	92.3	60.7	41.7	62.8
2042/43	30.4	31.7	35.0	38.7	45.9	58.7	69.2	88.4	99.1	73.1	51.2	36.4	54.8
2043/44	27.4	26.8	31.1	34.0	40.9	52.1	65.4	86.5	88.7	65.7	47.2	33.8	50.0
2044/45	24.7	24.4	28.0	32.7	39.2	49.9	64.3	83.5	94.6	73.6	50.5	35.7	50.1
2045/46	25.3	24.9	28.1	32.7	39.9	50.1	65.4	79.5	78.8	59.8	43.3	31.5	46.6
2046/47	23.4	25.4	27.9	31.6	37.8	50.3	60.0	73.7	86.2	64.4	45.8	33.1	46.6
2047/48	25.3	25.3	29.3	33.1	41.0	50.9	61.5	76.9	81.7	61.0	43.4	32.5	46.8
2048/49	24.9	24.5	28.9	33.6	40.8	49.8	62.6	79.5	88.1	63.9	45.3	32.6	47.9
2049/50	24.3	24.6	27.4	30.7	36.9	48.0	58.5	73.9	84.6	63.2	45.4	33.6	45.9
2050/51	26.2	25.9	29.5	32.6	39.1	50.3	63.1	80.0	85.3	63.2	45.1	33.2	47.8
2051/52	23.8	23.0	27.4	31.6	38.5	50.1	66.0	83.8	94.6	70.9	49.6	34.8	49.5
2052/53	25.7	28.0	31.7	34.5	41.9	51.8	61.0	72.8	75.3	54.5	40.2	30.3	45.6
2053/54	22.6	24.0	27.4	29.9	36.4	44.9	58.2	74.4	76.0	55.0	39.8	29.7	43.2
2054/55	22.6	23.5	25.9	29.6	35.5	44.1	53.5	60.7	58.2	43.7	33.5	25.1	38.0
2055/56	20.5	22.6	26.5	28.6	35.5	44.9	54.2	64.2	63.3	55.0	40.0	29.2	40.4
2056/57	21.6	23.8	25.8	28.9	36.0	45.0	55.8	69.5	67.2	49.1	36.2	27.2	40.5
2057/58	21.1	23.4	27.0	29.4	36.1	44.3	56.4	72.9	83.7	61.1	42.2	30.1	44.0
2058/59	22.4	22.5	25.3	28.4	34.0	41.1	49.8	65.2	69.3	50.9	36.3	26.6	39.3
2059/60	19.8	20.9	25.8	29.1	35.6	42.7	49.1	56.0	53.2	43.2	33.0	24.8	36.1
2060/61	21.0	22.1	23.1	26.7	34.8	44.8	54.0	61.1	61.8	46.8	34.7	25.6	38.0
2061/62	18.7	18.6	21.6	25.4	31.7	44.9	59.8	79.4	88.2	63.2	45.4	31.7	44.0
2062/63	22.6	22.0	27.0	31.0	38.6	52.2	64.3	76.9	77.2	58.1	43.8	32.1	45.5
2063/64	24.2	23.9	25.3	28.8	35.3	43.9	54.3	64.5	60.2	45.0	33.9	25.4	38.7
2064/65	18.9	18.8	22.9	27.6	33.8	43.0	55.8	66.8	72.1	54.7	38.4	27.8	40.0
2065/66	20.8	20.4	22.7	26.6	32.7	40.4	50.0	56.3	52.3	39.4	29.7	23.8	34.6
2066/67	18.1	17.3	19.7	22.4	27.2	34.7	43.9	55.4	55.5	42.0	32.0	23.4	32.6
2067/68	17.6	21.3	24.9	28.5	36.5	46.4	59.0	74.1	81.7	64.2	45.1	31.5	44.2
2068/69	23.0	22.4	25.0	28.9	34.9	42.9	53.6	64.2	64.4	48.3	35.7	27.1	39.2
2069/70	20.7	21.0	23.3	26.5	31.9	42.2	53.1	67.8	76.0	57.2	39.6	28.3	40.6
Promedio	23.2	23.9	27.2	30.7	37.5	47.5	59.2	73.5	78.3	58.9	42.1	30.6	44.4
Desv. Est.	3.3	3.7	4.0	4.0	4.6	5.9	7.6	11.3	16.4	12.2	7.3	4.6	6.7

TABLA E-8. CAUDALES MEDIOS MENSUALES PROYECTADOS PARA EL RÍO CACHAPOAL BAJO EL ESCENARIO A1B, MODELO PRECIS

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Año
2040/41	26.3	23.8	30.1	29.4	32.6	41.9	63.6	65.4	49.0	36.7	28.1	21.4	37.4
2041/42	16.4	15.6	16.1	19.2	30.3	56.6	66.2	62.8	55.4	41.0	30.1	22.1	36.0
2042/43	16.5	20.0	26.2	37.2	50.4	61.0	69.2	67.7	55.5	41.6	31.4	23.4	41.7
2043/44	18.1	19.1	20.6	22.0	23.5	28.5	47.6	77.3	81.1	59.6	43.7	29.1	39.2
2044/45	19.1	16.8	22.6	22.3	25.8	27.8	35.1	65.9	81.7	54.8	36.7	25.2	36.1
2045/46	18.0	16.6	20.5	20.8	23.1	33.4	60.0	81.3	71.4	53.0	36.6	24.7	38.3
2046/47	17.1	14.8	15.3	17.4	27.2	51.6	56.7	50.4	39.2	29.7	22.5	18.5	30.0
2047/48	15.8	18.0	27.7	28.2	31.4	40.9	61.8	81.2	70.6	48.0	34.1	23.9	40.1
2048/49	18.1	17.4	25.7	25.9	46.9	46.7	41.2	34.7	28.3	23.3	19.2	15.6	28.6
2049/50	12.6	11.8	15.2	24.7	60.1	75.9	68.7	61.9	50.9	38.1	28.4	30.5	39.9
2050/51	23.2	26.5	24.4	27.5	33.9	37.1	49.9	88.3	122.8	86.6	56.4	36.2	51.1
2051/52	25.8	23.2	25.4	27.6	39.2	43.9	39.9	36.0	30.0	24.6	20.1	17.0	29.4
2052/53	14.9	18.4	19.3	24.9	31.4	29.6	27.2	25.6	24.0	19.7	16.3	13.2	22.0
2053/54	11.1	16.8	16.5	25.8	43.3	73.6	101.7	105.6	99.3	89.6	54.6	35.9	56.2
2054/55	27.9	23.9	26.7	32.8	39.1	50.2	50.1	43.3	40.1	32.3	25.2	19.6	34.3
2055/56	15.4	14.3	15.9	20.6	27.7	45.5	44.5	36.2	37.9	31.1	23.7	18.6	27.6
2056/57	15.3	12.8	14.4	19.4	35.1	44.6	40.2	33.3	26.6	21.2	16.8	13.3	24.4
2057/58	10.7	12.4	16.2	21.7	26.2	26.3	32.9	66.0	109.1	74.5	46.7	32.2	39.6
2058/59	23.2	23.1	27.7	33.1	40.9	45.5	41.9	34.9	29.1	25.4	20.6	16.5	30.2
2059/60	13.6	12.8	14.8	19.2	21.5	28.7	29.4	26.9	22.1	18.1	14.6	11.8	19.5
2060/61	9.5	8.6	13.4	22.1	30.9	56.2	71.9	58.8	43.2	32.2	24.3	18.6	32.5
2061/62	14.1	15.3	19.6	19.4	27.8	49.4	63.8	65.7	57.8	44.5	34.7	24.4	36.4
2062/63	16.8	13.8	18.6	21.7	31.6	46.5	40.3	35.5	29.8	23.9	18.8	14.9	26.0
2063/64	12.6	14.0	17.6	23.8	42.0	46.4	45.7	39.1	31.2	24.6	19.4	15.4	27.7
2064/65	12.4	12.9	13.7	16.8	30.1	45.5	63.6	79.3	77.7	52.6	35.3	25.0	38.7
2065/66	16.6	20.4	20.5	22.6	30.5	34.1	32.3	27.5	22.5	18.5	15.2	12.5	22.8
2066/67	10.6	12.4	14.5	19.8	34.9	37.2	36.6	38.6	30.6	23.8	18.4	15.0	24.4
2067/68	12.7	13.4	13.6	20.8	24.7	41.5	42.9	37.9	35.5	27.8	21.1	15.8	25.7
2068/69	12.6	15.8	31.9	41.2	60.0	72.4	69.2	57.9	47.5	36.1	27.3	21.0	41.1
2069/70	16.1	14.7	20.4	26.0	46.1	44.8	38.8	36.4	30.4	27.0	28.4	21.2	29.2
Promedio	16.4	16.6	20.2	24.5	34.9	45.4	51.1	54.0	51.0	38.7	28.3	21.1	33.5
Desv. Est.	4.8	4.3	5.4	5.8	10.1	13.1	16.5	21.2	27.0	19.2	11.1	6.7	8.4

TABLA E-9. CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN LINEA BASE DE RÍO CIPRESES BAJO MODELO MK3.6

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Año
1971/72	16.1	10.3	8.1	9.1	10.8	13.8	18.5	28.0	53.9	67.3	35.4	20.1	24.3
1972/73	12.0	12.5	13.0	13.1	15.2	18.4	24.3	29.3	33.9	27.4	18.7	13.7	19.3
1973/74	9.4	9.5	9.9	11.4	14.4	19.2	21.8	37.4	61.5	65.6	38.2	22.4	26.7
1974/75	13.8	13.4	15.7	15.3	18.4	20.0	25.3	29.2	61.2	101.6	89.1	44.0	37.3
1975/76	23.8	22.7	21.4	21.3	23.0	23.0	25.4	39.1	53.7	43.8	28.2	19.4	28.7
1976/77	13.7	11.9	11.7	12.1	13.3	17.0	21.0	26.8	48.4	55.3	32.3	19.6	23.6
1977/78	12.5	11.7	11.5	12.0	13.5	15.1	18.5	32.7	57.5	49.6	29.5	18.4	23.6
1978/79	12.2	11.2	11.4	12.6	14.9	18.1	26.0	33.9	42.1	29.7	20.0	13.6	20.5
1979/80	9.2	9.8	10.3	10.8	12.3	14.4	19.6	31.3	47.9	37.2	23.2	16.1	20.2
1980/81	13.0	12.1	12.5	14.0	15.7	17.2	24.8	32.5	41.1	31.2	20.7	14.6	20.8
1981/82	9.8	7.9	7.5	7.6	8.6	10.3	14.1	17.6	23.0	19.0	13.3	9.3	12.3
1982/83	7.1	7.3	8.5	8.9	10.6	12.5	16.6	28.4	43.4	45.2	32.1	20.1	20.1
1983/84	11.8	10.6	10.5	11.6	13.9	14.9	20.7	29.1	35.4	27.6	20.2	15.1	18.5
1984/85	10.2	9.3	9.2	9.4	10.9	12.6	17.9	29.7	47.9	49.9	29.8	18.0	21.3
1985/86	11.6	12.6	12.3	12.6	14.5	17.2	21.6	30.6	51.7	47.5	28.3	17.8	23.2
1986/87	11.9	11.5	13.3	13.5	15.0	18.3	21.0	24.0	22.9	17.2	12.9	9.9	15.9
1987/88	8.4	9.0	8.9	9.9	11.8	13.7	18.2	31.1	41.6	29.6	19.4	13.1	17.9
1988/89	8.7	7.9	8.3	8.6	9.9	11.4	16.0	22.6	27.4	23.1	15.6	10.6	14.2
1989/90	7.2	7.3	7.6	8.0	9.3	11.3	14.9	20.2	23.2	19.1	13.9	9.6	12.6
1990/91	7.1	5.9	6.0	6.2	7.1	9.0	12.1	27.0	34.6	23.8	15.7	11.3	13.8
1991/92	7.3	5.9	6.2	6.9	8.7	11.1	16.2	20.9	19.8	14.7	10.7	7.7	11.3
1992/93	5.6	5.2	5.7	6.1	7.8	9.4	13.9	22.1	39.5	53.0	32.8	19.1	18.4
1993/94	12.8	10.9	13.0	13.6	17.3	19.0	21.8	29.6	33.2	24.8	17.1	12.8	18.8
1994/95	10.1	9.4	10.5	10.8	12.4	14.2	17.4	21.2	40.8	34.0	21.5	14.0	18.0
1995/96	9.2	7.4	7.8	8.0	9.3	10.9	15.8	25.4	38.9	27.1	18.0	12.3	15.8
1996/97	9.1	8.6	8.8	9.3	10.8	13.4	15.7	19.6	19.2	14.3	10.8	8.0	12.3
1997/98	6.1	6.3	6.6	7.2	8.9	12.7	18.4	25.6	25.9	27.3	18.7	12.6	14.7
1998/99	8.9	8.2	10.3	10.2	11.3	12.0	15.4	26.1	41.2	40.2	28.1	17.1	19.1
1999/0	11.4	9.5	9.5	10.1	11.6	13.4	17.3	35.3	53.1	42.8	26.7	16.7	21.5
2000/1	11.0	10.1	11.2	12.4	14.9	19.1	27.3	32.5	39.7	36.0	22.8	14.9	21.0
2001/2	10.1	10.9	12.5	12.4	15.3	20.6	28.6	36.8	47.4	44.3	27.7	17.4	23.7
2002/3	11.7	10.5	13.7	13.5	16.3	18.3	20.7	29.4	52.2	43.9	26.8	17.2	22.8
2003/4	11.3	10.0	11.2	12.4	13.8	16.7	22.7	26.2	22.2	16.5	12.4	9.2	15.4
2004/5	7.8	6.8	7.0	7.6	9.7	13.3	17.2	20.9	22.9	16.5	11.8	8.4	12.5
2005/6	6.6	7.5	8.2	9.2	12.6	15.4	16.9	23.9	42.6	37.9	22.8	14.8	18.2
2006/7	10.5	9.7	11.2	13.9	17.4	24.2	26.5	32.0	36.2	31.0	20.0	14.6	20.6
2007/8	10.2	8.7	9.8	11.0	12.9	16.6	20.5	26.8	31.2	22.0	15.4	10.8	16.3
2008/9	7.7	7.6	9.0	11.4	15.8	18.5	23.5	30.5	27.1	18.8	13.4	10.0	16.1
Promedio	10.4	9.7	10.3	10.9	12.9	15.4	19.8	28.0	39.1	35.7	23.5	15.1	19.2
Desv. Est.	3.3	3.0	3.0	3.0	3.3	3.7	4.2	5.2	12.0	17.7	13.2	6.2	5.2

TABLA E-10. CAUDALES MEDIOS MENSUALES EN LINEA BASE DE RÍO CIPRESES BAJO MODELO PRECIS

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Año
1971/72	14.3	11.0	7.6	7.8	9.0	9.7	10.7	12.9	34.5	51.8	30.1	17.2	18.1
1972/73	9.8	7.6	7.6	7.7	8.4	8.9	10.3	15.8	27.9	31.3	20.1	12.9	14.0
1973/74	8.3	7.1	7.5	7.4	9.6	14.3	17.6	24.6	31.6	21.7	14.4	10.8	14.6
1974/75	9.1	9.2	9.7	10.1	14.8	16.7	18.2	24.3	26.6	19.5	13.9	10.1	15.2
1975/76	7.7	7.6	7.1	7.3	8.2	9.9	13.6	21.7	40.7	35.4	21.1	14.7	16.3
1976/77	9.7	9.6	12.5	15.7	26.4	33.2	36.2	43.3	46.8	34.7	22.1	14.9	25.4
1977/78	10.8	9.8	10.8	10.5	11.2	11.2	12.1	20.2	30.9	27.9	18.2	12.1	15.5
1978/79	8.7	8.2	7.9	7.9	8.5	8.6	8.8	17.2	26.0	18.3	12.9	9.1	11.8
1979/80	6.3	6.1	6.9	6.9	9.0	12.5	17.2	18.1	14.3	10.9	8.3	6.4	10.2
1980/81	5.0	5.4	5.5	5.8	6.3	6.6	8.2	17.7	43.1	55.1	31.4	18.0	17.3
1981/82	10.5	8.7	8.0	8.3	9.0	9.1	8.9	12.8	35.1	40.4	27.8	17.7	16.4
1982/83	11.0	10.8	10.3	10.5	11.5	12.0	15.5	31.5	63.3	85.3	48.7	26.9	28.1
1983/84	16.6	12.9	12.4	12.3	12.9	12.9	12.9	12.1	16.7	24.4	18.5	12.7	14.8
1984/85	9.0	8.2	7.8	7.9	8.3	8.4	9.4	14.2	15.5	11.8	9.0	7.1	9.7
1985/86	5.5	5.6	7.3	8.0	8.7	11.0	14.2	15.5	12.6	11.5	10.5	7.9	9.9
1986/87	7.1	7.0	8.3	8.4	11.0	14.8	22.5	25.5	27.2	21.9	14.8	10.1	14.9
1987/88	7.0	5.7	6.1	6.0	6.5	6.6	8.4	24.4	38.1	25.8	16.8	11.3	13.6
1988/89	8.7	6.8	7.2	8.7	15.9	25.1	23.8	22.0	21.2	15.8	11.6	8.5	14.6
1989/90	6.3	8.0	10.0	10.1	12.0	13.3	18.3	32.0	41.5	27.5	17.6	11.6	17.3
1990/91	8.0	7.0	7.0	7.2	7.7	8.6	13.2	35.6	57.2	38.7	24.4	15.8	19.2
1991/92	13.7	10.7	10.1	10.4	11.3	11.7	17.5	28.5	47.8	40.1	23.7	15.6	20.1
1992/93	12.2	9.5	8.9	9.1	9.6	10.1	12.9	17.6	22.7	24.2	23.2	15.2	14.6
1993/94	10.6	9.6	11.4	13.2	18.6	27.9	31.5	34.0	33.9	23.0	15.8	13.8	20.3
1994/95	12.1	9.5	9.0	9.1	9.7	9.8	10.8	17.5	34.1	35.7	21.9	13.5	16.1
1995/96	8.6	7.6	7.1	7.2	7.7	8.3	12.5	17.1	15.0	11.2	8.3	6.2	9.7
1996/97	4.6	4.6	6.1	7.4	8.4	10.6	15.5	21.2	31.1	22.0	14.3	9.3	12.9
1997/98	7.4	9.2	10.6	10.3	11.6	13.8	20.6	29.3	46.1	40.9	23.8	14.6	19.8
1998/99	9.5	8.6	9.6	9.4	10.3	14.5	19.1	25.3	24.5	17.2	12.2	9.3	14.1
1999/0	7.4	7.1	11.8	11.2	12.5	13.4	18.1	24.5	23.0	16.1	11.5	8.5	13.8
2000/1	7.1	8.0	9.9	9.7	15.1	18.4	26.6	35.4	30.5	20.4	14.1	9.8	17.1
2001/2	7.2	8.3	11.1	10.7	11.7	11.9	13.2	20.3	33.7	25.4	18.5	12.8	15.4
2002/3	8.7	8.7	9.5	9.5	10.4	10.8	11.8	17.1	35.4	46.3	27.7	17.1	17.7
2003/4	10.7	10.1	10.7	11.3	15.3	19.6	24.5	23.1	19.4	14.3	10.7	8.6	14.9
2004/5	7.9	10.4	9.5	9.9	11.1	16.1	34.8	64.8	92.1	75.8	41.5	23.6	33.1
2005/6	16.4	19.9	21.9	20.5	21.9	21.6	24.4	36.5	47.0	40.2	25.0	16.4	26.0
2006/7	12.5	11.5	10.6	10.6	11.1	13.1	18.0	27.7	38.2	28.8	19.3	12.7	17.8
2007/8	8.9	8.4	8.9	8.8	10.2	12.6	14.0	16.9	17.8	13.1	9.6	7.2	11.4
2008/9	5.6	7.4	8.5	11.0	17.8	24.8	29.9	32.4	32.8	27.6	19.6	12.9	19.2
Promedio	9.2	8.7	9.3	9.6	11.6	13.7	17.3	24.5	33.6	29.8	19.3	12.7	16.6
Desv. Est.	2.9	2.6	2.8	2.7	4.2	6.0	7.3	10.2	15.4	16.7	8.8	4.5	5.0

TABLA E-11. CAUDALES MEDIOS MENSUALES PROMEDIOS PROYECTADOS PARA EL RÍO CIPRESES BAJO EL ESCENARIO RCP6.0, MODELO MK3.6

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Año
2040/41	9.7	10.3	11.9	13.5	17.1	21.6	26.6	31.7	35.2	26.5	18.6	13.2	19.7
2041/42	9.9	11.5	12.8	14.1	17.2	23.2	29.4	36.3	39.1	29.1	19.7	13.8	21.3
2042/43	10.2	10.8	12.0	13.5	16.4	21.5	25.0	30.2	31.5	23.3	16.7	12.1	18.6
2043/44	9.2	9.0	10.6	11.7	14.5	18.9	23.4	29.2	28.4	21.1	15.5	11.2	16.9
2044/45	8.3	8.2	9.5	11.3	13.8	18.2	23.2	28.6	30.3	23.2	16.4	11.8	16.9
2045/46	8.5	8.4	9.5	11.3	14.1	18.1	23.1	26.7	25.1	19.2	14.2	10.5	15.7
2046/47	7.9	8.6	9.5	11.0	13.4	18.2	21.4	25.2	27.5	20.4	14.9	11.0	15.7
2047/48	8.5	8.5	9.9	11.4	14.4	18.3	21.9	26.1	26.3	19.6	14.3	10.8	15.8
2048/49	8.3	8.3	9.8	11.6	14.4	17.9	22.4	27.2	28.1	20.5	14.8	10.9	16.2
2049/50	8.2	8.3	9.2	10.6	13.0	17.4	21.1	25.5	27.0	20.2	14.8	11.1	15.5
2050/51	8.8	8.6	10.0	11.2	13.8	18.4	22.7	27.2	27.3	20.3	14.8	11.0	16.2
2051/52	8.0	7.8	9.3	11.0	13.7	18.6	23.8	28.7	30.0	22.4	16.0	11.5	16.7
2052/53	8.6	9.3	10.7	11.8	14.6	18.4	21.6	24.8	24.1	17.7	13.3	10.1	15.4
2053/54	7.6	8.1	9.3	10.3	12.9	16.5	20.8	25.1	24.0	17.7	13.0	9.8	14.6
2054/55	7.6	7.9	8.7	10.1	12.4	15.7	18.6	20.5	18.7	14.3	11.1	8.4	12.8
2055/56	6.9	7.7	8.9	9.8	12.5	16.0	19.0	21.6	20.2	17.7	13.1	9.7	13.6
2056/57	7.3	8.0	8.6	9.8	12.6	16.1	19.7	23.4	21.5	16.0	12.0	9.1	13.7
2057/58	7.1	7.9	9.1	10.1	12.7	16.0	20.3	25.2	26.8	19.4	13.8	10.0	14.9
2058/59	7.5	7.6	8.6	9.8	12.0	14.8	17.9	22.2	22.2	16.4	12.0	8.9	13.3
2059/60	6.7	7.1	8.8	10.0	12.5	15.1	17.0	18.7	17.1	14.0	10.8	8.3	12.2
2060/61	7.0	7.4	7.7	9.2	12.3	15.9	18.9	20.7	19.9	15.2	11.4	8.5	12.8
2061/62	6.3	6.3	7.4	8.9	11.4	16.7	21.4	26.9	28.0	20.0	14.8	10.5	14.9
2062/63	7.6	7.4	9.2	10.7	13.7	19.0	22.8	25.9	24.5	18.6	14.3	10.6	15.4
2063/64	8.1	8.0	8.5	9.8	12.3	15.6	18.9	21.5	19.4	14.7	11.3	8.5	13.1
2064/65	6.4	6.3	7.8	9.5	11.9	15.5	19.7	22.8	23.1	17.4	12.6	9.2	13.5
2065/66	7.0	6.9	7.7	9.2	11.5	14.4	17.5	18.8	16.8	12.8	9.8	7.9	11.7
2066/67	6.1	5.8	6.7	7.6	9.4	12.3	15.5	18.7	17.7	13.6	10.5	7.8	11.0
2067/68	5.9	7.3	8.5	9.9	12.9	16.9	21.2	25.3	26.1	20.1	14.5	10.4	14.9
2068/69	7.7	7.5	8.4	10.0	12.1	15.2	18.9	21.7	20.6	15.6	11.7	9.0	13.2
2069/70	6.9	7.1	8.0	9.3	11.4	15.4	19.1	23.2	24.1	18.2	12.9	9.4	13.7
Promedio	7.8	8.1	9.2	10.6	13.2	17.2	21.1	25.0	25.0	18.8	13.8	10.2	15.0
Desv. Est.	1.1	1.2	1.4	1.4	1.7	2.3	2.9	4.0	5.2	3.7	2.3	1.5	2.3

TABLA E-12. CAUDALES MEDIOS MENSUALES PROYECTADOS PARA EL RÍO CIPRESES BAJO EL ESCENARIO A1B, MODELO PRECIS

	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Año
2040/41	8.7	7.9	10.0	9.9	11.2	15.3	21.4	21.1	16.0	12.2	9.4	7.2	12.5
2041/42	5.6	5.3	5.5	6.8	10.9	19.2	21.8	20.9	17.8	13.3	9.9	7.4	12.0
2042/43	5.6	6.7	8.7	12.9	16.8	21.0	23.4	22.2	18.2	13.8	10.6	7.9	14.0
2043/44	6.2	6.5	6.9	7.6	8.2	10.6	17.8	25.9	25.4	18.9	14.1	9.6	13.2
2044/45	6.4	5.7	7.8	7.9	9.4	10.8	13.5	22.5	25.3	17.3	11.9	8.3	12.2
2045/46	6.0	5.6	7.0	7.2	8.2	12.7	20.8	26.2	22.4	17.0	12.0	8.3	12.8
2046/47	5.8	5.0	5.2	5.9	9.3	17.3	18.4	16.5	13.0	10.0	7.6	6.3	10.0
2047/48	5.3	6.1	9.6	9.8	11.1	15.6	22.0	26.4	22.2	15.5	11.3	8.0	13.6
2048/49	6.1	6.0	8.5	9.0	15.5	15.4	13.8	11.7	9.6	8.0	6.6	5.3	9.6
2049/50	4.3	4.1	5.4	8.3	19.7	24.1	22.3	20.5	16.9	12.8	9.6	10.2	13.2
2050/51	7.8	9.0	8.5	10.1	13.3	15.1	19.6	30.8	38.0	26.6	18.0	11.9	17.4
2051/52	8.6	7.8	8.5	9.3	13.1	14.6	13.4	12.2	10.2	8.4	6.9	5.8	9.9
2052/53	5.0	6.1	6.4	8.3	10.3	9.9	9.2	8.7	8.1	6.7	5.5	4.5	7.4
2053/54	3.8	5.7	5.7	9.5	15.7	27.3	35.4	35.2	31.9	27.2	17.4	11.8	18.9
2054/55	9.3	8.0	8.9	11.1	13.2	16.9	16.7	14.6	13.5	10.9	8.6	6.7	11.5
2055/56	5.2	4.8	5.4	6.9	9.2	15.1	14.6	12.0	12.6	10.4	8.0	6.3	9.2
2056/57	5.1	4.3	5.0	6.7	11.7	14.5	13.1	11.0	8.9	7.2	5.7	4.5	8.1
2057/58	3.6	4.2	5.5	7.8	9.7	9.7	12.9	23.8	34.2	23.0	14.9	10.5	13.3
2058/59	7.7	7.7	9.2	11.0	13.6	15.2	14.1	11.8	9.9	8.6	7.0	5.6	10.1
2059/60	4.6	4.3	5.0	6.3	7.1	9.5	9.7	9.0	7.4	6.1	4.9	4.0	6.5
2060/61	3.2	2.9	4.4	7.3	10.1	18.5	23.4	19.3	14.4	10.9	8.2	6.3	10.8
2061/62	4.8	5.2	6.6	6.5	9.9	17.7	21.3	21.3	18.4	14.5	11.4	8.1	12.1
2062/63	5.6	4.7	6.2	7.2	10.5	15.3	13.4	11.9	10.1	8.1	6.4	5.1	8.7
2063/64	4.3	4.7	5.9	7.9	13.8	15.3	15.1	13.1	10.5	8.4	6.6	5.3	9.2
2064/65	4.2	4.3	4.6	5.8	10.3	16.4	22.2	26.0	24.4	16.9	11.6	8.3	12.9
2065/66	5.6	6.8	6.8	7.6	10.2	11.4	10.9	9.3	7.7	6.3	5.2	4.3	7.7
2066/67	3.6	4.1	4.8	6.6	11.4	12.2	12.2	12.8	10.2	8.0	6.2	5.1	8.1
2067/68	4.3	4.5	4.6	6.9	8.2	13.6	14.1	12.6	11.8	9.3	7.1	5.4	8.5
2068/69	4.3	5.3	10.7	13.6	19.8	24.3	22.9	19.4	16.0	12.3	9.4	7.2	13.8
2069/70	5.5	5.0	6.8	8.9	15.2	15.0	13.2	12.4	10.4	9.2	9.5	7.1	9.8
Promedio	5.5	5.6	6.8	8.4	11.9	15.7	17.4	18.0	16.5	12.6	9.4	7.1	11.2
Desv. Est.	1.6	1.4	1.8	2.0	3.2	4.3	5.6	7.0	8.2	5.7	3.4	2.1	2.9