

**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA NIVAL  
DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO MAIPO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**RAÚL ANTONIO BECERRA VALLADARES**

PROFESOR GUÍA:  
XIMENA VARGAS MESA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JAMES MCPHEE TORRES  
ERNESTO BROWN FERNANDEZ

SANTIAGO, CHILE  
NOVIEMBRE DE 2010

## **EFFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EVOLUCIÓN DE LA COBERTURA NIVAL DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO MAIPO**

Los recursos hídricos y su disponibilidad son materia de variados estudios en todo el mundo, dada su importancia dentro de la economía de un país. En el marco de estos estudios, la posibilidad de modelar de la mejor manera posible los procesos hidrológicos que ocurren en las áreas de interés es de suma importancia. Para tal efecto, uno de los modelos utilizados en Chile actualmente corresponde al modelo conceptual WEAP.

El principal objetivo del presente trabajo es simular mediante el modelo WEAP los procesos hidrológicos que ocurren en las cuencas cordilleranas en estudio, y más específicamente, la evolución en la superficie cubierta de nieve en el período de tiempo que va desde la situación observada, en los años 1977-2008, hasta la situación futura, en el período 2071-2100. Se analizaron además los cambios en la disponibilidad de caudal para cada uno de los cinco puntos de control utilizados, correspondientes a subcuencas pertenecientes a la zona cordillerana del Río Maipo, delimitadas por las estaciones fluviométricas Arrayán en La Montosa, Mapocho en Los Almendros, Maipo en San Alfonso, Maipo en Las Melosas, y Volcán en Queltehues.

El modelo se calibró a escala mensual en un período que va desde el año 1976 hasta el año 1992, utilizando los antecedentes de caudales registrados en las mencionadas estaciones. El período de 1993 hasta el 2008 fue utilizado para realizar la validación del modelo implementado en cada caso. Los resultados muestran un buen ajuste de los datos observados y simulados en lo referente a caudales medios mensuales, utilizando como criterio de calibración el coeficiente de Nash-Sutcliffe, obteniendo valores iguales o superiores a 0,7 en cada punto de control. En lo referente a la simulación de la cobertura nival, la modelación subestima las alturas de nieve simuladas, mas no así la superficie efectivamente cubierta con nieve, la que muestra un buen ajuste con datos reales observados.

Para simular las condiciones climáticas futuras se utilizó los resultados del modelo PRECIS para el escenario A2, generados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Este escenario presenta temperaturas entre 2°C y 4°C más altas que en la situación actual, además de diferencias en las precipitaciones. Para la simulación del escenario futuro, se observa que las cuencas en estudio sufren cambios de regímenes, pasando de nivales a mixtos en algunos casos, incluso con dominio pluvial. Además los resultados muestran un retroceso prematuro de las capas nivales, así como una disminución en la cobertura máxima en los meses de invierno, con diferencias de hasta un 30% en las situaciones base y futura.

## **AGRADECIMIENTOS**

Finalmente se terminó una larga etapa en mi vida, la universitaria. Probablemente más larga de lo que debió haber sido, pero no por eso menos agradable.

En este momento, no queda nada más que agradecerle a la gente que me acompañó durante estos años. Y a pesar de haber sido hartos años, fueron siempre las mismas personas las que me acompañaron en este proceso.

Se le agradece a la familia, que siempre me apoyó y me acompañó, y me dieron lo que necesitaba. Mis amigos, mis compadres. Tremendas personas, los mismos con los que llevo todos años, los que a pesar de habernos dispersado en distintas carreras y distintas universidades, no dejamos de vernos nunca, en un comienzo todas las semanas, después cuando llegaron las mayores responsabilidades (y las pololas) disminuyó un poco la frecuencia, no así las conversaciones y las ganas de seguir en contacto. Pere, Alex, León, Fifo, Chepo, Shanta, Pablito, y mis compadres agregados en la universidad, Didier, Manfred, Israel, Seba (ambos), Waren, etc., han sido tremenda compañía. Todo el Océano fue (¿es? Uno nunca sabe) una compañía increíble todos estos años.

A mi polola Flor, la que me acompañó varios de los años en la universidad, y que con su apoyo y amor me dio más energía para pasar por los cursos y trabajos finales de la universidad, le agradezco inmensamente todo.

Y finalmente, a mis profesores (todos los que tuve en la universidad), y en particular la profesora Ximena Vargas, la profesora por la que muchos de nosotros conocimos la especialidad de hidráulica, y que con sus clases nos motivó a continuar. Sabiendo que es una persona muy ocupada, se agradece mucho el apoyo entregado a lo largo de este trabajo, y la formación como persona y profesional. Mención especial también al profesor McPhee (uno de los mejores docentes con los que tuve clases en la universidad), y al profesor Brown, se les agradece de antemano por las observaciones y aportes para la confección de este trabajo.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	3
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	4
ÍNDICE DE TABLAS.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.2.1. Objetivo General.....	1
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
1.3. Organización del Informe.....	2
2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS.....	4
2.1. Cambio climático.....	4
2.2. Sobre el modelo WEAP.....	7
2.2.1. Algoritmos del modelo.....	8
2.3. Imágenes Satelitales.....	11
2.4. Otros estudios realizados en Chile.....	11
3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	13
3.1. Ubicación.....	13
3.2. Características Morfológicas y Climáticas.....	15
3.3. Régimen Hidrológico.....	16
4. APLICACIONES Y RESULTADOS.....	18
4.1. Creación de Modelos Para Calibración.....	18
4.1.1. Preparación de los datos de entrada.....	18
4.1.2. Determinación de los parámetros climáticos para cada banda de altura.....	24
4.2. Calibración y Validación.....	28
4.3. Validación de Cobertura Nival.....	31
5. ANALISIS DE ESCENARIOS FUTUROS.....	34
5.1. Metodología utilizada.....	34
6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN FUTURA.....	41
6.1. Subcuenca Estero Arrayán en La Montosa.....	41
6.2. Subcuenca Río Mapocho en Los Almendros.....	43
6.3. Subcuenca Volcán en Queltehues.....	45

6.4.	Subcuenca Río Maipo en Las Melosas.....	48
6.5.	Subcuenca Río Maipo en San Alfonso.....	50
7.	CONCLUSIONES.....	53
7.1.	Sobre el modelo WEAP.....	53
7.2.	Generación de escenarios futuros.....	54
7.3.	Conclusiones generales sobre escenarios futuros .....	55
7.4.	Comentarios y recomendaciones .....	55
	BIBLIOGRAFÍA.....	57
	ANEXO A: Resultados de la Calibración.....	A-1
A.1	Calibración según caudal medio mensual .....	A-1
A.1.1	Estero Arrayán en La Montosa.....	A-1
A.1.2	Río Mapocho en Los Almendros .....	A-2
A.1.3	Río Volcán en Queltehues .....	A-2
A.1.4	Río Maipo en Las Melosas.....	A-3
A.1.5	Río Maipo en San Alfonso.....	A-3
A.2	Calibración de las cuencas según caudal medio mensual promedio.....	A-4
A.2.1	Estero Arrayán en La Montosa.....	A-4
A.2.2	Río Mapocho en Los Almendros .....	A-5
A.2.3	Río Volcán en Queltehues .....	A-5
A.2.4	Río Maipo en Las Melosas.....	A-6
7.4.1.	Río Maipo en San Alfonso.....	A-6
	ANEXO B: Correlación datos La Ermita Bocatoma Central y Cerro Calán .....	A-7

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Cambio en temperaturas al año 2100 (IPCC, 2007).....	6
Tabla 3.1 Ubicación y características de las estaciones utilizadas.....	13
Tabla 3.2 Área de las cuencas en estudio .....	14
Tabla 4.1 Información de las estaciones pluviométricas utilizadas.....	19
Tabla 4.2 Gradientes lineales adoptados .....	20
Tabla 4.3 Información de las estaciones meteorológicas utilizadas .....	20
Tabla 4.4 Gradientes de temperatura .....	21
Tabla 4.5 Estaciones de Ruta de Nieve .....	22
Tabla 4.6 Detalles de las bandas de altura .....	23
Tabla 4.7 Rangos de variación del albedo .....	26
Tabla 4.8 Resultados de la calibración y validación .....	29
Tabla 5.1 Series de precipitación (mm) en Cerro Calán para el período 2071 – 2100.....	37
Tabla 5.2 Series de temperatura (°C) en Cerro Calán para el período 2071 – 2100 .....	38
Tabla 5.3 Series de precipitación (mm) en Embalse El Yeso para el período 2071 – 2100.....	39
Tabla 5.4 Series de temperatura (°C) en Embalse El Yeso para el período 2071 – 2100.....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Muestra de la evolución de los posibles forzantes según el escenario considerado.....	7
Figura 2.2 Representación conceptual del modelo WEAP .....	9
Figura 3.1 Zona de estudio .....	14
Figura 3.2 Delimitación de las cuencas.....	15
Figura 3.3 Curva de variación estacional Arrayán en La Montosa.....	16
Figura 3.4 Curva de variación estacional Mapocho en Los Almendros .....	16
Figura 3.5 Curva de variación estacional Volcán en Queltehues .....	17
Figura 3.6 Curva de variación estacional Maipo en Las Melosas.....	17
Figura 3.7 Curva de variación estacional Maipo en San Alfonso.....	17
Figura 4.1 Estaciones con información pluviométrica utilizadas.....	18
Figura 4.2 Comparación en gradientes .....	19
Figura 4.3 Estaciones con información de temperatura utilizadas.....	21
Figura 4.4 Discretización de las cuencas .....	23
Figura 4.5 Modelo WEAP de las cuencas en estudio.....	27
Figura 4.6 Calibración caudales cuenca Mapocho en Los Almendros .....	29
Figura 4.7 Calibración caudales cuenca Arrayán en La Montosa.....	30
Figura 4.8 Cobertura nival simulada Octubre 1986 .....	32
Figura 4.9 Cobertura nival real Octubre 1986 .....	32
Figura 5.1 Correlación entre temperaturas Embalse Yeso y caso base PRECIS .....	35
Figura 5.2 Correlación entre precipitaciones Embalse Yeso y caso base PRECIS .....	35
Figura 5.3 Correlación entre temperatura Cerro Calán y caso base PRECIS .....	35
Figura 5.4 Correlación entre precipitación Cerro Calán y caso base PRECIS.....	36
Figura 5.5 Series de precipitación para el Cerro Calán .....	37
Figura 5.6 Series de temperatura para el Cerro Calán.....	38
Figura 5.7 Series de precipitación para Embalse Yeso.....	39
Figura 5.8 Series de temperatura para Embalse Yeso.....	40
Figura 6.1 Comparación caudales medios mensuales promedio Arrayán en La Montosa.....	41
Figura 6.2 Evolución derretimiento de nieve Arrayán en La Montosa para todo el período .....	42
Figura 6.3 Evolución derretimiento de nieve Arrayán en La Montosa.....	42
Figura 6.4 Evolución derretimiento de nieve Arrayán en La Montosa.....	43
Figura 6.5 Comparación caudales mensuales promedio Mapocho en Los Almendros.....	44
Figura 6.6 Evolución derretimiento de nieve Mapocho en Los Almendros .....	44
Figura 6.7 Evolución derretimiento de nieve Mapocho en Los Almendros .....	45
Figura 6.8 Evolución derretimiento de nieve Mapocho en Los Almendros .....	45
Figura 6.9 Comparación caudales mensuales promedio Volcán en Queltehues.....	46
Figura 6.10 Evolución derretimiento de nieve Volcán en Queltehues.....	46
Figura 6.11 Evolución derretimiento de nieve Volcán en Queltehues.....	47
Figura 6.12 Evolución derretimiento de nieve Volcán en Queltehues.....	47
Figura 6.13 Comparación caudales mensuales promedio Maipo en Las Melosas .....	48
Figura 6.14 Evolución derretimiento de nieve Maipo en Las Melosas .....	49
Figura 6.15 Evolución derretimiento de nieve Maipo en Las Melosas .....	49
Figura 6.16 Evolución derretimiento de nieve Maipo en Las Melosas .....	50
Figura 6.17 Comparación caudales mensuales promedio Maipo en San Alfonso .....	51

Figura 6.18 Evolución derretimiento de nieve Maipo en San Alfonso.....	51
Figura 6.19 Evolución derretimiento de nieve Maipo en San Alfonso.....	52
Figura 6.20 Evolución derretimiento de nieve Maipo en San Alfonso.....	52
Figura A.1 Calibración de caudal Arrayán en La Montosa .....	1
Figura A.2 Calibración de caudal Mapocho en Los Almendros .....	2
Figura A.3 Calibración de caudal Río Volcán en Queltehues .....	2
Figura A.4 Calibración de caudal Río Maipo en Las Melosas .....	3
Figura A.5 Calibración de caudal Río Maipo en San Alfonso .....	3
Figura A.6 Calibración de caudal promedio mensual Arrayán en La Montosa .....	4
Figura A.7 Calibración de caudal promedio mensual Mapocho en Los Almendros .....	5
Figura A.8 Calibración de caudal promedio mensual Río Volcán en Queltehues.....	5
Figura A.9 Calibración de caudal promedio mensual Río Maipo en Las Melosas .....	6
Figura A.10 Calibración de caudal promedio mensual Río Maipo en San Alfonso .....	6

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Motivación**

El Cambio Climático hace referencia a la consecuencia del aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre. Tal efecto es un problema que en los últimos años, debido a su acentuación y al aumento en la preocupación por los recursos naturales y la sustentabilidad, ha sido objeto de mayor atención por parte de autoridades y especialistas referentes al tema ambiental. Incluso, se creó en 1988 el IPCC (Panel Internacional sobre Cambio Climático) para el mejor entendimiento de estos efectos. Se vuelve por lo tanto una tarea importante el estudio de los impactos de dicho fenómeno en el país.

Uno de los efectos estudiados por el IPCC y entregado en su último reporte del año 2007, dice que los glaciares en montañas y las capas de nieve han declinado en ambos hemisferios. Un impacto derivado de lo mencionado, es el hecho de que los deshielos se producirían anticipadamente por efecto del alza en las temperaturas, cambiando la disponibilidad de caudal en los ríos que muestran régimen nival o mixto. El estudio "Variaciones climáticas en Chile para el siglo XXI", del año 2007, realizado por el departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, indica que para fines del siglo XXI ocurra un aumento de temperatura en todas las regiones del país, variación fluctuante entre 2° y 4°C.

Por la suma de razones explicadas, es de gran importancia desarrollar herramientas que permitan simular en cierto grado el impacto que generará el cambio climático en las cuencas cordilleranas, con el objetivo de estar preparados ante los posibles cambios en los cuerpos de agua respectivos, especialmente en sectores donde los recursos hídricos son de gran utilidad, como ocurre en la zona cordillerana central del país.

### **1.2. Objetivos**

#### **1.2.1. Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo de título, será el modelar los recursos hídricos de la cuenca del Maipo-Mapocho para un escenario futuro, utilizando el modelo WEAP, con el objeto de conocer el efecto del cambio climático sobre la cobertura nival en el área de estudio.

### 1.2.2. Objetivos Específicos

- Creación de las curvas de variación estacional (CVE) actuales para el sector en estudio, utilizando el modelo WEAP para realizar el balance hídrico en cada una de las subcuencas.
- Creación de la estadística de caudales en un escenario futuro, a partir del modelo generado para la situación actual, pero trabajando con las condiciones de temperatura que se presentarían en el período de tiempo a simular.
- Obtener los resultados entregados por WEAP para la evolución de las coberturas nivales en el sector, en porcentaje de área cubierta de nieve para distintos meses del año.
- Llevar a cabo un análisis de la cobertura nival en años húmedos, normales y secos.
- Comparar los resultados obtenidos en 5 subcuencas: Volcán en Queltehues, Maipo en San Alfonso, Maipo en Las Melosas, Mapocho en Los Almendros, Arrayán en La Montosa.

### 1.3. Organización del Informe

Se entrega en el Capítulo 2 los antecedentes bibliográficos recopilados para llevar a cabo el estudio, conformados tanto por descripciones del modelo a utilizar, así como información del tipo climática de interés.

Una descripción de las cuencas en estudio se presenta en el Capítulo 3. Acá se hace referencia a las principales características del sector en general, como el uso de suelo, cauces principales, y detalles de las áreas en estudio.

El Capítulo 4 consiste en la descripción de los procesos llevados a cabo para la manipulación de los datos meteorológicos de entrada del modelo WEAP, además del análisis previo de las cuencas para obtener sus parámetros característicos y su segmentación en bandas de elevación. Se muestran en este mismo Capítulo los resultados obtenidos en las calibraciones y validaciones en los distintos puntos de control utilizados.

La metodología utilizada para el ingreso de datos futuros se adjunta en el Capítulo 5, así como el detalle de la validación y corrección de los datos de entrada.

El Capítulo 6 muestra los resultados de la simulación futura, y es aquí donde además se realiza la comparación entre las situaciones presente y futura para las condiciones simuladas consideradas en este estudio, para cada una de las subcuencas.

Por último, el Capítulo 7 incluye los comentarios y conclusiones finales obtenidas a lo largo del desarrollo de este trabajo, tanto de los resultados obtenidos, como del modelo WEAP y su aplicación a este tipo de estudios.

## 2. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

En el presente capítulo se entregan los antecedentes necesarios para poder comprender la clase de estudio que comprende el presente trabajo. Se realiza una presentación de algunos de los estudios que se ha llevado a cabo en relación a los efectos del cambio climático, así como información referente al modelo hidrológico utilizado.

Dentro de las tareas de la hidrología, se encuentra caracterización de los fenómenos naturales que ocurren en el ciclo hidrológico, en los lugares que no cuentan con información, o en los que se desea conocer su comportamiento frente situaciones no registradas. Tales procesos, precipitación, evaporación, escorrentía, infiltración, entre otros, dependen de muchos factores, lo que hace complejo su análisis y cuantificación. Por lo tanto, se recurre a modelos de simulación que a través de relaciones matemáticas representan la zona de interés.

### 2.1. Cambio climático.

Para comprender los esfuerzos que se han llevado a cabo alrededor del mundo para estudiar el efecto del cambio climático en nuestro planeta, hay que referirse al IPCC. Esta sigla hace referencia al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, el cual fue creado en el año 1988, por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas por el Medio Ambiente (PNUMA). La función principal del IPCC es analizar todos los elementos disponibles para entender el riesgo que supone el cambio climático provocado por actividades humanas. Dentro de sus actividades, realiza evaluaciones periódicas de los conocimientos sobre el cambio climático, además de elaborar informes especiales y documentos técnicos (<http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg3/index.php?idp=81>)

Dentro de los reportes emitidos por el IPCC se encuentran los de mayor importancia en este trabajo, que son los referidos a los escenarios de emisiones futuras<sup>1</sup> (o SRES, Special Reports on Emission Scenarios), reportes especiales que totalizan cinco hasta este momento, y que consisten en distintas situaciones en que puede desarrollarse la humanidad, y con esto cambiando las consecuencias que se pueden provocar en el medio ambiente. Estos escenarios consisten fundamentalmente en “imágenes” de como se encontraría el medio ambiente en una situación futura, y no cumplen una función de “predecir” lo que ocurrirá realmente.

1: [http://www.grida.no/publications/other/ipcc\\_sr/](http://www.grida.no/publications/other/ipcc_sr/)

En la actualidad, existen alrededor de 40 escenarios futuros en los reportes del IPCC citados anteriormente, generados a partir de 6 modelos de circulación general atmósfera-océanos distintos, desarrollados por investigadores alrededor del mundo. Los 6 modelos utilizados consisten en:

- Asian Pacific Integrated Model (AIM), desarrollado por el National Institute of Environmental Studies en Japón (Morita *et al.*, 1994). Este modelo consiste en una simulación computarizada de gran escala para el análisis de escenarios de emisiones de gas con efecto invernadero, y el impacto del calentamiento global en la zona de Asia-Pacífico.

- Atmospheric Stabilization Framework Model (ASF), del ICF Consulting en EE.UU. (Lashof and Tirpak, 1990; Pepper *et al.*, 1992, 1998; Sankovski *et al.*, 2000). La versión actual incluye modelaciones de emisiones de gases de efecto invernadero por agricultura, energía y deforestación, y emisiones estimadas para 9 regiones del mundo.

- Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect (IMAGE), realizado por el National Institute for Public Health and Environmental Hygiene (RIVM) (Alcamo *et al.*, 1998; de Vries *et al.*, 1994, 1999, 2000), utilizado en conjunto con el Dutch Bureau for Economic Policy Analysis (CPB) WorldScan model (de Jong and Zalm, 1991). IMAGE consiste en tres sistemas de modelos conectados, incluyendo sistemas de energía-industria, ambiente terrestre y sistemas océano-aire. Abarca gran parte del mundo.

- Multiregional Approach for Resource and Industry Allocation (MARIA), desarrollado por el Science University of Tokyo en Japón (Mori and Takahashi, 1999; Mori, 2000). Consiste en un modelo compacto que pretende simular las relaciones entre economía, energía, recursos, uso de suelo y cambio global.

- Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact (MESSAGE), creado por el International Institute of Applied Systems Analysis (IIASA) en Austria (Messner and Strubegger, 1995; Riahi and Roehrl, 2000). Modelo constituido a su vez por varios otros modelos, el que comienza con suposiciones de crecimiento poblacional y económico por región, estimando luego el uso de energía, y posteriormente las emisiones generadas.

- Mini Climate Assessment Model (MiniCAM), del Pacific Northwest National Laboratory (PNNL) de EE.UU. (Edmonds *et al.*, 1994, 1996a, 1996b). Modelo que estima emisiones de gases de efecto invernadero en base a otros dos modelos independientes.

Los 40 escenarios mencionados, pueden clasificarse dentro de 4 grandes familias. Estas 4 familias de escenarios se dividen por sus principales características, de la siguiente forma:

- A1: Un futuro con un rápido crecimiento económico, población mundial que alcanza su peak a mediados del siglo y comienza luego a declinar, además de la rápida introducción de nuevas y más eficientes tecnologías. Es un escenario en el cual la gente persigue su bienestar personal, pasando el cuidado del medioambiente a un segundo plano. Este escenario tiene a su vez subdivisiones según el énfasis tecnológico utilizado, lo que implicará distintos niveles de emisión: A1FI (energías fósiles), A1T (fuentes de energías no fósiles) y A1B (consistente en un balance entre las fuentes de energías disponibles).

- A2: Un mundo diferenciado, menos global que su símil A1, mucho más heterogéneo. Es importante el tema de identidades culturales y su preservación. La población mundial se incrementa lentamente, y el desarrollo económico es básicamente orientado regionalmente .

- B1: Este escenario es similar al A1 en la forma de desarrollo, siendo bastante rápida, pero se diferencia de la anterior en el hecho de que se introducen tecnologías limpias y se producen cambios en la estructura económica. Hay un esfuerzo global para el cuidado del ambiente, y en la creación de soluciones sustentables.

- B2: Un futuro similar al B1 en el sentido de buscar una sustentabilidad en el desarrollo de las tecnologías, pero con la diferencia de que el crecimiento en general y las medidas adoptadas, tienen a un desarrollo más regional que global.

En la Tabla 2.1 se muestra el rango en que aumentarían las temperaturas para los distintos escenarios generados para fines del siglo 21, mientras que en la Figura 2.1 se puede apreciar el comportamiento explicado previamente para las 4 familias de escenarios mencionados.

Tabla 2.1 Cambio en temperaturas al año 2100 (IPCC, 2007)

Escenario	Rango estimado de aumento de temperaturas (°C)
A1B	1.7 - 4.4
A1FI	1.4 - 6.4
A1T	1.4 - 3.8
A2	2 - 5.4
B1	1.1 - 2.9
B2	1.4 - 3.8

Figura 2.1 Muestra de la evolución de los posibles forzantes según el escenario considerado

Escenario	Población	Economía	Medio ambiente	Equidad	Tecnología	Mundialización
A1FI						
A1B						
A1T						
B1						
A2						
B2						

Fuente: Estimación Hidrológica Bajo Escenarios de Cambio Climático en Colombia, Acevedo Aristizábal, Lina Alexandra (2009).

## 2.2. Sobre el modelo WEAP.

El modelo WEAP (Water Evaluation And Planing), es un modelo semi distribuido que cumple funciones tanto de herramienta hidrológica, como de planificación. Tales características son las que lo han transformado en el más utilizado en Chile en estudios para intentar cuantificar los efectos del cambio climático en los recursos hídricos.

El modelo WEAP fue desarrollado por el Stockholm Environment Institute's Boston Center del Tellus Institute, el cual puede ser descargado gratuitamente en su versión de prueba, en el sitio web <http://www.weap21.org>. Cabe mencionar que si bien es un software comercial, los desarrolladores entregan licencias de forma gratuita para instituciones sin fines de lucro, gubernamentales y/o académicas de países en desarrollo, lista de la cual Chile forma parte.

WEAP posee una interfaz gráfica basada en SIG, la que permite al usuario interactuar con todos los componentes disponibles para la caracterización de la cuenca en estudio, además de poder trabajar con capas generadas previamente en formato shape, formato nativo del popular software ArcGIS. Dentro de los componentes previamente mencionados, se cuentan la gran mayoría de los elementos disponibles en una cuenca, tales como ríos, embalses, nodos de demanda, subcuencas, acuíferos, plantas de tratamiento, entre otros. Es en las

subcuencas (o “catchments”) donde se ingresan los parámetros climáticos tales como precipitación, humedad, temperatura, velocidad del viento, etc. Estos datos son ingresados al modelo de forma discretizada, de la forma en que requiera el estudio, pudiendo ser de forma anual, mensual, semanal, diaria, o como se estime conveniente. Otros parámetros, tales como características del suelo, se dejan fijos pues se considera que no experimentarán mayores variaciones a lo largo del tiempo.

### 2.2.1. Algoritmos del modelo.

WEAP presenta tres alternativas para modelar los procesos hidrológicos en una cuenca, pero solamente uno de ellos es lo suficientemente complejo en los términos de utilizar condiciones climáticas para ser utilizado en este trabajo. Este método es el llamado “Método de la Humedad del Suelo”.

Dicho método es el que fue utilizado en el presente estudio, y a su vez es el que se utilizó en anteriores trabajos relacionados con el tema del cambio climático, como los mencionados en el punto 2.4. Su principal característica, es que para la modelación del suelo de la zona en estudio, lo representa mediante dos capas, o cubetas (por su nombre original, “budgets”). Mientras la capa superior representa los procesos tales como la evapotranspiración y la escorrentía (considerando los parámetros meteorológicos de entrada y los parámetros del suelo), en la cubeta inferior se simulan procesos como el flujo base y los cambios de humedad en el suelo. Una representación gráfica de los procesos explicados, se puede ver en la Figura 2.2.

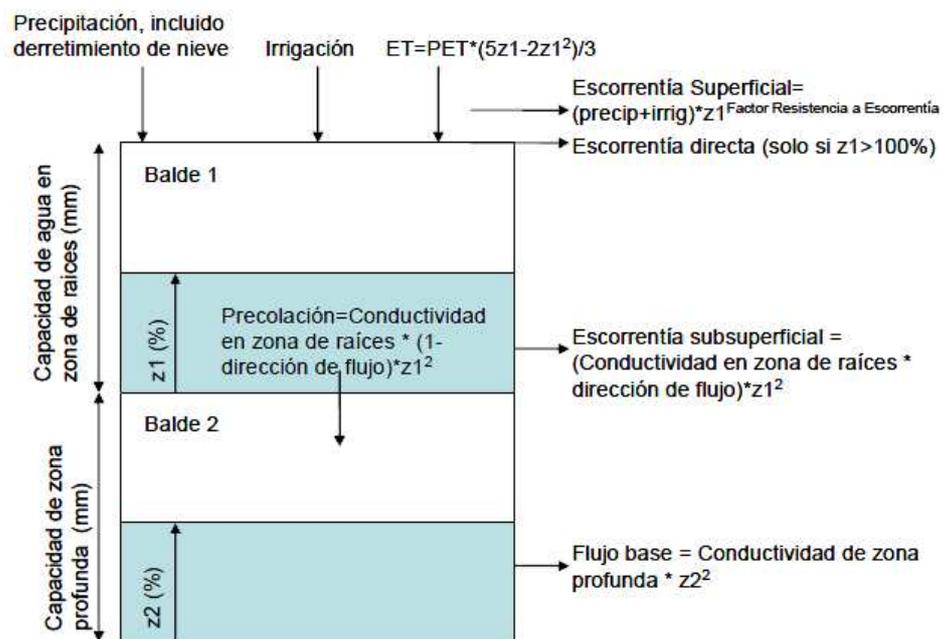
En el modelo, se permite la división de la zona de estudio en el número de subcuencas que se considere necesario. En análisis anteriores, se ha optado por dividir las cuencas tanto en sus subcuencas naturales, como además en bandas de elevación, específicamente en el caso de cuencas cordilleranas. Esto se explica por el hecho de que variables tales como la precipitación y la temperatura muestran variaciones importantes con la altura, razón por la que se hace necesario realizar esta subdivisión.

Para cada una de estas subcuencas, WEAP realiza un balance de masas particular, en el período de tiempo establecido por el usuario. En el caso del presente estudio se realizó a escala mensual, lo que implica que para cada variable climática ingresada, se calcula el balance de masas en cada nodo de forma instantánea, para el valor promedio mensual de temperatura, precipitación, humedad, etc. El balance de masas se realiza bajo la restricción lineal:

$$\sum \text{entradas} = \sum \text{salidas} + \Delta \text{almacenamiento}$$

Diferencias en almacenamiento en un nodo en particular, solamente son atribuibles a la existencia de acuíferos o embalses, mientras que las salidas están constituidas tanto por pérdidas como por consumo de nodos de demanda. Además, cada entrada o salida puede tener más de una fuente, es decir, a un nodo puede llegar agua mediante más de un nodo de transmisión, por ejemplo, un punto ubicado en la confluencia de dos ríos.

Figura 2.2 Representación conceptual del modelo WEAP



Fuente: Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP, Centro de Cambio Global-Universidad Católica de Chile, Stockholm Environment Institute, 2009.

Un punto de vital importancia para este estudio, es el de la modelación de la nieve. Para la última versión de WEAP, la versión 2.3149, del 5 de agosto del 2010, ya se cuenta con un módulo mejorado para el procesamiento de nieve, el cual permite que elementos como el albedo, o un coeficiente de radiación que sirve para realizar la calibración de derretimiento de nieve, sean ingresados por el usuario de la forma que se desee. Esta incorporación es de suma importancia, pues ayuda a que las simulaciones de las coberturas nivales presenten una forma más precisa de ser calibradas.

El algoritmo de cálculo de nieve incorporado en WEAP es de especial importancia, ya que precisamente se pondrá énfasis en el cálculo de coberturas nivales en este estudio. La acumulación de nieve en una subcuenca se calcula como:

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

Donde:

$AC_i$  = Acumulación en altura equivalente de agua en el período i.

$P_i$  = Precipitación en el período i.

$M_i$  a su vez, es un coeficiente que se estima a través de la siguiente expresión:

$$M_i = \min (AC_i * M_c, E_m)$$

$M_c$  viene dado por:

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

$T_d$  = Temperatura de derretimiento.

$T_i$  = Temperatura en el mes i.

$T_s$  = Temperatura de congelamiento.

$E_m$  es la energía disponible para el derretimiento convertida a una profundidad/tiempo equivalente. La energía se calcula como se muestra a continuación:

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

$R_{Net}$  representa la radiación neta sobre la zona, la cual es calculada dentro del modelo utilizando un factor que se puede calibrar, para representar de mejor manera el comportamiento de la cobertura nival. El factor de radiación neta además considera el albedo que uno ingrese en el modelo.  $E_{other}$  representa formas adicionales de energía, agrupados en un solo término.

De esta forma se construye la modelación de la nieve, de la mejor manera posible, en su última versión del algoritmo desarrollado para este software.

WEAP presenta una explicación extensiva de sus capacidades, características y formas de cálculo en su manual de usuario, y para mayores referencias se recomienda visitar la página web de los desarrolladores, así como sus foros y publicaciones.

### 2.3. Imágenes Satelitales.

Se incluyó el uso de imágenes satelitales para comparar las coberturas nivales simuladas para el período de calibración, período en el cual se extrajeron las imágenes disponibles y se compararon con los resultados obtenidos en la modelación. Para tal objetivo, se utilizaron principalmente dos tipos de imágenes, las LandSat y las MODIS.

Las primeras de ellas, son las obtenidas por la misión LandSat (<http://landsat.org/>). Los LandSat son una serie de satélites puestos en órbita por la NASA alrededor de la Tierra, con el objetivo de tomar imágenes en alta resolución de la superficie terrestre. Los satélites han sido lanzados en distintos años, siendo el LandSat 7 el más reciente, puesto en órbita en 1999. Actualmente, de los siete satélites que han sido lanzados históricamente en dicha misión, los cuatro primeros satélites se encuentran fuera de servicio. Imágenes de este servicio están disponibles para bajar gratuitamente desde la página del Visor Global del USGS (United States Geological Survey), <http://glovis.usgs.gov/>. Cabe destacar que existen largos períodos sin información, además de años en que debido a la cobertura nubosa no se permite extraer mayor información. Estas misiones tienen información desde el año 1972 hasta la actualidad.

Posteriormente están las imágenes MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). Estas imágenes, cuya sigla significa Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer, también son administradas y entregadas por la NASA. Las imágenes MODIS tienen una mejor resolución que las LandSat, y capturan las imágenes con 36 bandas espectrales, ante las entre 4 y 7 bandas de las LandSat. El inconveniente, es que cuenta con información desde el año 2000 solamente, y en algunas estaciones no se contaba con datos para la validación posteriormente al año 1992.

### 2.4. Otros estudios realizados en Chile.

En el marco del XIX Congreso Chileno de Hidráulica, del año 2009, fueron presentados 3 estudios relacionados con el cambio climático que fueron un referente importante para el presente trabajo.

- *Sensibilidad de los Recursos Hídricos Futuros al Procedimiento de Escalamiento de Variables Meteorológicas*, Ayala et al., 2009: En el mencionado estudio, se analiza el efecto que tienen las técnicas de escalamiento utilizadas sobre los modelos globales de circulación atmosférica. Los modelos de circulación se realizan en una escala global, en grillas distanciadas varios kilómetros. Dicho distanciamiento es un impedimento importante cuando se desea trabajar con datos para cuencas de menor escala, pues es posible que se necesite utilizar datos en

zonas que no cuentan con resultados directos. Por lo tanto, debe llevarse a cabo un proceso de escalamiento de los modelos existentes, lo que puede generar repercusiones en las series meteorológicas obtenidas, y en consecuencia, en los resultados obtenidos en posibles simulaciones de recursos hídricos. En el mencionado estudio se trabajó sobre la cuenca de Aconcagua en Chacabuquito, con datos del escenario futuro A2, y con el modelo WEAP para la simulación de recursos hídricos. En el estudio de Ayala et al., dentro de los métodos de escalamiento se analizó directamente el modelo PRECIS-DGF, el utilizado en el presente estudio.

- *Impacto del Cambio Climático en las Crecidas de la Quebrada San Ramón. Análisis de Variables Meteorológicas*, Pérez, J. y X. Vargas, 2009: En el estudio referido, se realiza un análisis del efecto del cambio global en los caudales de crecida en la zona en estudio, utilizándose en particular, precipitaciones diarias máximas y los máximos anuales de las temperaturas medias diarias en días de lluvia en el período pluvial. Para la situación futura, se utilizaron las series corregidas de los escenarios A2 y B2. Los resultados obtenidos muestran un considerable aumento en las precipitaciones asociadas a períodos de retorno alto para el escenario B2, y una disminución leve en el escenario A2. El aumento de temperaturas se muestra similar para ambos escenarios, en torno a los 2° y 4°C.

- *Proyecciones de Impacto del Cambio Climático Sobre Cuencas Andinas de Chile Central: Aplicación a Cuencas de Maule Alto y Laja*, McPhee et al., 2009: Este trabajo también tiene como finalidad estudiar la vulnerabilidad de sistemas hidrológicos en el país, ante los inminentes efectos del cambio global. En este caso, se trabajó sobre dos cuencas especialmente importantes por su capacidad de generación hidroeléctrica. Se estimaron los caudales medios mensuales para las series meteorológicas corregidas del escenario A2. Los resultados obtenidos muestran disminuciones importantes en la disponibilidad de los recursos hídricos, en torno a un 40%, dada una reducción en las precipitaciones en ambas cuencas, y un aumento de temperatura en la cuenca del río Laja.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1. Ubicación

Para este estudio, se utilizó un sector amplio en la cuenca del río Maipo, al oriente de la ciudad de Santiago, en la Región Metropolitana, el cual se puede observar en la Figura 3.1. Este sector queda delimitado por 3 puntos de control, los cuales son seleccionados por la existencia en dichos puntos de estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas. Las mencionadas estaciones son Estero Arrayán en La Montosa, Río Mapocho en los Almendros y Río Maipo en San Alfonso. Además, con el objeto de realizar una mejor caracterización de la cuenca, se utilizaron dos puntos extras de control, en estaciones ubicadas dentro de la cuenca de la estación Río Maipo en San Alfonso. Estas estaciones corresponden a Río Volcán en Queltehues, y Río Maipo en San Alfonso. Las coordenadas de dichas estaciones se muestran en Tabla 3.1, junto con la cota y la superficie de su cuenca:

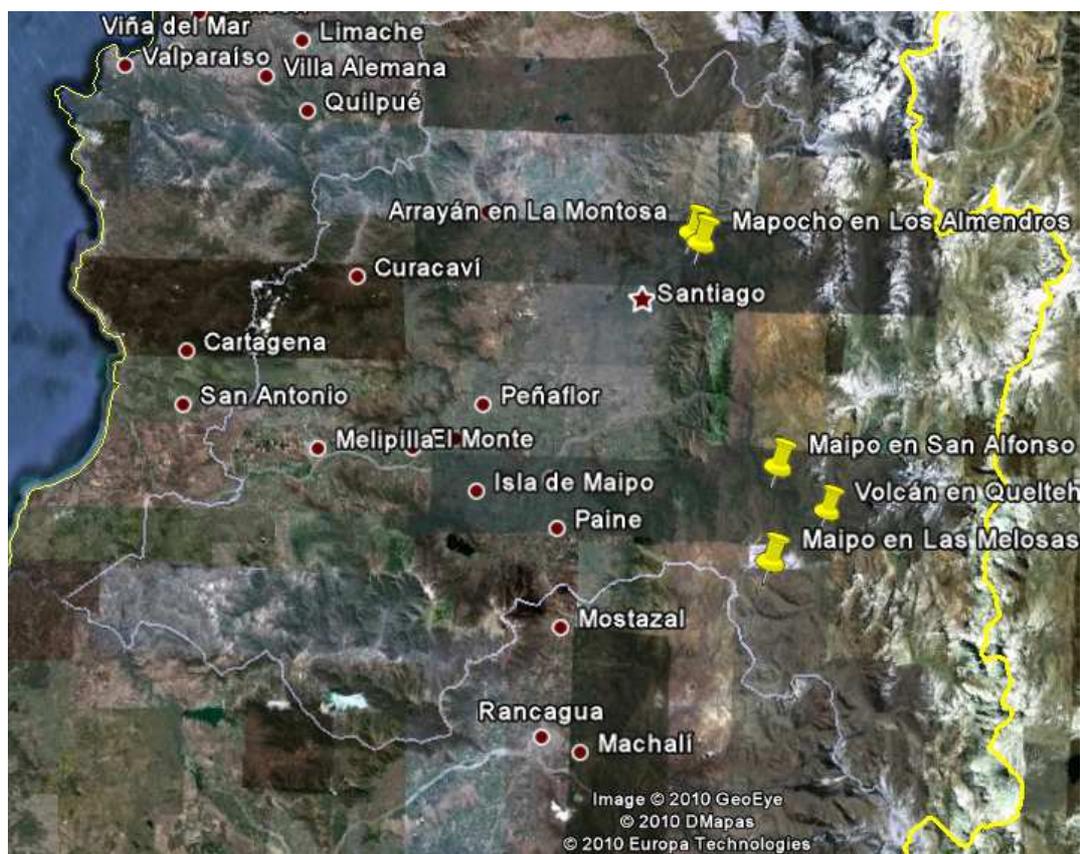
Tabla 3.1 Ubicación y características de las estaciones utilizadas

Estación	Latitud	Longitud	Cota (m.s.n.m.)	Superficie (km <sup>2</sup> )
Río Volcán en Queltehues	33°48'	70°12'	1.365	523
Esteros Arrayán en La Montosa	33°21'	70°21'	880	219
Río Mapocho en Los Almendros	33°22'	70°28'	1.024	620
Río Maipo en San Alfonso	33°44'	70°18'	1.108	2.850
Río Maipo en Las Melosas	33°50'	70°12'	1.527	1.488

Es un área cordillerana que incluso en períodos de verano mantiene nieve en sus capas superiores, que cuenta con poca actividad humana y asentamientos en general.

Las tres cuencas principales y las dos subcuencas fueron delimitadas con ayuda del software WMS (Watershed Modeling System). Para llevar a cabo la delimitación, debe utilizarse un archivo de elevación del terreno, conocidos como DEM (Digital Elevation Model). En este caso, se utilizó uno de los más precisos disponibles en internet en forma gratuita, los ASTER GDEM (<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/index.jsp>). Estos DEM Globales son producto de la misión ASTER llevada a cabo en conjunto por Estados Unidos y Japón, generando DEM con una precisión de 30 metros, 3 veces mejor que los del Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM). Los resultados gráficos de las delimitaciones se presentan en la Figura 3.2:

Figura 3.1 Zona de estudio



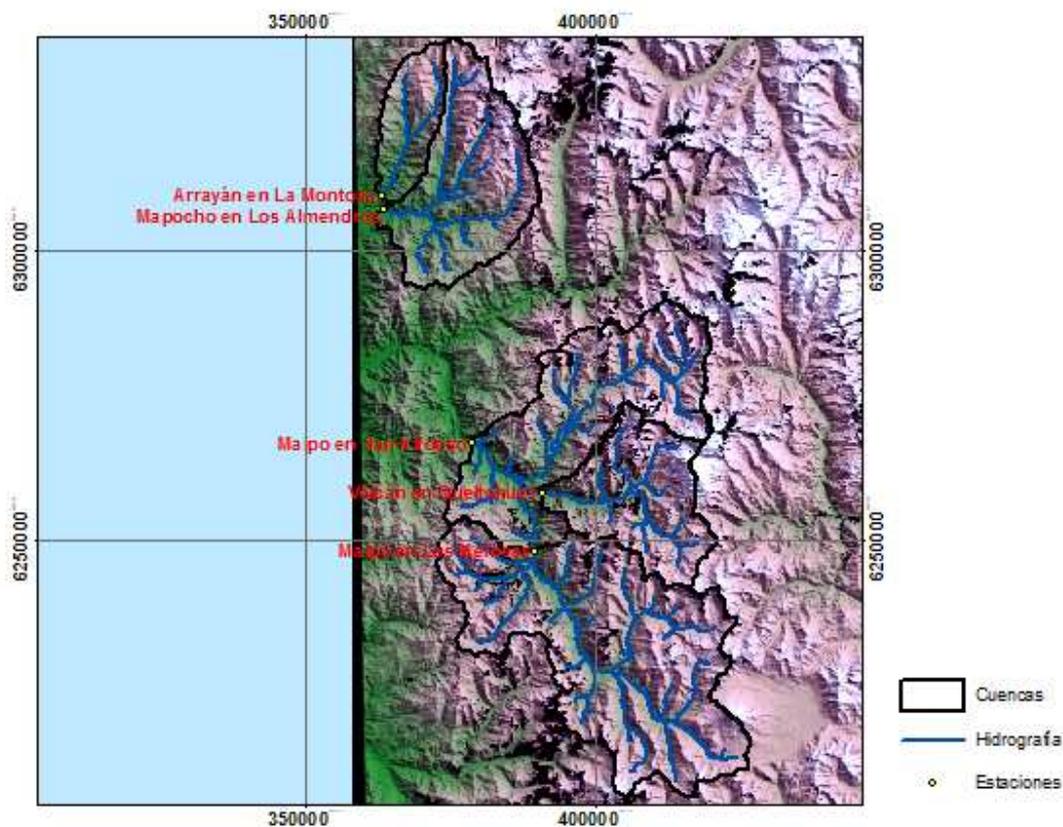
Fuente: Google Earth.

Para cada uno de los puntos de control, se muestra en la Tabla 3.2 el área correspondiente a cada uno de ellos. Hay que tener en cuenta que el área de la cuenca de Maipo en San Alfonso incluye la de las subcuencas correspondientes.

Tabla 3.2 Área de las cuencas en estudio

Cuenca	Superficie [km <sup>2</sup> ]
Arrayán en La Montosa	226.8
Mapocho en Los Almendros	647.7
Maipo en San Alfonso	2811.7
Volcán en Queltehues	515.9
Maipo en Las Melosas	1396.6

Figura 3.2 Delimitación de las cuencas



### 3.2. Características Morfológicas y Climáticas

Las cuencas se encuentran ubicadas en puntos de variada altura, que van desde los 1000 metros sobre el nivel del mar, hasta aproximadamente 6000 metros en el caso del punto más alto en la cuenca generada por la estación Río Maipo en San Alfonso.

La zona en estudio presenta un clima de altura, con precipitaciones invernales en forma de nieve en la mayoría de su superficie, y una temporada seca que dura aproximadamente entre Octubre y Marzo, aunque ocurren eventos de precipitaciones durante ese intervalo de tiempo, de forma esporádica. La temperatura varía considerablemente entre las estaciones consideradas, dependiendo de la altura en la que se encuentren.

Luego de consultar con el sistema de información territorial de la Comisión Nacional de Riego<sup>1</sup>, se pudo observar que en la zona de estudio no existen acuíferos que puedan interactuar con el sistema.

El uso de suelo es básicamente praderas y terrenos montañosos, además de zonas glaciadas, por lo que no se requiere análisis de pérdidas por cultivos.<sup>2</sup>

### 3.3. Régimen Hidrológico

Las 5 estaciones consultadas muestran un régimen nival, dado que sus mayores caudales comienzan a ocurrir en el período de deshielo. En los años húmedos se observa claramente la tendencia a presentar mayores caudales en la época de primavera, en años secos se suaviza la tendencia, pero igualmente puede apreciarse. En las Figuras 3.3 a 3.7 se pueden apreciar las características mencionadas.

Figura 3.3 Curva de variación estacional Arrayán en La Montosa

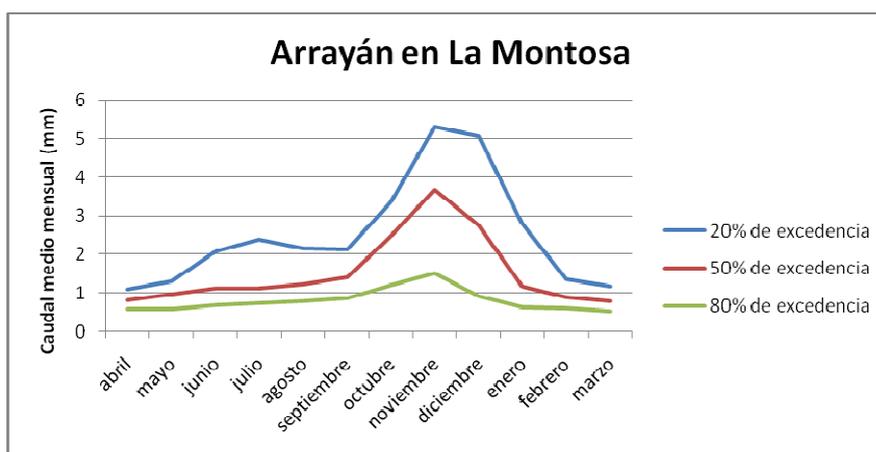
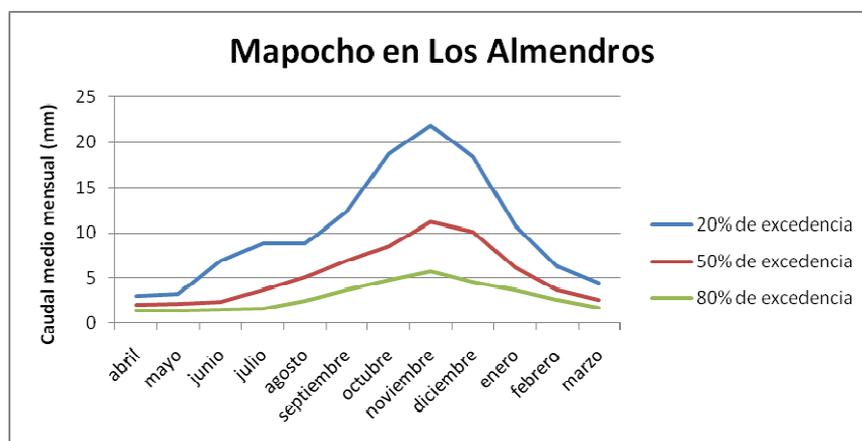


Figura 3.4 Curva de variación estacional Mapocho en Los Almendros



1: <http://esiir.cnr.cl/>

2: Sistema de Información Territorial de la CONAF: <http://conaf2010.siijsa.cl/>

Figura 3.5 Curva de variación estacional Volcán en Queltehues

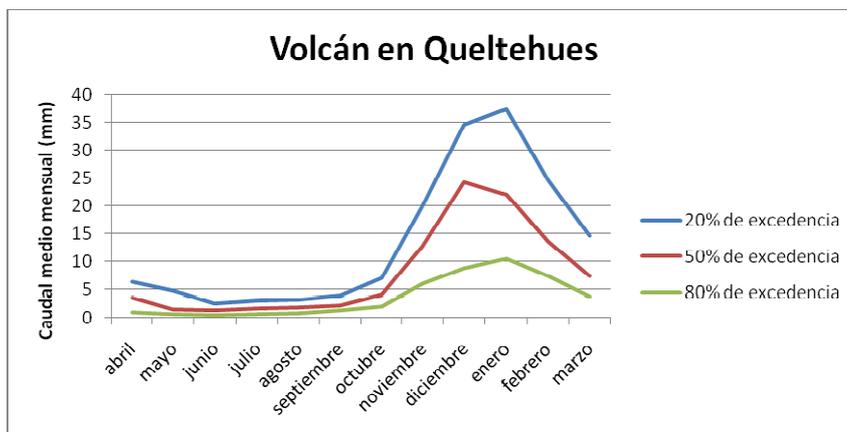


Figura 3.6 Curva de variación estacional Maipo en Las Melosas

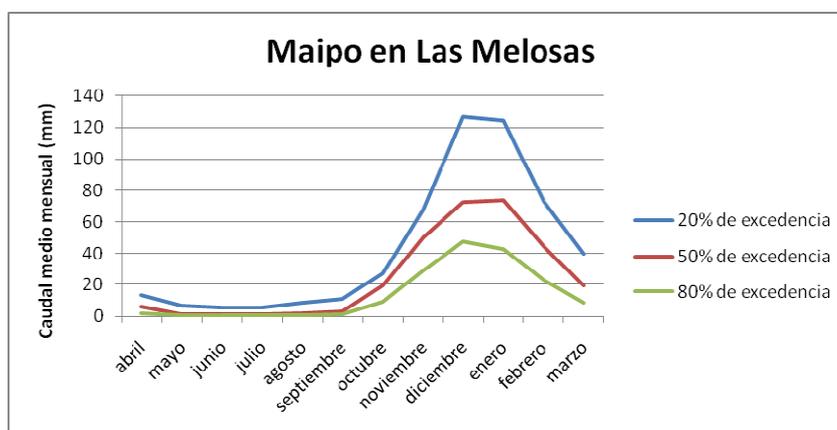
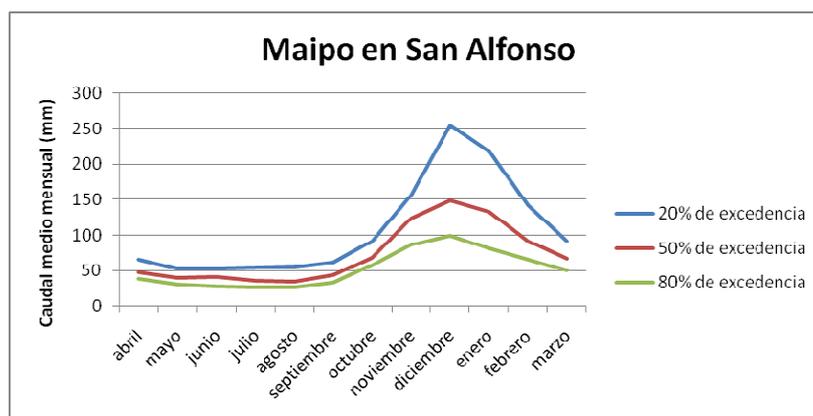


Figura 3.7 Curva de variación estacional Maipo en San Alfonso



## 4. APLICACIONES Y RESULTADOS

### 4.1. Creación de Modelos Para Calibración

#### 4.1.1. Preparación de los datos de entrada

##### - Información Pluviométrica

Para la modelación se recopiló la información hidrometeorológica disponible al Centro de Información de Recursos Hídricos de la Dirección General de Aguas que pudiera ser de utilidad para el presente estudio. Las estaciones pluviométricas se muestran en la Figura 4.1, todas ellas con información vigente a la fecha, y cuyos detalles son mostrados en la Tabla 4.1.

Figura 4.1 Estaciones con información pluviométrica utilizadas

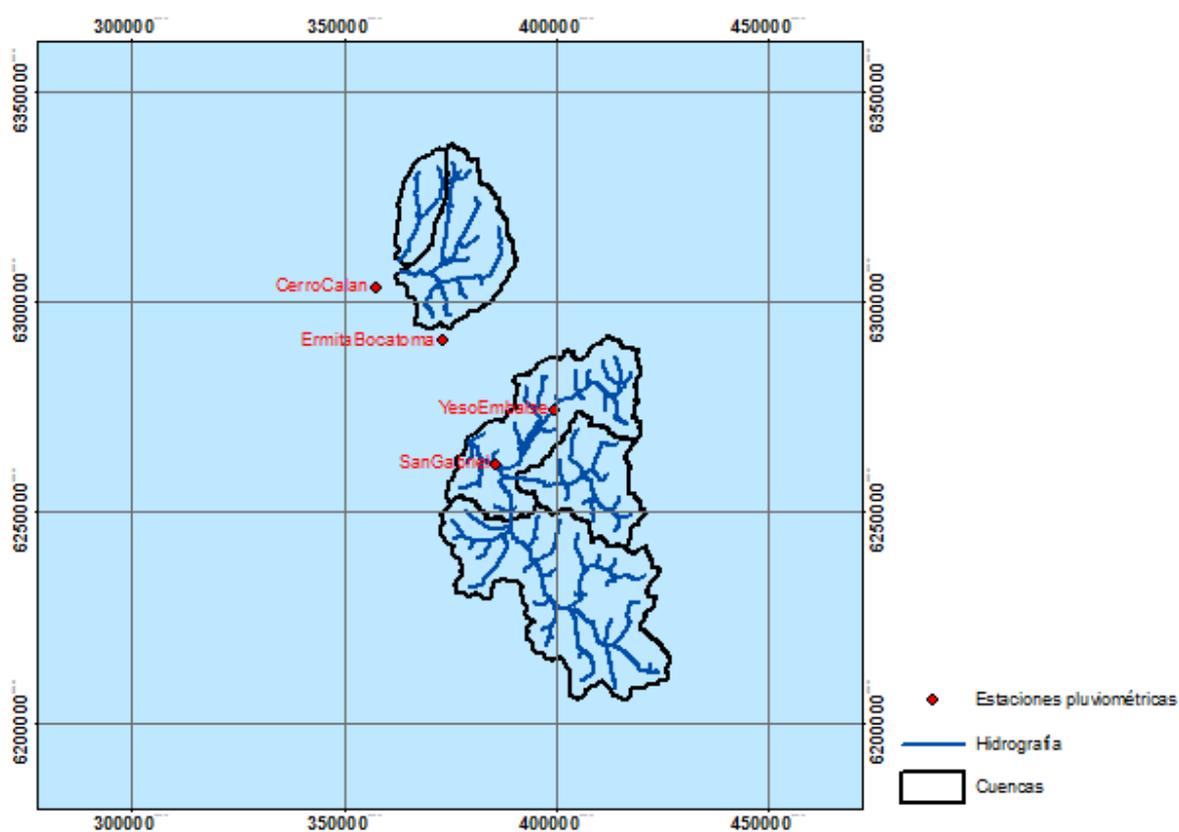


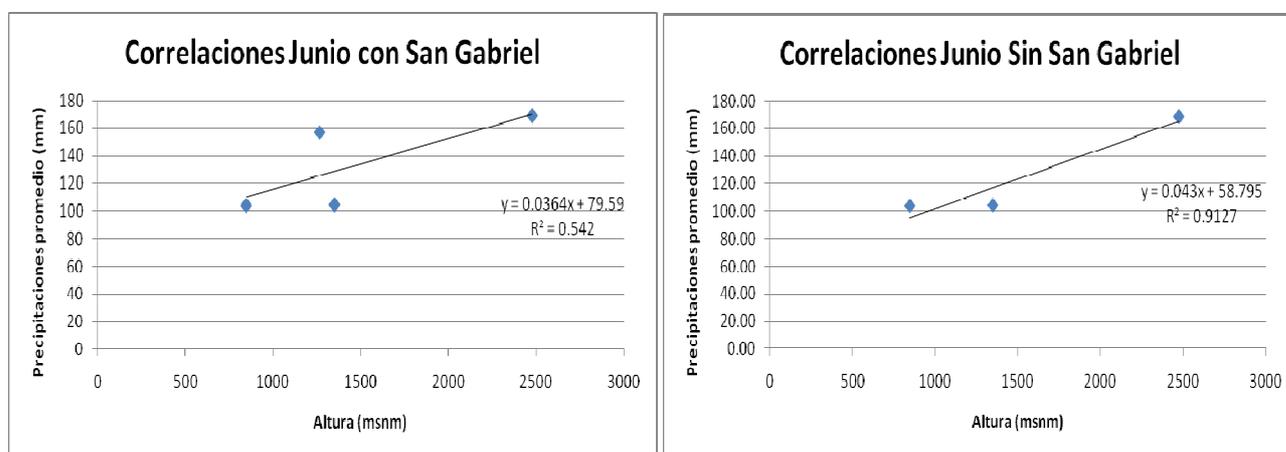
Tabla 4.1 Información de las estaciones pluviométricas utilizadas

Código BNA	Nombre Estación	Fecha Instalación	Altura	Coord. UTM	Coord. UTM	Tipo
			msnm	Norte (m)	Este (m)	Estación
05703008-9	EL YESO EMBALSE	01/07/63	2475	6274218	399560	Meteorológica
05704004-1	SAN GABRIEL	01/12/77	1195	6261125	385807	Pluviométrica
05730012-4	CERRO CALAN	01/06/75	900	6303260	357399	Meteorológica
05720003-0	LA ERMITA BOCATOMA CENTRAL	01/04/87	1250	6290539	373070	Meteorológica

Puede observarse en la tabla anterior que la estación que se encuentra a la mayor altura, está a menos de 2500 metros de altura sobre el nivel del mar, en comparación a los cerca de 6000 que tiene el punto más alto de la zona en estudio. Además, el período utilizado corresponde a partir del año 1977, por lo que se hizo necesario extender los datos de la estación La Ermita Bocatoma Central. Dicha estación fue extendida con la estadística en Cerro Calán, con la que se contaba con una buena correlación ( $R^2=0.94$ ), la que se muestra en el Anexo. De la misma forma, los datos faltantes fueron rellenados mediante correlaciones entre estaciones, con las que presentarían el mejor grado de correlación. Todas las series rellenadas, y las correlaciones, se entregan en el Anexo digital.

Una vez completas las series en todas las estaciones, se procedió a estimar gradientes de precipitación versus altura, con los datos medios en cada mes. Se observó que en los gradientes construidos, los datos medidos en la estación San Gabriel siempre quedaban fuera de la recta construida, lo que provocaba que hubiera una menor correlación en la línea de ajuste en el gradiente. Por lo tanto, luego de construir las curvas con la estación San Gabriel, y sin ella, y luego de comparar los resultados, se optó por excluirla en el gradiente mensual. Una comparación para el mes de Junio se muestra en los siguientes dos gráficos, donde se puede apreciar como cambia la correlación al eliminar el dato de San Gabriel.

Figura 4.2 Comparación en gradientes



Puede observarse que se utilizó un gradiente lineal para las precipitaciones. El hecho de que la temperatura aumente linealmente con la altura es un supuesto importante, cuya validez se discute en las discusiones de este estudio. Se muestra el gradiente mensual adoptado en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Gradientes lineales adoptados

Mes	m	n	r <sup>2</sup>
Enero	0.035	-2.2799	0.9125
Febrero	0.0033	-0.345	0.8799
Marzo	0.0026	4.5796	0.9815
Abril	0.0115	10.83	0.9502
Mayo	0.0226	38.439	0.9571
Junio	0.043	58.795	0.9127
Julio	0.0296	72.123	0.9232
Agosto	0.0215	50.322	0.8471
Septiembre	0.0059	38.412	0.95
Octubre	0.0004	18.701	0.91
Noviembre	0.0053	5.6277	0.9711
Diciembre	0.00005	3.9393	0.8554

#### - Información meteorológica

Para las temperaturas, el procedimiento fue similar. Las estaciones utilizadas fueron las mostradas en la Figura 4.3, y se detallan en la Tabla 4.3. Todas las estaciones siguen vigentes hasta la actualidad.

Tabla 4.3 Información de las estaciones meteorológicas utilizadas

Código BNA	Nombre Estación	Fecha Instalación	Altura	Coord. UTM		Tipo
			msnm	Norte (m)	Este (m)	Estación
05703008-9	EL YESO EMBALSE	01/07/63	2475	6274218	399560	Meteorológica
05701005-3	LAS MELOSAS	01/07/62	1527	6248225	389044	Meteorológica
05730012-4	CERRO CALAN	01/06/75	900	6303260	357399	Meteorológica
05720003-0	LA ERMITA BOCATOMA CENTRAL	01/04/87	1250	6290539	373070	Meteorológica

Se observan los mismos problemas que con los datos de pluviometría, el de la altura, y el hecho de que se debe extender la estadística en la estación La Ermita Bocatoma Central. El proceso fue similar, excepto que en este caso se excluyó la estación La Ermita en la creación de los gradientes mensuales, dado que es la que más desfavorecía las correlaciones. Se presenta una lista con los gradientes lineales para cada mes, en la Tabla 4.4.

Figura 4.3 Estaciones con información de temperatura utilizadas

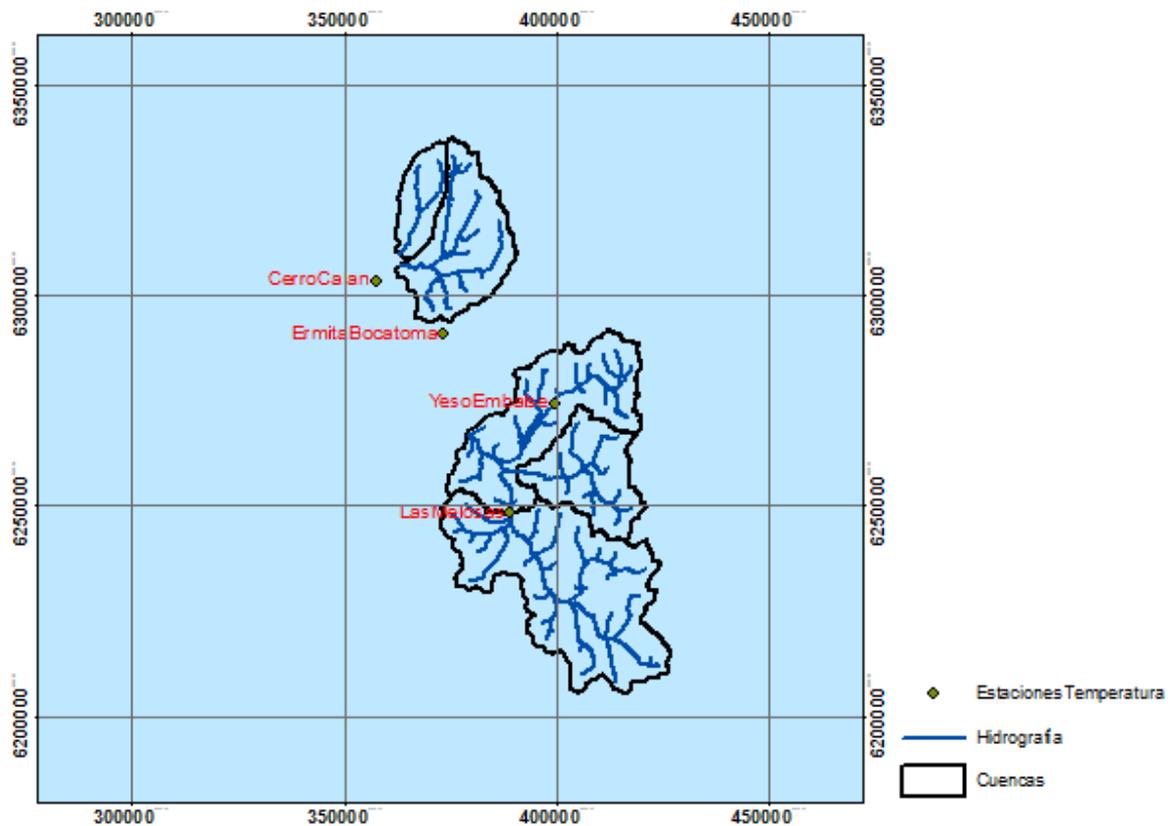


Tabla 4.4 Gradientes de temperatura

Mes	m	n	$r^2$
Enero	-0.0047	26.799	0.9657
Febrero	-0.0044	26.349	0.9391
Marzo	-0.0024	24.614	0.9147
Abril	-0.0041	20.758	0.948
Mayo	-0.0044	17.309	0.996
Junio	-0.0049	15.701	0.9954
Julio	-0.0053	15.276	0.9952
Agosto	-0.0052	16.102	0.9826
Septiembre	-0.005	17.702	0.9607
Octubre	-0.0048	20.152	0.9693
Noviembre	-0.0048	23.103	0.9672
Diciembre	-0.0047	25.472	0.9629

Se solicitó además información de las estaciones de ruta de nieve disponibles en la zona de estudio, con el fin de obtener información sobre la altura equivalente de agua en distintos períodos. Se obtuvo información de las estaciones mostradas en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5 Estaciones de Ruta de Nieve

Estación	Período de información solicitada	Ubicación UTM		Altura (msnm)
		Norte (m)	Este (m)	
El Zorro	1975 - 1990	6252137	391723	2100
Las Arenas	1977 - 2005	6258370	404098	2700
Laguna Negra	1975 - 2005	6274286	397293	2780
Barros Negros	1975 - 2005	6310582	381883	3100
Estero Plomo	1980 - 2005	6333542	375306	3150

#### - Caracterización de las cuencas

Posteriormente, se procedió con la discretización de las cuencas. Este proceso es necesario, dado que las cuencas tienen una amplia extensión, y aplicar sólo un valor de precipitación, y un solo valor de temperatura a toda una cuenca, no tendría resultados óptimos, pues se desea obtener resultados más completos y detallados. Por lo tanto, se dividió cada una de las cinco subcuencas en 10 bandas de altura, con intervalos equiespaciados en cada banda. Por lo tanto, se tuvo un resultado de 50 subcuencas en el modelo, cada una de las cuales tendría posteriormente sus datos climáticos propios de entrada. Se muestra en la Figura 4.4 como quedaron conformadas las bandas de altura.

En la Tabla 4.6 se muestran los intervalos de cada banda de altura para cada una de las cinco cuencas, además de las áreas determinadas con ArcGIS para cada una de las bandas.

Figura 4.4 Discretización de las cuencas

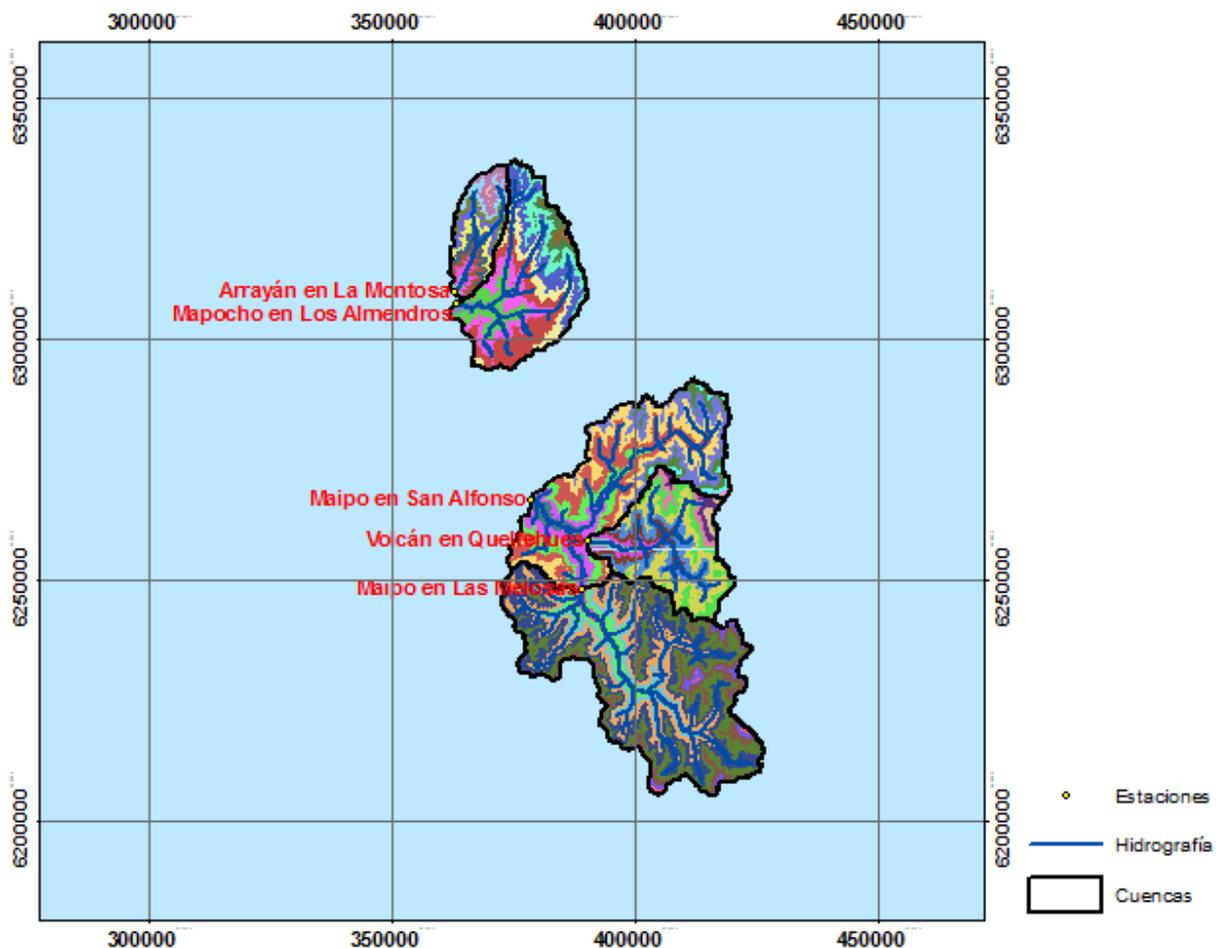


Tabla 4.6 Detalles de las bandas de altura

Arrayán en la Montosa			Mapocho en Los Almendros			Maipo en Las Melosas		
Intervalo	Altura media	Área (km <sup>2</sup> )	Intervalo	Altura media	Área (km <sup>2</sup> )	Intervalo	Altura media	Área (km <sup>2</sup> )
945 - 1231.5	1088.25	6.45	904 - 1353.8	1128.9	23.27	1516 - 1903.5	1709.75	25.64
1231.5 - 1518	1374.75	17.49	1353.8 - 1803.6	1578.7	76.31	1903.5 - 2291	2097.25	82.41
1518 - 1804.5	1661.25	27.44	1803.6 - 2253.4	2028.5	98.73	2291 - 2678.5	2484.75	146.01
1804.5 - 2091	1947.75	26.87	2253.4 - 2703.2	2478.3	137.99	2678.5 - 3066	2872.25	258.47
2091 - 2377.5	2234.25	25.72	2703.2 - 3153	2928.1	87.28	3066 - 3453.5	3259.75	387.10
2377.5 - 2664	2520.75	25.63	3153 - 3602.8	3377.9	103.03	3453.5 - 3841	3647.25	312.15
2664 - 2950.5	2807.25	27.46	3602.8 - 4052.6	3827.7	77.22	3841 - 4228.5	4034.75	132.23
2950.5 - 3237	3093.75	31.21	4052.6 - 4502.4	4277.5	28.96	4228.5 - 4616	4422.25	39.74
3237 - 3523.5	3380.25	33.73	4502.4 - 4952.2	4727.3	12.03	4616 - 5003.5	4809.75	11.08
3523.5 - 3810	3666.75	4.65	4952.2 - 5402	5177.1	2.80	5003.5 - 5391	5197.25	1.75

Tabla 4.6 (Continuación): Detalles de las bandas de altura

Maipo en San Alfonso			Volcán en Queltehues		
Intervalo	Altura media	Área (km <sup>2</sup> )	Intervalo	Altura media	Área (km <sup>2</sup> )
1080 - 1580.5	1330.25	53.52	1363 - 2039	1701	14.30
1580.5 - 2081	1830.75	85.95	2039 - 2493	2266	27.47
2081 - 2581.5	2331.25	121.20	2493 - 2852	2672.5	65.60
2581.5 - 3082	2831.75	212.24	2852 - 3179	3015.5	104.95
3082 - 3582.5	3332.25	207.79	3179 - 3476	3327.5	143.74
3582.5 - 4083	3832.75	132.98	3476 - 3772	3624	84.73
4083 - 4583.5	4333.25	56.80	3772 - 4114	3943	35.73
4583.5 - 5084	4833.75	22.73	4114 - 4558	4336	21.01
5084 - 5584.5	5334.25	5.07	4558 - 5110	4834	10.65
5584.5 - 6085	5834.75	1.44	5110 - 6080	5595	2.51

#### 4.1.2. Determinación de los parámetros climáticos para cada banda de altura

Para encontrar la precipitación en cada una de las bandas de altura, se utilizaron los gradientes de precipitación obtenidos previamente, además de elegir una de las estaciones de la DGA como estación base, para en base a esa información, calcular los datos de entrada en cada *catchment*.

Para el caso de las cuencas del estero Arrayán y del río Mapocho, se utilizó como estación base la estación Cerro Calán, dado que es el punto de control con la estadística más completa, además de ser la más cercana a la zona de esas dos cuencas. Para el caso de las cuencas correspondientes al río Maipo y el río Volcán, se optó por utilizar como estación base la estación meteorológica Embalse Yeso, por la misma razón anterior, por la cercanía y por la calidad de los datos.

Contando con los gradientes de altura y las series completas en ambas estaciones base, se utilizó la siguiente expresión para obtener los caudales en cada mes en cada una de las bandas de elevación:

$$P_{obs\ mes\ i}^j = P_{obs\ mes\ i}^B * \frac{P_{media}^j}{P_{media}^B}$$

Donde:

$P_{obs\ mes\ i}^j$  = Precipitación para la banda de altura j en el mes i.

$P_{obs\ mes\ i}^B$  = Precipitación observada en la estación base en el mes i.

$P_{media}^j$  = Precipitación media de acuerdo al gradiente de altura en la banda de elevación j.

$P_{media}^B$  = Precipitación media de acuerdo al gradiente de altura en la estación base.

Con ese procedimiento, se pudo estimar la precipitación para los 30 años de entrada correspondientes al intervalo Abril 1977-Marzo 2008, para las 50 subcuencas.

Para el caso de la temperatura se siguió un procedimiento similar, pero mediante otra expresión. Para determinar la temperatura en cada banda de altura, se determinó una disminución de temperatura por cada mil kilómetros, de acuerdo al gradiente obtenido previamente. En el anexo digital pueden observarse las estimaciones realizadas, así como la creación de los datos de entrada al modelo. Se muestran a continuación los gradientes para la temperatura en cada banda de altura.

$$T_i = T_b - 0,0047 * (h_i - h_b) \quad \text{para la estación base Cerro Calán}$$

$$T_i = T_b - 0,00469 * (h_i - h_b) \quad \text{para la estación base Embalse el Yeso}$$

Donde:

$T_i$  = Temperatura en la franja de altura  $i$  en un mes dado.

$T_b$  = Temperatura en la estación base en el mes dado.

$h_i$  = Altura de la banda  $i$ .

$h_b$  = Altura de la estación base.

Para el caso de las otras variables meteorológicas, lamentablemente no se contaba con la información suficiente para seguir un procedimiento equivalente de creación de gradientes de elevación. Por lo tanto, se tomaron los datos con los que se contaba, las mismas estaciones meteorológicas mostradas en la Tabla 4.3, y esos datos fueron utilizados directamente como datos de entrada al modelo para cada subcuenca, sin hacer variaciones con la altura. Dentro de dichas variables, se incluyen los datos de humedad, porcentaje de horas de sol en el día, y velocidad del viento. Este procedimiento no debería traer mayores problemas, ya que los factores climáticos más importantes en el proceso de modelación son la temperatura y precipitación. Datos como los mencionados, suelen ser utilizados en los estudios incluso como parámetros de calibración, por lo que realizar una estimación a partir de los datos conocidos, debería ser una buena solución al problema.

Otras variables, tales como el albedo, o la temperatura de derretimiento y congelamiento, fueron utilizados como parámetros de calibración, pero sin alejarse mucho de valores reales considerados en otros estudios.

Para el caso del albedo, se tomó en consideración los valores indicados en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7 Rangos de variación del albedo

<b>Características del suelo</b>	<b>Albedo</b>
Nieve Fresca y seca	0,80-0,95
Nieve antigua y seca	0,70-0,80
Nieve mojada	0,50-0,70
Hielo/Nieve derritiéndose	0,25-0,80
Bosque nevado	0,25-0,40
Suelo nevado con vegetación	0,10-0,30
Agua (Elevación solar alta)	0,05-0,10

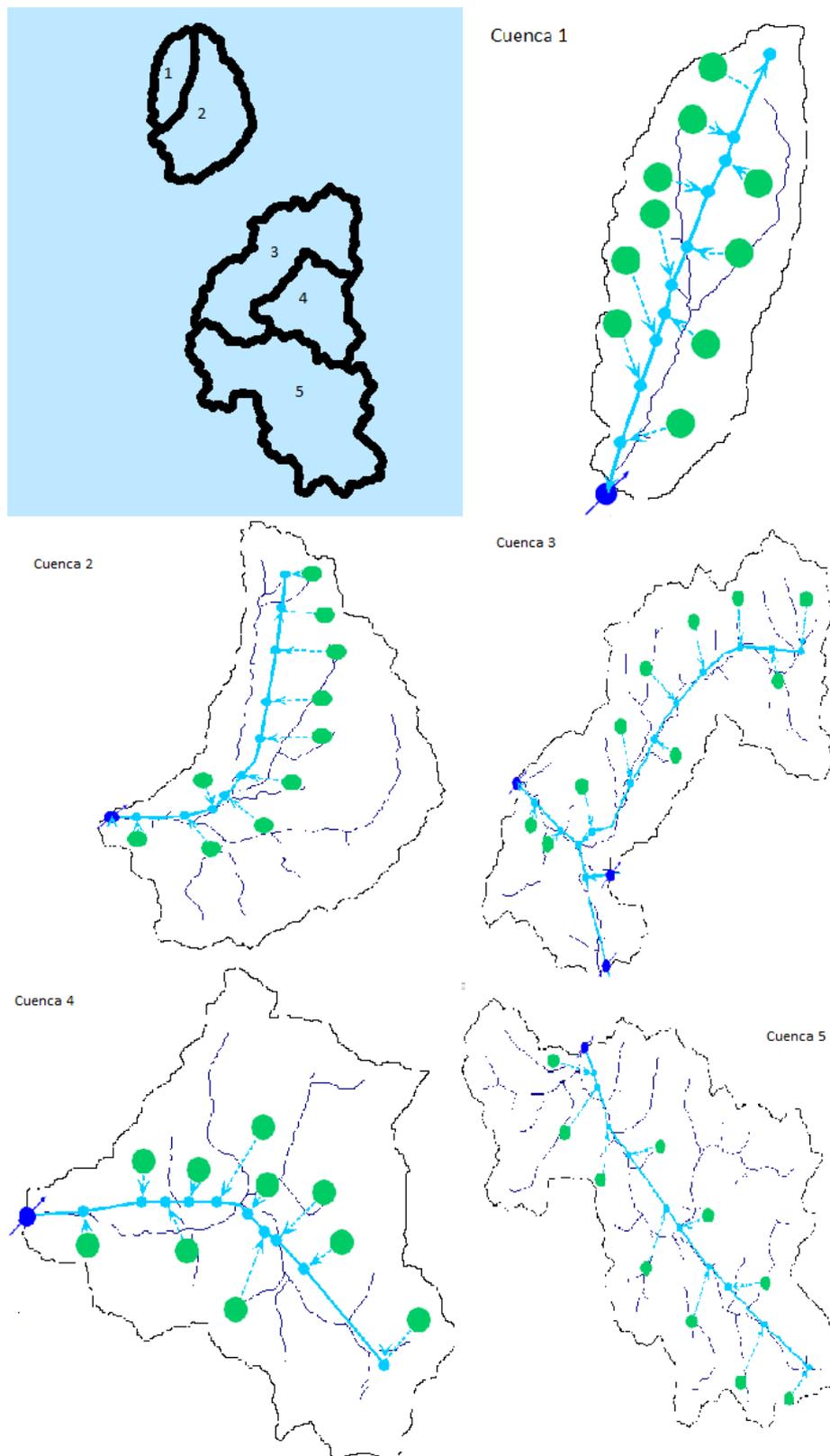
Fuente: Armstrong, Cambridge University, 2008

Para el caso de las cuencas en estudio, se consideró valores cercanos a 0,3 en verano, y 0,7 en invierno, correspondientes a suelo nevado y nieve antigua, respectivamente. Los valores finales en el modelo variaron alrededor de  $\pm 0,1$  para las distintas cuencas, para conseguir una mejor calibración.

Los valores que si se hicieron variar más, fueron los de la temperatura de congelamiento y derretimiento, ya que para las distintas cuencas se observaba un diferente comportamiento en la acumulación de nieve, incluso para bandas de elevación similares. Y si bien esto es probablemente debido a causas orográficas más que puramente climáticas, se utilizaron los parámetros mencionados para lograr una mejor calibración de la nieve y la escorrentía en períodos de deshielo. De todos modos, para cuencas altas suelen utilizarse valores más altos, cercanos a 13°C para la temperatura de derretimiento, y valores de -3° y 10°C para la de congelamiento (Mena, 2009).

Se presenta el esquema conceptual de la implementación del modelo WEAP en cada cuenca, en la siguiente Figura 4.5. En la Figura se aprecian las 50 subcuencas (los nodos verdes), y los ríos y transmisiones utilizadas. Se observan además en azul los puntos en que existe información fluviométrica, y que fueron utilizados para calibrar.

Figura 4.5 Modelo WEAP de las cuencas en estudio



## 4.2. Calibración y Validación

Los procesos de calibración y validación se llevaron a cabo en la última versión disponible del software WEAP, la versión 2.3149, del 5 de agosto del 2010. Recordando que esta versión incluye los módulos mejorados de derretimiento de nieve.

El proceso de calibración se llevó a cabo desde Abril del año 1977, hasta Marzo del año 1997, último año en que se contaba con información fluviométrica completa en los puntos de control. Mientras que el período de validación se realizó desde Abril de 1998, hasta Marzo del 2008, en todas las cuencas excepto en la controlada por el punto Río Maipo en Las Melosas, dado que dicha estación no cuenta con registros fluviométricos más allá del año 1993, y se consideró que hacer un relleno de la estación no tiene sentido si lo que se desea es validar los datos con datos reales.

La calibración para ambas cuencas se realizó manualmente, primero enfocado en el caudal generado versus el caudal observado en los puntos de control. Para comprobar el nivel de acierto de la simulación, se utilizó el criterio de Nash-Sutcliffe, el que ha sido el más utilizado en estudios de este tipo en el país. La fórmula tiene la siguiente forma:

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_{sim\ i} - Q_{obs\ i})^2}{\sum_i (Q_{obs\ i} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

Donde:

$Q_{sim\ i}$  = Caudal simulado en el mes  $i$ .

$Q_{obs\ i}$  = Caudal observado en el mes  $i$ .

$\overline{Q_{obs}}$  = Promedio de los caudales observados en todo el período de calibración.

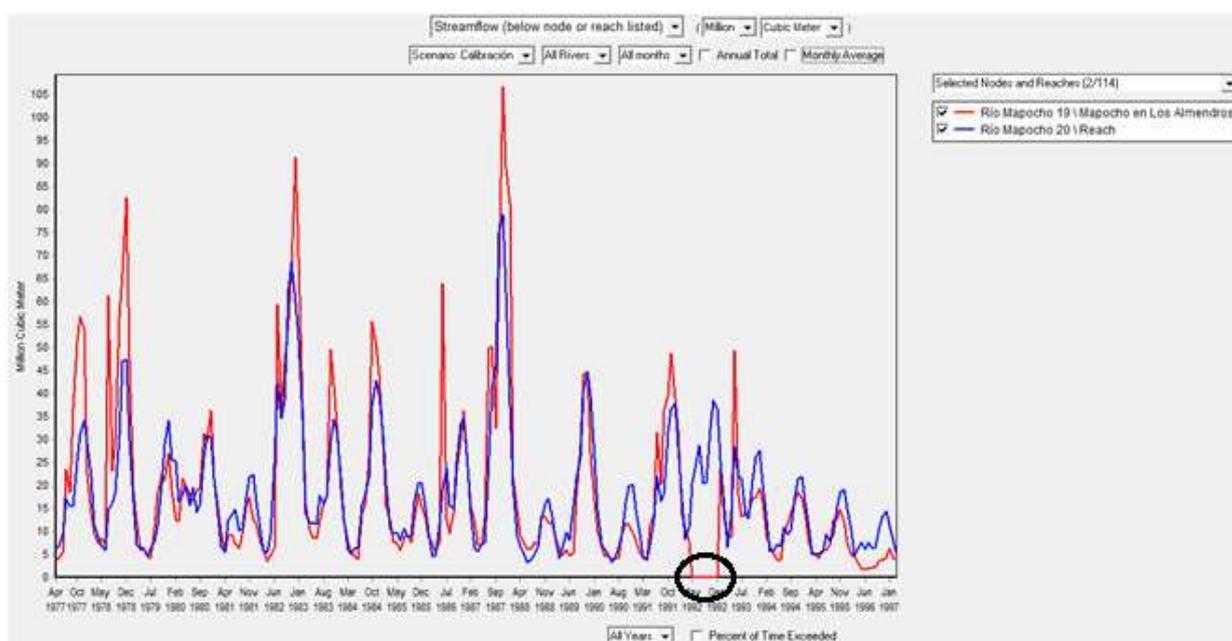
El criterio de Nash-Sutcliffe dice que para que una simulación sea buena, el valor calculado debe ser cercano a 0,70, y mientras más cercano a 1, mejor. Se realizó la calibración en todas las cuencas, y en todas se consiguió sobrepasar el valor de 0,7. Los valores alcanzados en la calibración son los siguientes (recordando que por la falta de registros, no se realizó la validación en la estación Río Maipo en Las Melosas). En la Tabla 4.8 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4.8 Resultados de la calibración y validación

Punto de control	NS Calibración	NS Validación
Estero Arrayán en La Montosa	0,70	0,69
Río Mapocho en Los Almendros	0,72	0,74
Río Maipo en Las Melosas	0,70	(*)
Río Maipo en San Alfonso	0,72	0,69
Río Volcán en Queltehue	0,70	0,67

Para efectos de este informe, se muestran a continuación la mejor (Río Mapocho en Los Almendros) y la peor (Estero Arrayán en La Montosa) de las simulaciones. Si se desea revisar en detalle las demás, se puede consultar el Anexo digital, en el cual se adjunta tanto el modelo completo de WEAP, como los gráficos más importantes en caso de no contar con el software para poder revisarlos. Se muestra en la Figura 4.6 la calibración en la estación Mapocho en Los Almendros.

Figura 4.6 Calibración caudales cuenca Mapocho en Los Almendros

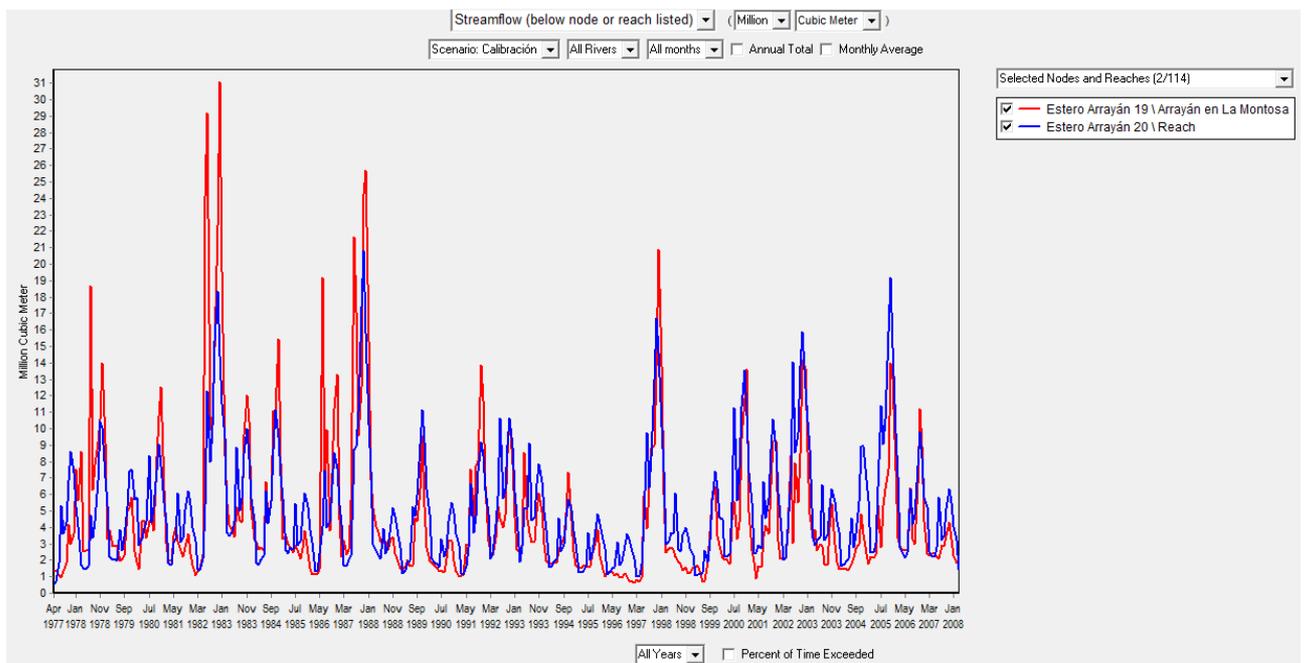


Se observa que los caudales altos no son tan bien simulados (curva azul), estando subestimados. Sin embargo, los otros caudales quedan bien reflejados. Además, el coeficiente de NS tiende a sobreestimar el error en los caudales altos, por lo tanto, al observar que es en los caudales altos donde se encuentran los problemas, se puede inferir que estos no son tan grandes, dado el error no queda tan reflejado en el NS calculado. Se puede observar en la curva de caudales observados ciertos meses en que el valor es cero, en particular los mostrados con el círculo. Esto ocurre porque no existían mediciones en la estación fluviométrica, y se

optó por no rellenar las estaciones de monitoreo de caudal, por las razones dadas previamente.

En la Figura 4.7 se muestran los resultados obtenidos en la calibración para la cuenca Arrayán en La Montosa.

Figura 4.7 Calibración caudales cuenca Arrayán en La Montosa



Como se mencionó, esta es la simulación que presenta un menor valor del coeficiente de NS, a pesar de que gráficamente se observa que se encuentra en el orden de los datos observados. Sin embargo, el hecho de que en los caudales más altos se observe una simulación no tan adecuada, implica que el error aumente de mayor manera, pues el coeficiente de NS privilegia el comportamiento medio.

Otras figuras, tales como el caudal anual total simulado versus el observado, o la curva de caudal versus probabilidad de excedencia, se muestran en el Anexo A.

Un procedimiento que es importante de mencionar en esta etapa, es el hecho de que las precipitaciones también fueron modificadas para la calibración y validación del modelo. Esto debió realizarse debido a que como se mencionó oportunamente, la estación pluviométrica más alta no se encuentra a una cota suficiente como para saber que una regresión lineal de los datos de precipitación versus altura sea representativa de los puntos de mayor cota en la zona de estudio, la cual llega incluso hasta los 6000 m.s.n.m. Por tal razón, la precipitación fue utilizada multiplicándola por un factor menor que 1, el cual iba en disminución a medida que se subía en altura. Por lo tanto, en vez de utilizar la precipitación calculada con los gradientes, se utilizó tal valor, pero multiplicado por dicho factor.

En la Tabla 4.10 se muestra el rango de dichos factores, así como los principales parámetros utilizados en la calibración, para cada una de las subcuencas en estudio.

Factores como la humedad, velocidad del viento, o fracción del día cubierta de nieve, fueron calculadas promediando los valores mensuales observados en las estaciones de monitoreo cercanas la zona de estudio. No se pudieron construir gradientes para dichos datos, ya que no se contaba con suficiente información sobre tales parámetros.

Para asegurarse que los parámetros del modelo estuvieran dentro de un rango aceptable, se utilizó como base la recopilación de información de estudios anteriores realizados en Chile, llevada a cabo por Cortés, 2010<sup>1</sup>. En dicho resumen se observa que los valores utilizados no siguen ningún tipo de patrón. En particular, las conductividades del suelo son especialmente altas en comparación a la mayoría de los estudios anteriores, excepto en comparación con el estudio del mencionado Cortés, el cual tiene valores aún mayores que los del presente trabajo. Dicho fenómeno es explicado por el hecho de ser una cuenca cordillerana, donde según la literatura pueden darse esos altos valores de conductividad.

Por lo tanto, se concluye que los parámetros son, en una gran medida, herramientas de calibración, cuyo fin es obtener buenos resultados en la modelación del comportamiento de la cuenca.

### **4.3. Validación de Cobertura Nival**

El proceso de validación de la cobertura nival fue el otro criterio utilizado para calibrar el modelo generado. El procedimiento consistió en descargar la mayor cantidad de imágenes disponibles en el proyecto LandSAT de la NASA para la zona en estudio, y realizar una comparación de los resultados obtenidos en la simulación versus los resultados observados en las imágenes. Se muestra un ejemplo en las Figuras 4.8 y 4.9.

Los resultados se realizaron con apoyo del software ArcGIS, luego de extraídos de WEAP. Se observa un resultado similar en las capas nivales simuladas y observadas. Cabe destacar que los resultados simulados son valores medios, mientras que los observados son de un momento puntual en el mes. Por esta razón, existe un margen de error importante dependiendo de la fecha del mes en que se sacó la imagen, por lo que se le dio prioridad a los otros métodos de calibración, aunque se utilizaron las imágenes como apoyo. Se entregan las imágenes utilizadas en el Anexo Digital.

1: Evaluación de un modelo hidrológico semi distribuido para la estimación de la esorrentía de deshielo en el río Juncal, 2010.

Figura 4.8 Cobertura nival simulada Octubre 1986

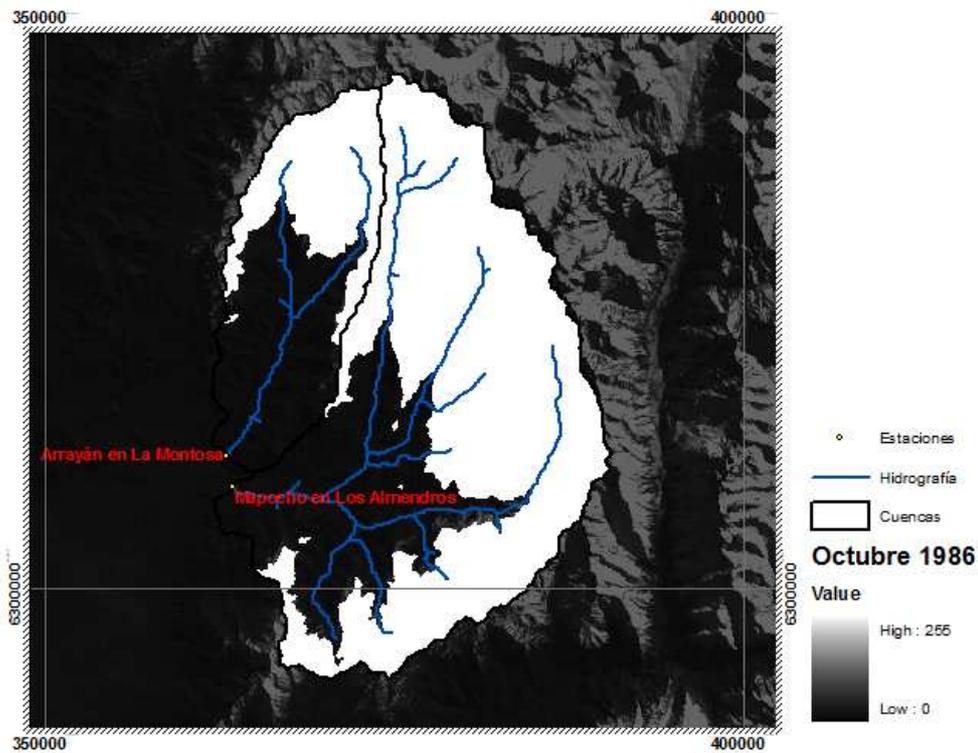


Figura 4.9 Cobertura nival real Octubre 1986

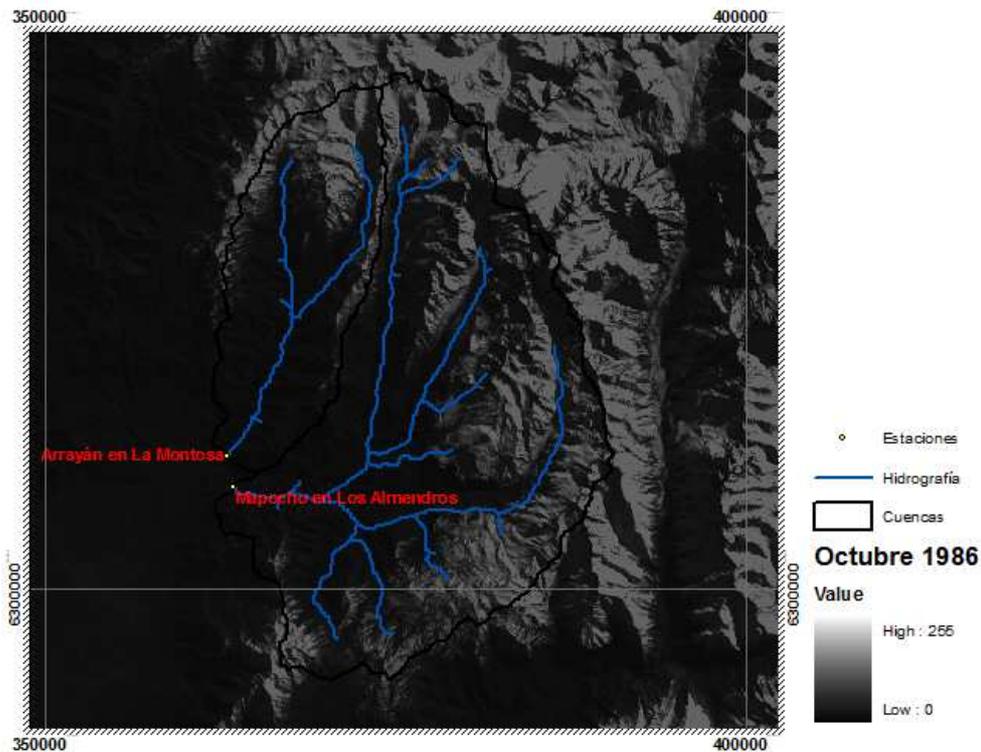


Tabla 4.9 Parámetros utilizados en la calibración

Parámetro	Descripción	Valor para la respectiva cuenca				
		Arrayán	Mapocho	Melosas	San Alfonso	Volcán
RRF	Factor de Resistencia a la Escorrentía	2 - 2	2 - 7	0.15 - 0.7	2 - 7	2 - 7
DWC	Deep Water Capacity: Capacidad de la cubeta inferior	500	500	50	100	50
SWC	Soil Water Capacity: Capacidad del balde superior (variable con la altura de la subcuenca)	1200 - 2000	1200 - 2000	3000	1200 - 2000	1200 - 2000
DWCond	Deep Water Conductivity: Conductividad de la cubeta inferior	200	300	10	600	20
RZCond	Root Zone Conductivity: Conductividad de la cubeta superior	400 - 850	600 - 1500	10 - 30000	100 - 9000	300 - 17000
Albedo Inferior		0.2	0.3	0.3	0.3	0.3
Albedo Superior		0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Rnet	Índice de radiación de Yates para derretimiento de nieve	1 - 50	5	1 - 50	5	0.1 - 5
Melting Point	Temperatura de derretimiento	9 - 13	9 - 14	10	9	9 - 14
Freezing Point	Temperatura de congelamiento	-4 - -2	-4 - -2	-2	-4	-4
kc	Coefficiente de Cultivo	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Wind	Velocidad del viento	2	2	2	2	2
Humidity	Humedad	49 - 67	49 - 67	49 - 67	49 - 67	49 - 67
Preferred Flow Direction	Dirección preferida del flujo	1	0.98	1	0.8	0.8
Cloudiness Factor	Porcentaje del día cubierto de nieve	0.18 - 0.46	0.18 - 0.47	0.18 - 0.48	0.18 - 0.49	0.18 - 0.50
Factor para la precipitación	Factor por el que se multiplicó la precipitación generada	0.44 - 0.64	0.44 - 0.64	0.8 - 0.9	0.44 - 0.64	0.8 - 1.2

## 5. ANALISIS DE ESCENARIOS FUTUROS

### 5.1. Metodología utilizada

Para la creación de los escenarios futuros, se utilizaron los datos generados por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile en el proyecto Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI. En el mencionado estudio, se utilizaron los datos generados por el modelo PRECIS para generar estadística climática en el período 2071-2100 para distintos puntos en Chile. Dichos datos forman una grilla de puntos equiespaciados cada 25 kilómetros en la mayor parte del territorio nacional, lo que permite extraer información meteorológica en la zona de interés. Los resultados son presentados en la web (<http://www.dgf.uchile.cl/PRECIS/>) y pueden ser extraídos del punto de la grilla que se desee. Se encuentran disponibles para la consulta los resultados generados para los escenarios A2 y B2, además del período base que abarca desde 1960 hasta 1990.

Es importante mencionar que en la mayoría de los puntos, los resultados sobreestiman o subestiman tanto las temperaturas como las precipitaciones. Por tal razón, antes de ingresar los datos de los escenarios futuros al modelo, primero deben ser corregidos. Para esto, el procedimiento fue el siguiente:

- Extraer la información disponible del modelo para la situación base.
- Para los años en que se cuente con registros reales en las estaciones base (Cerro Calán y Embalse Yeso), se realiza una correlación entre los datos, ordenados de mayor a menor. La correlación debe ser buena, o se elige otro punto de la grilla para extraer los datos.
- Luego, la función obtenida como correlación es aplicada a los datos extraídos para los escenarios A2 y B2.

Una vez cumplidos estos pasos, es posible ingresar los datos a la situación futura del modelo.

Se muestran en las Figuras 5.1 a 5.4 las relaciones entre precipitaciones y temperaturas para el caso base y los valores observados, tanto para la estación Cerro Calán como para Embalse Yeso.

Figura 5.1 Correlación entre temperaturas Embalse Yeso y caso base PRECIS

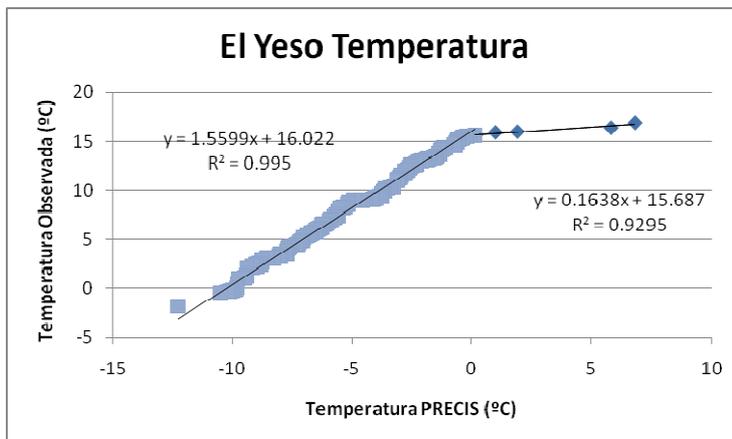


Figura 5.2 Correlación entre precipitaciones Embalse Yeso y caso base PRECIS

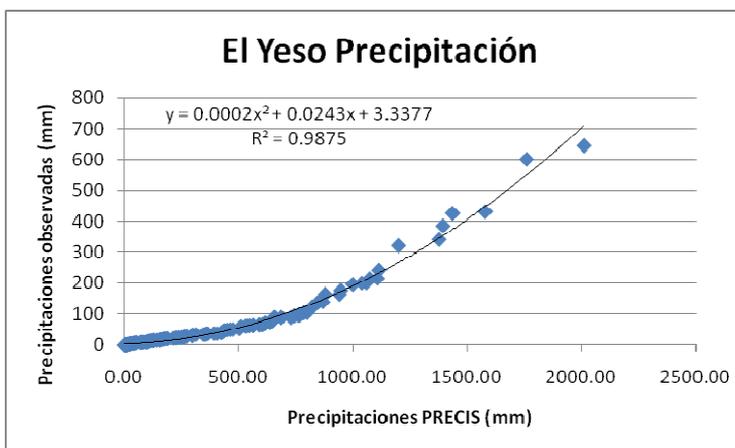


Figura 5.3 Correlación entre temperatura Cerro Calán y caso base PRECIS

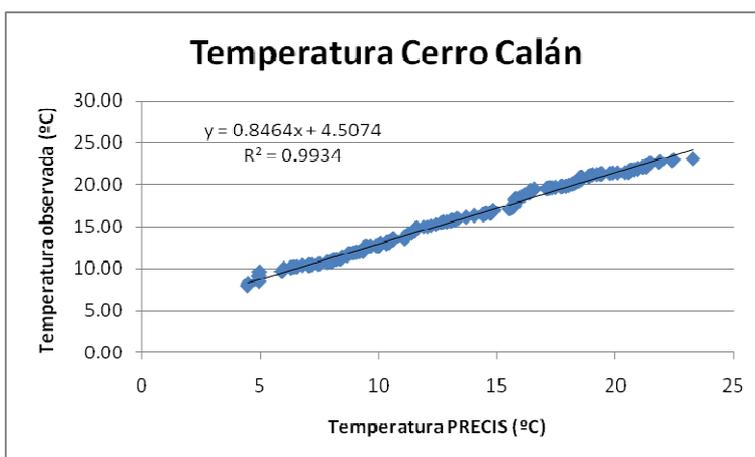
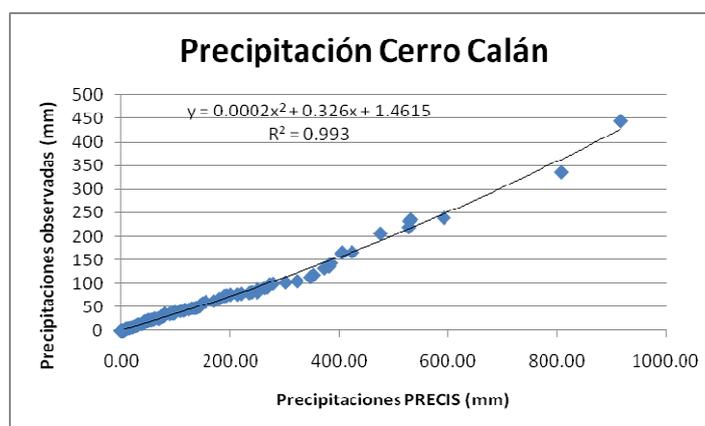


Figura 5.4 Correlación entre precipitación Cerro Calán y caso base PRECIS



En las Figuras 5.1 y 5.3, que son las que muestran las correlaciones en temperatura entre el caso base y los datos observados, se observa una subestimación de los datos entregados por el modelo PRECIS, especialmente notoria en la estación El Yeso. Por su parte, las Figuras 5.2 y 5.4 demuestran una sobreestimación de las precipitaciones entregadas por PRECIS, respecto a las observadas en las estaciones meteorológicas utilizadas.

Se puede apreciar que para el caso de la temperatura se escogió una regresión lineal, mientras que para las precipitaciones, se optó por correlacionar los datos con una función polinomial. Esto se debe a que las precipitaciones no siguen una relación lineal entre los datos, sino que las precipitaciones de menor magnitud tienden a estar más sobre dimensionadas aún que las precipitaciones mayores. Por esto, tiene más sentido, y una mejor correlación, utilizar la regresión polinomial.

Las series corregidas de precipitación y temperatura para el período 2071-2100, para la estación Cerro Calán, en el escenario A2 se muestran en las Tablas 5.1 y 5.2. Se puede observar en la Figura 5.5 una disminución en las precipitaciones en la estación de medición, y en la Figura 5.6 el aumento en las temperaturas para la estación en análisis.

Se puede realizar un análisis equivalente para la otra estación base, Embalse Yeso. En la Figura 5.8 se visualiza la tendencia al aumento de temperaturas medias anuales en El Yeso, con una mayor variabilidad en el futuro. Además, se observa un aumento no significativo de las precipitaciones, en la Figura 5.7, pero con una mayor variabilidad.

Figura 5.5 Series de precipitación para el Cerro Calán

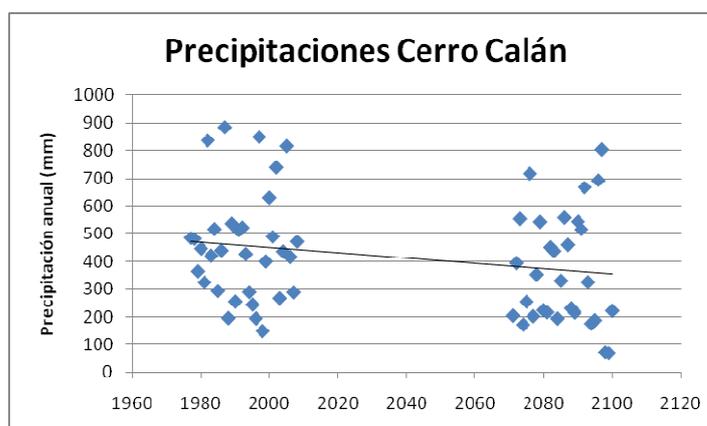


Tabla 5.1 Series de precipitación (mm) en Cerro Calán para el período 2071 – 2100

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2070	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.46
2071	1.49	1.48	2.97	14.49	102.93	29.17	38.88	4.57	1.78	4.57	1.46	1.56
2072	1.50	1.46	3.55	3.05	40.64	54.14	176.92	107.05	1.74	1.65	1.51	1.59
2073	1.47	1.47	1.50	21.60	44.65	220.76	120.22	73.89	62.72	2.74	1.86	1.51
2074	1.54	1.55	4.44	1.69	15.84	78.86	21.24	5.11	37.97	1.88	1.49	1.52
2075	1.46	1.46	1.81	9.55	31.55	74.06	40.90	49.91	36.93	1.49	3.83	1.58
2076	1.81	3.14	1.53	15.03	84.64	458.23	49.72	14.40	68.18	8.33	9.92	2.43
2077	1.47	1.47	4.54	1.54	29.06	39.20	72.99	20.96	26.78	1.66	1.78	1.47
2078	1.46	1.53	1.98	13.14	2.09	239.19	26.49	53.95	3.28	7.91	1.48	1.50
2079	1.53	1.47	2.75	4.24	42.03	211.73	64.52	188.84	16.78	6.52	1.57	1.46
2080	1.48	1.51	1.92	5.20	109.27	13.79	48.17	36.62	1.99	1.47	1.55	1.46
2081	1.49	1.46	1.47	1.53	1.47	142.68	32.65	7.26	22.80	1.58	1.52	1.47
2082	1.47	1.47	1.90	14.70	28.69	209.62	135.41	40.39	4.58	9.08	1.51	1.47
2083	1.46	1.72	2.00	1.91	42.96	319.91	13.17	26.75	22.74	1.47	1.47	1.46
2084	1.51	1.57	1.47	3.26	1.49	148.35	8.36	20.19	3.00	2.56	1.46	1.46
2085	1.46	1.47	1.49	3.25	103.67	188.02	1.51	17.20	5.23	5.12	1.60	1.46
2086	1.48	1.47	1.47	56.33	46.86	141.33	98.98	106.01	99.04	2.27	1.69	1.46
2087	1.60	1.47	1.52	77.54	68.98	150.53	96.49	47.17	7.58	3.16	1.72	1.47
2088	1.93	1.51	2.12	22.55	95.98	53.83	27.93	18.95	1.61	1.82	1.51	1.49
2089	1.60	1.48	2.24	24.51	17.21	72.31	7.34	81.73	1.98	2.83	1.58	1.49
2090	1.46	4.94	2.29	7.54	182.56	24.78	243.92	69.60	1.72	2.48	1.47	1.49
2091	1.47	1.52	1.81	8.44	210.65	165.78	52.59	60.00	9.61	1.67	1.76	1.48
2092	1.48	1.47	1.52	79.08	60.68	62.43	372.11	41.17	27.34	2.06	15.03	1.60
2093	1.92	1.61	3.62	15.13	31.93	120.50	57.61	80.06	7.65	3.48	1.49	1.84
2094	1.48	1.47	11.38	2.07	82.56	25.74	35.84	7.37	4.19	1.70	1.63	1.46
2095	1.46	1.76	1.62	7.28	83.72	15.61	44.58	26.36	1.66	1.53	1.57	1.47
2096	1.53	2.21	1.60	38.71	29.40	380.87	42.48	35.36	155.24	2.64	1.46	1.48
2097	1.47	12.71	2.99	10.25	197.24	18.90	518.75	19.20	15.37	1.88	2.70	1.53
2098	1.49	1.56	1.47	1.58	5.81	24.30	15.01	10.83	1.64	5.12	1.84	1.46
2099	1.47	1.47	2.11	1.84	28.83	14.87	6.90	1.94	3.79	2.86	1.67	1.53
2100	1.46	1.46	2.97	12.92	31.58	28.69	49.74	64.80	5.09	3.54	1.71	-
Promedio	1.53	2.08	2.54	16.00	61.83	124.27	84.05	44.59	22.00	3.24	2.43	1.54
Desviación Estándar	0.13	2.12	1.89	20.79	55.79	115.05	113.41	40.35	34.32	2.17	2.85	0.18

Figura 5.6 Series de temperatura para el Cerro Calán

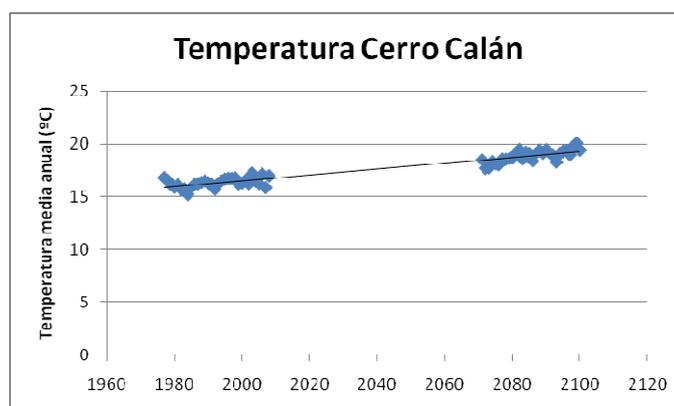


Tabla 5.2 Series de temperatura (°C) en Cerro Calán para el período 2071 – 2100

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2070	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.26
2071	24.37	23.63	21.11	19.31	15.77	12.75	14.13	13.50	15.55	18.59	20.93	22.61
2072	23.76	24.21	21.06	18.12	13.96	12.81	11.13	10.35	15.28	17.39	20.20	24.30
2073	23.62	23.68	23.06	17.78	15.65	12.38	10.74	14.20	13.56	16.68	19.97	22.10
2074	23.94	25.34	21.69	19.72	16.43	12.14	12.17	13.82	15.12	18.07	19.41	22.22
2075	24.41	24.61	20.62	17.98	14.22	14.47	13.31	12.58	15.40	18.44	19.12	22.00
2076	25.62	24.36	21.02	17.67	15.56	12.81	13.93	14.05	14.41	15.95	19.42	21.78
2077	23.59	23.67	23.13	19.38	17.34	12.45	13.82	14.87	14.68	17.82	19.57	22.49
2078	25.69	23.76	21.80	17.89	15.95	13.54	14.26	13.97	14.88	17.31	20.34	23.17
2079	24.52	26.27	21.74	19.64	14.92	15.14	10.64	13.77	14.13	18.17	20.11	24.14
2080	25.81	23.92	21.53	19.27	12.45	13.80	15.45	12.43	15.98	18.94	21.78	22.76
2081	25.03	24.90	23.65	20.44	18.54	13.46	12.85	13.16	14.30	17.14	21.73	23.81
2082	26.26	25.71	22.26	19.71	17.23	14.12	14.58	15.20	15.62	17.65	21.04	24.21
2083	25.84	23.68	22.50	19.32	14.84	12.67	13.96	12.15	14.26	17.37	22.17	23.67
2084	23.90	24.68	22.62	19.68	18.83	14.36	12.98	14.58	16.04	17.95	21.08	23.84
2085	24.70	25.14	23.10	19.25	15.90	13.81	14.04	14.35	15.33	18.74	21.17	23.77
2086	24.50	24.95	22.61	18.40	13.67	13.65	14.54	13.89	13.93	16.60	20.71	23.46
2087	25.77	25.76	23.55	20.55	15.79	15.43	13.20	12.71	15.64	17.45	20.23	23.53
2088	26.30	25.77	23.72	19.13	15.04	16.27	14.05	14.21	16.56	18.13	20.76	22.86
2089	24.37	26.19	22.52	18.36	16.78	15.48	15.47	13.88	14.92	17.55	20.92	23.49
2090	26.43	25.66	23.06	20.34	14.54	15.09	13.87	14.63	15.00	18.32	22.43	23.92
2091	25.64	24.74	22.72	17.88	16.57	13.87	14.78	15.35	15.77	17.69	20.41	24.63
2092	26.02	25.26	24.35	18.95	14.06	14.67	13.27	13.52	16.34	18.44	19.50	23.53
2093	23.37	24.91	22.18	17.62	15.46	12.99	13.34	13.16	15.60	16.71	21.59	22.56
2094	24.42	25.14	22.95	19.43	15.18	13.40	12.89	15.87	17.46	18.37	20.84	23.29
2095	25.20	25.24	22.87	18.49	14.01	14.56	15.54	13.73	16.72	20.78	20.94	23.76
2096	24.95	24.46	22.42	22.36	15.22	15.80	12.94	15.45	14.11	18.90	21.76	24.07
2097	25.98	25.38	23.42	19.07	14.53	13.86	14.66	13.91	16.47	15.96	20.76	23.89
2098	24.49	24.80	23.35	20.70	18.96	14.86	13.87	14.86	17.81	17.72	21.37	24.26
2099	25.12	25.12	22.89	18.98	18.87	17.29	14.13	16.73	17.08	19.52	21.23	24.12
2100	26.38	25.99	21.83	19.49	17.65	13.91	15.03	15.12	17.66	17.25	20.82	-
Promedio	25.00	24.90	22.51	19.16	15.80	14.06	13.65	14.00	15.52	17.85	20.74	23.42
Desviación Estándar	0.93	0.78	0.91	1.07	1.66	1.24	1.26	1.25	1.13	1.01	0.85	0.78

Figura 5.7 Series de precipitación para Embalse Yeso

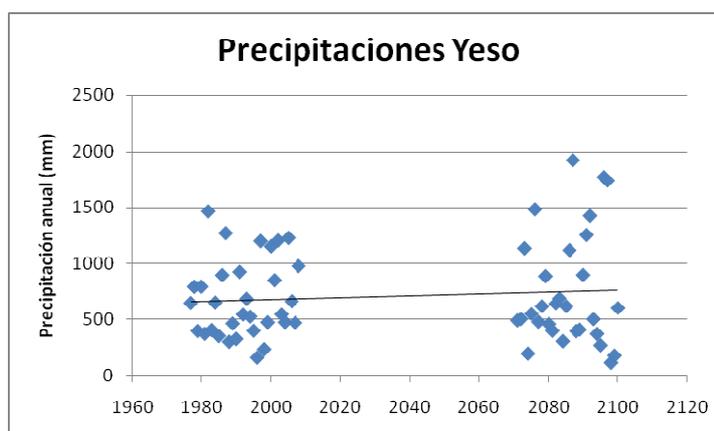


Tabla 5.3 Series de precipitación (mm) en Embalse El Yeso para el período 2071 – 2100

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2070	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.36
2071	3.40	3.41	3.52	12.32	182.77	69.35	176.89	18.87	7.12	6.23	3.36	3.35
2072	3.40	3.34	3.79	4.41	32.71	55.81	312.99	70.30	5.45	4.08	3.89	4.03
2073	3.55	3.43	6.61	45.01	84.92	391.87	165.06	335.60	88.30	4.06	5.08	3.35
2074	3.34	3.35	4.01	4.04	11.40	97.82	19.14	9.59	25.05	6.84	5.39	4.31
2075	3.38	3.52	4.32	54.53	71.37	191.83	62.03	102.95	45.27	3.79	3.99	3.37
2076	3.38	4.28	3.93	58.06	75.43	1011.24	133.19	34.43	124.23	26.48	4.15	3.85
2077	3.61	3.36	5.21	5.56	82.41	161.18	95.56	53.03	52.97	8.22	3.47	3.36
2078	3.37	3.56	4.81	7.26	16.84	473.28	37.26	57.99	3.67	5.92	4.10	3.46
2079	3.45	3.54	5.27	16.03	40.37	477.09	64.69	256.33	9.37	6.99	3.54	3.35
2080	3.54	3.44	4.92	6.01	206.32	13.53	178.41	21.96	8.59	3.51	3.74	3.46
2081	4.50	4.17	4.63	3.99	6.62	326.07	17.63	12.44	6.54	3.49	4.00	3.42
2082	3.86	3.95	4.80	11.45	65.17	325.73	159.94	15.92	15.00	34.04	3.42	3.36
2083	3.38	3.98	3.47	4.40	144.59	452.24	31.99	29.30	8.62	3.37	3.34	3.44
2084	3.46	4.04	3.44	11.17	4.30	214.79	15.80	20.81	14.97	4.60	3.44	3.45
2085	3.50	3.73	3.47	11.05	261.98	304.06	5.45	11.29	5.51	3.76	3.44	3.37
2086	3.37	3.55	3.44	35.47	72.96	407.80	180.68	111.78	289.89	4.46	3.35	3.35
2087	3.41	3.35	3.89	100.36	404.43	1121.24	167.65	56.87	53.37	4.86	3.65	3.36
2088	4.64	3.35	4.25	64.73	171.10	52.15	50.64	24.35	8.11	3.97	3.40	3.36
2089	3.36	3.36	3.45	10.83	23.25	179.05	5.58	150.54	8.84	12.16	3.57	3.41
2090	3.40	6.69	3.73	16.62	446.20	25.12	311.29	72.06	4.20	4.02	3.34	3.36
2091	4.73	3.35	3.71	9.96	520.55	577.15	33.88	76.31	5.76	12.88	3.38	3.34
2092	3.44	3.38	3.48	248.90	65.92	81.42	831.60	94.86	28.55	4.69	55.10	3.45
2093	4.06	3.60	5.27	18.62	56.45	138.58	128.96	115.56	19.55	4.62	3.41	3.40
2094	3.53	3.67	18.78	9.57	207.10	22.04	63.16	22.25	6.35	5.59	3.40	3.42
2095	3.42	4.46	3.38	10.66	131.15	8.12	68.28	21.26	7.56	3.47	3.38	3.46
2096	3.50	6.30	3.78	46.85	77.03	1275.97	41.86	36.19	269.24	5.41	3.34	3.35
2097	3.34	7.49	7.73	31.92	303.62	27.88	1095.72	91.85	158.78	3.89	3.74	3.34
2098	3.38	3.42	3.48	7.30	18.54	23.37	24.79	11.38	4.87	6.34	3.40	3.49
2099	3.43	3.40	3.80	25.99	78.61	16.26	12.61	7.29	5.83	10.38	5.39	3.38
2100	3.38	3.35	6.31	28.67	28.43	37.37	174.69	235.70	13.18	18.84	4.50	-
Promedio	3.58	3.93	4.82	30.73	129.75	285.31	155.58	72.64	43.49	7.70	5.49	3.46
Desviación Estándar	0.38	1.04	2.84	47.09	135.76	335.85	237.65	79.76	74.08	7.10	9.39	0.22

Figura 5.8 Series de temperatura para Embalse Yeso

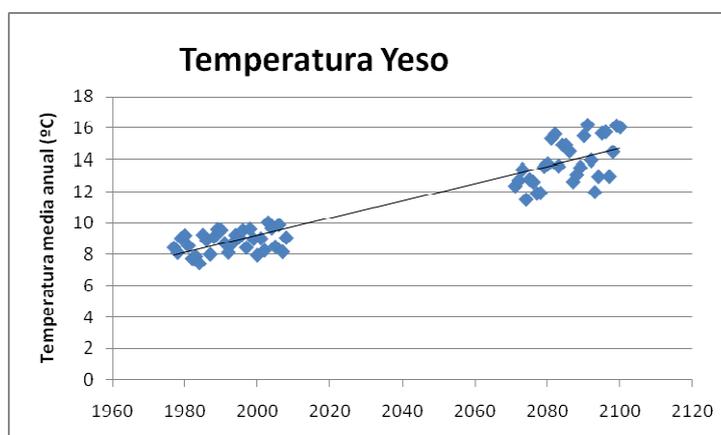


Tabla 5.4 Series de temperatura (°C) en Embalse El Yeso para el período 2071 – 2100

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
2070	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.19
2071	16.98	18.00	20.32	15.39	10.09	6.53	8.07	7.98	8.56	9.60	12.43	14.30
2072	17.70	25.36	21.33	16.62	8.46	5.28	4.93	4.71	8.15	11.07	12.99	15.86
2073	20.55	25.56	22.95	15.54	11.35	6.58	1.99	9.59	7.61	10.22	14.60	14.19
2074	15.94	16.80	16.38	13.28	8.67	5.49	6.10	6.13	8.62	12.34	12.63	15.63
2075	19.98	26.14	20.75	14.77	8.73	6.72	6.94	2.88	8.79	11.83	12.50	13.28
2076	19.94	17.52	19.72	14.57	10.01	8.23	8.23	8.10	9.26	10.35	11.45	13.90
2077	14.71	14.13	16.87	14.38	11.47	6.52	7.87	10.07	8.76	10.91	11.93	15.00
2078	20.16	17.78	16.42	14.29	7.69	5.82	4.55	7.43	5.68	12.13	14.63	16.43
2079	18.73	23.95	24.59	16.37	8.71	9.68	3.70	7.54	8.77	12.41	13.37	15.07
2080	17.60	18.44	22.44	17.33	6.49	3.71	10.77	5.65	11.23	11.49	13.25	26.45
2081	29.18	29.32	26.42	19.68	12.45	8.19	4.82	6.57	5.01	10.34	13.40	18.98
2082	29.36	28.33	23.54	17.71	12.99	8.18	8.90	6.71	9.74	12.60	13.45	16.12
2083	18.98	22.81	24.53	18.64	10.98	6.38	7.15	5.99	9.11	9.16	13.41	16.08
2084	18.10	27.06	23.41	17.43	12.12	9.78	6.76	8.74	8.94	11.61	15.40	19.91
2085	26.00	27.92	25.77	17.36	10.84	9.97	5.60	8.35	8.27	10.70	12.03	16.50
2086	21.60	27.81	24.53	15.83	9.12	8.25	8.43	7.57	9.08	11.00	15.50	15.52
2087	17.19	18.07	18.17	17.57	10.47	11.30	6.12	5.16	9.44	11.31	12.43	14.26
2088	16.81	19.06	19.07	16.05	10.95	10.07	7.19	6.39	9.25	11.44	13.97	16.41
2089	19.46	19.12	19.55	14.53	12.38	9.82	9.68	7.07	8.73	10.89	13.51	17.58
2090	21.22	28.31	23.39	18.77	9.09	7.55	6.10	8.78	9.51	10.43	13.84	29.33
2091	32.36	29.08	25.50	15.67	11.77	9.23	9.15	8.36	10.60	12.63	12.42	17.67
2092	21.46	18.49	21.34	18.06	8.51	10.20	8.39	7.58	10.79	12.56	15.09	15.20
2093	18.33	19.14	17.56	12.99	9.70	6.67	4.07	5.89	9.79	9.64	13.28	16.63
2094	17.53	19.28	18.87	15.08	8.70	5.71	5.84	10.08	11.09	11.04	14.60	17.50
2095	22.04	27.73	25.09	17.44	8.73	7.84	8.61	8.96	10.47	13.82	15.78	21.77
2096	27.55	25.74	23.47	21.14	9.88	11.98	7.51	10.10	8.52	13.84	13.69	15.81
2097	17.86	20.82	19.45	15.33	9.25	6.15	10.13	7.88	11.60	8.85	13.30	14.85
2098	19.14	20.87	19.48	15.74	12.51	8.09	8.15	10.00	11.30	12.77	16.62	19.15
2099	19.10	25.51	24.09	16.91	14.03	11.30	7.23	10.15	10.05	15.81	16.46	23.35
2100	30.28	29.73	22.85	16.85	12.87	8.49	9.13	9.91	11.78	10.95	13.88	-
Promedio	20.86	22.93	21.60	16.38	10.30	7.99	7.07	7.68	9.28	11.46	13.73	17.26
Desviación Estándar	4.61	4.68	2.97	1.85	1.82	2.03	2.04	1.84	1.54	1.49	1.33	3.69

## 6. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN FUTURA

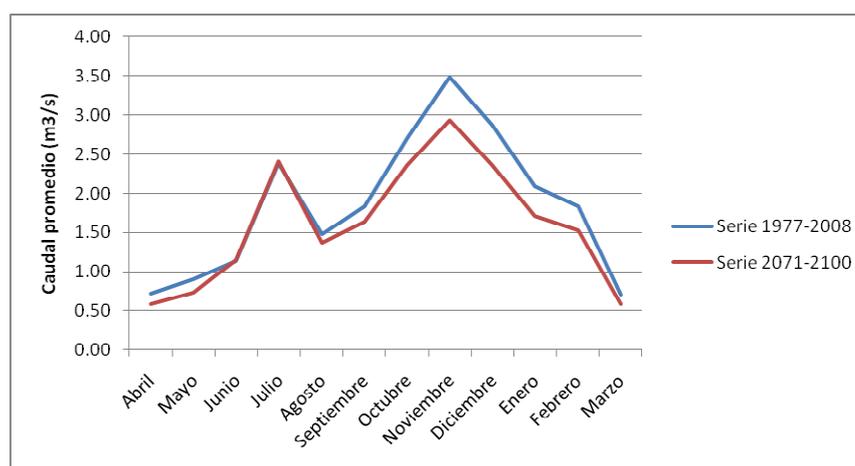
En el presente capítulo se entregan los resultados de la simulación futura realizada con el modelo WEAP a las cuencas cordilleranas del río Maipo, bajo el escenario A2. Se realizó un análisis de los cambios en caudal medio mensual, las posibles variaciones de régimen, además del análisis de la cobertura nival, tanto por subcuencas como del área en estudio completa. Se incluyen análisis tanto para el período completo como en años húmedos, normales y secos.

Los resultados obtenidos se entregan por subcuenca, para que sea un análisis lo más detallado y claro posible.

### 6.1. Subcuenca Estero Arrayán en La Montosa.

Tal como se observa en la Figura 6.1, esta subcuenca presenta un régimen nivo-pluvial en la actualidad, con caudales máximos en el período de deshielos, pero con una leve influencia en meses pluviales que hace que el caudal aumente durante el mes de Julio. Los resultados futuros, señalan una reducción en los caudales del período de deshielo, atribuible a la disminución de las precipitaciones, sumados al alza de temperatura. Sin embargo, no se aprecia un cambio en el régimen hidrológico de la cuenca.

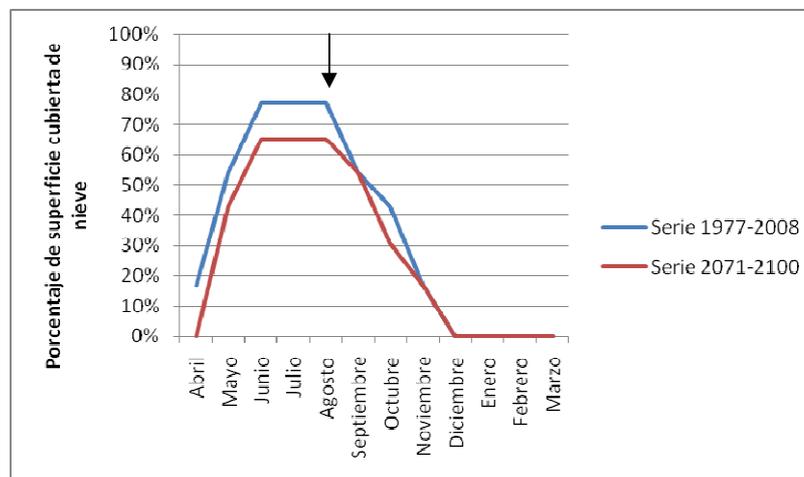
Figura 6.1 Comparación caudales medios mensuales promedio Arrayán en La Montosa



En lo referente a cobertura nival, para determinar cuando una determinada subcuenca está o no cubierta de nieve, se decidió que se adoptaría que está cubierta cuando tenga al menos 5 mm de altura según el modelo WEAP. En la Figura 6.2 se observa un cambio en el período de deshielos y en la acumulación de nieve, pues se junta menos nieve, aunque para ambas situaciones se mantiene que

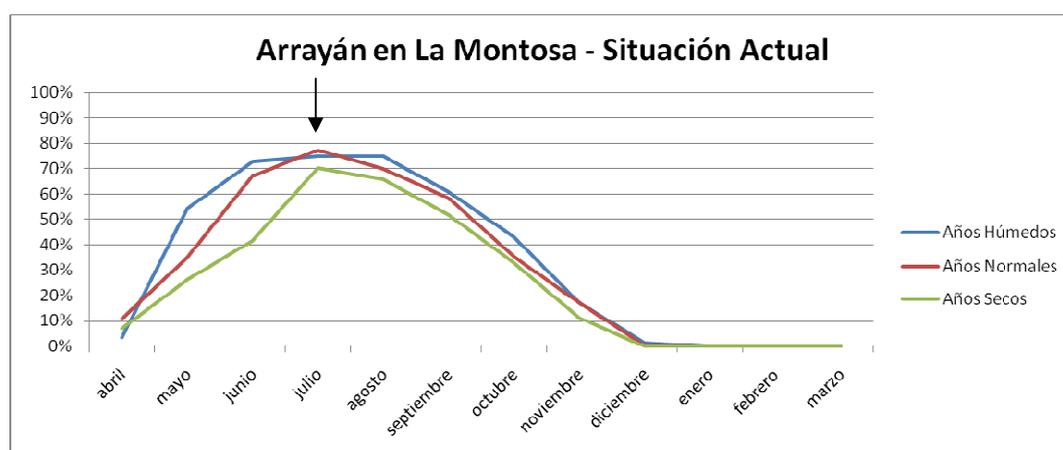
es en el mes de Septiembre donde comienza el retroceso de las capas nivales, como se indica en la Figura.

Figura 6.2 Evolución derretimiento de nieve Arrayán en La Montosa para todo el período



Se realizó además un análisis para la cobertura nival en tres clasificaciones de años; años húmedos, normales y secos, tanto en la situación actual como en la situación futura, tal como se observa en las Figuras 6.3 y 6.4 respectivamente. Para los tres tipos de años se aprecia que el máximo se alcanza en el mes de Julio, dándose que el promedio de los años normales es mayor al de los años húmedos. Esto se puede explicar por el hecho de que para clasificar los años solamente se utilizó la cantidad de precipitaciones, mas no la temperatura, que es la otra variable de mayor influencia en la cobertura nival, lo puede explicar lo ocurrido.

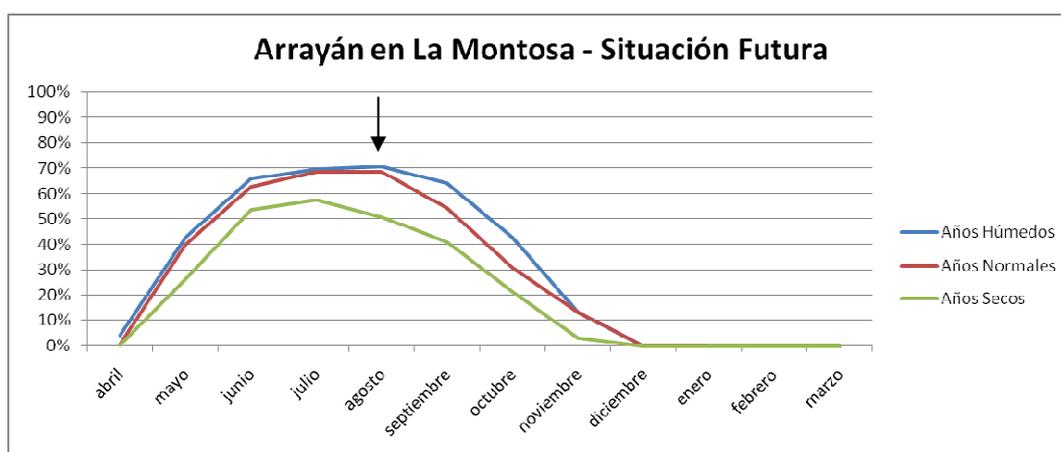
Figura 6.3 Evolución derretimiento de nieve Arrayán en La Montosa para distintas clasificaciones de años en la situación actual



En la situación futura, en la Figura 6.4 se observa un menor porcentaje de cobertura en todos los meses de invierno, de alrededor de un 10% comparados con la situación actual. El cambio es especialmente notorio para los años secos, donde

se puede observar que el máximo porcentaje de cobertura nival no alcanza el 60% de superficie. Se observa además que el punto máximo en los años húmedos y normales se alcanza en el mes de Agosto, un mes más tarde que en la situación actual. Para los años secos el máximo se mantiene en Julio.

Figura 6.4 Evolución derretimiento de nieve Arrayán en La Montosa para distintas clasificaciones de años en la situación futura



## 6.2. Subcuenca Río Mapocho en Los Almendros.

Esta subcuenca presenta similares características a la de Arrayán en La Montosa, con un tamaño y una altura similar, y un régimen nivo-pluvial también, pero menos marcado que la anterior. Sin embargo, en esta cuenca es más marcado el cambio de régimen, pues ahora, dado el aumento en temperatura, el régimen de la cuenca se transforma en uno más mixto que antes, donde los caudales generados en épocas de lluvia alcanzan casi un 80% el valor de los caudales de deshielo, a diferencia del 50% que eran antes. En la Figura 6.5 se puede apreciar esta tendencia.

Sobre la cobertura nival, se observa una disminución de alrededor de un 10% en la superficie cubierta, en casi todos los meses del año. Se muestra en la Figura 6.6 como evoluciona la cobertura nival. Además, se aprecia en la misma Figura que la nieve llega al mismo valor mínimo, pero en la situación futura este mínimo se alcanza un mes antes, en Febrero, mientras que en la actualidad ocurre en Marzo.

Figura 6.5 Comparación caudales mensuales promedio Mapocho en Los Almendros

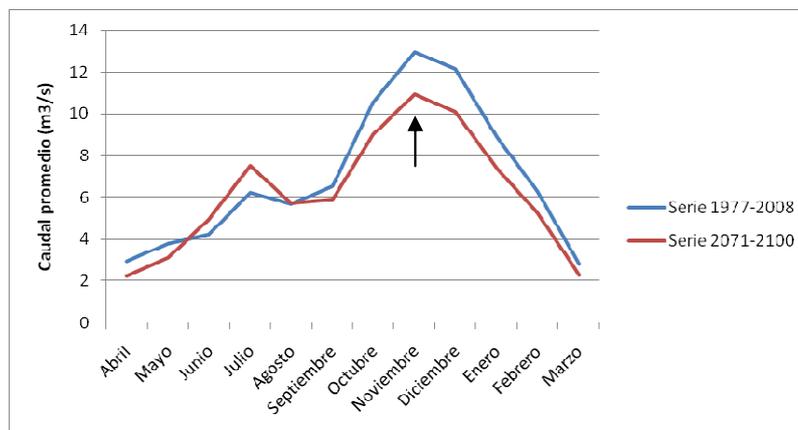
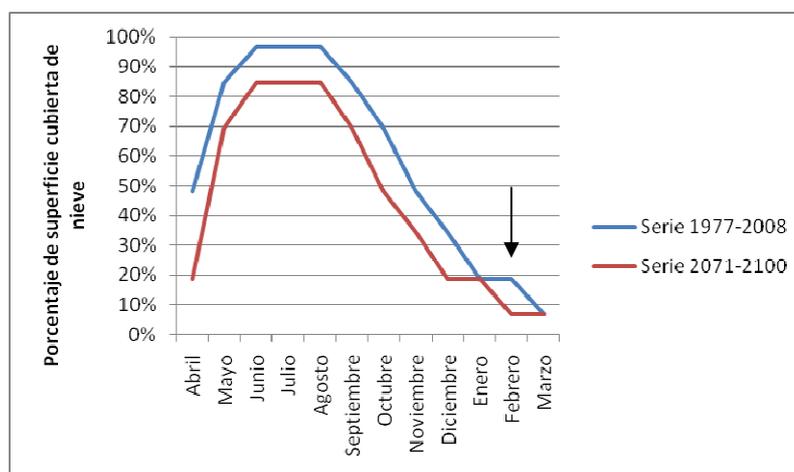
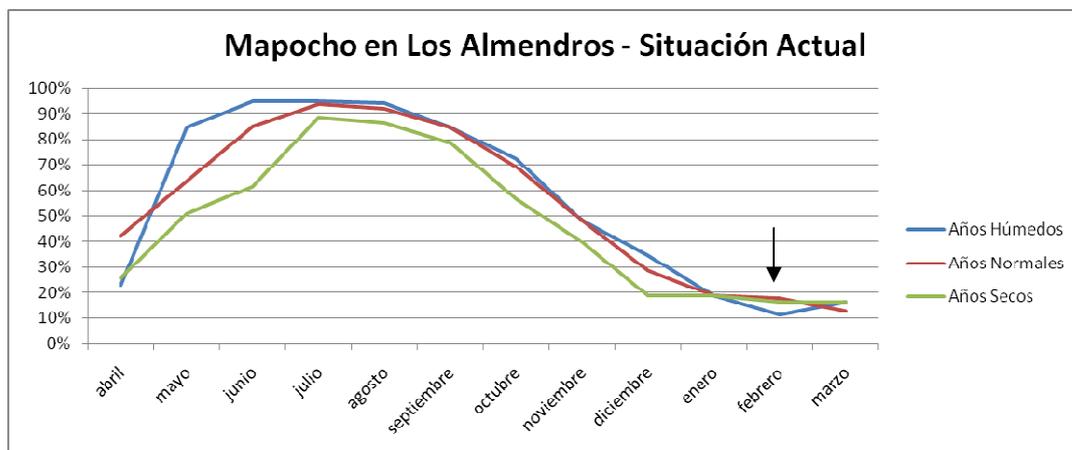


Figura 6.6 Evolución derretimiento de nieve Mapocho en Los Almendros



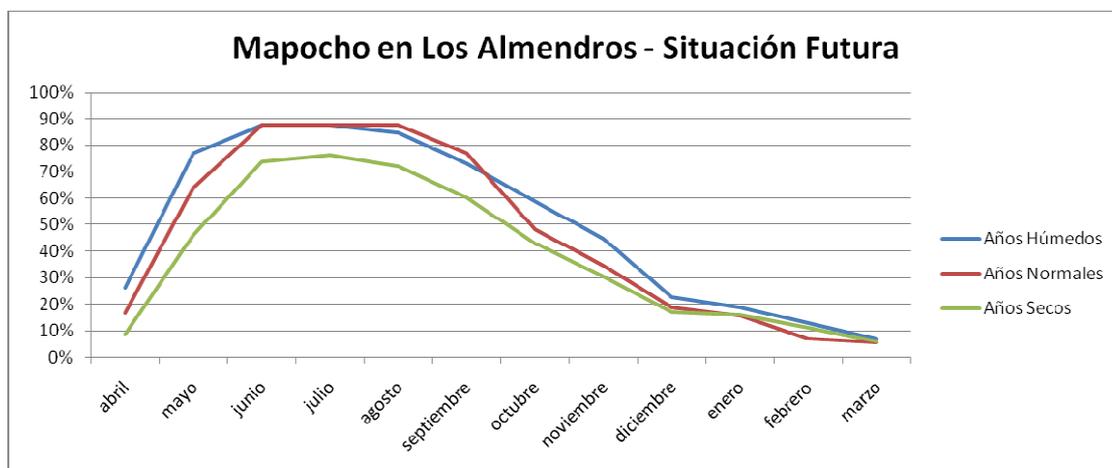
Se observa en las Figuras 6.7 y 6.8, la situación de cobertura nival para años húmedos, normales y secos tanto para la situación actual como para la situación simulada futura, respectivamente. En la situación actual se observan diferencias en el mes en que ocurren los valores máximos de cobertura. Mientras en los años húmedos el máximo se da en Junio, en los otros años ocurre en el mes de Julio. Y otro fenómeno que ocurre en esta cuenca, es que el porcentaje de cobertura mínima en la situación actual de los años húmedos es menor que para los años normales y secos, ocurrente en el mes de Febrero, indicado en la figura, con un valor de menos de un 12%, mientras que en los años normales y secos es de un 17,7% y 16,3% respectivamente.

Figura 6.7 Evolución derretimiento de nieve Mapocho en Los Almendros para distintas clasificaciones de años en la situación actual



En la situación futura, en la Figura 6.8 se observa un menor porcentaje de cobertura en todos los meses de invierno, pero con un menor margen que en la cuenca de Arrayán en La Montosa. Acá nuevamente puede observarse que son los años secos los que marcan una mayor diferencia con respecto a la situación actual, y respecto de los años húmedos y medios en la misma situación futura. Con respecto a la situación actual, se observan diferencias de casi un 20% en los meses de Abril y Septiembre.

Figura 6.8 Evolución derretimiento de nieve Mapocho en Los Almendros para distintas clasificaciones de años en la situación futura



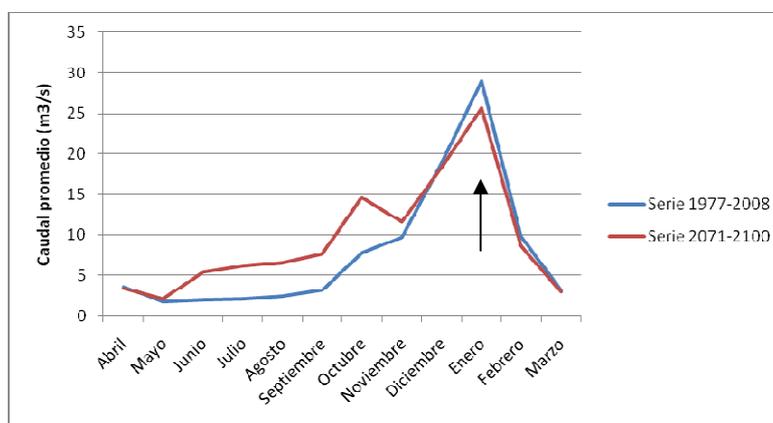
### 6.3. Subcuenca Volcán en Queltehues.

La cuenca de Río Volcán en Queltehues es más alta que las dos anteriores, muestra una clara tendencia nival en la actualidad, con caudales de deshielo de

magnitud casi 10 veces los caudales más bajos. La Figura 6.9 muestra dicha situación. Los caudales peak ocurren actualmente en el mes de Enero, mes en que se alcanzan las temperaturas necesarias para el deshielo de las zonas más elevadas de la cuenca.

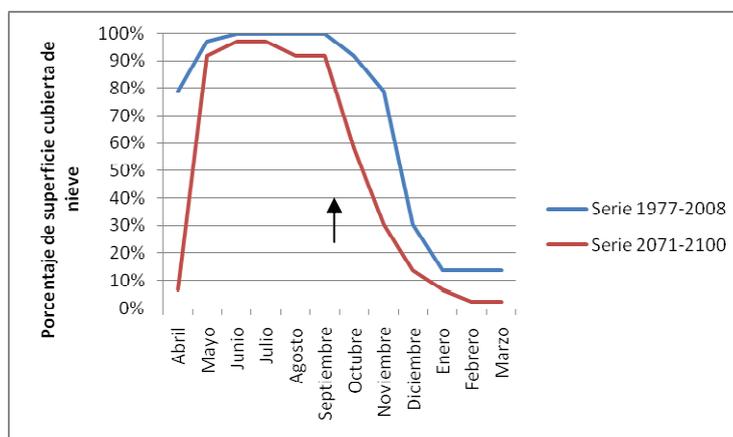
Para la situación futura, se puede observar que comienza a ocurrir un aumento de caudal en los meses de invierno, cambiando las disponibilidades de caudal, pero no en una gran magnitud. Se comparan ambas curvas en la Figura 6.9. Se observa además una diferencia de 20 m<sup>3</sup>/s en la suma anual de caudales mensuales promedio, explicado por el aumento en el derretimiento de nieve.

Figura 6.9 Comparación caudales mensuales promedio Volcán en Queltehues



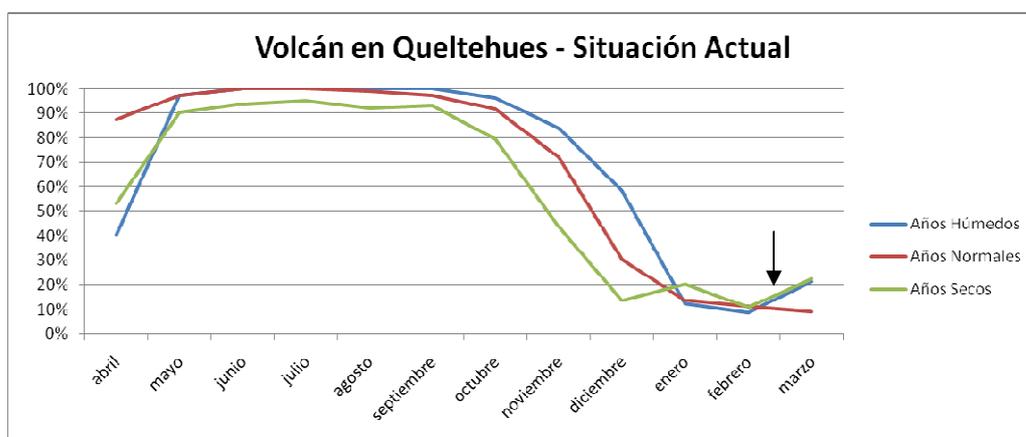
Sobre la cobertura nival, en la situación actual se observa que durante los meses de invierno, toda la cuenca se encuentra cubierta de nieve, y en el mes de Noviembre comienza el deshielo rápidamente, hasta llegar a un 13% de cobertura en Febrero. Sin embargo, en la situación futura el retroceso de las coberturas nivales comienza a ocurrir de manera marcada entre Septiembre y Octubre, donde se muestra en la Figura 6.10, y el descenso aumenta hasta un 6% de cobertura permanente en los meses de verano, en promedio..

Figura 6.10 Evolución derretimiento de nieve Volcán en Queltehues



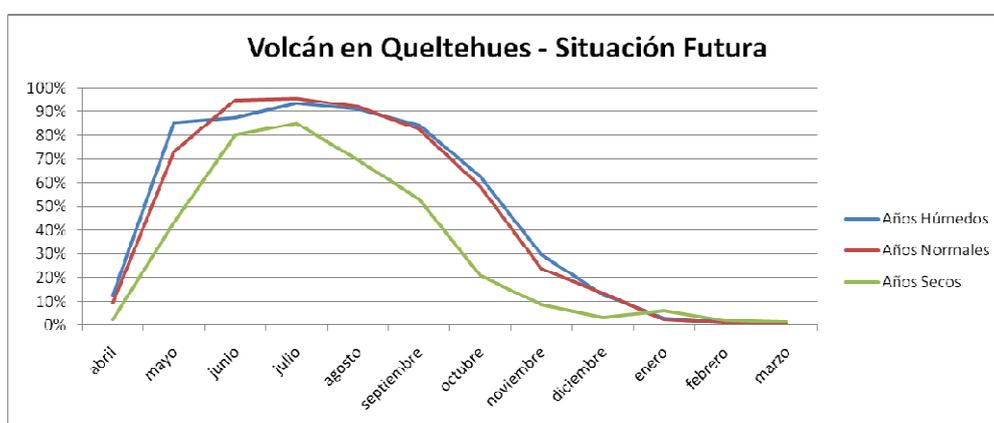
Se observa en las Figuras 6.11 y 6.12, la situación de cobertura nival simulada para las distintas clasificaciones de años tanto para la situación actual como para la situación simulada futura, respectivamente. Para la situación actual es posible observar que en años secos no se alcanza el 100% de cobertura en los meses de invierno, lo que ocurre para años húmedos y normales. El porcentaje mínimo de cobertura se alcanza en Febrero para años húmedos y secos, mientras que para los años normales el mínimo se encuentra en Marzo. Se observa un retroceso bastante rápido de la capa nival, entre los meses de Octubre y Diciembre.

Figura 6.11 Evolución derretimiento de nieve Volcán en Queltehues para distintas clasificaciones de años en la situación actual



En la situación futura, en la Figura 6.12 se observa un menor porcentaje de cobertura en todos los meses de invierno, incluso llegando al punto de que ni siquiera en los años húmedos se llega a un 100% de cobertura nival, como sí ocurre en la actualidad. Los años secos en este período muestran una diferencia de hasta un 38% con los años normales, además de una diferencia de más de un 50% de cobertura con la situación actual, en algunos meses. Además, el porcentaje mínimo de cobertura cambia de un 9% a un 1% en la situación futura.

Figura 6.12 Evolución derretimiento de nieve Volcán en Queltehues para distintas clasificaciones de años en la situación futura

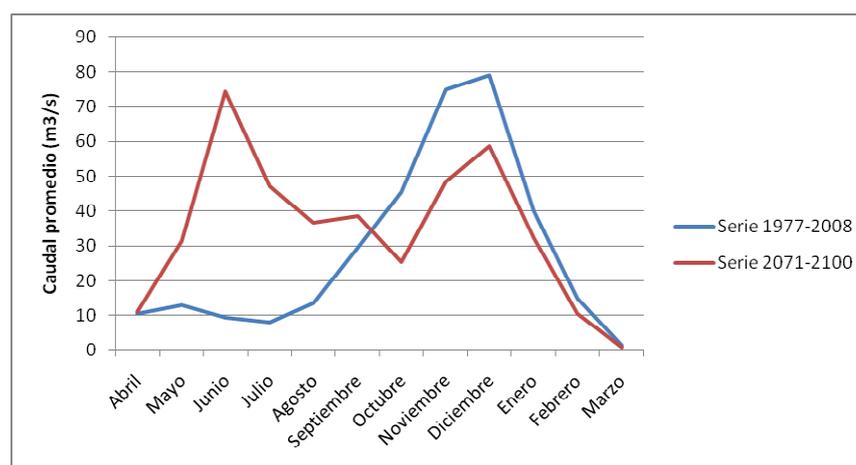


#### 6.4. Subcuenca Río Maipo en Las Melosas.

La cuenca del Río Maipo en Las Melosas es la que presenta las mayores alturas, empinándose hasta los 6000 metros sobre el nivel del mar. Además tiene una extensión bastante amplia, con sus 1400 kilómetros cuadrados. Por tal razón tiene caudales importantes, y con un régimen marcadamente nival, con sus caudales máximos en los meses de Octubre a Enero. Los caudales en otoño alcanzan un valor aproximado de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$ , mientras los máximos se acercan a los  $80 \text{ m}^3/\text{s}$ .

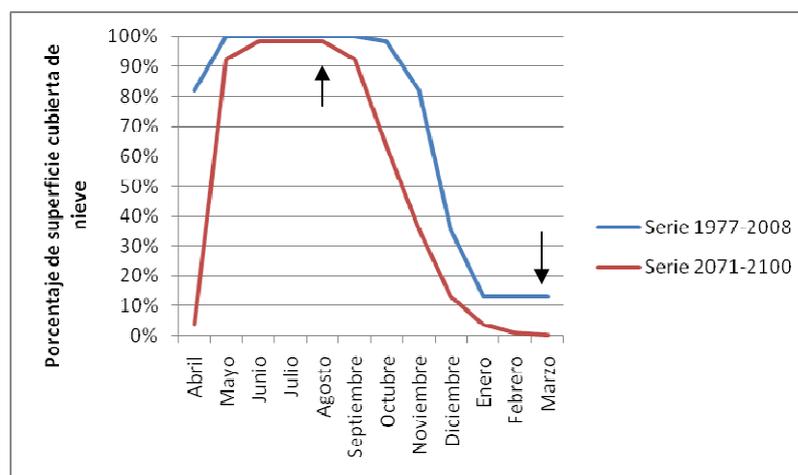
Esta es una de las cuencas que presentan el cambio más importante en su régimen hidrológico, ya que pasa a convertirse en una cuenca pluvio-nival, mixta, pero cuyos caudales pluviales son mayores que los nivales. Se muestran las curvas mencionadas en la Figura 6.13. Es importante destacar la variación de volumen en esta cuenca, la cual llega a los  $65 \text{ m}^3/\text{s}$  para la suma de caudales mensuales promedio.

Figura 6.13 Comparación caudales mensuales promedio Maipo en Las Melosas



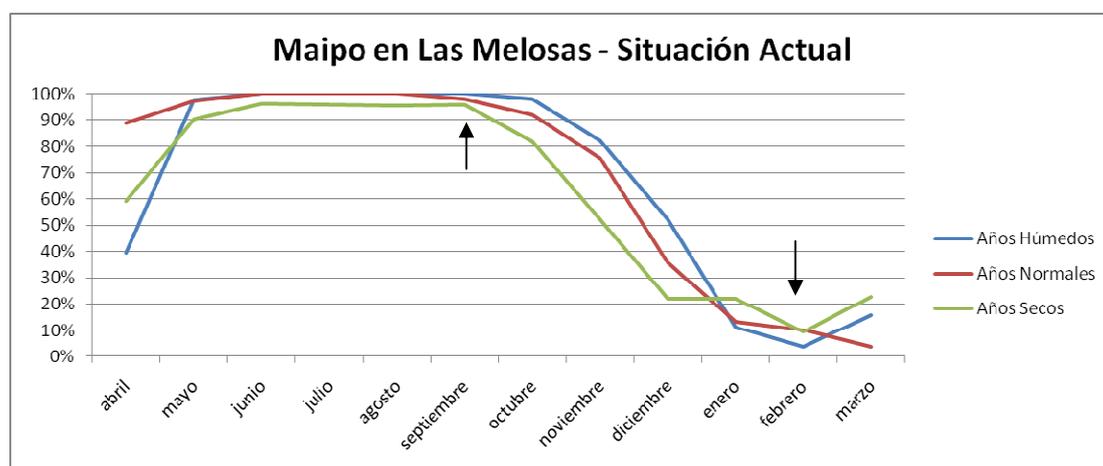
En el caso de la cobertura nival, se aprecia que la evolución en porcentaje cubierta de nieve es similar al de la subcuenca Volcán en Queltehues, en el sentido de que la superficie disminuye entre un 10% y un 20% en casi todos los meses, a excepción de los más fríos, Julio y Agosto, donde se mantiene en un 100%. Esto se justifica porque el punto de salida de la cuenca se encuentra a gran altura, alrededor de 1500 metros sobre el nivel del mar, por lo que incluso en su parte más baja se mantiene cubierta de nieve, aunque sea un par de centímetros, de la forma que se observa en la Figura 6.14.

Figura 6.14 Evolución derretimiento de nieve Maipo en Las Melosas



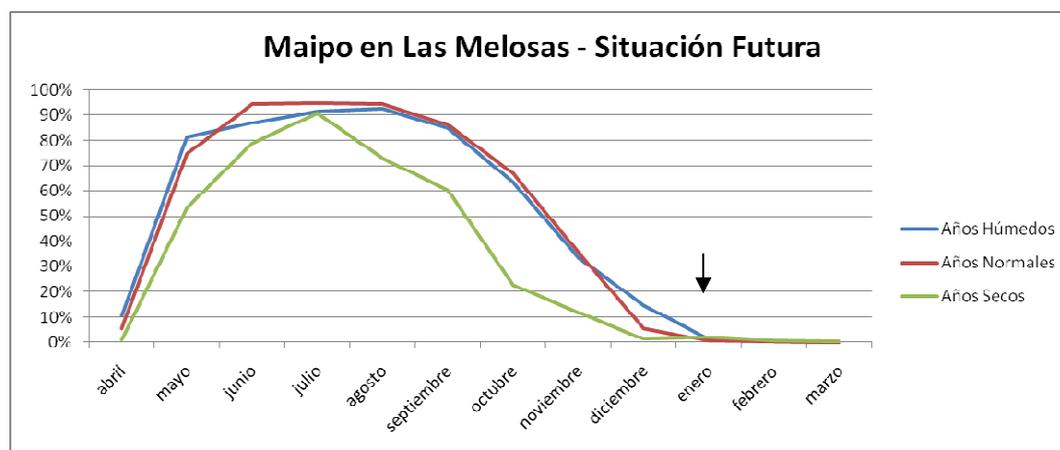
Se observa en las Figuras 6.15 y 6.16, la cobertura simulada para las condiciones definidas y para ambos escenarios. Para la situación actual se observa que en años secos solamente no se alcanza el 100% de cobertura en los meses de invierno, lo que sí ocurre para años húmedos y normales. Entre Septiembre y Octubre comienza un retroceso producido por el aumento de temperaturas en primavera, hasta llegar a un mínimo en Febrero, excepto para los años normales, que tienen su mínimo en Marzo.

Figura 6.15 Evolución derretimiento de nieve Maipo en Las Melosas para distintas clasificaciones de años en la situación actual



Mientras que para la situación futura, en la Figura 6.16 se observa un menor porcentaje de cobertura en todos los meses de invierno, nuevamente sin alcanzar el 100% de cobertura en ninguna categoría de año. Es importante destacar en la mencionada figura, que para el escenario futuro la cobertura nival es menor que un 2% durante todos los meses de Enero a Marzo, a diferencia de la situación actual, donde solamente un mes es inferior al 5%, y todos los demás es superior al 10%.

Figura 6.16 Evolución derretimiento de nieve Maipo en Las Melosas para distintas clasificaciones de años en la situación futura

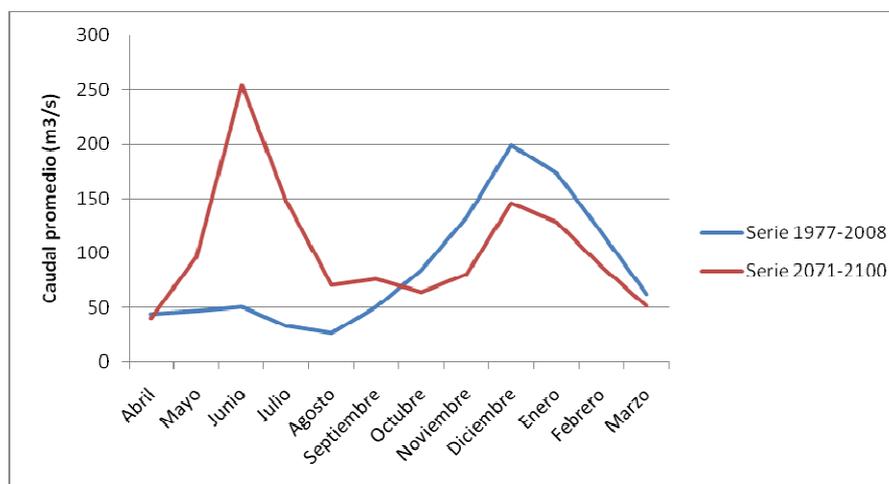


### 6.5. Subcuenca Río Maipo en San Alfonso.

La cuenca del Río Maipo en San Alfonso incluye a las subcuencas Río Maipo en Las Melosas y Volcán en Queltehues, además del aporte del río Yeso. Por lo tanto, es la más extensa de las cuencas analizadas, además de ser la que presenta los caudales más altos de todas las mencionadas. Esta cuenca, a pesar de que su punto de salida no se encuentra tan alto, tal como se observa en la Figura 6.17, tiene régimen marcadamente nival, con caudales de deshielo que alcanzan los 200 m<sup>3</sup>/s, aunque con caudales de consideración en otoño, un poco menores a los 50 m<sup>3</sup>/s.

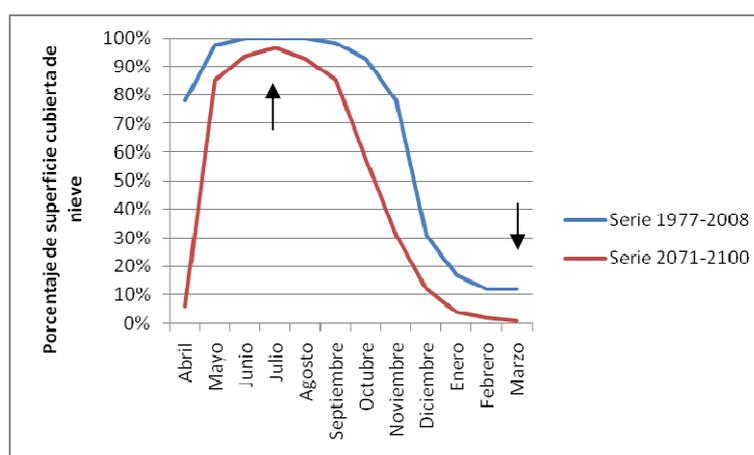
En la situación futura, en la Figura 6.17 se aprecia un cambio radical en la distribución de los caudales medios mensuales en dicha estación. Del régimen marcadamente nival que se presenta en la actualidad, bajo el escenario A2 la cuenca cambiaría a un régimen casi exclusivamente pluvial, pero con un aporte nival importante aún, probablemente debido a las subcuencas altas que mantienen su régimen, como la de Volcán en Queltehues. No obstante lo anterior, el cambio de las condiciones climáticas es tan importante, que modifica totalmente el balance hídrico en la cuenca. Se observa incluso que el caudal futuro en el mes de Junio alcanzaría valores medios de alrededor 250 m<sup>3</sup>/s, lo que representa un aumento de 25% sobre los previos caudales de deshielo en la situación base. Además, acá también es importante el cambio en caudales totales al año, pues la suma de caudales mensuales promedio en el escenario futuro, es alrededor de 222 m<sup>3</sup>/s mayor que para el escenario actual.

Figura 6.17 Comparación caudales mensuales promedio Maipo en San Alfonso



En el caso de la cobertura nival, también se observa un retroceso marcado de ésta para el caso del escenario futuro evaluado. En este caso, el descenso de cobertura nival alcanza entre un 10% y un 40%, tal como se ve en la Figura 6.18, llegando a un 70% en el mes de Abril. Esta menor acumulación de nieve, dado el importante aumento de temperatura en la situación futura, provoca que haya menos nieve en las épocas de deshielo que en la situación actual, lo que explica el cambio de régimen en la cuenca. Se alcanzan los valores máximos de cobertura nival en el mes de Julio en ambos escenarios, con una diferencia de menos de un 5%, además de que en la situación futura el retroceso de la capa nival comienza instantáneamente, mientras que en la situación actual simulada, empieza a ocurrir en la primavera.

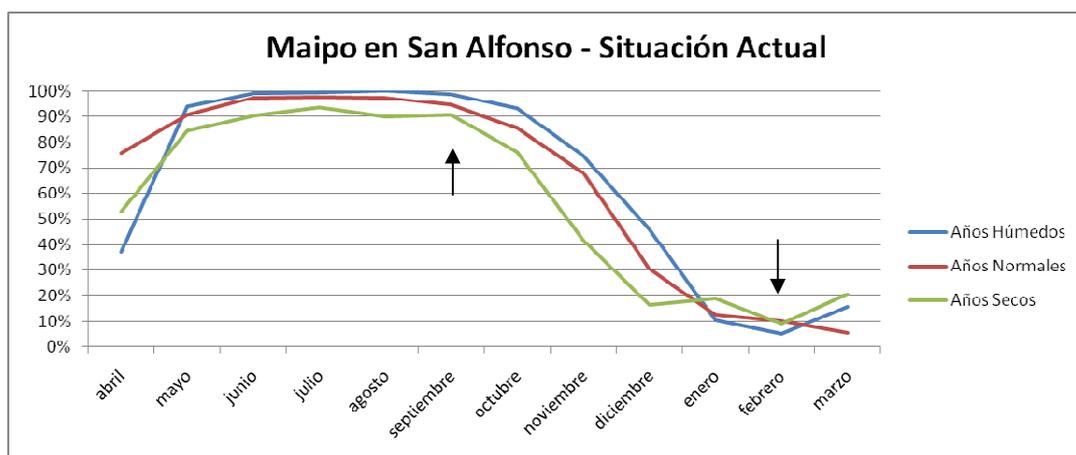
Figura 6.18 Evolución derretimiento de nieve Maipo en San Alfonso



Se observa en las Figuras 6.19 y 6.20 que se entrega la cobertura simulada para las condiciones definidas, y para ambos escenarios. En la situación actual, se aprecia que solamente en los años húmedos se llega al 100% de cobertura en los

meses de invierno, y su derretimiento comienza en Septiembre, pero de forma paulatina, mientras que entre Octubre y Diciembre comienza el retroceso más importante y rápido. El mínimo ocurre en Febrero, con una cobertura de un 5% aproximadamente.

Figura 6.19 Evolución derretimiento de nieve Maipo en San Alfonso para distintas clasificaciones de años en la situación actual



Mientras que para la situación futura, en la Figura 6.20 se observa un menor porcentaje de cobertura en todos los meses de invierno, meses en los que no se alcanza el 100% de cobertura para ninguna clase de año. Para la situación futura, se alcanza una cobertura mínima de un 0,3% en los meses de verano, lo que marca una gran diferencia con el escenario simulado actual.

Figura 6.20 Evolución derretimiento de nieve Maipo en San Alfonso para distintas clasificaciones de años en la situación futura



## 7. CONCLUSIONES

### 7.1. Sobre el modelo WEAP

En general el modelo WEAP se mostró como una herramienta muy precisa para realizar el balance hídrico en las subcuencas escogidas. Se pudo calibrar para cinco puntos de control elegidos, con coeficientes de Nash-Sutcliffe más que satisfactorios. La configuración del modelo era relativamente simple, pues se aplicó en una gran zona cordillerana con un tipo de suelo homogéneo y sin mayor intervención humana; a pesar de esto el proceso de calibración fue bastante largo, y laborioso debido a la falta de experiencia en el uso del software.

Otro inconveniente que se presenta en el programa, es que para ingresar las series de caudales, precipitaciones, y temperaturas, utiliza un sistema de lectura de archivos de texto, lo que si bien es más simple de programar, es menos eficiente al momento de generar los datos, ya que en casos donde se tienen muchas subcuencas (como en este caso, con un total de 50), ingresar los datos meteorológicos es un proceso bastante largo, casi tanto como el generarlos.

Pero más allá de los problemas generados, los beneficios del software son innegables. La reproducción del balance hídrico en la cuenca se logró satisfactoriamente, llegándose a un buen nivel de correlación en datos simulados versus los observados. La cobertura nival también se ve muy bien representada, pues luego de verificar con las imágenes satelitales existentes de la misión LandSat (entregadas en el Anexo digital) se aprecia un buen acercamiento en los resultados simulados. Además, el modelo entrega zonas que se mantienen siempre cubiertas de nieve, las cuales coinciden con lo observado en la realidad, en las zonas actualmente glacializadas. Sobre la cobertura nival, si bien la superficie es representada de muy buena manera, la altura de la capa nival es subestimada, y no concordante con los datos medidos en las estaciones dentro de la cuenca. Hay que mencionar además que los datos de equivalente en agua obtenidos de las estaciones de ruta de nieve no siguen una distribución lineal con la altura (existen datos de estaciones de ruta de nieve con cotas similares, pero registros bastante distintos), básicamente porque los datos medidos en las estaciones no son un promedio del mes, sino que son datos puntuales medidos en una fecha cualquiera de un mes. Como ejemplo en la zona de interés, en la estación Las Arenas (2700 msnm) para el 26/08/1987 se registraron 1803 mm de equivalente en agua, mientras que en Laguna Negra (2780 msnm) el 30/08/1987 se registraron 143 mm. Por lo tanto, realizar algo como un gradiente de altura de nieve versus altura no tiene sentido. En este caso puntual, el modelo entregó para la cuenca que se encuentra a esa altura, una altura de nieve de 1100 mm. En este caso particular el resultado parece adecuado, pero en general, las alturas son menores a lo que se esperaría en

la realidad. La explicación a estos problemas debería estar en las temperaturas de derretimiento y congelamiento utilizadas en el modelo en la calibración, pero el variarlas implicaría modificar el ajuste de los caudales, y no existen valores ciertos con los cuales calibrar la altura del manto nival como para intentar hacerlo.

En la mayoría de las subcuencas además, los caudales máximos fueron difíciles de simular bien, y en general quedaron levemente subestimados. Sin embargo, el ajuste es bastante bueno a pesar de esas diferencias, las cuales ocurren en años especialmente húmedos, error que como se ha explicado podría ser atribuible al derretimiento de la nieve acumulada, que podría no ser suficiente.

Finalmente, el modelo WEAP muestra ser una buena herramienta para la planificación de recursos hídricos, y en particular, para estudios relacionados con el cambio climático.

## **7.2. Generación de escenarios futuros**

La caracterización de los escenarios futuros, explicados en mayor profundidad en el Capítulo 2, es una importante herramienta para intentar caracterizar la disponibilidad futura de los recursos hídricos de una región, entre otras aplicaciones. Sin embargo, hay que recordar que estas son estimaciones, que puede que se acerquen a la realidad, y puede que sean totalmente distintas. Lo que si es indiscutible, es la tendencia al alza de las temperaturas y los cambios en el ciclo hidrológico, por lo que el poder tener una cuantificación de los posibles cambios climáticos futuros, es de tremenda utilidad. Y ante la aparente inevitabilidad de estos cambios climáticos, es necesario analizar los casos más desfavorables para estar preparados a las posibles consecuencias. Por tal razón se optó por el escenario A2 del modelo PRECIS implementado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile.

El problema observado con la extracción de dichos datos, fue el caso de los datos de PRECIS para la línea base mantienen importantes diferencias con los datos obtenidos en las estaciones. Sin embargo, la correlación es bastante buena, por lo que se pueden corregir los datos en común, además de los datos futuros. Lamentablemente, una observación que se puede realizar, es que a medida que pasen los años, los períodos elegidos de calibración tendrán cada vez menos años en común con la línea base de PRECIS, la cual solamente llega hasta el año 1990, por lo que la correlación entre la línea base y los datos reales será cada vez menos precisa. Afortunadamente, aún no es tan grave ese problema, pero es bueno tenerlo en cuenta para estudios en el futuro.

### **7.3. Conclusiones generales sobre escenarios futuros**

Los cambios climáticos son de una magnitud importante para el escenario evaluado. Los cambios de temperatura son del orden de entre 2°C y 5°C en promedio para cada serie. Y las precipitaciones presentan cambios en su media del orden de 7 mm, lo que no es menor considerando que por el hecho de haber tantos meses con precipitación de baja magnitud, pues en meses de verano casi no existe precipitación, implica que las diferencias en períodos invernales son importantes. Y se aprecia que ante estos cambios se producen variaciones considerables en el régimen hidrológico en cada una de las subcuencas, perdiendo cada vez más la influencia nival, para dar paso a regímenes más pluviales.

Esto queda explicado por la menor acumulación de nieve en las zonas más altas de la cordillera, lo que provoca que los caudales de deshielo sean menores, dada la disminución en la cantidad de agua acumulada en las cumbres. Esta menor cantidad de nieve (explicada directamente por el aumento en la temperatura), es un fenómeno que tendría fuerte impacto en la disponibilidad de recursos en el futuro, ya que provocará cambios tan importantes como los mostrados gráficamente en el Capítulo 6, teniendo directa influencia en cambios en la administración de los recursos hídricos en la región. Son en general cambios importantes, que merecen ser evaluados en profundidad.

### **7.4. Comentarios y recomendaciones**

En general los resultados fueron satisfactorios, consiguiéndose una buena calibración, y observándose resultados claros para la situación futura. Además, se cuenta con una buena red de estaciones de monitoreo en la región escogida. Sin embargo, hay que hacer notar que a pesar de que existen un número importante de estaciones, más de alguna está discontinuada, y otras no presentan estadística completa, por lo que debió rellenarse de la mejor manera posible. Además, existe el problema de que existen estaciones hasta cierta altura, y no más allá de ella, por lo que las precipitaciones y temperaturas deben extrapolarse para obtener datos de entrada para las subcuencas más altas del modelo. Esto implica que pueden existir problemas posteriormente al intentar calibrar el modelo, como ocurrió en este estudio, donde al utilizar un gradiente lineal de precipitación versus altura, los datos resultan sobreestimados, obteniéndose caudales de salida en los puntos de control demasiado altos, por lo que la precipitación pasó a ser un parámetro más de calibración. Este problema no es nuevo, y ya se había dado en un estudio realizado en la cuenca del Maule (presentado durante el Taller de Modelación Hidrológica y Cambio Climático, del Centro del cambio global de la Universidad Católica, realizado en Octubre del 2010, donde participó David Purkey, uno de los desarrolladores de

WEAP) donde las precipitaciones de la estación Armerillo debieron ser multiplicadas por 0,76 para todas las bandas de altura utilizadas. De hecho se adoptó la misma solución en este estudio, pero variando ese coeficiente para hacer coincidir los caudales de salida simulados con los observados.

Sin duda no es un problema de fácil solución, porque lo único realmente eficiente sería instalar estaciones de monitoreo en puntos más altos, donde las condiciones climáticas y de acceso hacen complicado mantenerlas en correcto funcionamiento. Pero sería la mejor solución ante el problema enfrentado, ya que al tener variables de entrada de mejor calidad, se ahorraría mucho tiempo en el proceso de calibración, además de contar con la certeza de saber que la precipitación utilizada es la que realmente se presenta en la zona.

## BIBLIOGRAFÍA

- ACEVEDO, L., Estimación Hidrológica Bajo Escenarios de Cambio Climático en Colombia, 2009.
- ARMSTRONG R. L. and Brown Ross, "Snow and Climate: Physical Processes, Surface Energy Exchange and Modeling" Cambridge University Press, 2008.
- AYALA, A. et al., Sensibilidad de los Recursos Hídricos Futuros al Procedimiento de Escalamiento de Variables Meteorológicas, 2009.
- COMISIÓN NACIONAL DE RIEGO. (n.d.). Sistema de Información Integral de Riego. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. <http://esiir.cnr.cl/esiir/>.
- CORTÉS, G, Evaluación de un modelo hidrológico semi distribuido para la estimación de la escorrentía de deshielo en el río Juncal, 2010.
- FUENZALIDA H. (2007). Simulaciones con modelo PRECIS bajo escenarios A2 y B2 del IPCC. Revista Ambiente y Desarrollo 23 (2): 9-14. Santiago, Chile.
- LAGOS, M y Vargas, X. Vulnerabilidad futura de los recursos hídricos afluentes al Embalse El Yeso, 2009.
- LÉVITE Hervé, Hilmy Sally, Julien Cour. Testing water demand management scenarios in a water-stressed basin in South Africa: application of the WEAP model. Physics and Chemistry of the Earth, 28: 779-786, ago. 2003.
- MARDONES Morales, Gabriel Ignacio. Implementación y uso del modelo WEAP en cuencas nivales de la IV región para el análisis del cambio climático. Tesis (Título de Ingeniero Civil). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2009. 84 h.
- MCPHEE, J. et al., Proyecciones de Impacto del Cambio Climático Sobre Cuencas Andinas de Chile Central: Aplicación a Cuencas de Maule Alto y Laja, 2009.
- MENA Pardo, Diego Ignacio. Análisis de impactos del cambio climático en la cuenca andina del Río Teno, usando el modelo WEAP. Tesis (Título de Ingeniero Civil). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2009. 73 h.

- O'NEILL A.D.J. and Gray Don M. 1996, "Spatial and temporal variations of the albedo of prairie snowpack", *Journal of Hydrology* , Volume 184, Issues 3-4, October 1996, Pages 277-298
- PÉREZ, J. y X. Vargas, Impacto del Cambio Climático en las Crecidas de la Quebrada San Ramón. *Análisis de Variables Meteorológicas*, 2009.
- SIEBER, J., David Purkey. (2007). *User Guide, for WEAP21*. Stockholm Environment Institute. Estocolmo, Suecia.
- SINGH, P. Y BENGTSSON L. Effect of warmer climate on the depletion of snow-covered area in the Satluj basin in the western Himalayan región. *Hydrological Science Journal*. 48(3), June 2003.
- U.S. Geological Survey. (n.d.). The National Map Seamless Server. <http://seamless.usgs.gov/>.
- WATER resources for agriculture in a changing climate: international case studies por Cynthia Rosenzweig "et al". *Global Environmental Change* 14: 345-360, sep. 2004
- WEAP Página oficial: Water Evaluation And Planing System WEAP (n.d.). <http://www.weap21.org/>.
- YOUNG C. et al., "Modeling the Hydrology of California's Sierra Nevada for Sub-Watershed scale Adaptation to Climate Change" *Computation Methods in Water Resources XVII International Conference*, 2008.

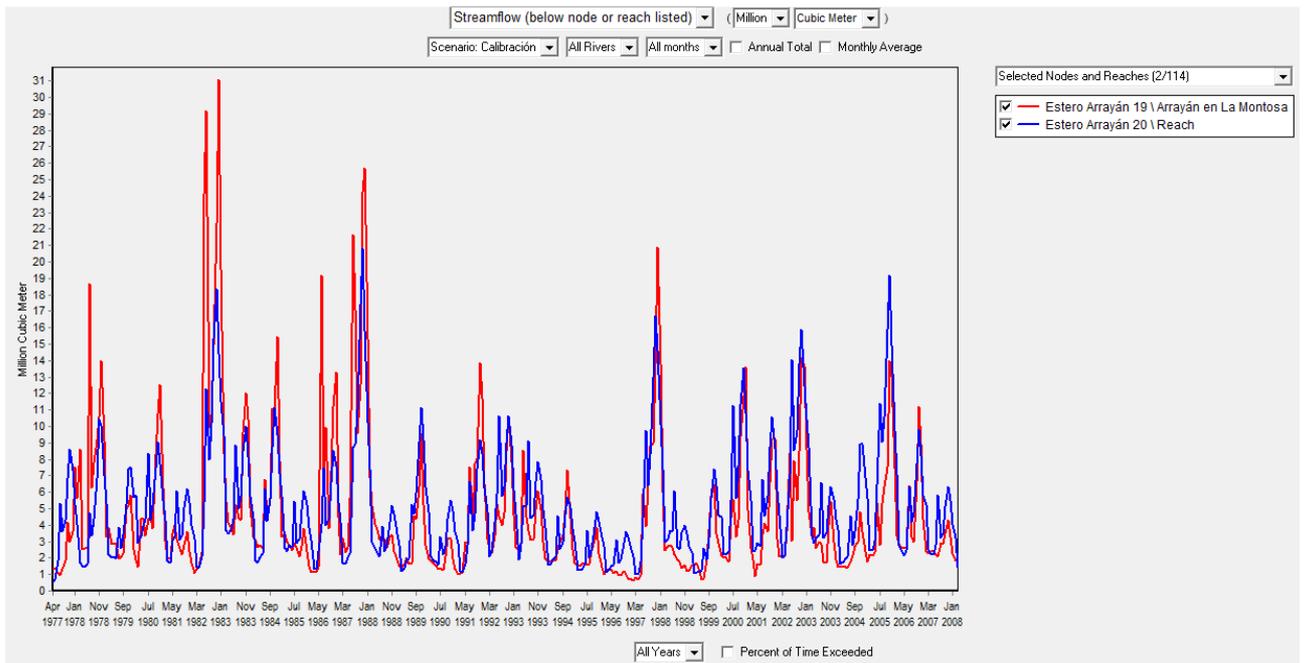
# **ANEXOS**

## ANEXO A: Resultados de la Calibración

### A.1 Calibración según caudal medio mensual

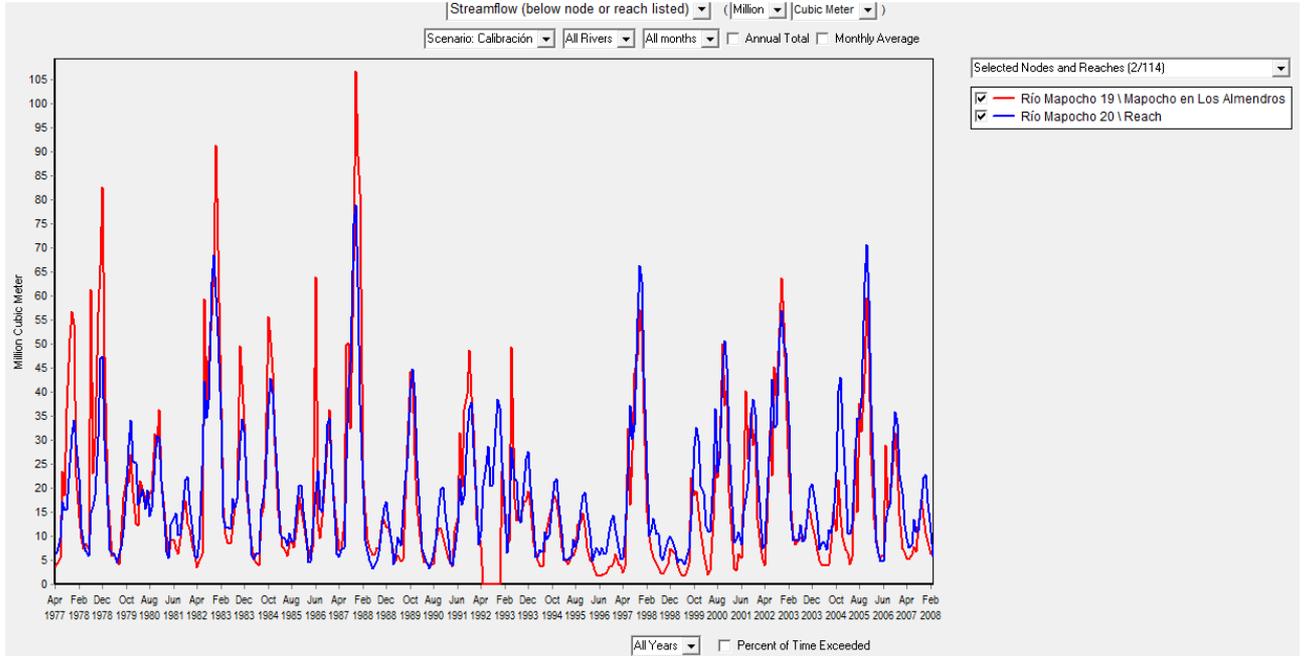
#### A.1.1 Estero Arrayán en La Montosa

Figura A.1 Calibración de caudal Arrayán en La Montosa



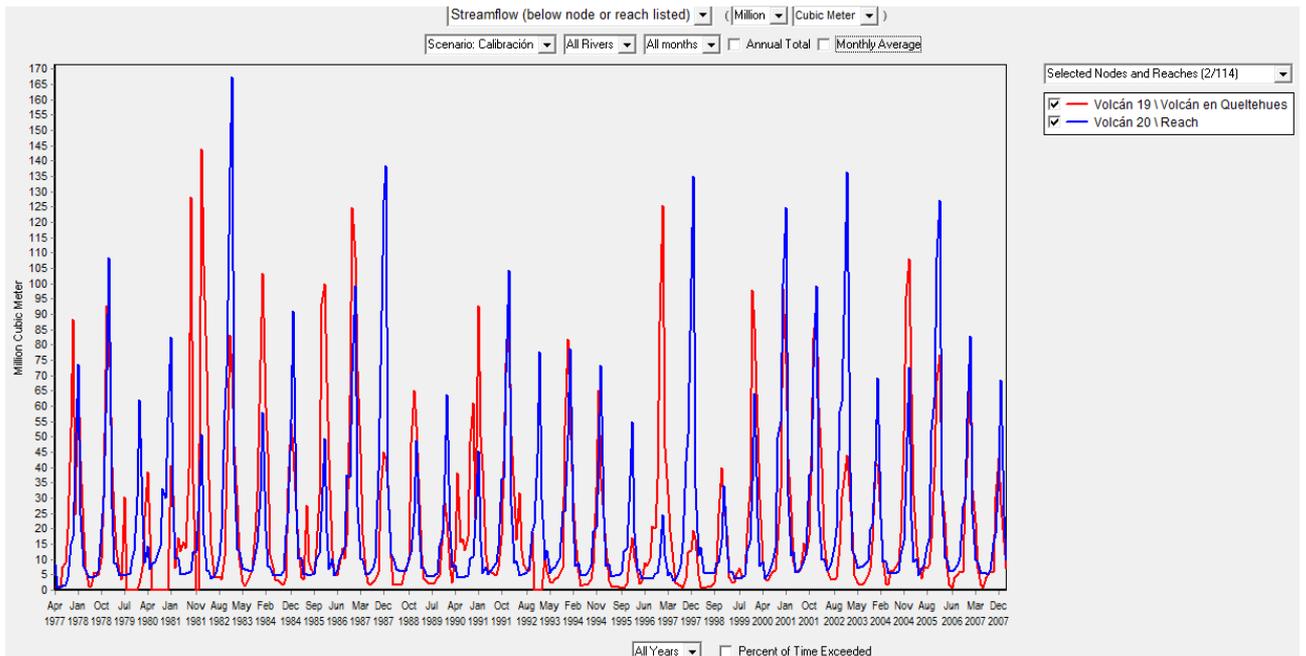
### A.1.2 Río Mapocho en Los Almendros

Figura A.2 Calibración de caudal Mapocho en Los Almendros



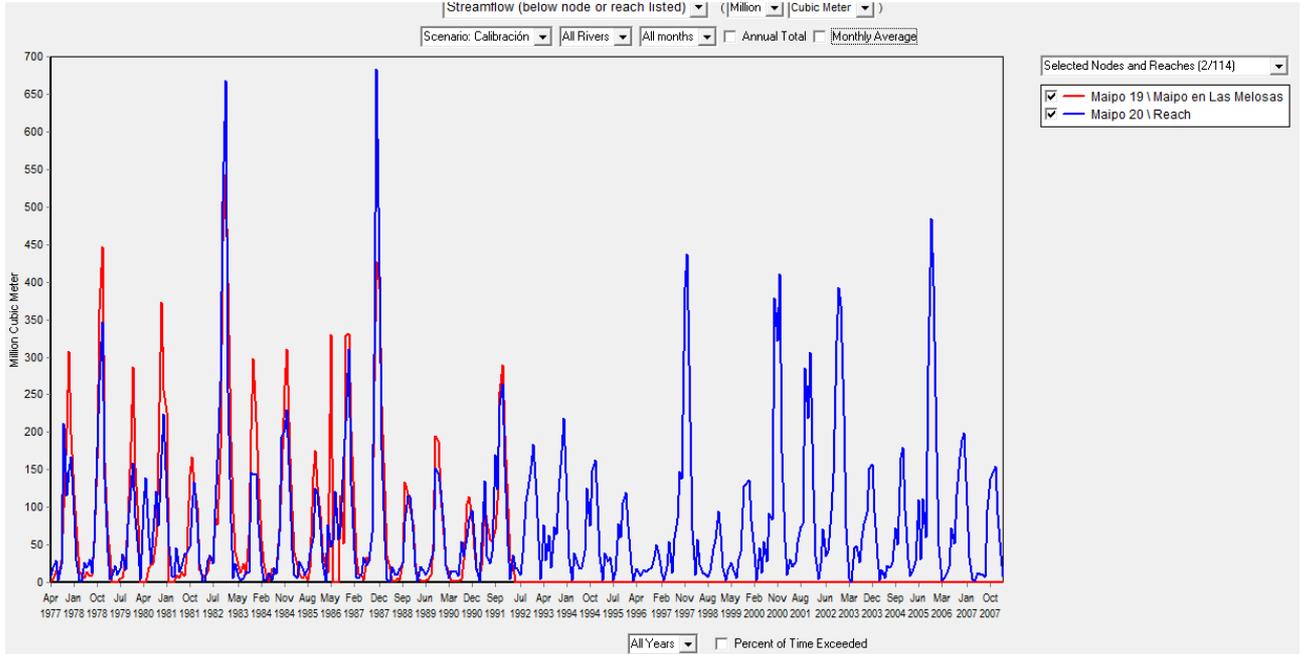
### A.1.3 Río Volcán en Queltehues

Figura A.3 Calibración de caudal Río Volcán en Queltehues



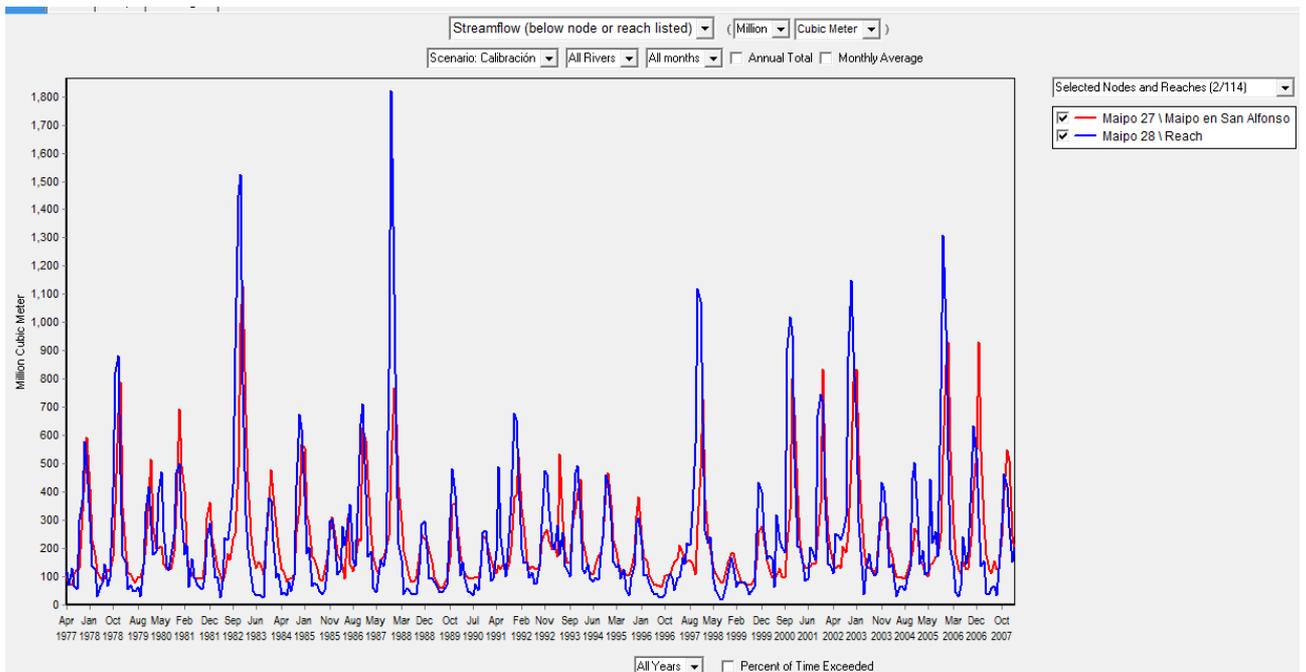
### A.1.4 Río Maipo en Las Melosas

Figura A.4 Calibración de caudal Río Maipo en Las Melosas



### A.1.5 Río Maipo en San Alfonso

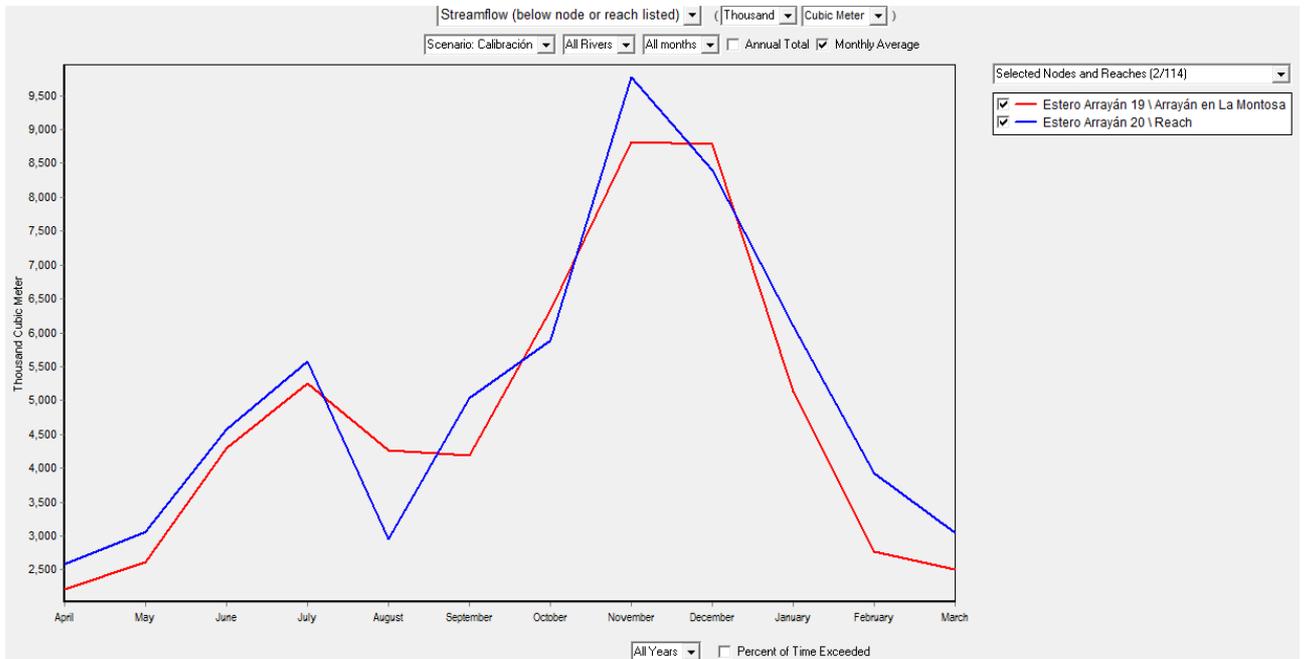
Figura A.5 Calibración de caudal Río Maipo en San Alfonso



## A.2 Calibración de las cuencas según caudal medio mensual promedio

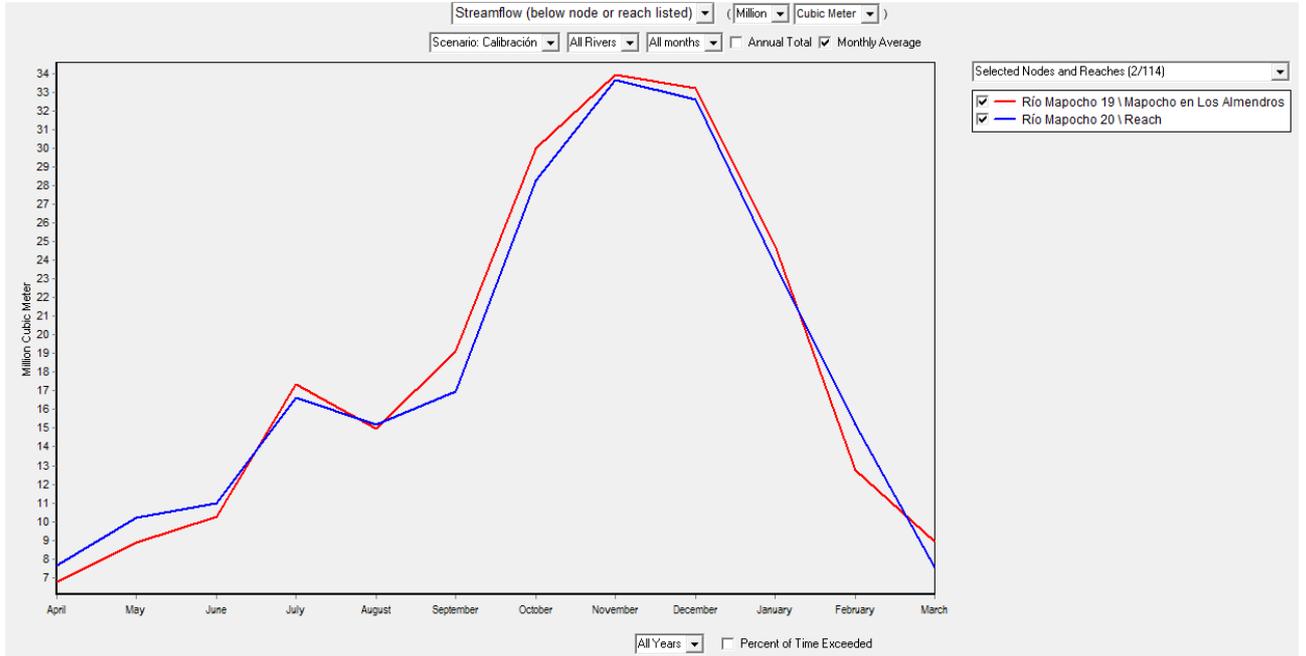
### A.2.1 Estero Arrayán en La Montosa

Figura A.6 Calibración de caudal promedio mensual Arrayán en La Montosa



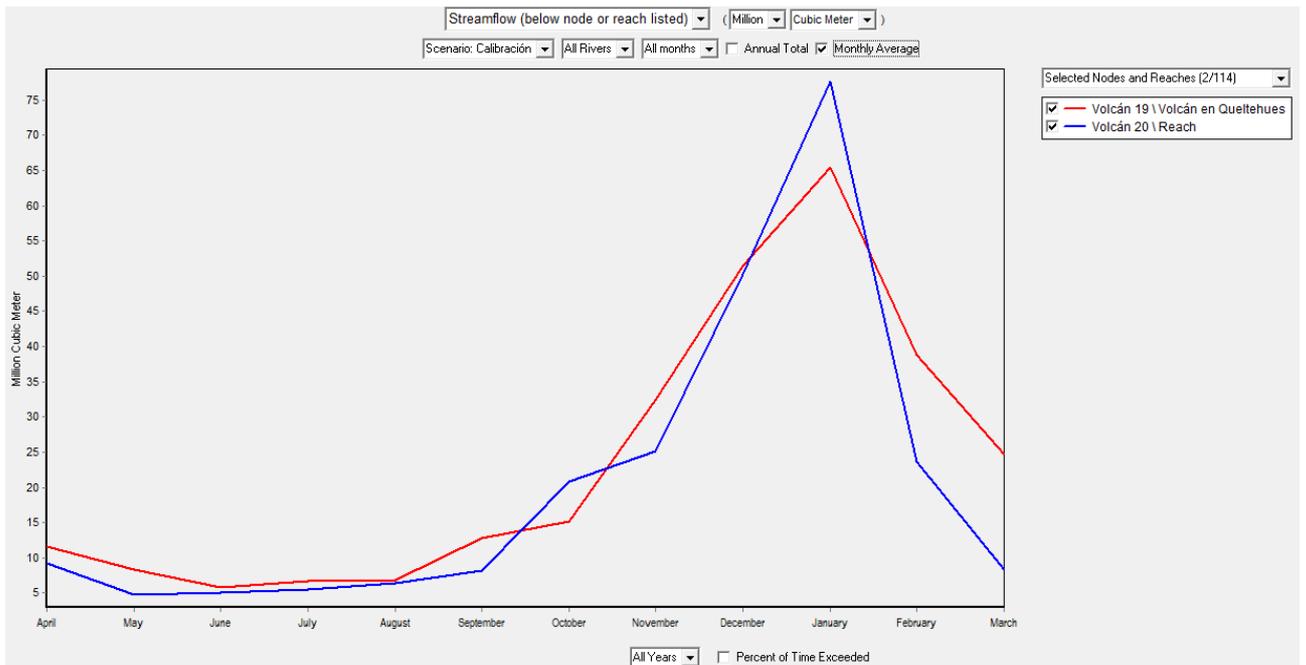
## A.2.2 Río Mapocho en Los Almendros

Figura A.7 Calibración de caudal promedio mensual Mapocho en Los Almendros



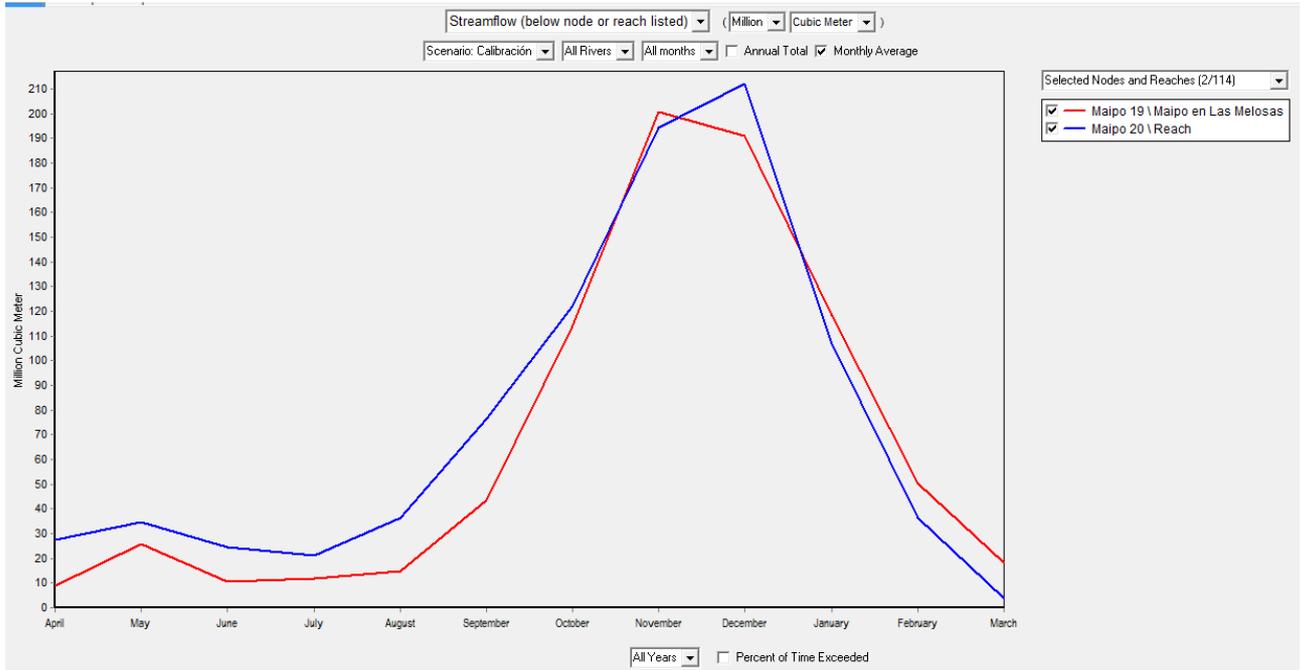
## A.2.3 Río Volcán en Queltehues

Figura A.8 Calibración de caudal promedio mensual Río Volcán en Queltehues



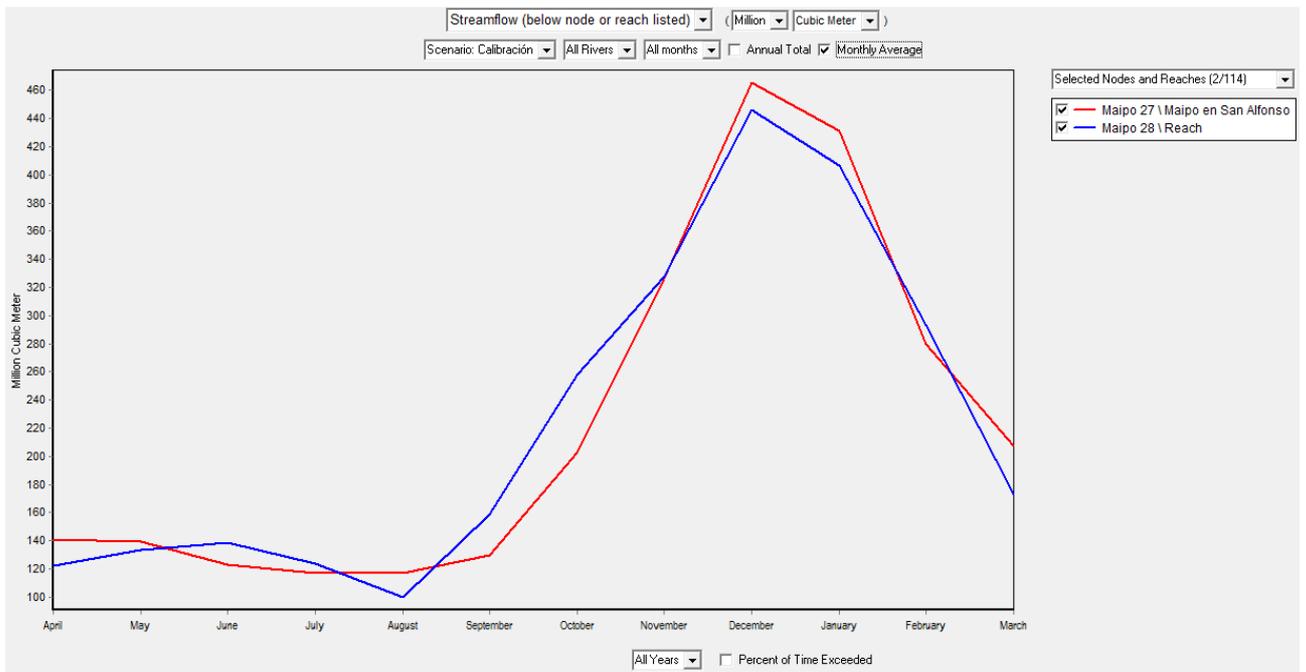
### A.2.4 Río Maipo en Las Melosas

Figura A.9 Calibración de caudal promedio mensual Río Maipo en Las Melosas



### 7.4.1. Río Maipo en San Alfonso

Figura A.10 Calibración de caudal promedio mensual Río Maipo en San Alfonso



### ANEXO B: Correlación datos La Ermita Bocatoma Central y Cerro Calán

Figura B.1 Correlación La Ermita Bocatoma Central y Cerro Calán

