



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

**INCERTIDUMBRE DE LAS VARIABLES  
METEOROLÓGICAS EN LA ESTIMACIÓN DE LOS  
RECURSOS HÍDRICOS FUTUROS EN LA CUENCA DEL RÍO  
PANGAL**

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

**JAIME PATRICIO RIQUELME SEREY**

**PROFESOR(A) GUÍA  
XIMENA VARGAS MESA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN  
JAMES MCPHEE TORRES  
RENÉ FIGUEROA LEIVA**

**SANTIAGO DE CHILE  
OCTUBRE 2010**

*Felicidad no es hacer lo que uno quiere  
sino querer lo que uno hace*

*Jean – Paul Sartre*

## Resumen Ejecutivo

Existe en la comunidad científica un amplio consenso que el cambio climático modificará, entre otros efectos, la disponibilidad de los recursos hídricos alrededor del planeta. Esto se basa en los resultados de modelos meteorológicos de gran escala que sirven de entrada a modelos hidrológicos aplicados a situaciones locales.

El objetivo principal de este trabajo es cuantificar la variación que sufren las series de caudales medios mensuales, producto de los datos meteorológicos y configuraciones adoptadas en la modelación del río Pangal, el cual se encuentra ubicado en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Chile, utilizando el modelo de gestión WEAP desarrollado por el Stockholm Environment Institute.

Para el análisis de la variabilidad e incertidumbre de los resultados, se consideraron un conjunto de parámetros, siendo éstos: i) división espacial de la cuenca, ii) gradientes meteorológicos, iii) series alternativas futuras y iv) parámetros modelo WEAP.

Generados los gradientes en base a registros de estaciones existentes en el área de interés, y utilizando el modelo de humedad del suelo, se implementó la cuenca en WEAP considerando tres escenarios consistentes en una, dos y seis bandas de altura, los cuales fueron calibrados y validados en el escenario actual utilizando el coeficiente de Nash – Sutcliffe. Se observó que a medida que la cuenca se modela de manera más concentrada, el valor del coeficiente disminuye desde 0,82 a 0,62, lo que se ve reflejado en una subestimación importante de los caudales de deshielo.

Para la generación de los caudales futuros en el periodo 2005 a 2035, se utilizaron series mensuales de temperatura y precipitación para los escenarios A2 como B2 definidos por el IPCC. Las series meteorológicas futuras fueron derivadas del modelo de circulación global HadCM3, escaladas con el software SDSM, generando un modelo con coeficiente  $R^2$  de 0,53 y 0,42 para la temperatura y precipitación, respectivamente.

Los resultados de la modelación indican que al seleccionar de las 20 series generadas con cada gradiente, aquella con mayor disminución de precipitación y mayor aumento de la temperatura, se produce en el escenario A2 un descenso promedio de los caudales medios anuales de un 16%, aunque los caudales medios mensuales pueden tener importantes variaciones (37% en Noviembre). Por otra parte, si se selecciona aquella serie con menor disminución de precipitación y menor aumento de temperaturas, se tiene un aumento promedio de los caudales medios anuales de un 12%. Finalmente, en el escenario B2 se observa la misma tendencia, sin embargo las variaciones son de una menor magnitud (disminución de un 4% en el caso más desfavorable, y aumento de 5% en el más favorable). Lo anterior refleja la necesidad de mayor investigación para disminuir la incertidumbre inherente a estas modelaciones.

## Agradecimientos

En realidad, también podría no haber escrito, bien pensado, no es una obligación, pero aquí estoy, no escribiendo las últimas palabras de un trabajo de título, no escribiendo las últimas palabras de mi vida universitaria, no escribiendo las últimas palabras de un ciclo que se está cerrando, Yo, Jaime, Jaimito para los amigos, o Chamo para la familia, estoy aquí, simplemente, para decirles *gracias*.

Quisiera agradecer, en primer lugar, a todos los integrantes de mi comisión, al profesor James por sus comentarios finales y sus críticas en el modo de presentar, a René por sus observaciones de forma y fondo en el borrador entregado, y con especial cariño, a la profesora Ximena, por toda su paciencia, sus ánimos, su tiempo y sus recomendaciones en estos largos meses de trabajo.

La Universidad es un punto de encuentro, y no simplemente un lugar donde uno *invierte* el tiempo para salir con un título, en este espacio confluyen un sinfín de individuos, la mayoría pasan delante de nuestros ojos sin un nombre, una parte de ellos son compañeros, con los cuales uno comparte cursos y trabajos, y unos pocos, con el pasar de los años, terminan siendo amigos, a ellos, a Alejandro, Alonso, Andrés, Fernando, Sebastián y Pablo, les digo *gracias totales*.

Estos últimos años no han sido fáciles, pero con el tiempo, uno se da cuenta que esa es la gracia de la vida, los problemas, las dificultades, los retos y los desafíos nos hacen ser lo que somos, y aún cuando en ese momento de angustia uno no vea más allá, todo termina saliendo bien, es por esto último que quiero agradecer a Sergio, por la oportunidad brindada de trabajar junto a él, y a Cesar, Andrés y Denisse por las risas, los consejos, el día a día y la compañía entregada.

Así como estos últimos años han tenido sus dificultades, también es justo decir que han tenido sus alegrías, es por eso que es especial para mí agradecer a María José, por haber estado ahí, en las buenas, en las malas y en las complicadas.

Finalmente, y no menos importante, quiero dedicar este trabajo a dos personas en particular, cierto autor dijo *el que no ama ya está muerto*, no quedándome más que agregar que, con ustedes, Seba y Mamá, me siento vivo, no teniendo más palabras para expresar todo lo que significan para mí.

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1- MOTIVACIÓN .....	1
1.2- OBJETIVOS .....	3
1.2.1- OBJETIVO GENERAL .....	3
1.2.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
1.3- ORGANIZACIÓN DEL INFORME .....	4
<b>CAPÍTULO 2: DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1- CAMBIO CLIMÁTICO Y GENERACIÓN DE ESCENARIOS .....	5
2.1.1- ESCENARIOS SRES .....	5
2.2- HIDROLOGÍA Y MODELOS .....	6
2.2.1- MODELO HADCM3 .....	7
2.2.2- SDSM .....	8
2.2.3- MODELO WEAP .....	14
<b>CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO .....</b>	<b>21</b>
3.1.- DESCRIPCIÓN GENERAL .....	21
3.1.1- INTRODUCCIÓN .....	21
3.1.2- UBICACIÓN .....	21
3.1.3- CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES DE LA ZONA .....	22
3.2.- ESTUDIO CUENCA RÍO PANGAL .....	29
3.2.1- INTRODUCCIÓN .....	29
3.2.2- ANTECEDENTES GENERALES .....	29
3.2.3- PROCESAMIENTO DE LA CUENCA .....	31
<b>CAPÍTULO 4: GENERACIÓN DE SERIES DE TIEMPO .....</b>	<b>41</b>
4.1- INTRODUCCIÓN .....	41
4.2- GENERACIÓN SERIES INDEPENDIENTES .....	41
4.2.1- SELECCIÓN PREDICTORES .....	41
4.2.2- CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN .....	44
<b>CAPÍTULO 5: WEAP .....</b>	<b>53</b>
5.1- INTRODUCCIÓN .....	53
5.2.- MODELO WEAP .....	53
5.3.- IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO .....	55
5.4.- CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN .....	57
5.4.1- CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN 6 BANDAS .....	58
5.4.2- ANÁLISIS 1 BANDA .....	66
5.4.3- ANÁLISIS 2 BANDAS .....	68
5.5.- ANÁLISIS ESCENARIOS FUTUROS .....	70
<b>CAPÍTULO 6: COMENTARIOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>77</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1: COMPARACIÓN DISTINTOS ESCENARIOS.....	6
TABLA 2.2: TABLA COMPARATIVA ESCALAMIENTO DINÁMICO-ESTÁTICO .....	10
TABLA 2.3: PREDICTORES SDSM .....	12
TABLA 2.4: PARÁMETROS WEAP .....	20
TABLA 3.1: ESTACIONES VI REGIÓN .....	27
TABLA 3.2: ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS .....	28
TABLA 3.3 EXTRACCIÓN MINERA RÍO BLANCO .....	30
TABLA 3.4: CAUDALES CVE (m <sup>3</sup> /s).....	32
TABLA 3.5: PROPIEDADES 1 BANDA .....	33
TABLA 3.6: PROPIEDADES 2 BANDAS .....	33
TABLA 3.7: PROPIEDADES 6 BANDAS .....	33
TABLA 3.8: CURVA DE NIVEL LÍMITROFE 2 BANDAS.....	34
TABLA 3.9: CURVAS DE NIVEL LÍMITROFES 6 BANDAS .....	34
TABLA 3.10: GRADIENTE TEMPERATURA INVIERNO (°C/m).....	36
TABLA 3.11: GRADIENTE TEMPERATURA VERANO (°C/m) ... ..	37
TABLA 3.12: VALORES MENSUALES PRECIPITACIÓN (mm/mes) .....	38
TABLA 3.13: GRADIENTES DE PRECIPITACIÓN (mm/m).....	39
TABLA 4.1: CONFIGURACIÓN PREDICTORES .....	42
TABLA 4.2: PREDICTORES TEMPERATURA RENGO .....	43
TABLA 4.3: PREDICTORES PRECIPITACIÓN RENGO .....	43
TABLA 4.4: CALIBRACIÓN TEMPERATURA (R <sup>2</sup> ) .....	44
TABLA 4.5: CALIBRACIÓN PRECIPITACIÓN (R <sup>2</sup> ) .....	45
TABLA 4.6: VALORES MENSUALES TEMPERATURA RENGO (°C) .....	45
TABLA 4.7: VALIDACIÓN TEMPERATURA RENGO (°C).....	46
TABLA 4.8: VALORES MENSUALES PRECIPITACIÓN RENGO (mm).....	47
TABLA 4.9: VALIDACIÓN PRECIPITACIÓN RENGO (mm) .....	47
TABLA 4.10: GENERACIÓN SERIES FUTURAS TEMPERATURA (°C) .....	48
TABLA 4.11: GENERACIÓN SERIES FUTURAS PRECIPITACIÓN (mm).....	49
TABLA 5.1: PARAMETROS CALIBRACION .....	53
TABLA 5.2: VALORES PARAMETROS DE CALIBRACION INICIAL .....	57
TABLA 5.3: CALIBRACIÓN PANGAL $\Delta PP/\Delta Z=0.015$ mm/m .....	58
TABLA 5.4: CALIBRACIÓN PANGAL $\Delta PP/\Delta Z=0.085$ mm/m .....	59
TABLA 5.5: RELACIÓN Q SIMULADO VS PRECIPITACIÓN (m <sup>3</sup> /mes) .....	60
TABLA 5.6: SEGUNDA CALIBRACIÓN PANGAL $\Delta PP/\Delta Z=0.085$ mm/m .....	60
TABLA 5.7: SEGUNDA CALIBRACIÓN PANGAL $\Delta PP/\Delta Z=0.015$ mm/m .....	61
TABLA 5.8: SEGUNDA RELACIÓN Q SIMULADO VS PRECIPITACIÓN (m <sup>3</sup> /mes) .....	63
TABLA 5.9: PARÁMETROS FINALES CALIBRACIÓN (m <sup>3</sup> /mes).....	63
TABLA 5.10: RESULTADOS VALIDACIÓN (m <sup>3</sup> /mes) .....	64
TABLA 5.11: CALIBRACIÓN 1 BANDA $\Delta PP/\Delta Z=0.015$ mm/m .....	66
TABLA 5.12: SEGUNDA CALIBRACIÓN 1 BANDA $\Delta PP/\Delta Z=0.015$ mm/m .....	67
TABLA 5.13: CALIBRACIÓN CAUDALES 2 BANDAS .....	68
TABLA 5.14: SEGUNDA CALIBRACIÓN CAUDALES 2 BANDAS .....	69
TABLA 5.15: RESULTADOS VALIDACIÓN CAUDALES 2 BANDAS .....	70
TABLA 5.16: CAUDALES MÍNIMOS MENSUALES ESCENARIO A2.....	71
TABLA 5.17: CAUDALES MÍNIMOS MENSUALES ESCENARIO B2.....	72
TABLA 5.18: CAUDALES MAXIMOS MENSUALES ESCENARIO A2 .....	73
TABLA 5.19: CAUDALES MAXIMOS MENSUALES ESCENARIO B2 .....	74
TABLA 20: MODELACIÓN GRADIENTE ALEATORIO 1 .....	75
TABLA 5.21: MODELACIÓN GRADIENTE ALEATORIO 2.....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.1: VARIACIÓN DE COBERTURA GLACIAR BOULDER.....	2
FIGURA 1.2: TENDENCIA DE TEMPERATURA.....	2
FIGURA 2.1: AUMENTO TEMPERATURA ESCENARIOS FUTUROS .....	6
FIGURA 2.2: ESQUEMA ESCALAMIENTO .....	10
FIGURA 2.3: ESQUEMA MODELO HUMEDAD DEL SUELO .....	19
FIGURA 3.1: UBICACIÓN VI REGIÓN .....	21
FIGURA 3.2: DISTRIBUCIÓN DE CLIMAS EN LA VI REGIÓN .....	23
FIGURA 3.3: SENTIDO ACUÍFEROS Y RED HÍDRICA.....	25
FIGURA 3.4: USO DE SUELO.....	26
FIGURA 3.5: ACTIVIDADES ECONÓMICAS CUENCA PANGAL .....	26
FIGURA 3.6: ESTACIONES EXISTENTES VI REGIÓN AREA DE INTERÉS.....	29
FIGURA 3.7: CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL.....	30
FIGURA 3.8: CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL.....	31
FIGURA 3.9: CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL .....	32
FIGURA 3.10: CURVA HIPSOMÉTRICA.....	33
FIGURA 3.11: CUENCA 2 BANDAS.....	34
FIGURA 3.12: CUENCA 6 BANDAS.....	35
FIGURA 3.13: TENDENCIA TEMPERATURAS INVIERNO.....	36
FIGURA 3.14: TENDENCIA TEMPERATURAS VERANO.....	37
FIGURA 3.15: TENDENCIA DE LAS PRECIPITACIONES .....	39
FIGURA 4.1: GRILLA HADCM3.....	42
FIGURA 4.2 VALIDACIÓN TEMPERATURA RENGO (°C).....	46
FIGURA 4.3: VALIDACIÓN PRECIPITACIÓN RENGO (mm).....	48
FIGURA 4.4: COMPORTAMIENTO MENSUAL TEMPERATURA (°C) .....	50
FIGURA 4.5 COMPORTAMIENTO MENSUAL PRECIPITACIÓN (mm).....	50
FIGURA 4.6: TENDENCIA TEMPERATURA ANUAL (°C).....	51
FIGURA 4.7 TENDENCIA PRECIPITACIÓN ANUAL (mm) .....	51
FIGURA 4.8: RELACIÓN TEMPERATURA – PRECIPITACION A2 .....	52
FIGURA 4.9: RELACIÓN TEMPERATURA – PRECIPITACION B2 .....	52
FIGURA 5.1: MODELO 1 BANDA PANGAL EN PANGAL .....	56
FIGURA 5.2: MODELO 2 BANDAS PANGAL EN PANGAL.....	56
FIGURA 5.3: MODELO 6 BANDAS PANGAL EN PANGAL.....	57
FIGURA 5.4: CALIBRACIÓN PANGAL $\Delta PP/\Delta Z=0.015$ mm/m.....	58
FIGURA 5.5: CALIBRACIÓN PANGAL $\Delta PP/\Delta Z=0.085$ mm/m.....	59
FIGURA 5.6: SEGUNDA CALIBRACIÓN PANGAL $\Delta PP/\Delta Z=0.085$ mm/m .....	61
FIGURA 5.7: SEGUNDA CALIBRACIÓN PANGAL $\Delta PP/\Delta Z=0.015$ mm/m .....	62
FIGURA 5.8: CAUDALES MENSUALES CALIBRACIÓN 6 BANDAS.....	62
FIGURA 5.9: COMPORTAMIENTO VOLÚMENES DE AGUA A ESCALA MENSUAL.....	63
FIGURA 5.10: INTERFAZ WEAP.....	64
FIGURA 5.11: CORRELACIÓN CAUDALES OBSERVADOS Y GENERADOS.....	65
FIGURA 5.12: CAUDALES MENSUALES VALIDACIÓN .....	65
FIGURA 5.13: CAUDALES MENSUALES CALIBRACIÓN 1 BANDA .....	66
FIGURA 5.14: CAUDALES MENSUALES SEGUNDA CALIBRACIÓN, 1 BANDA .....	67
FIGURA 5.15: CAUDALES MENSUALES CALIBRACIÓN 2 BANDAS.....	68
FIGURA 5.16: CAUDALES MÍNIMOS MENSUALES ESCENARIO A2 .....	71
FIGURA 5.17: CAUDALES MÍNIMOS MENSUALES ESCENARIO B2 .....	72
FIGURA 5.18: CAUDALES MAXIMOS MENSUALES ESCENARIO A2 .....	73
FIGURA 5.19: CAUDALES MAXIMOS MENSUALES ESCENARIO B2 .....	74
FIGURA 5.20: CAUDALES MENSUALES ESCENARIO A2 ALEATORIO.....	76





# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1- MOTIVACIÓN

Existe en la comunidad científica internacional un amplio consenso que el cambio climático modificará el comportamiento de los distintos sistemas hídricos alrededor del planeta teniéndose, de acuerdo a los resultados del informe IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007), los siguientes antecedentes:

- *Once de los últimos doce años (1995-2006), se encuentran dentro de los 12 años más cálidos de los que se tiene registro de temperaturas superficiales globales (año 1850).*
- *Se tiene un aumento sostenido del nivel de los océanos, observándose una tasa de crecimiento de 1.8 mm anual desde el año 1961 al 2003, y una tasa de 3.1 mm anual desde el año 1993 al 2003.*
- *Disminución generalizada tanto de la cobertura de los glaciares como de la extensión de nieve en ambos hemisferios (ver Figura 1.1, donde se presenta retroceso que ha sufrido el glaciar Boulder entre los años 1932 y 1988, para más ejemplos de disminución de la extensión de los glaciares visitar <http://nrm-sc.usgs.gov/repeatphoto>).*
- *El fenómeno de El Niño se ha vuelto relativamente más frecuente, persistente, e intenso que el fenómeno de La Niña, incidiendo tanto en las precipitaciones como en las temperaturas de las zonas tropicales y subtropicales del planeta.*
- *Desde el año 1900 al 2005, la precipitación se ha incrementado significativamente en el este tanto de Norteamérica como de Sudamérica, Europa noreste, y los sectores norte y centro de Asia, pero declinado en el Sahara, el Mediterráneo, y en el sur tanto de África como de Asia, encontrándose de forma global que las zonas afectadas por sequía se han visto incrementadas desde la década de los setenta.*
- *La temperatura media global ha aumentado, especialmente en las últimas tres décadas. El aumento de las temperaturas en los últimos 100 años (1906-2005), es de  $0.74 \pm 0.18^\circ \text{C}$  realizando una relación lineal de las temperaturas medias anuales. La tasa de calentamiento en los últimos 50 años ( $0.13 \pm 0.03^\circ \text{C}$  por década), es casi el doble que la tasa de los últimos 100 años ( $0.07 \pm 0.02^\circ \text{C}$  por década). En cuanto a un comportamiento global, es muy probable que la temperatura media en el hemisferio norte durante la segunda mitad del siglo XX fuera la más alta que en cualquier otro intervalo de 50 años en los últimos 500 años, y es probable que este mismo intervalo de tiempo fuese el más caluroso en los últimos 1,300 años (ver Figura 1.2 para valores de tendencia de temperatura de los últimos 40 años, donde se observa que la tasa aumenta de forma sostenida en el transcurso del tiempo).*

Considerando los antecedentes anteriores, junto con la totalidad de los presentados en el informe del IPCC y en el Scientific Assessment of the Effects of Global Change on the US, se tiene que la frecuencia y la magnitud de eventos extremos, la disponibilidad del recurso hídrico, deshielos en zonas polares, cuantía de los caudales medios, todo ha sufrido en menor o mayor grado variaciones, por lo que es de sumo interés el estimar el cómo en un futuro próximo, generadas las series de variables meteorológicas, estos cambios sucederán,

y así tener la capacidad de definir políticas de acción para adoptar las medidas de adaptación y mitigación necesarias.

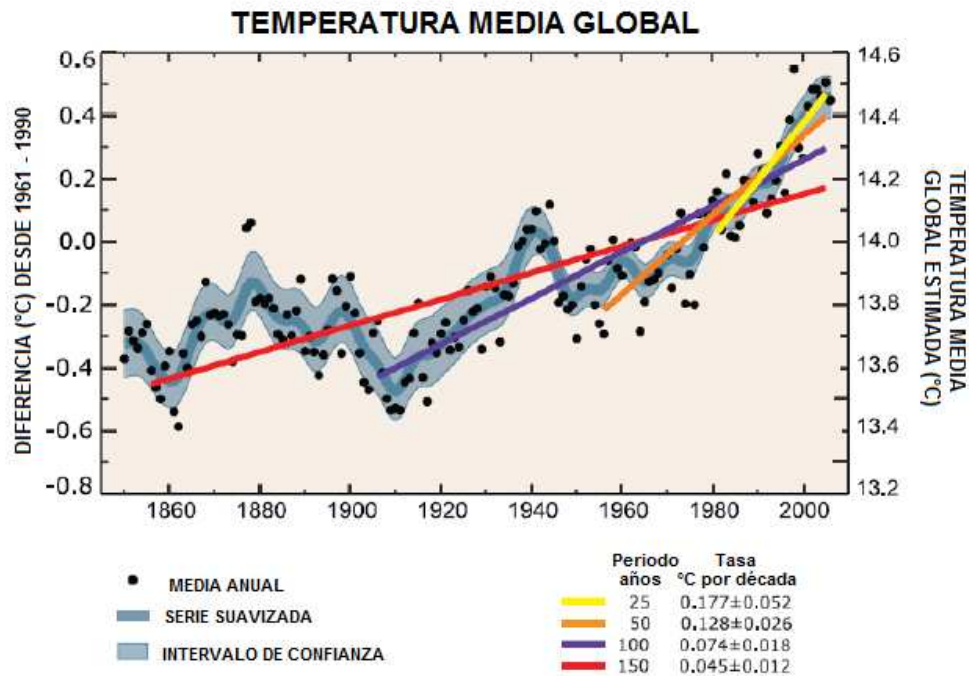
Dado que el análisis se realiza en un escenario futuro, es necesario generar diversas series temporales de las variables meteorológicas relevantes del problema, produciéndose diferencias en el resultado producto de la forma en que éstas son consideradas en el modelo, generándose una incertidumbre en el resultado, situación que será estudiada a fondo realizando una modelación de una cuenca ubicada en terreno nacional (Cuenca del Río Pangal, VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins).

**FIGURA 1.1: VARIACIÓN DE COBERTURA GLACIAR BOULDER**



Fuente: <<http://nrmsc.usgs.gov/repeatphoto/boulder-ic.htm>>.

**FIGURA 1.2: TENDENCIA DE TEMPERATURA**



Fuente: Scientific Assessment of the Effects of Global Change on the US (2008).

## **1.2- OBJETIVOS**

### **1.2.1- OBJETIVO GENERAL**

Cuantificar las variaciones de caudal que se generan producto de las distintas series de datos consideradas, en la modelación de una cuenca por medio de un modelo semi-distribuido bajo un escenario de cambio climático.

### **1.2.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Implementar el modelo WEAP (Calibración y Validación), en la cuenca del río Pangal.
- Generar escenarios futuros de cambio climático, para evaluar variaciones producto del calentamiento global en la disponibilidad de los recursos hídricos entre los años 2005 y 2035.
- Analizar la sensibilidad del modelo frente a variaciones de las series meteorológicas generadas, así como también de la forma en que éstas son consideradas en el modelo.
- Determinar intervalos de confianza en la generación de series de caudales, comparando con resultados de modelo agregado (Figuroa, 2008).

### **1.3- ORGANIZACIÓN DEL INFORME**

En el Capítulo 2 se entregan antecedentes recopilados en la literatura que tienen relación tanto con el modelo estudiado, como con el cambio climático y los distintos escenarios definidos a estudiar.

En el Capítulo 3 se describe la zona de estudio así como también las distintas variables de interés, realizando estudios previos como lo son la determinación del régimen de la cuenca, y la construcción de los gradientes de los datos meteorológicos de importancia.

En el Capítulo 4 se describen los procesos de generación de las series meteorológicas alternativas.

En el Capítulo 5 se muestran los procesos de implementación y validación de las series contempladas, así como también se entregan los resultados obtenidos para las modelaciones futuras, construyendo intervalos de confianza para los posibles escenarios, para luego realizar una comparación con resultados de modelo agregado.

Para finalizar, en el Capítulo 6 se presentan una serie de comentarios y conclusiones, así como también recomendaciones para la implementación correcta tanto del modelo semi-distribuido, generación de distintas series alternativas y configuraciones de entrada del modelo.

## **CAPÍTULO 2: DISCUSIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1- CAMBIO CLIMÁTICO Y GENERACIÓN DE ESCENARIOS**

#### **2.1.1- ESCENARIOS SRES**

El interés por el cambio climático tiene su origen previa conformación del IPCC, cuya creación data del año 1988 (el último informe se publicó el año 2007, proyectándose para el año 2014 una nueva edición), teniéndose en esos entonces en el ambiente científico un conjunto variado de escenarios futuros, cuya naturaleza en lo referente al espacio temporal, así como también la forma de generación del modelo y variables meteorológicas consideradas, era diversa, no permitiendo una comparación directa entre estudios para determinar un comportamiento y/o tendencia general.

La importancia del IPCC radica en homogeneizar el panorama a la fecha de su creación, ya que se definieron escenarios únicos de cambio climático, respondiendo cada uno de ellos a distintos crecimientos posibles de la humanidad, como lo son crecimiento poblacional, económico y tecnológico.

Los escenarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios), fueron construidos para explorar los futuros desarrollos en el medioambiente global, con especial énfasis en la producción de gases de efecto invernadero y emisiones de aerosoles precursores (Carter et al, 1999), agrupándose en 4 familias, siendo éstos los escenarios A1, A2, B1 y B2.

El escenario A1 considera un mundo de rápido crecimiento económico, cuyo peak de población se alcanza a mediados de siglo encontrándose una rápida introducción de nueva y más eficiente tecnología. El escenario B1 describe un mundo convergente, con la misma población que el escenario A1, pero con un cambio aún mayor en lo referente a las estructuras económicas y a la introducción de las economías limpias. El escenario A2 da cuenta de un mundo altamente heterogéneo, en donde se tiene un fuerte crecimiento demográfico, y un lento crecimiento económico asociado a pequeños cambios tecnológicos. Finalmente, el escenario B2 da cuenta de un mundo de población y crecimiento económico intermedio, enfatizando las soluciones locales a soluciones de ámbito sustentable.

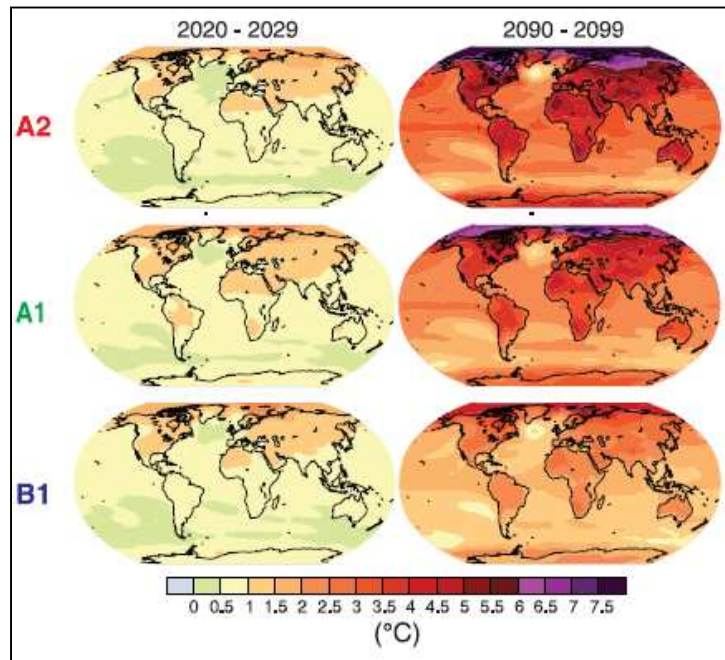
A continuación se presentan una serie de antecedentes que permiten comprender de mejor manera los distintos escenarios, observándose que el escenario A2 es el más severo, pronosticándose aumentos de hasta 7°C en el Ártico (ver Tabla 2.1 para comparación de los distintos escenarios, y Figura 2.1 donde se muestra la realidad dispar de los escenarios planteados).

**TABLA 2.1: COMPARACIÓN DISTINTOS ESCENARIOS**

Tema	1990	SRES Escenarios para 2100			
		A1	A2	B1	B2
Población ( $10^{12}$ habitantes)	5.2	7.1	15.1	7.2	10.4
Concentración de CO <sub>2</sub> (ppmv)	354	680	834	547	601
Cambio de temperatura media anual global (°C)	---	2.52	3.09	2.04	2.16
Rango (°C)	---	1.70 – 3.66	2.12 – 4.41	1.37 – 2.99	1.45 – 3.14
Elevación del nivel del mar promedio global (cm)	---	58	62	50	52
Rango (cm)	---	23 – 101	27 – 107	19 – 90	20 – 93

Fuente: Carter et al (1999).

**FIGURA 2.1: AUMENTO TEMPERATURA ESCENARIOS FUTUROS**



Fuente: IPCC Report (2007).

## 2.2- HIDROLOGÍA Y MODELOS

Se denomina Hidrología a la ciencia geográfica que se dedica al estudio de la distribución, espacio y temporal, y las propiedades del agua presente en la atmósfera y en la corteza terrestre incluyéndose dentro de sus componentes: las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y el equilibrio de las masas globales.

Para determinar el comportamiento de los recursos hídricos, se hace necesaria la implementación de modelos, los que no son más que simplificaciones de la realidad. Desde un punto de vista de su naturaleza, los modelos hidrológicos pueden ser Físicos o Abstractos, siendo los primeros idealizaciones de la situación real, por ejemplo por medio de maquetas, y los segundos se basan en fórmulas matemáticas que relacionan variables de entrada y salida.

Desde un punto de vista del desarrollo del presente estudio, los modelos que se utilizaron son abstractos, ya que permiten de forma directa y sencilla analizar los efectos que puede tener el cambio climático sobre los recursos hídricos futuros, siendo éstos: i) el modelo HadCM3, que entrega resultados de Modelos Generales de Circulación; ii) el programa SDSM, que mediante técnicas de escalamiento, permite generar series de tiempo de las variables meteorológicas de interés; iii) y el modelo WEAP, que permite realizar las posteriores simulaciones hidrológicas recibiendo como entrada datos suministrados por el programa WMS (estudio de la cuenca, donde se define área y elevaciones medias).

A continuación se presenta una breve descripción de los modelos involucrados en el desarrollo del presente trabajo:

### **2.2.1- MODELO HADCM3**

HadCM3 es un modelo atmósfera-océano desarrollado en el Hadley Center de Inglaterra, y descrito por Gordon et al. (2000), pudiendo utilizarse para los escenarios A2 y B2, no necesitando ningún tipo de ajuste de flujo para la realización de las simulaciones.

La utilidad del modelo HadCM3 es que para cada celda definida entrega predictores del tipo meteorológico, los que luego de un tratamiento de escalamiento mediante un software determinado, permite establecer una relación entre la serie de predictores y los datos reales de una estación en superficie (predictandos).

Para efectuar el escalamiento existe un conjunto de herramientas, eligiéndose como se presenta de forma posterior el programa SDSM, el cual constituye un producto de fácil uso para lograr el objetivo propuesto.

Dentro de las características más importantes del modelo HadCM3 se tiene:

- El modelo dispone de 19 niveles con una resolución de  $2.5^{\circ} \times 3.5^{\circ}$  que corresponden a un total de  $96 \times 73$  celdas de la malla, equivalentes a unos  $417 \times 278$  km en el Ecuador y a unos  $295 \times 278$  km a  $45^{\circ}$  de latitud aproximadamente.
- Dispone de 6 bandas espectrales para longitudes de ondas cortas y de 8 para longitudes de onda larga. Los efectos de los gases como el  $\text{CO}_2$ , el vapor de agua y el ozono están representados explícitamente y también se incluye una parametrización para los aerosoles.
- Dentro del esquema de la superficie terrestre, se incluye la representación de las aguas que se congelan y se funden. En cuanto a la evaporación, se incluye una dependencia de la resistencia estomatal con la temperatura, la presión y la concentración de  $\text{CO}_2$ .
- El modelo también incluye explícitamente las corrientes bajas y el impacto de la convección sobre el momento. El esquema de larga escala para la precipitación y las nubes está formulado en términos explícitos de algunas variables de agua de la nube. El radio efectivo de las gotas de agua es función de la cantidad de agua que contiene la nube y de la concentración del número de gotas.
- La componente atmosférica permite la emisión, el transporte, la oxidación y el vertido de las componentes sulfúricas de manera opcional, lo que permite simular escenarios con aerosoles sulfúricos.

- La componente oceánica del HadCM3 dispone de 20 niveles con una resolución de  $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ , lo que hace posible la representación de importantes detalles de corrientes oceánicas y sus estructuras. También muestra un esquema de difusión adiabática y no aparecen direcciones de difusiones explícitas.

### 2.2.2- SDSM

Los Modelos Generales de Circulación (GCMs), indican que las concentraciones de los gases asociados al efecto invernadero tendrán un gran impacto en el clima tanto en una perspectiva global como en escalas regionales.

Sin embargo, los GCMs se encuentran restringidos en su utilidad para el estudio de impactos locales a causa de la resolución espacial de éstos (típicamente del orden de  $50,000 \text{ km}^2$ ), y su incapacidad de resolver importantes características como lo son las nubes y la topografía local.

Como consecuencia de lo expuesto, dos tipos de técnicas han emergido para llevar datos globales a locales, siendo éstos los métodos de escalamiento dinámico, y los métodos de escalamiento estático, teniendo éstos últimos una serie de ventajas con respecto a su contraparte (los datos globales son suministrados en este caso por el modelo antes descrito, HadCM3).

En cuanto a la teoría subyacente usada por los escalamientos, así como también sus limitaciones y sus usos, se tiene una extensa discusión realizada por diversos autores, sin embargo existe un consenso que las técnicas pueden ser agrupadas en 4 clases principales, siendo éstas:

- Escalamiento dinámico

El escalamiento dinámico hace referencia al ajuste que se hace de un modelo regional climático (RCM), dentro de uno de menor resolución como lo es un modelo general de circulación (GCM). El RCM usa el GCM para definir condiciones de borde atmosféricas que varían en el tiempo sobre un dominio finito, dentro del cual la dinámica física de la atmósfera es modelada usando un espaciado de grilla horizontal de 20 a 50 km. La principal limitación de los RCM es que estos son computacionalmente igual de exigentes que los GCM, así como también los escenarios generados son sensibles según la elección de las condiciones de borde escogidas, como por ejemplo, la humedad del suelo.

Sin embargo, así como tiene desventajas en cuanto a la demanda de recursos computacionales, tienen ventajas, ya que puede resolver de mejor forma problemas de una menor escala como lo es la precipitación del tipo orográfica, además de poder ser usado en explorar la importancia relativa de forzamientos externos como son el ecosistema terrestre y cambios en la química de la atmósfera.

- Generación en base a datos en terreno.

Este tipo de escalamiento obedece al agrupamiento local de datos meteorológicos con relación a patrones prevalecientes en la circulación atmosférica. En cuanto a los escenarios climáticos, éstos son construidos o bien mediante un re-muestreo de las distribuciones de los datos observados, o bien generando series sintéticas de los patrones climáticos para



luego re-muestrear con datos observados. El escalamiento en base a los patrones de clima está sustentado en una íntima relación entre el clima existente a grandes escalas con el clima existente a una escala local (la técnica es válida también para una extensa variedad de variables ambientales). De todas formas, esta metodología puede ser en ocasiones deficiente, como lo es en la descripción de eventos extraordinarios, así como también sufre de una dependencia en la circulación estacionaria y el clima en superficie, sin embargo, su más seria limitante es que los cambios de precipitación producidos por variaciones en la frecuencia de patrones de clima son rara vez consistentes con los cambios producidos por el GCM asociado, a menos que se consideren predictores adicionales, como por ejemplo, la humedad atmosférica.

- Generación mediante procesos estocásticos

El escalamiento estocástico típicamente involucra el modificar parámetros convencionales de generadores climáticos como es el Weather Generator (WGEN).

Los escenarios de cambio climático son generados estocásticamente usando parámetros escalados en línea con las salidas del GCM correspondiente. La principal ventaja de esta técnica es que puede reproducir de forma exacta una cantidad importante de estadísticos climáticos, así como también ha sido usada de forma extensa para el estudio de los impactos climáticos en la agricultura, además de tener la capacidad de permitir el análisis de riesgo.

En lo referente a las desventajas, esta técnica tiene una pobre capacidad para reproducir la variabilidad climática a nivel inter-anual, así como también los efectos que puede tener la precipitación en otras variables, como por ejemplo la temperatura existente.

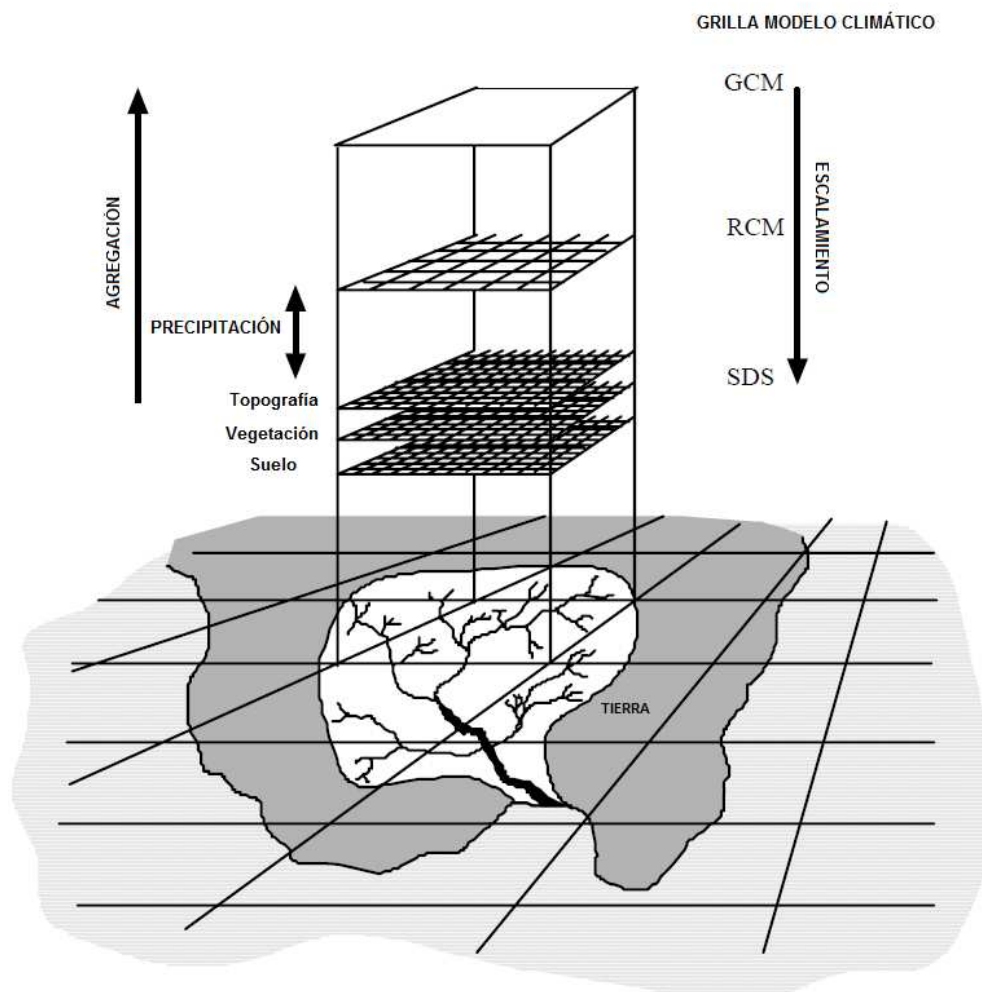
- Funciones de Transferencia

El escalamiento por medio de funciones de transferencia se basa en relaciones empíricas entre predictandos locales y predictores a escalas regionales.

La principal fortaleza con la cual cuenta esta forma de escalamiento es la relativa facilidad de su aplicación, mientras que la principal debilidad es que solamente es capaz de explicar una parte de la variabilidad climática observada (especialmente en las series de precipitación). Al igual que la generación en base a datos observados, los métodos de transferencia también asumen la validez de los parámetros del modelo bajo condiciones futuras de cambio climático, así como también el escalamiento es altamente sensible a la elección de los predictores escogidos.

A continuación, en la Figura 2.2 se presenta esquema del escalamiento como tal, y en la Tabla 2.2 se realiza una comparación entre el escalamiento dinámico y el escalamiento dinámico:

**FIGURA 2.2: ESQUEMA ESCALAMIENTO**



Fuente: SDSM User Manual, Wilby & Dawson (2007).

**TABLA 2.2: TABLA COMPARATIVA ESCALAMIENTO DINÁMICO-ESTÁTICO**

	<b>Escalamiento Estático</b>	<b>Escalamiento Dinámico</b>
<b>Ventajas</b>	Entrega información meteorológica a la escala de una estación desde datos de GCM.	Información con una resolución de 10 a 50km proveniente de datos de GCM.
	Bajo costo y computacionalmente poco demandante.	Responde consistentemente a diferentes solicitaciones externas.
<b>Desventajas</b>	Depende del realismo de las condiciones de borde del GCM	Depende del realismo de las condiciones de borde del GCM
	Elección de la localización y dominio afectan resultados.	Elección de la localización y dominio afectan resultados.
	Requiere datos de alta calidad para la calibración	Requiere significativos recursos computacionales.
	Relación entre predictor y predictando son frecuentemente no estacionales.	Condiciones iniciales afectan el resultado.
	Elección de esquema de transferencia empírico afecta resultados.	Elección de nubes/esquemas convectivos afectan resultados.

Fuente: SDSM User Manual, Wilby & Dawson (2007).

Considerando las ventajas y desventajas de los modelos existentes para llevar datos meteorológicos globales a locales se elige, tanto por la facilidad de uso como por la calidad de los datos entregados, el modelo SDSM (Statistical Downscaling Model, desarrollado por Rob Wilby y Christian Dawson en el Reino Unido, siendo la última versión disponible la 4.2.2), el que dentro de la taxonomía de los tipos de escalamientos se describe como un híbrido entre generación estocástica climática y métodos de funciones de transferencia, lo que se debe a que los patrones de circulación de grandes escalas y las variables atmosféricas son usadas para la generación de parámetros climáticos de escalas locales. Adicionalmente, técnicas estocásticas son usadas artificialmente para aumentar la varianza del escalamiento diario de las series de tiempo para tener una mayor relación con las observaciones.

SDSM ha sido aplicado para el estudio de los impactos hídricos, meteorológicos y ambientales en diversas partes del planeta, como en Etiopía (Abraham, 2006), y en Noruega (Fealy, 2006). A continuación se presenta una breve descripción del programa, junto a sus principales opciones de configuración:

#### Metodología SDSM

Para la generación de las series se establece un conjunto de pasos previos, siendo éstos:

- Control de calidad y transformación de los datos

SDSM, como todo programa, requiere un conjunto de datos de entradas para su funcionamiento, los que son:

- a. Datos a escala diaria de las variables meteorológicas en la zona de interés.
- b. Datos del GCM para la grilla que incluye al sector en donde se encuentra la estación que provee los datos observados.
- c. Datos del re-análisis del National Center for Environmental Prediction asociados a la grilla definida en el GCM.

La experiencia indica que pocas estaciones meteorológicas tienen un 100% de la información completa en el periodo de análisis, o bien existen datos dudosos, por lo que SDSM permite identificar datos faltantes y datos dudosos.

En lo que respecta a la transformación de datos, en muchas instancias puede resultar apropiado el transformar tanto los predictores como los predictandos antes de la calibración del modelo, encontrándose dentro del conjunto de posibles transformaciones las logarítmicas, las potenciales, las inversas, binomiales, etc.

- Determinación de las variables predictoras del escalamiento

Identificar las relaciones empíricas existentes entre los predictores (conjunto de variables asociadas al HadCM3, como lo es la presión atmosférica), y los predictandos (variables observadas en la estación de interés, como lo es la precipitación), es fundamental para todos los métodos de escalamiento estático.

El propósito principal de la presente etapa es establecer el conjunto de predictores que definen de mejor forma a la variable en cuestión, para lo que se determinan las correlaciones entre todos los predictores existentes en el modelo y el predictando.

Los predictores utilizados en el SDSM (ver Tabla 2.3), son:

**TABLA 2.3: PREDICTORES SDSM**

<b>Predictor</b>	<b>Descripción</b>
mssl	Presión media al nivel del mar
p_f	Fuerza del flujo de aire superficial
p_u	Velocidad zonal superficial
p_v	Velocidad meridional superficial
p_z	Vorticidad superficial
p_th	Dirección del viento superficial
p_zh	Divergencia superficial
p5_f	Fuerza del flujo de aire a 500hPa
p5_u	Velocidad zonal a 500hPa
p5_v	Velocidad meridional a 500hPa
p5_z	Vorticidad a 500hPa
p500	Altura neopotencial a 500hPa
p5th	Dirección del viento a 500hPa
p5zh	Divergencia a 500hPa
p8_f	Fuerza del flujo de aire a 850hPa
p8_u	Velocidad zonal a 850hPa
p8_v	Velocidad meridional a 850hPa
p8_z	Vorticidad a 850 hPa
p850	Altura neopotencial a 850hPa
p8th	Dirección del viento a 850hPa
p8zh	Divergencia a 850hPa
r500	Humedad relativa a 500hPa
r850	Humedad relativa a 850hPa
rhum	Humedad relativa cercana a la superficie
shum	Humedad específica superficial
temp	Temperatura media a 2m

Fuente: SDSM User Manual, Wilby & Dawson (2007).

- Calibración del modelo

Determinados los predictores asociados al predictando en estudio, mediante un algoritmo de optimización se calibra una relación matemática que defina al proceso (ecuación de regresión lineal múltiple).

Cabe mencionar que la calibración se puede realizar a nivel mensual, estacional o anual, siendo necesario establecer si el proceso es de carácter condicional o incondicional. Un modelo incondicional asume una relación directa entre el predictor y el predictando, en cambio un comportamiento condicional indica que existe un proceso intermedio entre el forzamiento regional y el clima local.

- Generación de Clima

La opción de generador de escenarios climáticos deriva un conjunto de series climáticas sintéticas a nivel diario, dados predictores de variables atmosféricas observadas. El

procedimiento permite la verificación de modelos calibrados (usando datos independientes), y la síntesis de series artificiales de condiciones climáticas presentes.

- Análisis de Datos

SDSM provee la opción de realizar análisis de carácter estadístico de los escenarios escalados y los datos observados, realizando análisis de frecuencia para las series de datos.

- Análisis Gráfico

Como su nombre lo indica, existe la opción de realizar análisis del tipo gráfico, encontrándose tres opciones, las cuales son análisis de frecuencia, comparar resultados, o analizar series de tiempo.

- Generación de Escenarios

Finalmente, el generador de escenarios construye conjuntos de series climáticas sintéticas a nivel diario, recibiendo como entrada variables predictoras de modelos climáticos (ya sea para escenarios presentes o futuros).

### Configuración SDSM

Previa determinación de la relación entre predictores y predictandos, es necesario el establecer de forma previa en el software los siguientes parámetros.

- Largo del año

Se define un largo por defecto de 366 días, permitiendo 29 días en Febrero cada cuatro años. En cuanto a la longitud en los modelos climáticos, no existe un consenso, ya que por ejemplo en el CGCM2 y CSIRO se define un largo de 365 días sin año bisiesto, y en HadCM3 los años consisten en 360 días (en casos que no se tomen las precauciones del caso, se puede llegar a serios problemas de modelación, ya que se genera un desfase entre el modelo y los predictandos).

- Fecha de comienzo y de fin

Se ingresa el intervalo de tiempo a considerar para la operación correspondiente.

- Datos negativos

La presente opción permite establecer si se permite o no existencia de valores negativos, por ejemplo, en el caso de la temperatura, donde se pueden tener valores bajo los 0°C, esta opción se encuentra seleccionada, sin embargo en la precipitación, ésta no se encuentra seleccionada.

- Valores límites

Para algunas variables meteorológicas es necesario especificar límite inferior. Por ejemplo, cuando se calibran modelos de precipitación diaria, el parámetro debe estar ajustado en 0.3 mm/día, para discernir entre días lluviosos o días húmedos. Similarmente, el umbral para días soleados versus días nublados debe ser ajustado a 1 hora/día, para discriminar entre condiciones de sol o cubierto.

- Identificador de datos faltantes

Este es el código asignado para datos faltantes en todas las series de entrada, ya que si SDSM encuentra este código el valor será saltado (por ejemplo en la calibración del modelo o bien en la determinación de estadísticos). El valor por defecto que establece el programa es -999.

- Generador de Números Aleatorios

Esta opción permite asegurarse que las secuencias aleatorias definidas tanto para la generación del clima como de las series futuras sean diferentes cada vez que el modelo se corre.

- Transformación del modelo

Especifica la transformación aplicada al predictando en modelos condicionales. La opción por default, es decir, sin aplicar transformación a los datos, es usada cuando el predictando se encuentra normalmente distribuido. Las alternativas (raíz cuarta, logaritmo natural o normal inversa), son usadas cuando los datos no siguen una distribución normal, como es el caso de las precipitaciones diarias.

- Inflación de la varianza

Este parámetro controla la magnitud de la inflación de la varianza en el proceso del escalamiento de las variables meteorológicas diarias, cambiando la varianza añadiendo o reduciendo la cantidad de "ruido blanco" aplicado para modelar procesos locales. El valor por defecto produce de forma aproximada inflación de la varianza del tipo normal.

- Corrección BIA

Esta opción compensa cualquier tendencia para sobre o sub estimar la media de los procesos condicionales por el uso de un modelo de escalamiento (por ejemplo los valores diarios de precipitación). El valor por defecto es 1, indicando la no existencia de corrección.

### **2.2.3- MODELO WEAP**

WEAP es una herramienta computacional para la planificación integrada de recursos hídricos, proporcionando un marco comprensivo, flexible y de fácil uso para la planificación y análisis de políticas.

En lo que respecta a su funcionamiento, WEAP usa el principio básico de balance de masa, pudiendo ser utilizado tanto en sistemas de una sola cuenca, como también complejos esquemas en donde se definen un conjunto de sub-cuencas.

WEAP fue desarrollado por el Stockholm Environment Institute, recibiendo apoyo financiero del US Army Corps of Engineers, además de aportes de un sinnúmero de instituciones como la EPA, el Water Research Foundation y el Global Infrastructure Fund Of Japan. WEAP se ha aplicado en cuencas en distintos países, incluyendo los Estados Unidos, México, Brasil, Alemania, Israel, China y Chile (Mardones, 2009).

El modelo WEAP puede simular una amplia gama de componentes naturales e intervenidos de los sistemas a estudiar, incluyendo:

- Escorrentía por Precipitación.
- Flujos Base.
- Recargas Subterráneas por Precipitación.
- Análisis de demandas sectoriales.
- Derechos de agua y prioridades de asignación.
- Operaciones de Embalses.
- Generación de Hidroelectricidad.

Las principales características de WEAP son:

- Enfoque Integrado: Enfoque único para realizar evaluaciones de planificación integrada de recursos hídricos.
- Procesos de Participación: Una estructura transparente que facilita la participación de los actores involucrados en un proceso abierto.
- Balance de Agua: Base de datos que mantiene la información de demanda y oferta de agua para realizar balances de masa en arquitectura del tipo conexión-nodo.
- Basado en Simulación: Calcula la demanda, oferta, escorrentía, infiltración, requisitos para las cosechas, flujos y almacenamiento del agua, y generación, tratamiento y descarga de contaminantes y de calidad de agua en ríos, para variados escenarios hidrológicos y de políticas operacionales.
- Escenarios de políticas de uso de agua: Evalúa una amplia gama de opciones de desarrollo y manejo de agua, y toma en cuenta múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos.
- Interfaz amigable: Interfaz gráfica basada en mapas SIG con conceptos de agarrar-arrastrar.

### Marco Teórico WEAP

WEAP efectúa un balance tanto de agua como de polución en cada nodo del sistema modelado uniéndolo al sistema por medio de un paso de tiempo. El agua es entregada al nodo para computar el tramo del canal y los requerimientos consuntivos, sujetos a prioridades de demanda, preferencias de entrega, balances de masas y otras restricciones. Polución de cuerpos de agua receptores, y calidad de agua del tramo en estudio son también calculados.

WEAP opera, como se mencionó previamente, con un paso de tiempo, definiéndose para efectos del presente estudio ser de carácter mensual, siendo cada mes independiente del anterior, exceptuando los embalses y el almacenamiento en acuíferos. Así, toda el agua que entra al sistema en un mes (por ejemplo, caudales de cabecera, recarga del acuífero o escorrentía), es almacenada en un acuífero o en un embalse, o simplemente deja el sistema al fin de cada periodo mensual (por ejemplo el caudal de salida de un río, demandas consuntivas, evaporación de embalses o ríos). Dado que la escala de tiempo es

relativamente extensa (mensual), se asume que todos los flujos ocurren de manera instantánea.

Para cada mes, los cálculos se realizan en el siguiente orden:

- 1- Demanda anual y requerimientos de suministros mensuales para cada punto de demanda y requerimientos de caudal.
- 2- Escorrentía e infiltración desde cuencas.
- 3- Entradas y Salidas de agua para cada uno de los nodos y conexiones en el sistema. Esto incluye el cálculo de salidas desde la fuente para resolver la demanda, y eventualmente enviar a los almacenamientos. Este paso es resuelto utilizando programación lineal, la cual permite optimizar la cobertura de demandas y los requerimientos de flujos del tramo del río, sujeto a prioridades de demandas, suministros de preferencia, balance de masa y otras restricciones.
- 4- Generación de contaminantes por focos de demanda, flujos y tratamiento de contaminante, carga de cuerpos receptores y concentración en ríos.
- 5- Generación Hidráulica.
- 6- Capital, Gastos y Ganancias.

A continuación se presenta, de forma breve, la manera en el que modelo WEAP considera sus principales componentes:

- Escorrentía, Infiltración y Riego

WEAP posee un conjunto de cuatro métodos para simular procesos en una cuenca aportante como lo son la evapotranspiración, la infiltración y las demandas de riego (la versión a utilizar corresponde a la 2.1334, con fecha del 13 de Abril del año 2010). Estos métodos se refieren a i) la escorrentía generada producto de la precipitación, ii) demandas de riego como una versión del método FAO de requerimientos de cultivos, iii) el método de la humedad del suelo, iv) y el método MABIA. La elección del método a utilizar depende del nivel de complejidad deseada para representar los procesos asociados a las cuencas, considerando los datos disponibles.

De los cuatro métodos, el de demandas de riego es el más simple, usando coeficientes de cultivo para calcular la evapotranspiración potencial en la cuenca en estudio, para luego determinar las demandas de riego. El método en cuestión no es capaz de modelar procesos de escorrentía ni tampoco procesos de infiltración.

El método de Precipitación-Escorrentía, determina la evapotranspiración por riego de cultivos o vegetación usando coeficientes de cultivo. El remanente de la lluvia no consumida por la evapotranspiración es simulada como escorrentía al río, o puede ser proporcionada como flujo a ríos y a sistemas de aguas subterráneas.

El método de la humedad del suelo representa el almacenamiento por medio de dos capas de suelo, así como también el potencial de acumulamiento de nieve. En la capa superior de tierra, se simula la evapotranspiración considerando precipitación y riego, y tierra no agrícola, con escorrentía y cambios en la humedad del suelo. Flujo base al río y cambios de humedad del suelo son generados en la capa inferior de suelo.

Finalmente, el método MABIA realiza una simulación a escala diaria de la transpiración, evaporación, requerimientos de riego, crecimientos de cosecha y rendimientos asociados, junto con incluir módulos para estimar la evapotranspiración y la capacidad de retención del



suelo. El modelo fue desarrollado por el Instituto Nacional de Agronomía de Túnez por el Dr. Ali Sahli y Mohamed Jabloun.

MABIA utiliza el método del “doble”  $K_c$  (FAO, 2000), donde el coeficiente  $K_c$  se encuentra dividido en un coeficiente de cultivo basal  $K_b$ , y un coeficiente  $K_e$  que representa la evaporación que ocurre desde la superficie del suelo. El coeficiente de cultivo basal representa las condiciones actuales de evapotranspiración donde la superficie del suelo se encuentra seca, sin embargo, existe humedad en la zona de raíces que aporta de manera íntegra a la transpiración (considerando lo anterior, MABIA ofrece mayor detalle que lo presentado por el modelo CROPWAT, ya que este último considera de forma exclusiva un solo coeficiente  $K_c$ , no existiendo separación entre el proceso de evaporación y transpiración). En cuanto a los escenarios de implementación, este modelo puede ser aplicado tanto a suelos agrícolas como no agrícolas, como son bosques y tundras.

Aún cuando la escala temporal en MABIA es diaria, para el análisis en WEAP no es requisito que se trabaje en esta nivel, por ejemplo, en caso de definirse un paso de tiempo mensual, MABIA se ejecutará de forma diaria agregando los resultados (evaporación, transpiración, requerimientos de riego, escorrentía e infiltración), a ese intervalo definido.

Finalmente, los pasos para el cálculo en el modelo MABIA son:

- Evapotranspiración Referencial.
- Capacidad de Retención del Suelo.
- Coeficiente de Cultivo Basal.
- Coeficiente de Evaporación.
- Evapotranspiración Actual y Potencial del cultivo.
- Riego.
- Rendimiento.

De los cuatro métodos antes mencionados, gracias a su flexibilidad y capacidad de ajustar de mejor forma los resultados, se propone el uso del método de la humedad del suelo (ver Figura 2.3), presentándose a continuación en detalle.

El método de la humedad del suelo es unidimensional, definiéndose 2 estanques de suelo, cuyo esquema se encuentra basado en funciones empíricas que describen la evapotranspiración, escorrentía superficial, escorrentía sub-superficial, y percolación profunda hacia la napa ubicada en la zona basal. Cabe mencionar que esta aproximación permite caracterizar tanto el uso del suelo como el impacto de éstos en las posteriores modelaciones hídricas.

Desde un punto de vista de modelación hidrológica, una cuenca puede ser dividida en N fracciones de área, cada una de las cuales puede representar diferentes tipos de suelo o bien tener diversos usos, realizándose un balance hídrico para cada una de las fracciones j de N. Con respecto al clima, cabe mencionar que se considera uniforme sobre cada una de las sub-cuencas, donde el balance de aguas está dado por la ecuación 2.1:

$$Rd_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left( \frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t)z_{1,j}^{RRF_j} - f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \quad (2.1)$$

Donde  $z_{1,j} = [1,0]$  es el almacenamiento relativo dado como una fracción del almacenamiento total efectivo de la zona reticular;  $Rd_j$  es la fracción de suelo cubierto j (mm), y  $P_e$  es la

precipitación efectiva, la que incluye derretimiento del manto nival en las subcuencas, para lo cual se define un coeficiente de derretimiento  $m_c$  dado por:

- $m_c = 0$  si  $T_i < T_s$
- $m_c = 1$  si  $T_i > T_l$
- $m_c = (T_i - T_s) / (T_l - T_s)$  si  $T_s < T_i < T_l$

Donde  $T_i$  es la temperatura observada para el mes  $i$ , y  $T_l$  y  $T_s$  son las temperaturas de derretimiento y congelamiento respectivamente.

En lo referente a la acumulación de nieve  $Ac_i$ , esta es función de  $m_c$  y de la precipitación mensual observada  $P_i$ , como se presenta en la relación 2.2:

$$Ac_i = Ac_{i-1} + (1-m_c) P_i \quad (2.2)$$

Donde se define la tasa de derretimiento  $m_r$  por la ecuación 2.3:

$$m_r = Ac_i m_c \quad (2.3)$$

Así como también la precipitación efectiva  $P_e$ , que es calculada usando la expresión 2.4:

$$P_e = P_i m_c + m_r \quad (2.4)$$

Con respecto a las demás variables de la ecuación de balance antes presentada se tiene: *PET* hace referencia a la evapotranspiración potencial para un cultivo de referencia, donde  $k_{c,j}$  es un coeficiente de cultivo para cada una de las fracciones de tierra contempladas. En cuanto al tercer término de la expresión, éste representa la escorrentía superficial, donde  $RRF_j$  es el coeficiente de resistencia de la escorrentía (altos valores de  $RRF_j$  conducen a una menor escorrentía en la superficie). El cuarto y quinto término hacen referencia a los términos de flujo sub-superficial y percolación profunda respectivamente, donde el parámetro  $k_{s,j}$  es una estimación de la conductividad saturada de la zona radicular (mm/tiempo), y  $f_j$  es un coeficiente de partición relacionado al suelo, tipo de cubierta de este mismo, y la topografía, la que divide las particiones de agua tanto en componentes verticales como horizontales, definiéndose de esta forma la escorrentía total (RT), para cada sub-cuenca en el tiempo  $t$ , como muestra la ecuación 2.5:

$$RT(t) = \sum_{j=1}^N A_j \left( P_e(t) z_{1,j}^{RRF_j} + f_j k_{s,j} z_{1,j}^2 \right) \quad (2.5)$$

Donde  $A_j$  corresponde al área de la cuenca aportante considerada.

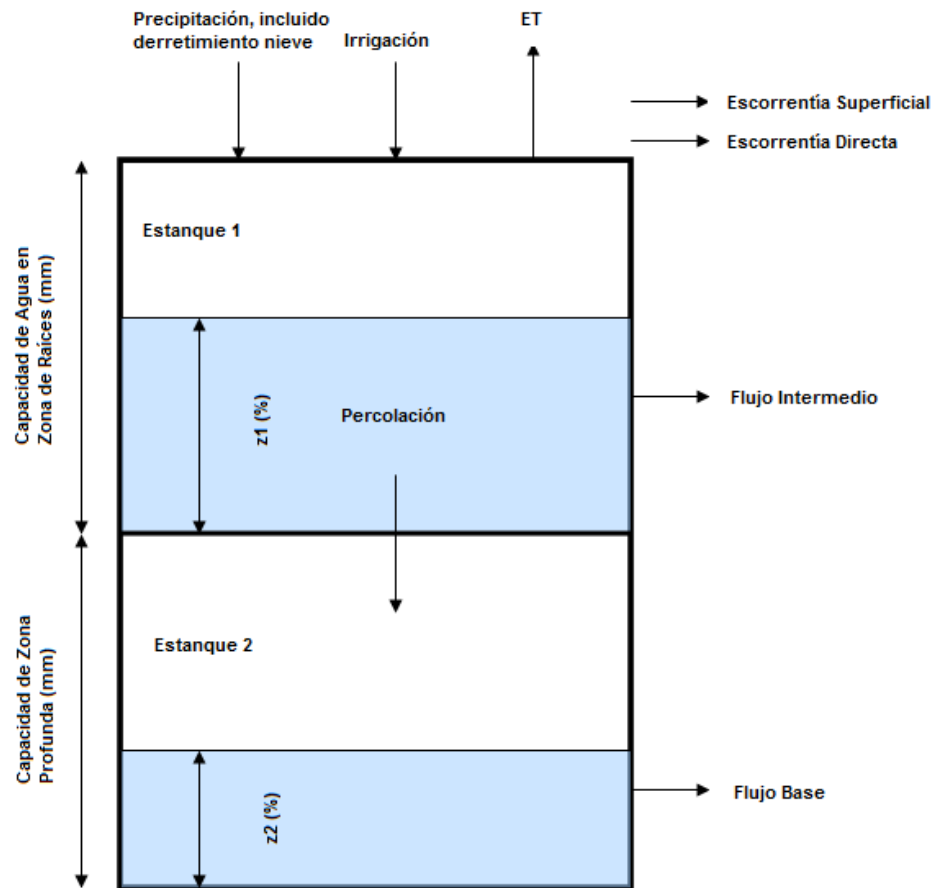
En el caso que no existan flujos de retorno desde la cuenca hacia un acuífero, se tiene un flujo base que emerge del segundo estanque (ver ecuación 2.6).

$$S_{\max} \frac{dz_2}{dt} = \left( \sum_{j=1}^N (1-f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \right) - k_{s2} z_2^2 \quad (2.6)$$

Donde el flujo de entrada al almacenamiento  $S_{\max}$ , es la percolación profunda desde la ecuación de balance, y  $k_{s2}$  es la conductividad saturada del almacenamiento inferior, el que se define para un único valor para toda la cuenca, no existiendo una diferenciación en sectores aledaños (desde un punto de vista de resolución, las expresiones para el balance

como para el almacenamiento de entrada son resueltas por un algoritmo del tipo predictor-corrector).

**FIGURA 2.3: ESQUEMA MODELO HUMEDAD DEL SUELO**



Fuente: WEAP Tutorial (2008).

Cuando se introduce en el modelo un acuífero del tipo aluvial y la unión escorrentía/infiltración se establece entre el sistema superficial y el subterráneo, el término del segundo almacenamiento es ignorado, y la recarga  $R$  (volumen/tiempo), al acuífero queda expresado como indica la ecuación 2.7.

$$R = \sum_{j=1}^N A_i (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2 \quad (2.7)$$

Explicado el modelo de humedad de suelo, a continuación se presentan los distintos parámetros que permiten calibrar el modelo, ya que las series meteorológicas son datos fijos que solo pueden ser modificadas antes del ingreso, generando series alternativas mediante la aplicación de gradientes construidos procesando datos observados (ver Tabla 2.4)

**TABLA 2.4: PARÁMETROS WEAP**

<b>Parámetro Modelo</b>	<b>Unidad</b>
Coeficiente cultivo ( $K_c$ )	-
Índice de Resistencia a la Escorrentía ( $RRF$ )	-
Dirección preferencial del flujo ( $T$ )	-
Temperatura de derretimiento ( $t_1$ )	°C
Temperatura de congelamiento ( $t_s$ )	°C
Factor de radiación ( $R_f$ )	-
Albedo de nieve nueva ( $A_n$ )	-
Albedo de nieve vieja ( $A_0$ )	-
Estanque superior, Capacidad de Zona de Raíces ( $z_1$ )	mm
Estanque superior, Conductividad de Zona de Raíces ( $k_j$ )	-
Estanque inferior, Capacidad del suelo ( $z_2$ )	mm
Estanque inferior, Conductividad del suelo ( $k_s$ )	mm/mes
Porcentaje de agua inicial en la zona de las Raíces ( $z_1$ )	%
Porcentaje de agua inicial en el Estanque Inferior ( $z_2$ )	%
Humedad Relativa ( $HR$ )	%
Velocidad promedio del viento ( $W$ )	m/s
Factor de Nubosidad ( $CF$ )	-
Nieve Inicial ( $IS$ )	-

Fuente: WEAP Tutorial (2008).

# CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN ZONA DE ESTUDIO

## 3.1.- DESCRIPCIÓN GENERAL

### 3.1.1- INTRODUCCIÓN

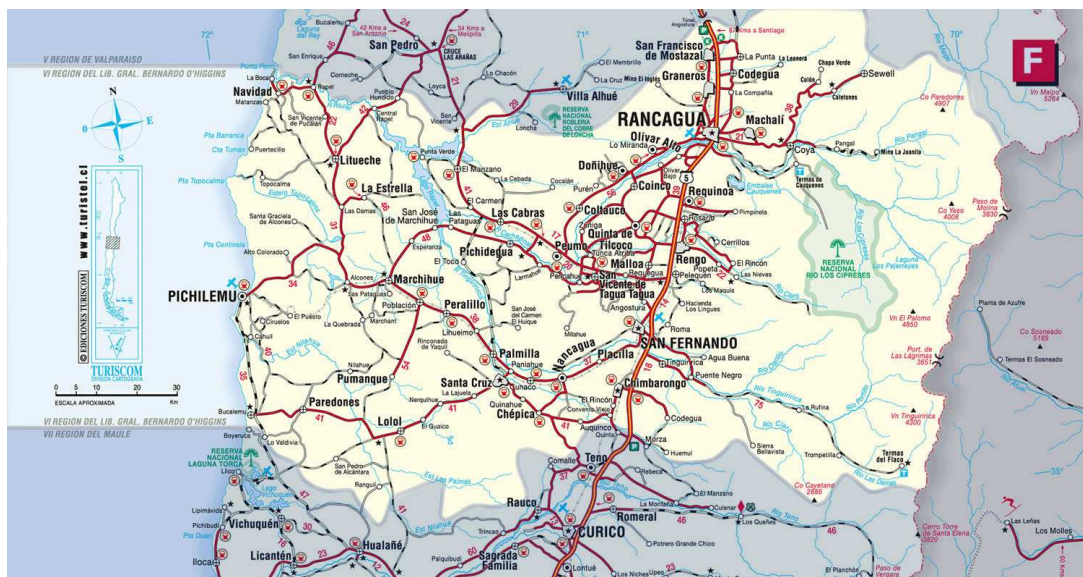
En el presente apartado se realiza una descripción general del entorno donde se inserta la cuenca en estudio, como lo son la región a la cual pertenece y sus características principales, así como también una descripción del clima existente y de la geología subyacente.

### 3.1.2- UBICACIÓN

La cuenca del río Pangal, parte integrante de la cuenca del río Cachapoal, pertenece a la VI Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (ver Figura 3.1), siendo ésta una de las quince regiones en las que se encuentra dividido Chile. Limita al norte con la V Región de Valparaíso y la Región Metropolitana de Santiago, al sur con la VII Región del Maule, al este con la República de Argentina y al oeste con el Océano Pacífico.

Cuenta con una superficie de 16,387 km<sup>2</sup> y una población estimada en el año 2006 de 849,120 habitantes. La región está compuesta por las provincias de Cachapoal, Cardenal Caro y Colchagua, y la capital regional es la ciudad de Rancagua.

FIGURA 3.1: UBICACIÓN VI REGIÓN



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

### 3.1.3- CARACTERIZACIÓN DE COMPONENTES DE LA ZONA

#### Geografía-Física

El territorio regional se caracteriza por la ordenada presencia de tres unidades rectoras del relieve chileno.

La Cordillera de la Costa, aunque pierde altura, no sobrepasa los 1,000 m, cobrando mayor amplitud hacia el centro del territorio. Por el oeste en cambio, se confunde con las Planicies Litorales, las que logran bastante desarrollo. La cordillera decrece en altura alcanzando apenas los 800 m, y se desvía hacia el interior de la región, lo que le da mayor amplitud a las Planicies Litorales, alcanzando su máximo desarrollo con 25 a 30 km de ancho.

La Depresión Intermedia aparece en forma de cubeta alargada hasta Pelenquén, donde se cierra la cuenca de Rancagua para abrirse definitivamente al Sur de la Angostura de Regolemu. Se trata de una llanura de relleno, principalmente aluvial, donde se alojan los mejores suelos de la región. Está cortada por dos angosturas, la de Paine por el norte, y la de Regolemu al norte de San Fernando, provocadas por la intromisión de las serranías de ambas cordilleras, que tienden a juntarse en el centro del valle longitudinal, conformando la cuenca media del Cachapoal. Al sur de la angostura de Regolemu, el valle es más amplio.

#### Clima

En la región en cuestión la orientación del relieve influye de forma importante en la distribución de las precipitaciones, observándose que aumentan en las laderas occidentales de ambas cordilleras en relación a sus áreas contiguas, encontrándose 3 climas de importancia.

- Clima templado cálido con estación seca prolongada de 7 a 8 meses y gran nubosidad.

Este clima se encuentra en el sector costero de la parte norte de la región, abarcando las planicies litorales y la ladera occidental de la cordillera de la Costa. Es la extensión hacia el sur del mismo clima que se encuentra en el litoral de la V Región, determinado por la cercanía al mar, que modera las temperaturas y produce una gran humedad, que se manifiesta en una gran cantidad de días nublados. Las precipitaciones son de origen frontal y se concentran en invierno, los valores anuales varían entre algo más de 500 mm en la parte norte hasta casi 800 mm en el sector sur. Entre los meses de Mayo y Agosto caen entre el 76% y el 80% de los totales anuales, lo que conduce a que entre los meses de Octubre a Abril se presenten menos de 40 mm de agua caída, definiendo así una estación seca que dura 7 meses.

- Clima templado cálido con estación seca prolongada de 7 a 8 meses.

La zona ubicada en la depresión intermedia o en el valle longitudinal de esta región presenta las condiciones de este tipo de clima, mostrando claramente características mediterráneas con veranos cálidos y secos e inviernos lluviosos, frescos y húmedos. Las precipitaciones son algo menores que en el litoral pero las amplitudes térmicas tanto diarias como anuales son mayores. La diferencia de temperatura entre el mes más cálido y el más frío es del orden de 13° C en Rancagua y sólo llega a los 8°C en la costa. También hay 7 meses con precipitación inferior a 40 mm, que van de Octubre a Abril. La cordillera de la Costa limita el

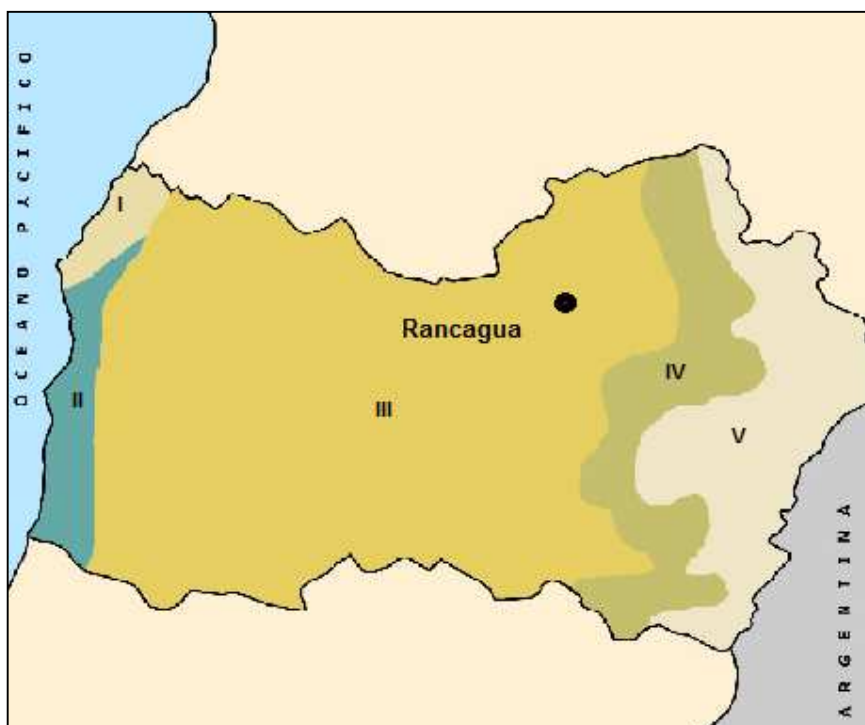
alcance de la influencia marítima, lo que se manifiesta en una menor cantidad de días nublados en el litoral.

- Clima templado cálido con estación seca prolongada de 4 a 5 meses.

El presente régimen se tiene en el sector cordillerano de la Región, por sobre los 800 m, el ascenso del relieve provoca grandes variaciones en el clima, ya que las temperaturas medias en el invierno se aproximan a 0° C, y las precipitaciones invernales se hacen sólidas, al mismo tiempo que aumentan a cerca de 1,000 mm anuales, acortándose así la duración de la estación seca a tan solo 4 a 5 meses con precipitaciones inferiores a 40 mm. Las temperaturas medias son del orden de 4°C más bajas que en el valle y la diferencia entre el mes más cálido y el más frío es de unos 11°C.

Finalmente, a modo de resumen, se presenta distribución espacial de los climas de la región, para ello ver Figura 3.2.

**FIGURA 3.2: DISTRIBUCIÓN DE CLIMAS EN LA VI REGIÓN**



Fuente: <[http://www.mapasdechile.com/clima\\_region06/index.htm](http://www.mapasdechile.com/clima_region06/index.htm)>.

Donde la zona I corresponde a un clima templado cálido con lluvias invernales y gran nubosidad, la zona II a un clima templado cálido con lluvias invernales y gran humedad atmosférica, la zona III a un clima cálido con lluvias invernales, la zona IV a un clima cálido lluvioso sin estación seca, y la zona V a un clima templado frío lluvioso sin estación seca.

### Geología y Geomorfología

La geología se desarrolla principalmente bajo depósitos aluviales del Cuaternario, entre unidades del Cretácico superior y del Terciario inferior (Klohn, 1960), ambas correspondientes a rocas volcánicas y sedimentarias continentales.

La Macro Región Central de las Cuencas y del Llano Fluvio-Glacio-Volcánico (Börgel, 1983), es la unidad regional que caracteriza el área de influencia, localmente el lugar donde se inserta la zona de estudio está en el trayecto cordillerano del río Cachapoal, en la cuenca de Rancagua, la cual drena una superficie total de 6,370 km<sup>2</sup>.

El elemento morfo estructural más relevante del área de influencia es el río Cachapoal, el cual nace de un conjunto de ventisqueros localizados en el cerro Altos de Los Piuquenes, recibiendo desde el sur las aguas de los ríos Las Leñas y Cortaderal, de los cuales este último presenta un valle bien desarrollado y de notable extensión longitudinal. Recibe aguas abajo los aportes de los ríos Cipreses, Pangal y Coya, estos dos últimos le tributan desde la parte septentrional de la hoya cordillerana (ver Figura 3.3).

Desde sus nacientes el valle del río Cachapoal, en la parte más alta de la Cordillera de los Andes y hasta salir del dominio andino, justo antes de entrar en la Depresión Intermedia, presenta dos macro unidades, la primera de ellas caracterizada por formas de origen glacial, y una segunda donde las formas fluviales son las que caracterizan el tramo.

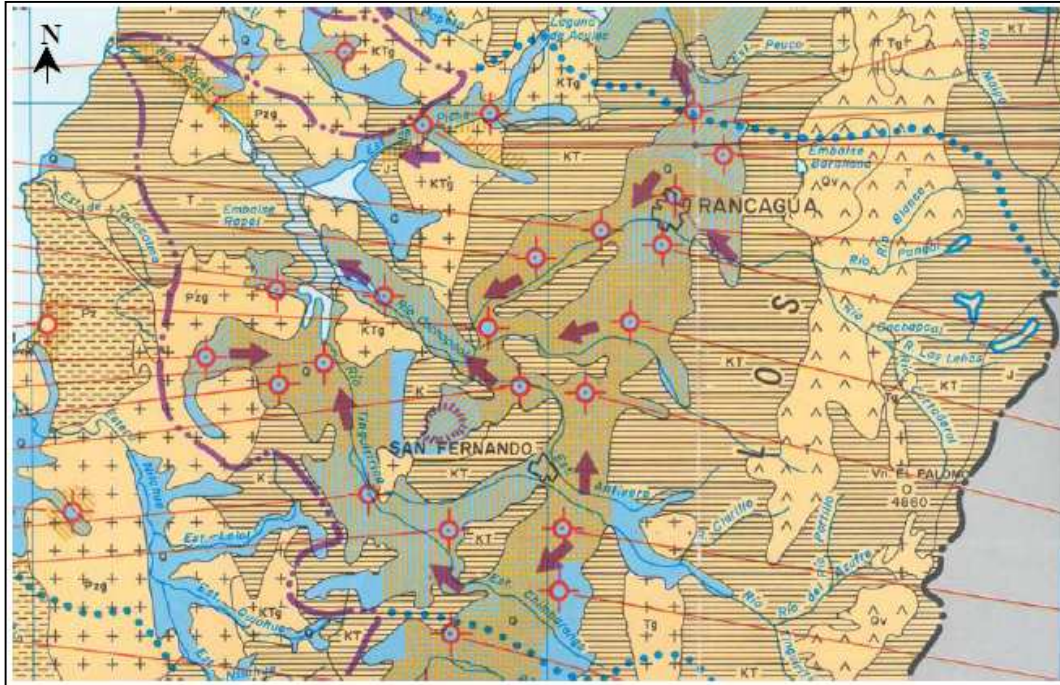
Centrando la atención en el área de estudio, ésta corresponde a una de dominio glacial, en donde se presentan laderas abruptas de gran desnivel en las que afloran escalonadamente estratos de la formación volcano sedimentaria terciaria de Farellones, dispuesta en estructura horizontal o débilmente ondulada (Santana, 1968), así como también los depósitos detríticos típicamente glaciales se encuentran tanto en las laderas como en el fondo del valle (el desarrollo de conos aluviales presenta su mayor expresión desde las quebradas principales que bajan hacia el valle principal, inscribiéndose de manera transversal en los materiales morrénicos, hecho que evidencia la sucesión de un periodo que favoreció condiciones morfoclimáticas glaciales hacia uno de condiciones más cálidas que permitió una morfogénesis fluvial, luego del retiro de los hielos cuaternarios).

### Hidrogeología

Sobre la base de la información del “Diagnóstico y Clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca Río Rapel”, del año 2004, en la hidrogeología general del área se observa un acuífero en dirección este – oeste que llega hasta frente a Rancagua, drena paralelo al curso del río Cachapoal, para aguas abajo aflorar parcialmente en el sector de Doñihue - Coinco, y finalmente escurrir junto con el río a mayor profundidad hasta el Embalse Rapel (ver Figura 3.3 para sentido de las aguas subterráneas, donde se concluye que siguen tanto la dirección como sentido de los cauces principales existentes en la región).



**FIGURA 3.3: SENTIDO ACUÍFEROS Y RED HÍDRICA**



Fuente: Mapa Hidrogeológico de Chile, DGA (1986).

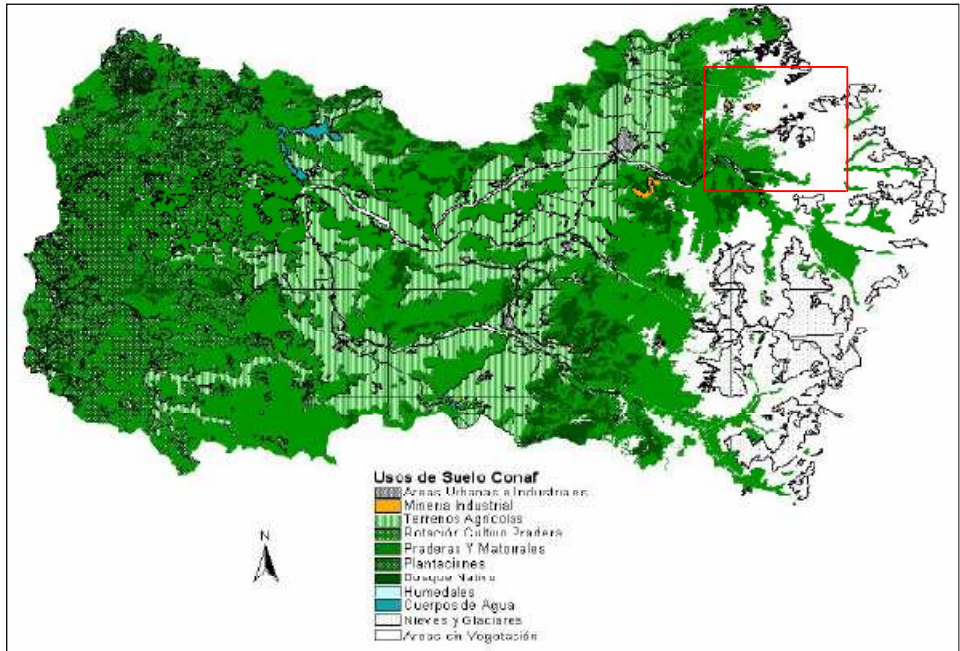
### Suelos

Los suelos en el área de estudio pertenecen a los denominados suelos aluviales del Valle Central (V a VIII regiones). Corresponden en general a Mollisoles, los que tienen un desarrollo moderado. También es posible encontrar Alfisoles en las extensiones de los sedimentos aluviales en la cercanía de los ríos, siendo éstos suelos moderadamente profundos, de texturas medias a finas, y con altos contenidos de materia orgánica.

Aproximadamente 1 km antes de la confluencia del río Cachapoal con el río Pangal, el valle del río Cachapoal se extiende y aparecen amplias terrazas de origen fluvial, que en algunos sectores pueden alcanzar un ancho de hasta 2 km, en ellas se desarrollan suelos de aptitud agrícola asociados a una actividad agrícola menor. Estas terrazas han sido formadas por antiguos depósitos del río Cachapoal, con diferentes acumulaciones de sedimentos y distintos niveles de energía, pudiendo reconocerse en sus perfiles desde rellenos de baja potencia (arenas medias a finas, limos y arcillas, con escaso material pétreo), hasta depósitos aluviales (arenas gruesas e inclusión de clastos de gran tamaño, carentes de estratificación y restos vegetales removidos desde sus sitios originales).

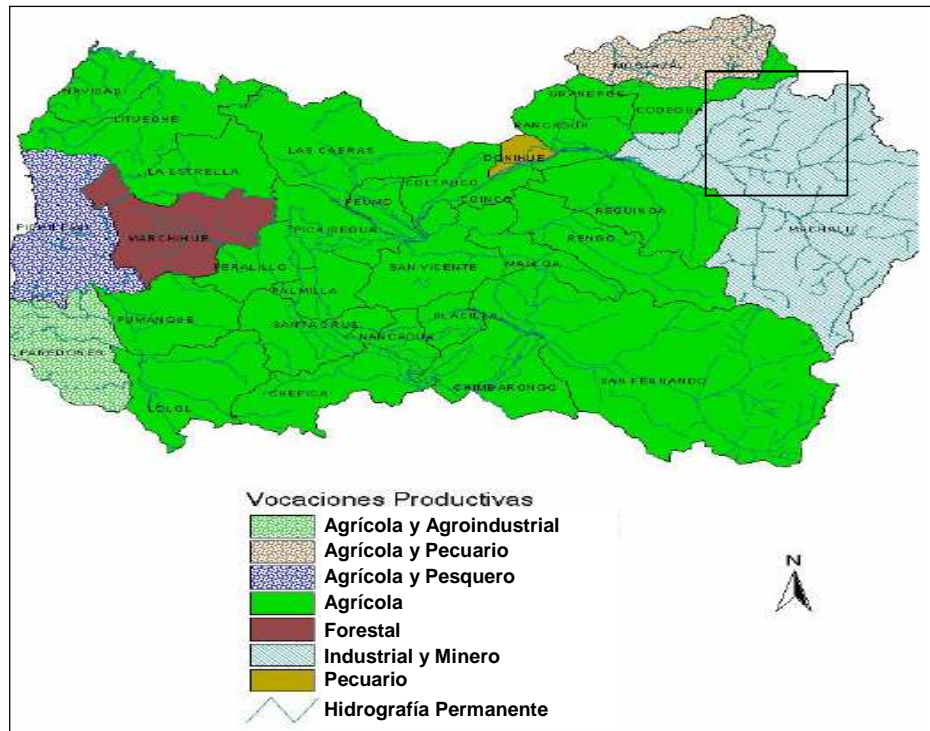
Luego el valle se angosta, desapareciendo la superficie de suelo con valor agrícola, disponiéndose los suelos sobre antiguo fondos de valle glacial. En cuanto a una descripción más detallada de los suelos existentes (ver Figura 3.4 para usos de suelos y Figura 3.5 para actividades económicas asociadas), se tiene que corresponden a suelos delgados, desarrollados sobre depósitos glaciales de variabilidad granulométrica, desarrollados en posición fisiográfica de planicies con escasa pendiente, teniendo una capacidad de uso VI (uso limitado a empastadas y forestación, fuertes pendientes superiores al 15%, requieren de prácticas de conservación).

**FIGURA 3.4: USO DE SUELO**



Fuente: DNP (2006).

**FIGURA 3.5: ACTIVIDADES ECONÓMICAS CUENCA PANGAL**



Fuente: DNP (2006).

Donde el cuadrante delimitado en las Figuras 3.4 y 3.5 corresponde a la zona en donde se encuentra el río Pangel.

### Información Disponible

Descritas las características principales de la región en donde se ve inserta la cuenca del río Pangal, es de interés conocer los datos existentes en la zona de estudio, por lo que se solicita a la Dirección General de Aguas (DGA), antecedentes acerca de la existencia de estaciones meteorológicas y fluviométricas (para catastro de estaciones ver Tabla 3.1 y Tabla 3.2)

**TABLA 3.1: ESTACIONES VI REGIÓN**

N°	Nombre Estación	Fechas		Altura msnm	Coord. UTM		Tipo Estación
		Instal	Supresión		Norte	Este	
1	LAS LEÑAS	01-03-79		1240	6198191	378900	plu
2	R. CACHAPOAL 5 KM. A. ABAJO JUNTA	01-03-99		1100	6199217	372702	plu
3	LAS CALLANAS	01-02-79		1450	6211129	378732	plu
4	RIO PANGAL EN PANGAL	01-11-01		1750	6212788	364889	plu
5	CANAL SAUZAL EN PUENTE TERMAS	01-07-05		0	6210483	356990	plu
6	RANCAGUA	01-09-71	30-08-78	510	6217921	338691	plu
7	RANCAGUA ENDESA	01-01-79		500	6217921	338691	plu
8	SAUZAL	01-01-79	11-01-05	650	6208882	351129	plu
9	GRANEROS	01-01-79	04-04-01	500	6229063	341577	met
10	COLTAUCO	01-10-78		450	6204404	308225	plu
11	POPETA	01-03-70		460	6188293	336137	met
12	LAS NIEVES CENTRAL	01-01-70		720	6182801	339296	plu
13	RENGO	01-01-70		310	6191852	328410	met
14	SAN FERNANDO	01-09-71		350	6171344	319612	plu
15	VIÑA VIEJA	01-01-79		315	6187829	311630	plu
16	MILLAHUE	01-01-72		370	6178263	296516	plu
17	RIO CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO (CA)	01-10-02		117	6203868	283673	plu
18	PICHIDEGUA	01/03/79		280	6196614	289978	plu
19	TERMAS DEL FLACO	01-06-99		1660	6140891	379648	temp
20	LA RUFINA	01-05-99		735	6155047	338251	plu
21	RIO TINGUIRICA BAJO LOS BRIONES	01-03-99		518	6160427	328991	plu
22	CONVENTO VIEJO	01-01-71		245	6150762	307805	met
23	PANIAHUE	01-01-79	01-09-88	200	6166894	284532	plu
24	LA CANDELARIA	01-05-74		220	6142641	275947	met
25	VILLA ALHUE	01-01-79		270	6232131	307659	plu
26	LONCHA	01-04-76	01-10-85	210	6222857	306310	plu
27	BARRERA LONCHA	01-04-84		130	6226393	298543	plu
28	COCALAN	01-11-78		195	6213286	291140	plu
29	LITUECHE	01-01-79		210	6221515	249419	plu
30	RAPEL	01-07-04		50	6239962	247387	plu
31	PICHILEMU	01-04-80		5	6191199	775850	met
32	EL MEMBRILLO	01-05-81		240	6145914	259080	met
33	RANGUILI	01-05-81		130	6140163	251604	met
34	LA PALMA	01-02-81		114	6130343	260353	plu
35	NILAHUE BARAHONA	01-05-81		120	6171513	247696	met

Fuente: DGA (2010).

Donde met corresponde a una estación del tipo meteorológica, plu a una estación pluviométrica y temp a una estación de temperatura.

**TABLA 3.2: ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS**

N°	Nombre Estación	Fechas		Altura msnm	Coord. Norte	UTM Este
		Instal.	Supresión			
1	RIO LAS LEGNAS COTA 2150	01-12-87	01-05-89	0	6190024	391261
2	RIO CORTADERAL ANTE JUNTA RIO CACHAPOAL	01-01-85	10-01-91	1200	6198171	377367
3	RIO CACHAPOAL 5 KM. A ABAJO JUNTA CORTADERAL	01-12-89		1100	6199217	372702
4	RIO PANGAL EN PANGAL	01-12-85		1750	6212788	364889
5	RIO CACHAPOAL EN CHICAYAS	01-12-14	31-08-31	0	6210802	355705
6	RIO CACHAPOAL EN COYA	01-01-66	31-03-49	0	6212698	358748
7	RIO COYA EN COYA	01-12-20	01-11-28	0	6212698	358748
8	RIO CACHAPOAL EN PTE TERMAS DE CAUQUENES	02-09-02		700	6208954	355733
9	CANAL SAUZAL EN PUENTE TERMAS	01-07-05		0	6210483	356990
10	RIO CLARO EN CAMPAMENTO	01-02-86	31-05-86	664	6207082	354227
11	EST. DE LA CADENA ANTES JUNTA RIO CACHAPOAL	01-01-68		440	6215938	331042
12	RIO CLARO EN HACIENDA LAS NIEVES	01-03-97		720	6182853	342357
13	CANAL TIPAUME EN PUENTE (SUC CELIS)	01-12-33	01-04-44	0	6193838	336039
14	RIO CLARO EN TUNCA	01-04-94		480	6193249	305388
15	ESTERO ZAMORANO EN PUENTE EL NICHE	01-10-85		900	6189455	300869
16	RIO CACHAPOAL EN PEUMO (BRAZO # 1)	01-12-19	01-12-21	0	6189520	303933
17	RIO CACHAPOAL EN PEUMO (BRAZO # 2)	01-12-14	01-12-21	0	6189520	303933
18	RIO CACHAPOAL EN PEUMO (BRAZO # 3)	01-01-14	01-12-22	0	6190470	356019
19	RIO CACHAPOAL EN PUENTE ARQUEADO (CA)	01-09-02		117	6203868	283673
20	RIO TINGUIRIRICA AGUAS ABAJO JUNTA RIO AZUFRE	01-01-70	22-04-93	1024	6146108	356708
21	RIO CLARO EN EL VALLE	01-11-60		476	6160398	327464
22	RIO CLARO EN PUENTE NEGRO	01-01-69	01-07-82	0	6153225	339809
23	RIO TINGUIRIRICA BAJO LOS BRIONES	01-08-89		518	6160427	328991
24	ESTERO CHIMBARONGO EN CONVENTO VIEJO	01-04-77	13-12-93	245	6150730	306279
25	CANAL TENO EN KM. 13.465	01-09-02		285	6145494	307941
26	ESTERO CHIMBARONGO EN SANTA CRUZ	01-01-68	01-12-80	225	6163197	284618
27	RIO TINGUIRIRICA EN LOS OLMOS (CA)	01-11-02		223	6179764	281169
28	ESTERO ALHUE EN QUILAMUTA	01-01-70		130	6228040	289273
29	RIO RAPEL EN RAPEL	01-02-73	01-08-76	7	6241770	245797
30	ESTERO NILAHUE EN SANTA TERESA	01-07-85		50	6171429	244637

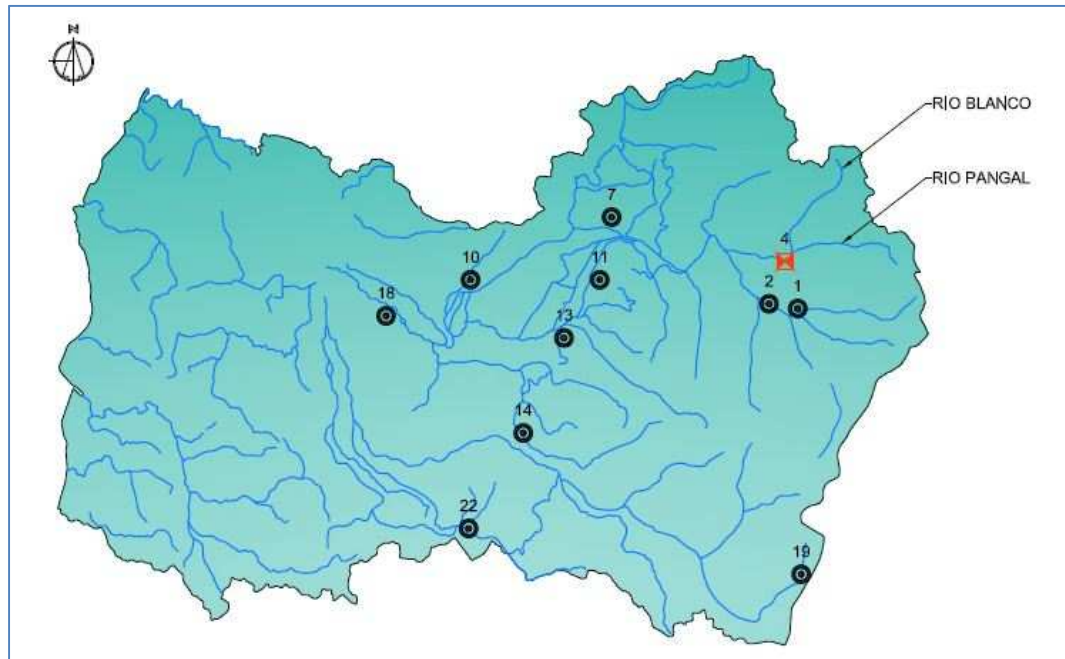
Fuente: DGA (2010).

Analizando la distribución espacial de las estaciones en la región, se observa la falta de estaciones meteorológicas en altura, hecho que impide el poder caracterizar correctamente la cuenca, ya que variables meteorológicas como la precipitación y la temperatura, varían de forma directa en función de altura no manteniéndose necesariamente el mismo comportamiento en terrenos de baja y alta altura.

A continuación, en la Figura 3.6, se presenta red de estaciones cercanas al río Pangal (la identificación corresponde al número asociado tanto en la Tabla 3.1 como 3.2, donde los puntos son estaciones de carácter meteorológico, y el cuadrado hace referencia a la estación fluviométrica Pangal en río Pangal).



**FIGURA 3.6: ESTACIONES EXISTENTES VI REGIÓN AREA DE INTERÉS**



Fuente: Elaboración Propia.

## **3.2.- ESTUDIO CUENCA RÍO PANGAL**

### **3.2.1- INTRODUCCIÓN**

Descritas las características principales de la región donde se ve inserta la cuenca del río Pangal, a continuación se presentan antecedentes de ésta, junto a un estudio y procesamiento de sus componentes principales.

### **3.2.2- ANTECEDENTES GENERALES**

La cuenca del río Pangal, cuyo punto de salida se define en la estación fluviométrica Pangal en río Pangal, pertenece a la cuenca del río Cachapoal (ver Figura 3.7), ubicándose en la cabecera de esta última.

En cuanto al río Cachapoal, es posible agregar que es un río de régimen pluvio-nival, tiene su origen en la cordillera de los Andes en el sector del Volcán Overo, Pico del Barroso y Nevado de los Piuquenes, una longitud de 250 km., un caudal medio de 92.3 m<sup>3</sup>/s, una superficie de la cuenca de 6,370 km<sup>2</sup> y desemboca en el río Rapel.

**FIGURA 3.7: CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL**



Fuente: Comisión Nacional de Riego.

Considerando los antecedentes presentados en el punto 3.1, y la ubicación relativa del río Pangal, se observa que se está frente a una cuenca de altura, existiendo de forma exclusiva una extracción de carácter minera (ver Tabla 3.3).

**TABLA 3.3 EXTRACCIÓN MINERA RÍO BLANCO**

Mes	Extracción (m <sup>3</sup> /s)	Mes	Extracción (m <sup>3</sup> /s)
Enero	0.65	Julio	0.62
Febrero	0.73	Agosto	0.64
Marzo	0.63	Septiembre	0.70
Abril	0.62	Octubre	0.69
Mayo	0.57	Noviembre	0.43
Junio	0.64	Diciembre	0.73
<b>Caudal Medio (m<sup>3</sup>/s)</b>		<b>0.64</b>	

Fuente: Figueroa (2008).

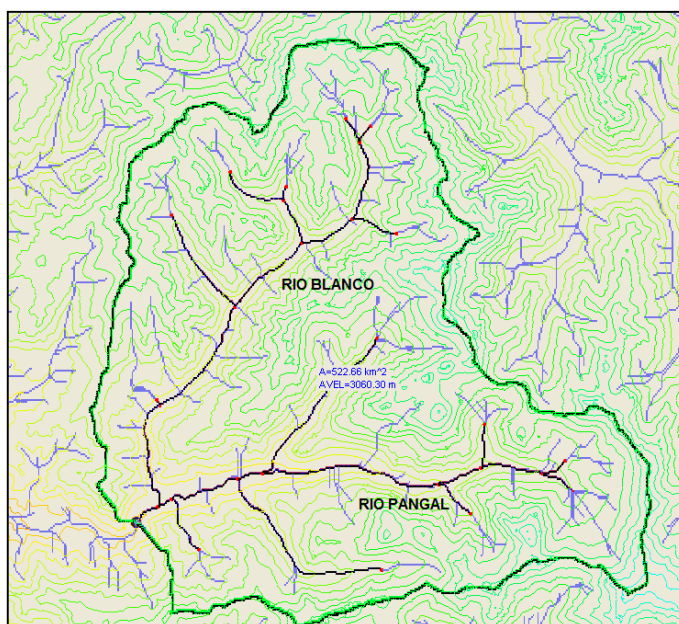
### 3.2.3- PROCESAMIENTO DE LA CUENCA

#### Delimitación Cuenca

Para delimitar la cuenca se utilizó el software WMS (versión 7.1, año 2006), siendo necesario como entrada un Modelo de Elevación Digital, cuya su sigla en inglés es DEM, definiéndose como punto de salida la estación fluviométrica Pangal en río Pangal (para descargar DEM visitar página de la USGS).

La cuenca generada por WMS alcanzó un área de 522 km<sup>2</sup>, teniéndose una elevación media de 3,060 m (ver Figura 3.8 para cuenca en WMS, donde se observa la presencia de dos cursos importantes de agua), lo que permite deducir a priori que se está frente a una cuenca con una importante componente nival producto de las alturas involucradas (ver Gráfico 3.1 para Curva de Variación Estacional, concluyéndose así lo antes propuesto).

**FIGURA 3.8: CUENCA DEL RÍO CACHAPOAL**



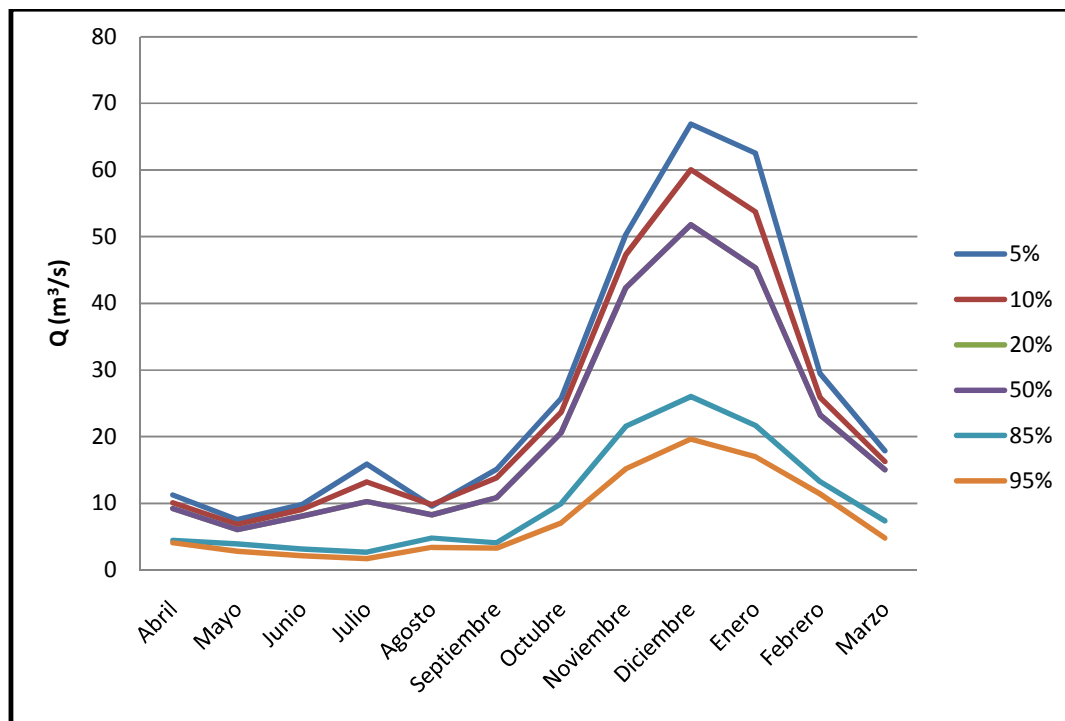
Fuente: Elaboración Propia.

#### Régimen de la Cuenca

Para la determinación del régimen de la cuenca se construye la Curva de Variación Estacional, considerando probabilidades de excedencia de un 5%, 10%, 20%, 50%, 85% y 95%, y datos de caudales medios mensuales de la estación Pangal en río Pangal en el periodo comprendido entre el año 1985 al 2009 (ver Anexo I Digital para caudales medios diarios, fuente DGA).

Los resultados arrojan que la cuenca del río Pangal presenta un régimen nival, donde los caudales medios mensuales máximos ocurren en los meses de deshielo, entre Octubre y Febrero, manteniéndose este comportamiento tanto en años húmedos como secos. En cuanto a los caudales menores, éstos ocurren en los meses de invierno, siendo los comprendidos entre los meses de Mayo y Agosto (ver Figura 3.9 para Curva de Variación Estacional y Tabla 3.4 para valores de caudales mensuales).

**FIGURA 3.9: CURVA DE VARIACIÓN ESTACIONAL**



Fuente: Elaboración Propia.

**TABLA 3.4: CAUDALES CVE (m³/s)**

PEX (%)	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE	ENERO	FEBRERO	MARZO
5	11.2	7.5	9.8	15.9	9.8	15.1	25.7	50.3	66.9	62.5	29.4	17.9
10	10.1	6.8	9.1	13.2	9.6	13.8	23.6	47.3	60.0	53.7	25.8	16.2
20	9.2	6.1	8.1	10.2	8.2	10.8	20.6	42.3	51.7	45.3	23.2	15.0
50	6.3	4.7	5.7	6.0	6.0	7.8	16.2	32.7	38.5	32.3	18.6	11.6
85	4.5	3.9	3.1	2.7	4.8	4.1	9.9	21.6	26.0	21.7	13.2	7.3
95	4.1	2.8	2.1	1.7	3.3	3.2	7.0	15.2	19.6	16.9	11.3	4.8

Fuente: Elaboración Propia.

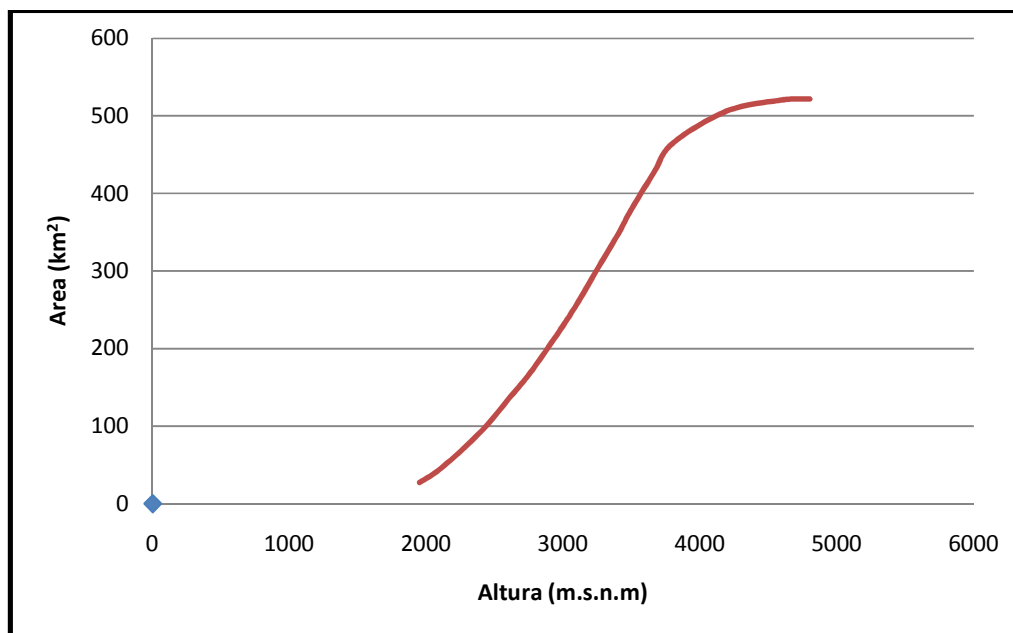
### División Cuenca

Uno de los aspectos a considerar en la modelación de la cuenca del río Pangal, es estudiar la respuesta del sistema frente a distintas configuraciones espaciales, definiéndose un escenario con la totalidad del área, un segundo escenario donde se considera una división de dos áreas iguales, y un tercer y último escenario con seis áreas iguales (cada unidad espacial se denomina banda de altura).

Para la construcción de las bandas se utilizó el software WMS, el cual permite determinar de forma directa el área existente bajo una cota dada (ver Figura 3.10 para Curva Hipsométrica), observándose un aumento lineal entre estas dos componentes en el rango de los 2,200 y 3,800 m de altura.



**FIGURA 3.10: CURVA HIPSOMÉTRICA**



Construida la Curva Hipsométrica, se calcula tanto las áreas como las elevaciones medias que éstas bandas poseen (ver Tabla 3.5, 3.6 y 3.7).

**TABLA 3.5: PROPIEDADES 1 BANDA**

Banda	Área (km <sup>2</sup> )	Elevación Media (m)
I	522.66	3,060

**TABLA 3.6: PROPIEDADES 2 BANDAS**

Banda	Área (km <sup>2</sup> )	Elevación Media (m)
I	261.33	2,580
II	261.33	3,540

**TABLA 3.7: PROPIEDADES 6 BANDAS**

Banda	Área (km <sup>2</sup> )	Elevación Media (m)
I	87.11	2,086
II	87.11	2,580
III	87.11	2,954
IV	87.11	3,255
V	87.11	3,538
VI	87.11	3,910

Determinada tanto la superficie como la elevación media de cada banda, se presenta de forma gráfica cuenca con dos bandas (ver Tabla 3.8 para cota limítrofe, y Figura 3.11 para

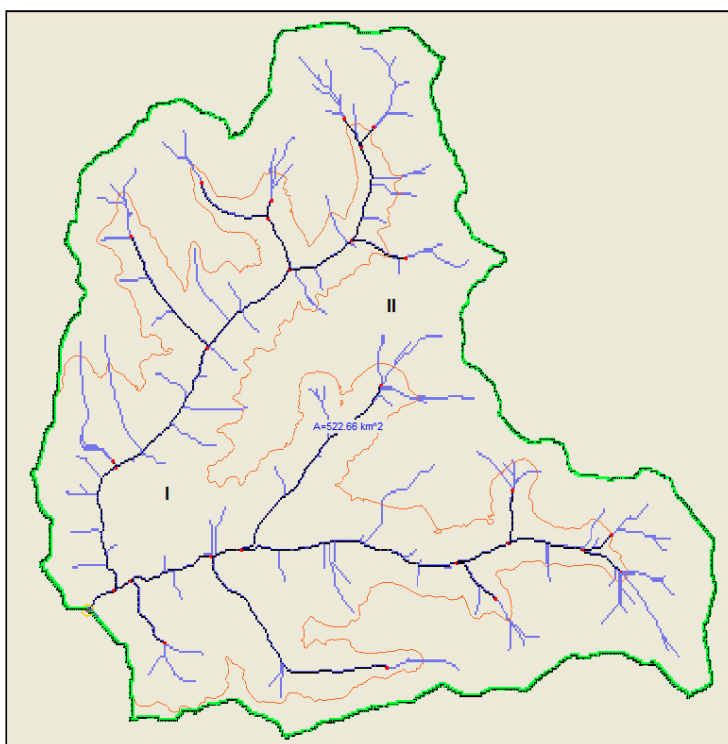
esquema), y cuenca con 6 bandas (ver Tabla 3.9 para cotas limítrofes, y Figura 3.12 para esquema).

La numeración dentro de la Figura 3.11 y 3.12, corresponde a la presentada en la Tabla 3.6 y 3.7

**TABLA 3.8: CURVA DE NIVEL LIMÍTROFE 2 BANDAS**

Curva de Nivel	Elevación (m)
i	3,060

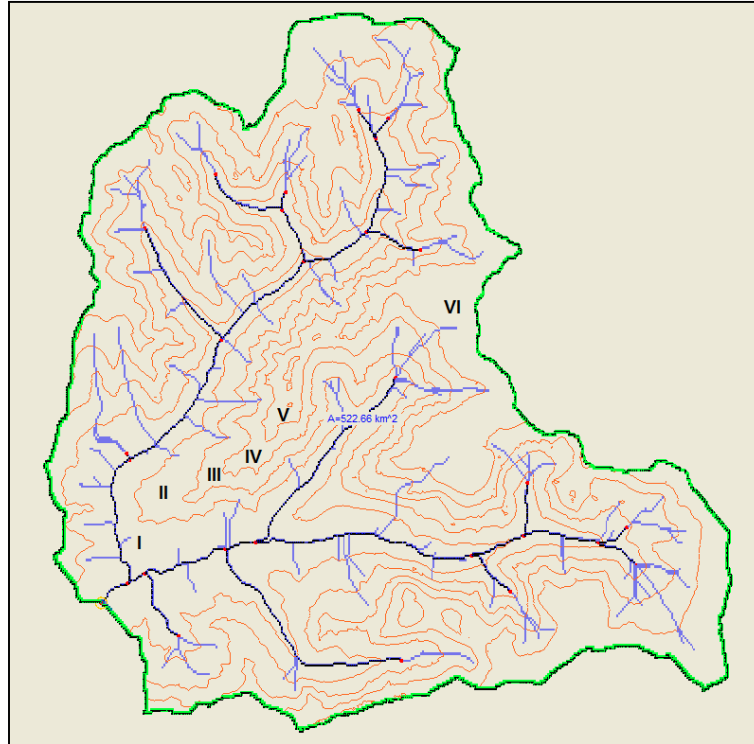
**FIGURA 3.11: CUENCA 2 BANDAS**



**TABLA 3.9: CURVAS DE NIVEL LIMÍTROFES 6 BANDAS**

Curva de Nivel	Elevación (m)
i	2,333
ii	2,767
iii	3,104
iv	3,396
v	3,724

**FIGURA 3.12: CUENCA 6 BANDAS**



### Generación Gradientes

Definido los parámetros de las bandas (área y elevación media), es de interés determinar los gradientes de precipitación y temperatura a utilizar en la modelación, los que se generan utilizando la información disponible de las estaciones cercanas.

Considerando las variables involucradas, se define el gradiente de una variable meteorológica como indica la expresión 3.1:

$$\frac{\Delta V}{\Delta Z} = k \quad (3.1)$$

Donde  $\Delta V$  es el diferencial de la variable escogida (temperatura y precipitación en el presente estudio),  $\Delta Z$  es el desnivel existente, y  $k$  la razón y/o gradiente.

### *Gradiente de Temperatura*

Para la construcción del gradiente de temperatura, se consideran los promedios mensuales entre el año 1999 y 2004 de las siguientes estaciones (ver Anexo A):

- Convento Viejo (245 m.s.n.m.).
- Rengo (310 m.s.n.m.).
- Termas del Flaco (1,660 m.s.n.m.).

Producto de la variación estacional existente entre invierno (Abril-Septiembre), y verano (Octubre-Marzo), se construye un gradiente para cada una de los intervalos definidos,

siendo éste calculado como el promedio entre el gradiente entre Convento Viejo – Termas del Flaco, y el gradiente entre Rengo – Termas del Flaco.

- Gradiente Temperatura Invierno

Se determinan los gradientes para cada par de estaciones, encontrándose que las desviaciones son prácticamente nulas, resultado cuya explicación radica en que los gradientes no sufren variaciones de importancia en el rango de años establecido (ver Tabla 3.10).

**TABLA 3.10: GRADIENTE TEMPERATURA INVIERNO (°C/m)**

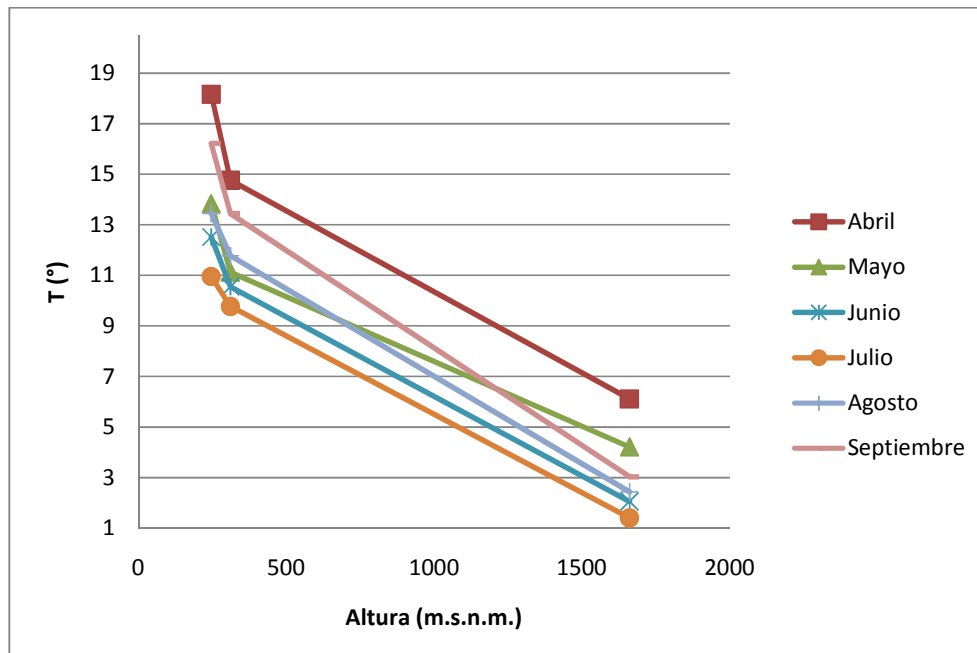
Año	Convento Viejo - Termas	Rengo - Termas
1999	-0.008	-0.009
2000	-0.008	-0.006
2001	-0.008	-0.007
2003	-0.007	-0.005
2004	-0.007	-0.006
<b>Media</b>	-0.008	-0.007
<b>Desviación Estándar</b>	0.000	0.002

Considerando los resultados presentados, se define un único gradiente promedio, el que está dado por:

$$\frac{\Delta T}{\Delta Z} = -0.007$$

Finalmente, se presenta comportamiento a escala mensual de la temperatura con respecto a la altura (ver Figura 3.13).

**FIGURA 3.13: TENDENCIA TEMPERATURAS INVIERNO**



- Gradiente Temperatura Verano

Se construye el gradiente de verano, el que al igual que el gradiente de invierno, utiliza las estaciones de Convento Viejo, Rengo y Termas del Flaco (ver Tabla 3.11).

**TABLA 3.11: GRADIENTE TEMPERATURA VERANO (°C/m)**

Año	Convento Viejo - Termas	Rengo - Termas
1999	-0.010	-0.007
2004	-0.010	-0.006
<b>Media</b>	-0.011	-0.007
<b>Desviación Estándar</b>	0	0

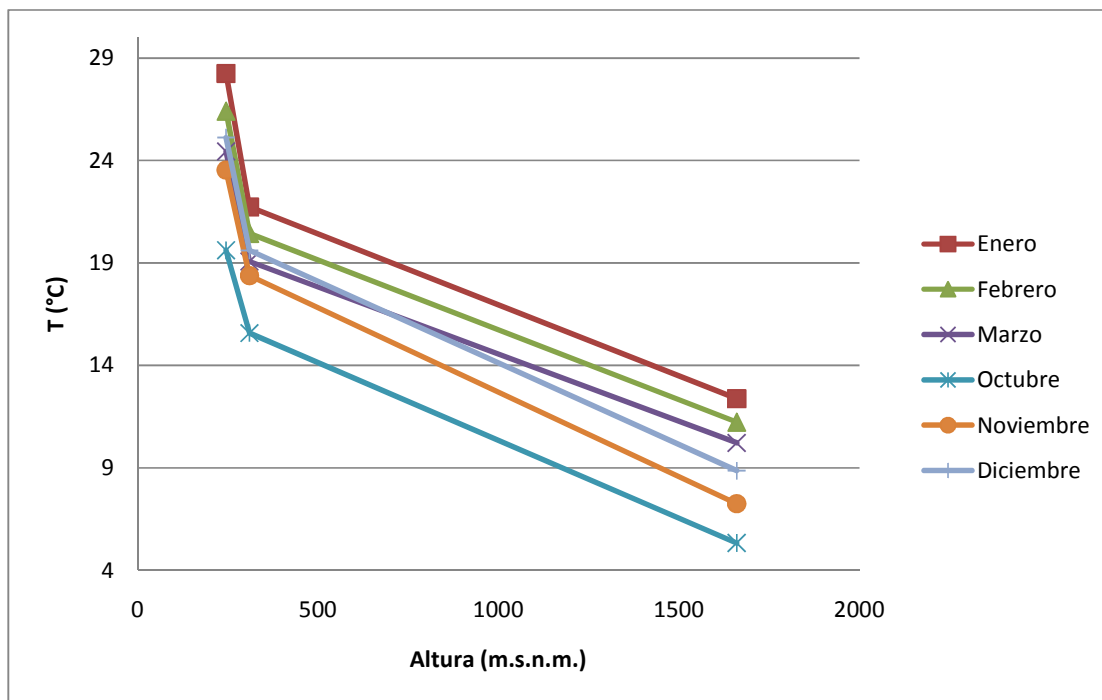
Calculando los gradientes inter-estaciones, se llega a una desviación estándar igual a cero, situación atribuida a que éstos no cambian de forma importante año a año.

Considerando los resultados presentados, se define un único gradiente promedio, el que está dado por:

$$\frac{\Delta T}{\Delta Z} = -0.009$$

Finalmente, se presenta comportamiento de la temperatura con respecto a la altura (ver Figura 3.14).

**FIGURA 3.14: TENDENCIA TEMPERATURAS VERANO**



### *Gradiente de Precipitación*

Para la construcción del gradiente de precipitación, a diferencia del gradiente de temperatura, no se realizó una separación entre invierno y verano, siendo utilizado valores de precipitación mensual de las siguientes estaciones:

- Coltauco (450 m.s.n.m.).
- 5 km AA Cortaderal (1,127 m.s.n.m.).
- Pangal en río Pangal (1,750 m.s.n.m.).

Los meses considerados para la generación del gradiente de precipitación son:

- Enero 2003.
- Junio 2003.
- Septiembre 2003.
- Noviembre 2003.
- Junio 2004
- Noviembre 2004.
- Marzo 2005.

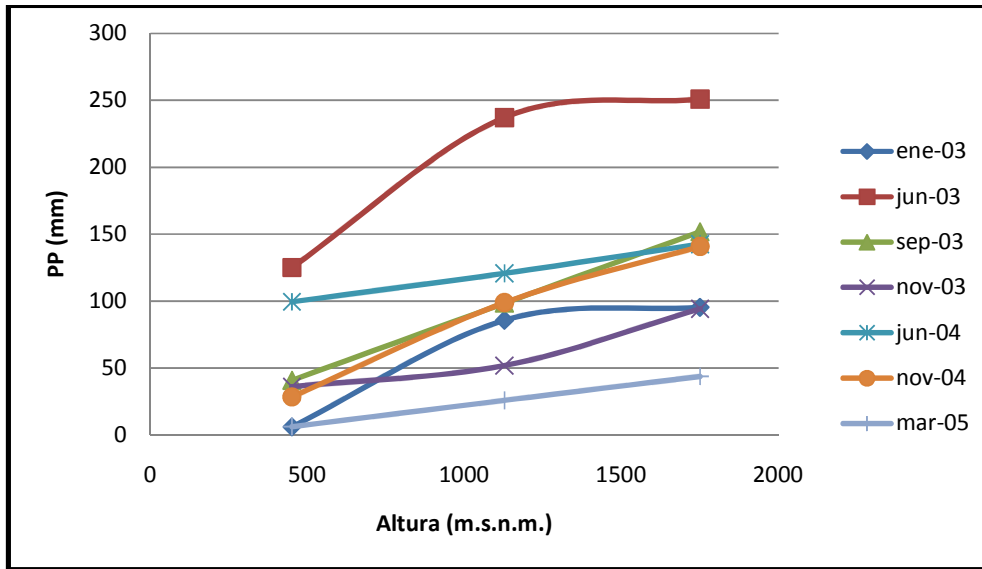
En cuanto al criterio de elección, este responde a cubrir de forma eficiente tanto el rango de elevaciones dentro de la región, como también tener una distribución mensual de los datos, no siendo finalmente necesario rellenar las estadísticas diarias ya que se consideraron de forma exclusiva meses con datos completos (ver Anexo A).

A continuación se presenta, en la Tabla 3.12 y en el Figura 3.15, valores mensuales de precipitación en las distintas estaciones, y tendencia de cada uno de ellos.

**TABLA 3.12: VALORES MENSUALES PRECIPITACIÓN (mm/mes)**

<b>Año</b>	<b>Coltauco</b>	<b>5 km AA Cortaderal</b>	<b>Pangal en Río Pangal</b>
Enero 2003	6.0	85.6	95.3
Junio 2003	125.0	237.1	250.8
Septiembre 2003	40.9	98.5	151.8
Noviembre 2003	36.0	51.8	94.2
Junio 2004	99.4	120.7	142.5
Noviembre 2004	28.5	98.9	140.9
Marzo 2005	6.3	25.9	43.7

**FIGURA 3.15: TENDENCIA DE LAS PRECIPITACIONES**



De la Figura 3.15, se observa que existe un cambio de tendencia de las precipitaciones a medida que se aumenta en altura, definiéndose un primer gradiente entre la estación Coltauco y 5 km AA Cortaderal, y un segundo gradiente entre esta última y la estación Pangal en río Pangal (producto de la falta de estaciones a mayores cotas, no es posible determinar la validez del gradiente entre 5 km AA Cortaderal – Pangal en el área de estudio, por lo que fuera del rango de los 450 y 1,750 m.s.n.m. se tiene una incertidumbre intrínseca asociada a esta componente).

Los gradientes construidos, para cada par de estaciones, se presentan a continuación (ver Tabla 3.13).

**TABLA 3.13: GRADIENTES DE PRECIPITACIÓN (mm/m)**

Año	Coltauco – 5 km AA Cortaderal	5 km AA Cortaderal – Pangal en Río Pangal
Enero 2003	0.117	0.015
Junio 2003	0.165	0.022
Septiembre 2003	0.085	0.085
Noviembre 2003	0.023	0.068
Junio 2004	0.031	0.035
Noviembre 2004	0.104	0.028
Marzo 2005	0.029	0.027

Calculado el gradiente para cada uno de los meses, se determina un gradiente promedio para cada par de estaciones, llegando a:

$$\frac{\Delta P_{\text{Coltauco-Cortaderal}}}{\Delta Z_{\text{Coltauco-Cortaderal}}} = 0.079$$

$$\frac{\Delta P_{Cortaderal-Pangal}}{\Delta Z_{Cortaderal-Pangal}} = 0.046$$

Donde la desviación estándar para el primero es de 0.054, y para el segundo de 0.03.

Producto que el valor promedio es comparable con la desviación estándar, se determina que cada mes tiene asociado un comportamiento propio, por lo que se definen 7 gradientes distintos, no utilizándose en las posteriores modelaciones el gradiente promedio (ver Tabla 3.13).



## **CAPÍTULO 4: GENERACIÓN DE SERIES DE TIEMPO**

### **4.1- INTRODUCCIÓN**

Definidos los gradientes de temperatura y precipitación, junto con la división en bandas de la cuenca para la determinación de las series de caudales futuros, es preciso generar las series de variables meteorológicas relevantes en los escenarios contemplados, para lo cual se usa SDSM, software que incorpora un modelo estocástico y de función de transferencia que escala datos desde un modelo de circulación global a uno local.

### **4.2- GENERACIÓN SERIES INDEPENDIENTES**

#### **4.2.1- SELECCIÓN PREDICTORES**

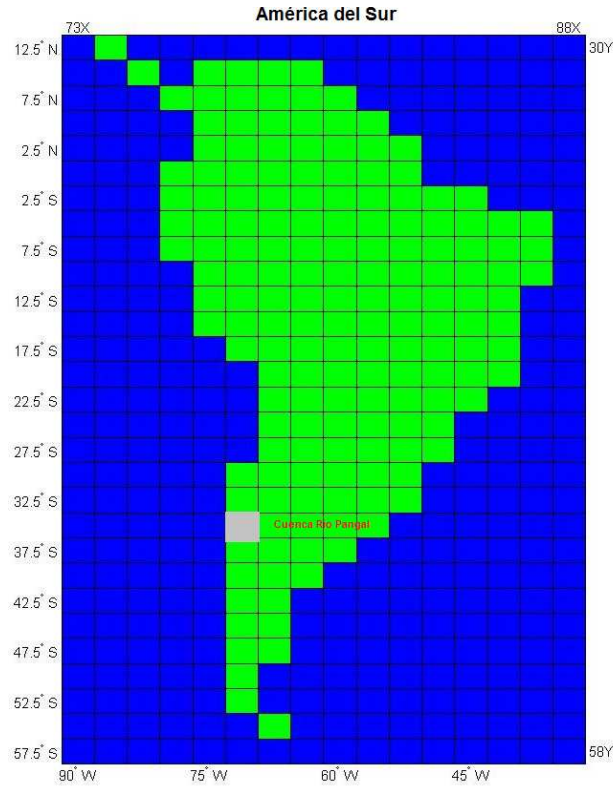
Las variables meteorológicas de interés, en el presente estudio, son la temperatura y la precipitación, siendo los datos de entrada utilizados para los predictandos y los predictores los siguientes:

- Predictandos: Se utiliza estadísticas de la estación Rengo para ambas variables, comenzando el registro de temperaturas el 1 de Abril del año 1971, y el registro de precipitaciones el 20 de Agosto del 1971 (la elección radica en la extensión de los registros comparando con estaciones vecinas).
- Predictores: para realizar el escalamiento se utilizan datos de línea base y de escenarios futuros.

Para la línea base se utilizan los datos presentados en el NCEP, los que se encuentran comprendidos entre el año 1961 y 2001. En cuanto a los escenarios futuros, las series corresponden a los datos del modelo HadCM3, utilizándose para el escenario A2 los resultados del H3A2A, y para el escenario B2, los resultados del H3B2A (para ambos escenarios el rango de año va desde el año 1961 al 2099, sin embargo, como se establece en los objetivos específicos, el intervalo de interés corresponde al rango de años comprendido entre el año 2005 y 2035).

Las estadísticas de los predictandos y los predictores tienen una naturaleza distinta, solicitándose a la DGA, en el caso de los primeros, series diarias de las variables involucradas (ver Anexo II Digital, valores temperatura y precipitación estación Rengo), en cambio, para el caso de los segundos, estas series son descargas desde la página del "Canadian Climate Impacts Scenarios" <<http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi>>, donde luego de seleccionar una grilla definida tanto por la latitud como longitud, se descargan los datos (la cuadrícula correspondiente a la cuenca del río Pangal es la 78X-49Y, ver Figura 4.1).

**FIGURA 4.1: GRILLA HADCM3**



Fuente: <<http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi>>

Determinación Predictores

La temperatura y la precipitación son variables meteorológicas de distinta naturaleza, observándose ya en la construcción del gradiente un comportamiento dispar en función de la altura. Producto de lo anterior, se definen distintas configuraciones para la determinación de las correlaciones entre predictor-predictando, lo cual se observa en la Tabla 4.1.

**TABLA 4.1: CONFIGURACIÓN PREDICTORES**

Option	Temperatura	Precipitación
Datos Negativos	Si	No
Valores Límites	No	0.3
Datos Faltantes	-999	-999
Transformación del Modelo	No	Raíz Cuarta
Inflación Varianza	12	18
Corrección Bias	1	0.8
Proceso	Incondicional	Condicional

Considerando los valores de la Tabla 4.1, junto con las series de datos del NCEP, y las series diarias de la estación Rengo entre el año 1971 y 1990, se llega a los siguientes resultados (ver Tabla 4.2 para correlación entre temperatura Rengo y predictores NCEP, y Tabla 4.3 para correlación entre estos últimos y precipitación en Rengo).

**TABLA 4.2: PREDICTORES TEMPERATURA RENGO**

Predictor	Correlación	Predictor	Correlación
<i>mslp</i>	-0,572	<i>p5zh</i>	-0,053
<i>p_f</i>	0,019	<i>p8_f</i>	-0,207
<i>p_u</i>	-0,017	<i>p8_u</i>	-0,296
<i>p_v</i>	0,379	<i>p8_v</i>	0,197
<i>p_z</i>	-0,095	<i>p8_z</i>	-0,224
<i>p_th</i>	0,140	<i>p850</i>	-0,025
<i>p_zh</i>	0,379	<i>p8th</i>	0,175
<i>p5_f</i>	-0,285	<i>p8zh</i>	0,196
<i>p5_u</i>	-0,176	<i>r500</i>	-0,310
<i>p5_v</i>	-0,056	<i>r850</i>	-0,440
<i>p5_z</i>	0,232	<i>rhum</i>	-0,567
<i>p500</i>	0,663	<i>shum</i>	0,363
<i>p5th</i>	-0.002	<i>temp</i>	0,895

**TABLA 4.3: PREDICTORES PRECIPITACIÓN RENGO**

Predictor	Correlación	Predictor	Correlación
<i>mslp</i>	-0,445	<i>p5zh</i>	-0.135
<i>p_f</i>	0.237	<i>p8_f</i>	0.432
<i>p_u</i>	0.416	<i>p8_u</i>	0.438
<i>p_v</i>	-0.028	<i>p8_v</i>	-0.128
<i>p_z</i>	0.094	<i>p8_z</i>	0,010
<i>p_th</i>	-0.234	<i>p850</i>	-0.492
<i>p_zh</i>	-0.036	<i>p8th</i>	-0.070
<i>p5_f</i>	0.300	<i>p8zh</i>	-0.119
<i>p5_u</i>	0.274	<i>r500</i>	0.345
<i>p5_v</i>	-0.143	<i>r850</i>	0.361
<i>p5_z</i>	-0.048	<i>rhum</i>	0.303
<i>p500</i>	-0.289	<i>shum</i>	0.251
<i>p5th</i>	0.004	<i>temp</i>	-0.012

Previo análisis, es preciso señalar que la correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables aleatorias. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varía sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra.

Una correlación positiva indica que los incrementos en la medida X son igualados por incrementos en la medida Y; una correlación cero sugiere que no existe correlación alguna entre las dos variables; y una correlación negativa indica que a medida que se incrementan los valores de la primera variable, disminuyen los de la segunda (una correlación de 1 significa que existe una correlación positiva perfecta, y una correlación -1 indica una correlación negativa perfecta).

Considerando lo anterior, se define para cada una de las variables meteorológicas un conjunto de 5 predictores, siendo éstos usados para determinar, utilizando el coeficiente  $R^2$ , la mejor calibración posible (los 5 predictores son los que tienen una mayor correlación con respecto al predictando, sea esta negativa o positiva).

- Temperatura: mslp; p500; r850; rhum; temp.
- Precipitación: mslp; p\_u; p8\_f; p8\_u; p850.

#### 4.2.2- CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Determinado los predictores, el siguiente paso es la calibración del modelo tanto para la temperatura como para la precipitación.

##### Calibración Temperatura

Se calibra un modelo para la estimación de series de temperatura, utilizando datos de la estación Rengo entre el año 1971 y el 1990, junto con los predictores escogidos del re-análisis del NCEP.

Los resultados de las calibraciones se presentan en la Tabla 4.4, donde los predictores escogidos son: mslp (1); p500 (2); r850 (3); rhum (4); y temp (5).

**TABLA 4.4: CALIBRACIÓN TEMPERATURA ( $R^2$ )**

Predictores	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
1-2-3-4-5	0.464	0.467	0.563	0.463	0.556	0.579	0.556	0.516	0.557	0.621	0.633	0.524	0.542
1-2-3-4	0.438	0.440	0.550	0.465	0.520	0.542	0.523	0.489	0.537	0.605	0.619	0.519	0.521
1-3-4-5	0.464	0.466	0.557	0.459	0.555	0.579	0.556	0.513	0.552	0.615	0.630	0.505	0.538
1-3-4	0.383	0.372	0.493	0.418	0.470	0.469	0.462	0.366	0.443	0.506	0.548	0.411	0.445
2-5	0.446	0.470	0.557	0.440	0.539	0.565	0.553	0.502	0.550	0.616	0.627	0.517	0.532

De los cálculos de  $R^2$  presentados en la tabla 4.4, se observa que el mayor valor corresponde a una relación considerando los 5 predictores escogidos, sin embargo, al realizar un análisis de sensibilidad de los predictores en SDSM, se concluye que *p500* y *temp* son los predictores que determinan el resultado (el  $R^2$  resultante es prácticamente el mismo que considerando los 5 predictores, y baja de forma sustancial considerando los 3 restantes), por lo que el modelo a utilizar en la modelación es el calibrado con estos dos últimos.

##### Calibración Precipitación

Se calibra un modelo para la estimación de series de precipitación, utilizando datos de la estación Rengo entre el año 1971 y el 1990, junto con los predictores escogidos del re-análisis del NCEP.

Los resultados de las calibraciones se presentan en la Tabla 4.5, donde: mslp (1); p\_u (2); p8\_f (3); p8\_u (4); y p850 (5).

**TABLA 4.5: CALIBRACIÓN PRECIPITACIÓN (R<sup>2</sup>)**

Predictores	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
1-2-3-4-5	1.000	1.000	0.189	0.246	0.456	0.338	0.505	0.271	0.299	0.239	0.306	0.573	0.452
1-2-3-4	1.000	1.000	0.192	0.231	0.422	0.296	0.503	0.254	0.179	0.212	0.317	0.559	0.430
2-3-4-5	1.000	1.000	0.221	0.224	0.342	0.304	0.427	0.257	0.269	0.214	0.314	0.511	0.424
1-2-5	0.967	1.000	0.124	0.218	0.457	0.326	0.505	0.261	0.283	0.231	0.236	0.406	0.418
1-3-5	0.966	1.000	0.124	0.149	0.437	0.343	0.501	0.265	0.288	0.215	0.308	0.393	0.416
1-4-5	0.950	1.000	0.126	0.206	0.452	0.331	0.510	0.249	0.272	0.196	0.273	0.330	0.408
2-3-4	0.550	1.000	0.229	0.202	0.314	0.195	0.371	0.205	0.168	0.206	0.311	0.513	0.355
1-5	0.944	1.000	0.124	0.122	0.412	0.327	0.495	0.237	0.258	0.186	0.174	0.334	0.385

Al igual que la calibración de la temperatura, la mayor correlación se logra considerando la totalidad de los predictores seleccionados, sin embargo, al calibrar con *mslp*, *p\_u*, y *p850*, se tiene un modelo del mismo orden de correlación y con menos parámetros involucrados, por lo que se propone como modelo a utilizar el formulado con estos últimos.

Finalmente, como era de esperarse, la correlación de la temperatura arroja mejores resultados que la correlación de la precipitación, ya que existe en esta última, al momento de realizar el escalamiento, un proceso intermedio entre el forzamiento regional y el clima local, lo que deriva es una disminución del coeficiente de correlación entre el predictando y los predictores.

#### Validación Temperatura

A continuación se presentan los resultados de la validación del modelo calibrado en el periodo comprendido entre el año 1991 y 2001 (ver Tabla 4.6 para datos mensuales en estación Rengo), observándose la existencia de una estrecha relación entre los valores generados y los observados, manteniéndose la tendencia de que en los meses invernales la temperatura es menor, y en los meses estivales la temperatura es mayor (ver Tabla 4.7 para datos mensuales del NCEP).

**TABLA 4.6: VALORES MENSUALES TEMPERATURA RENGO (°C)**

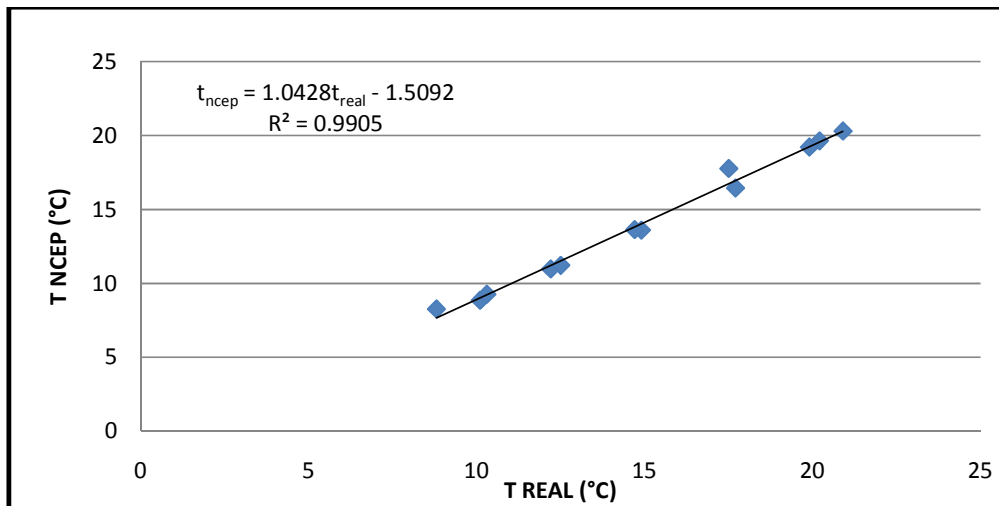
Año/Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
<b>1991</b>	20.6	20.9	6.8	15.5	12.9	10.2	8.5	8.8	12.5	14.3	17.7	18.5
<b>1992</b>	21.5	19.8	19.4	13.9	11.5	8.1	7.2	10.0	11.9	14.3	17.4	19.8
<b>1993</b>	21.8	21.3	20.1	15.0	10.5	10.0	7.5	10.0	11.9	14.9	17.2	19.5
<b>1994</b>	21.3	20.5	18.8	14.9	11.3	10.3	8.6	9.1	13.5	15.1	18.4	20.4
<b>1995</b>	21.3	20.4	18.4	15.5	12.7	10.3	7.7	9.5	12.6	14.3	17.8	21.0
<b>1996</b>	20.3	20.5	18.8	13.6	10.9	8.6	9.9	11.2	12.7	14.8	18.2	19.8
<b>1997</b>	21.0	19.3	17.9	14.5	12.2	9.8	9.9	10.8	12.5	14.1	17.3	19.0
<b>1998</b>	21.1	19.6	17.7	14.2	12.8	9.3	8.0	9.3	11.9	16.2	17.9	20.3
<b>1999</b>	18.3	18.4	16.4	16.1	15.2	13.8	11.7	13.9	15.4	14.8	18.6	20.6
<b>2000</b>	21.7	20.1	18.1	14.6	11.2	10.2	7.9	10.5	11.1	15.7	18.3	20.7
<b>2001</b>	21.1	21.7	20.0	15.5	12.6	10.4	9.5	9.9	11.1	13.3	15.5	18.8
<b>Media</b>	20.9	20.2	17.5	14.9	12.2	10.1	8.8	10.3	12.5	14.7	17.7	19.9
<b>Desviación</b>	1.0	0.9	3.7	0.8	1.3	1.4	1.3	1.4	1.2	0.8	0.8	0.8

**TABLA 4.7: VALIDACIÓN TEMPERATURA RENGÓ (°C)**

Mes	Observada	Desviación Estándar	NCEP	Desviación Estándar	Razón
Enero	20.9	1.0	20.3	0.2	1.03
Febrero	20.2	0.9	19.6	0.5	1.03
Marzo	17.5	3.7	17.7	0.6	0.99
Abril	14.9	0.8	13.6	0.4	1.10
Mayo	12.2	1.3	10.9	1.0	1.12
Junio	10.1	1.4	8.8	0.6	1.15
Julio	8.8	1.3	8.2	0.9	1.07
Agosto	10.3	1.4	9.2	0.5	1.12
Septiembre	12.5	1.2	11.2	0.8	1.12
Octubre	14.7	0.8	13.6	0.6	1.08
Noviembre	17.7	0.8	16.4	0.6	1.08
Diciembre	19.9	0.8	19.2	0.9	1.04
<b>Promedio</b>	14.9	1.2	14.1	0.6	-

Analizando los resultados, se concluye que año a año los valores no sufren grandes modificaciones (se presenta razón entre datos observados y datos generados, observándose una leve sub-estimación de la serie de valores medios mensuales), hecho que se ve justificado por la baja desviación estándar de las series mensuales en el periodo comprendido. Para mayor claridad, se presenta en Figura 4.2 relación entre los datos observados y los datos generados, teniéndose que estos se disponen de forma lineal al momento de ser graficados.

**FIGURA 4.2 VALIDACIÓN TEMPERATURA RENGÓ (°C)**



Validación Precipitación

Se presentan los resultados de la validación del modelo calibrado en el periodo comprendido entre el año 1991 y 2001 (ver Tabla 4.8 para datos mensuales en estación Rengó, Tabla 4.9 para datos mensuales del NCEP, y Figura 4.3 para comparación entre series de temperaturas).

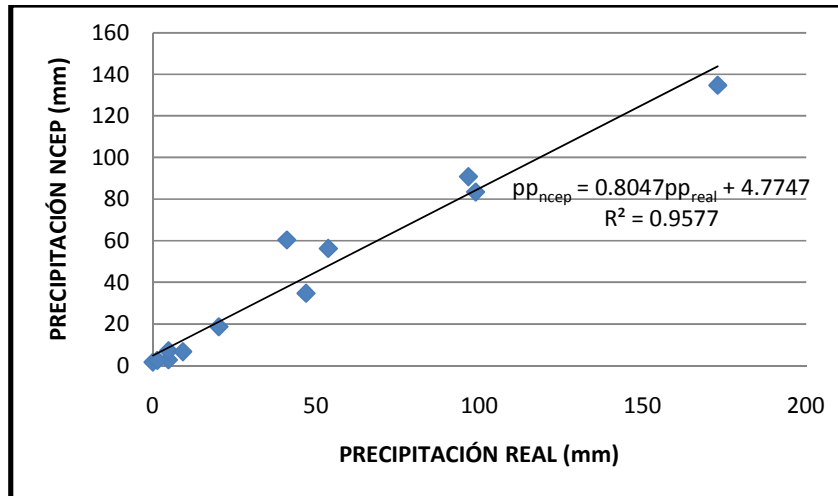
**TABLA 4.8: VALORES MENSUALES PRECIPITACIÓN RENGÓ (mm)**

<b>Año/Mes</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
<b>1991</b>	0	0	0	42.5	102.0	165.3	145.9	19.1	49.2	28.0	-	61.8
<b>1992</b>	0	0.9	5.5	66.0	226.5	279.1	23.2	79.6	29.5	2.0	8	0
<b>1993</b>	0	0	0	45.4	185.0	173.3	99.2	28.9	11.5	27.8	22.2	14.6
<b>1994</b>	0	0	0.2	86.8	86.7	111.6	177.8	11.0	24.7	6.0	0	8.6
<b>1995</b>	0	11.0	0	80.0	1.6	156.9	124.7	49.7	49.7	21.5	0.6	-
<b>1996</b>	-	-	-	-	-	47.3	26.3	83.7	2.5	4.5	1.7	0
<b>1997</b>	0	0	7.0	25.5	107.6	371.4	25.0	110.7	89.6	95.0	19.0	4.2
<b>1998</b>	0	0	0	39.5	21.2	24.5	-	-	29.0	0	-	0
<b>1999</b>	0	0	1.4	5.9	-	-	-	-	-	31.0	-	3.0
<b>2000</b>	0	35.8	0	4.0	11.9	378.1	62.3	3.0	172.6	6.1	1.0	0
<b>2001</b>	0	0	0	14.8	147	21.2	271.3	151.0	11.0	0.4	0	0
<b>Media</b>	0	4.8	1.4	41.0	98.8	172.9	96.6	53.7	46.9	20.2	4.8	9.2
<b>Desviación</b>	0	11.4	2.6	29.4	78.5	132.4	85.8	51.0	50.8	27.6	8.2	19.0

**TABLA 4.9: VALIDACIÓN PRECIPITACIÓN RENGÓ (mm)**

<b>Mes</b>	<b>Observada</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>NCEP</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Razón</b>
Enero	0	0	1.7	0.4	N/A
Febrero	4.8	11.4	2.8	5.2	1.7
Marzo	1.4	2.6	2.6	4.7	0.5
Abril	41	29.4	60.4	62.1	0.7
Mayo	98.8	78.5	83.4	78.1	1.2
Junio	172.9	132.4	134.7	122.3	1.3
Julio	96.6	85.8	90.8	58.5	1.1
Agosto	53.7	51.0	56.3	37.4	1.0
Septiembre	46.9	50.8	34.8	17.2	1.3
Octubre	20.2	27.6	18.7	15.8	1.1
Noviembre	4.8	8.2	7.2	9.6	1.3
Diciembre	9.2	29	6.7	9.5	1.4
<b>Promedio</b>	45.8	42.2	41.6	35.1	-

**FIGURA 4.3: VALIDACIÓN PRECIPITACIÓN RENGÓ (mm)**



Estudiando las series generadas se tiene, a diferencia de la temperatura donde los valores generados y observados son similares, la existencia de una desviación estándar importante de los datos, resultado cuyo origen radica en que la precipitación no se ajusta a una distribución normal a lo largo del tiempo.

Realizada la calibración y validación del modelo, tanto para la temperatura como para la precipitación, es de interés generar las series futuras, para lo cual se utiliza como predictores los establecidos por el modelo HadCM3 para el escenario A2 y B2.

En lo que respecta a la determinación de las series futuras, la principal diferencia radica en la longitud de los años, ya que en el NCEP éste es de 366 días, y en el H3A2A y H3B2A es de 360 días.

Analizando los resultados (ver Tabla 4.10 para valores mensuales de temperatura y Tabla 4.11 para valores mensuales de precipitación), se concluye que los datos son consistentes, observando en los meses de verano una mayor temperatura, y en los meses de invierno una mayor precipitación (para series mensuales generadas ver Anexo Digital III).

**TABLA 4.10: GENERACIÓN SERIES FUTURAS TEMPERATURA (°C)**

Mes	Observada (1991-2001)	A2 (2005-2035)	Desviación Estándar	B2 (2005-2035)	Desviación Estándar
Enero	20.9	23.1	0.4	22.2	0.4
Febrero	20.2	22.5	0.4	21.5	0.5
Marzo	17.5	18.5	0.2	17.5	0.3
Abril	14.9	15.2	0.3	14.9	0.3
Mayo	12.2	11.6	0.4	11.3	0.4
Junio	10.1	8.7	0.5	8.4	0.4
Julio	8.8	9.0	0.6	8.7	0.5
Agosto	10.3	10.5	0.4	10.2	0.3
Septiembre	12.5	13.3	0.6	12.9	0.6
Octubre	14.7	15.1	0.5	14.7	0.6
Noviembre	17.7	19.4	0.6	18.4	0.5
Diciembre	19.9	22.5	0.5	21.5	0.4
<b>Media</b>	14.9	15.8	-	15.2	-



**TABLA 4.11: GENERACIÓN SERIES FUTURAS PRECIPITACIÓN (mm)**

<b>Mes</b>	<b>Observada (1991-2001)</b>	<b>A2 (2005-2035)</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>B2 (2005-2035)</b>	<b>Desviación Estándar</b>
Enero	0	1.28	2.6	1.1	1.1
Febrero	4.8	3.7	9.6	1.8	4.6
Marzo	1.4	8.1	8.2	10.1	12.2
Abril	41	18.6	9.8	19.8	5.8
Mayo	98.8	61.4	40.5	71.3	36.7
Junio	172.9	100.8	54.8	125.2	55.6
Julio	96.6	84.0	40.1	74.2	34.1
Agosto	53.7	60.5	20.9	76.9	31.6
Septiembre	46.9	50.8	16.9	64.2	23.3
Octubre	20.2	23.6	9.6	29.5	14.1
Noviembre	4.8	11.5	8.4	12.5	7.5
Diciembre	9.2	6.0	4.6	4.5	3.4
<b>Total</b>	550.3	430.3	-	491.7	-

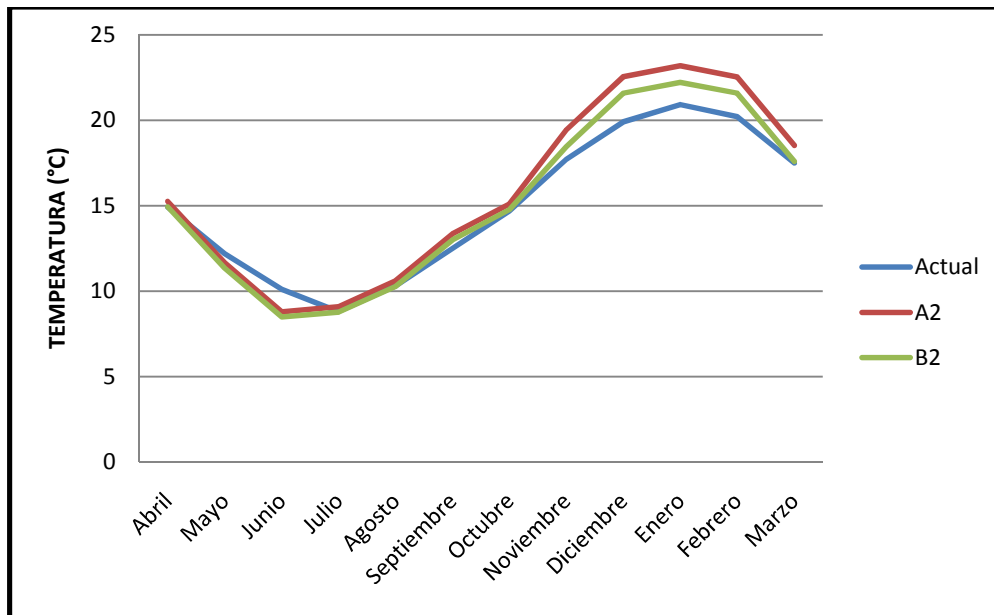
Al igual que la validación, se tiene una desviación estándar mayor en las series mensuales de precipitación que en las series mensuales de temperatura, lo que da cuenta de la variabilidad de los datos.

En lo referente al comportamiento futuro, se tiene un aumento del 5.6% de la temperatura en el escenario A2, y un aumento del 1.9% en el escenario B2, lo que se condice con lo presentado en el IPPC en cuanto a que el escenario A2 es el más severo.

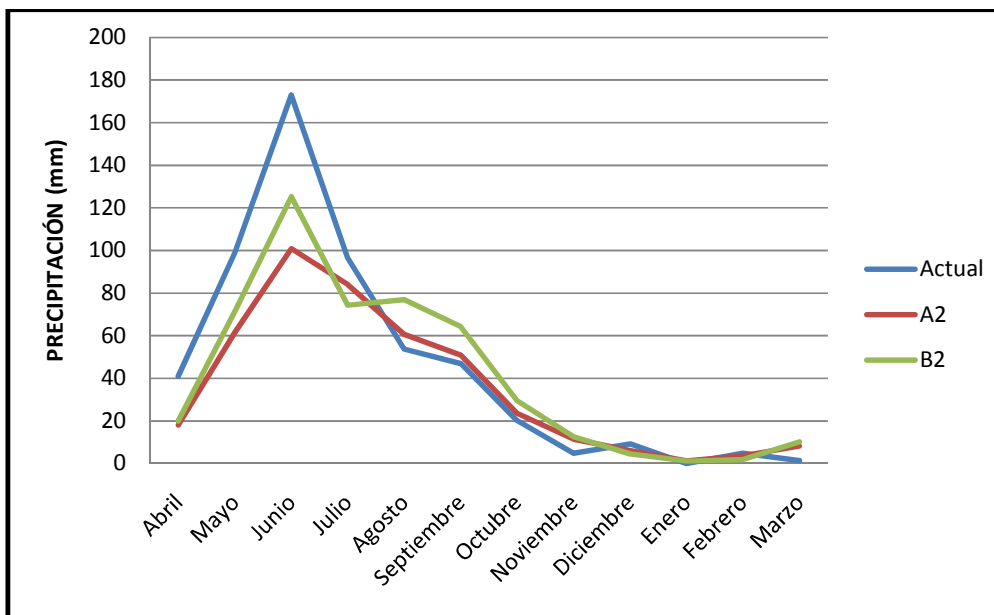
Centrando la atención en la precipitación, se tiene una disminución en el total anual del 21.8% para el escenario A2, y una disminución del 10.6% para el escenario B2, siendo los mayores descensos en los meses invernales (al caer menor precipitación se tiene, a priori, de forma directa una disminución en la cantidad de nieve acumulada, punto no menor al estar en una cuenca de régimen nival ya que los deshielos disminuye de forma directa el aporte de agua al sistema en los meses estivales).

Para un mayor comprensión de los resultados obtenidos, se presenta en la Figura 4.4 y Figura 4.5 comportamiento mensual para ambas variables, así como también las series medias anuales para los datos observados y los escenarios futuros (ver Figura 4.6 y Figura 4.7).

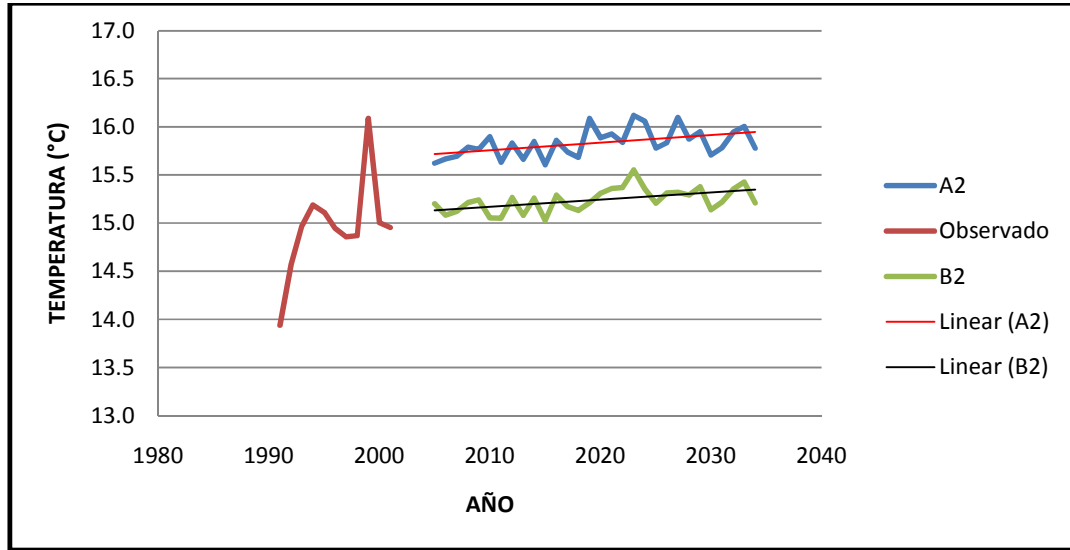
**FIGURA 4.4: COMPORTAMIENTO MENSUAL TEMPERATURA (°C)**



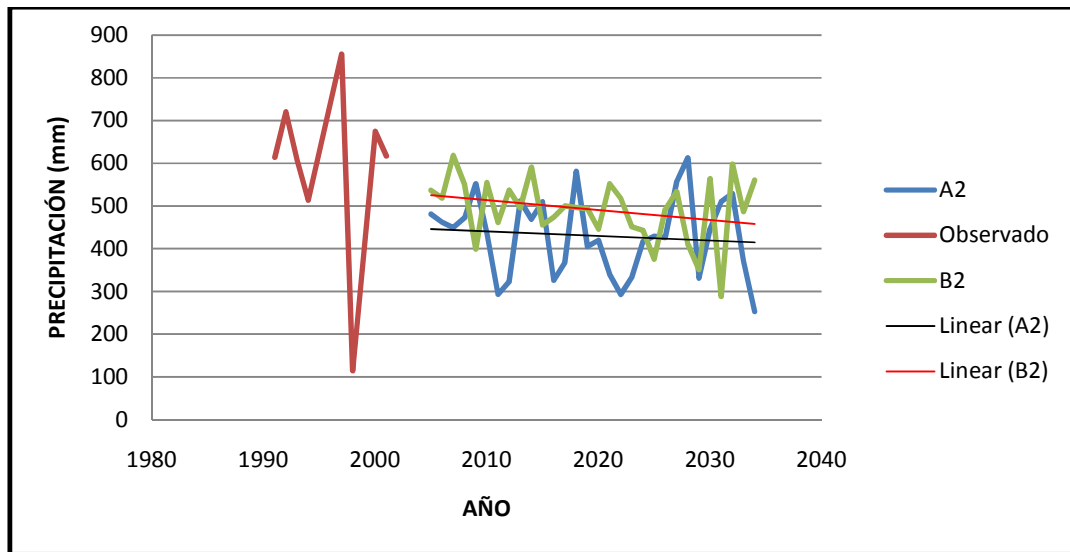
**FIGURA 4.5 COMPORTAMIENTO MENSUAL PRECIPITACIÓN (mm)**



**FIGURA 4.6: TENDENCIA TEMPERATURA ANUAL (°C)**



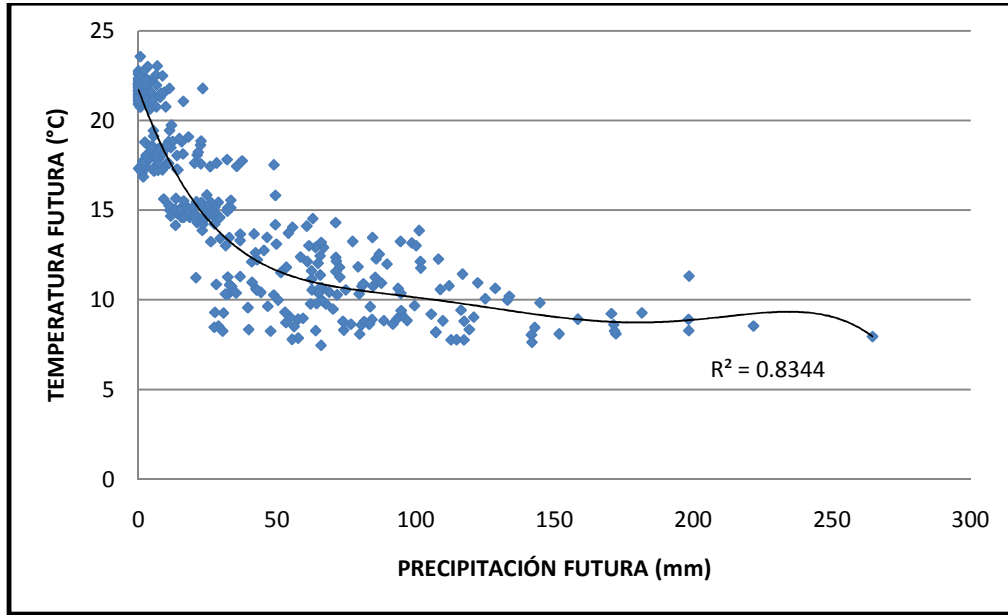
**FIGURA 4.7 TENDENCIA PRECIPITACIÓN ANUAL (mm)**



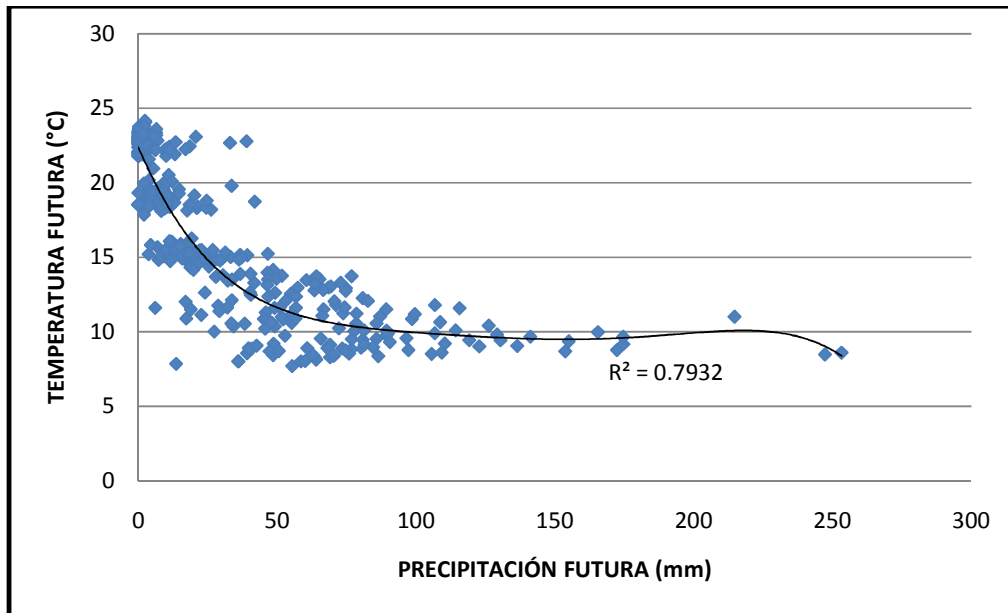
De las Figuras 4.6 y 4.7, se observa la existencia de un aumento sostenido de las temperaturas, y de una disminución en las precipitaciones anuales, teniéndose en el año 1998 una situación especial, ya que se observa una elevada temperatura con un descenso brusco de la precipitación, hecho que tiene su justificación en la importante sequía acontecida en esa fecha.

Finalmente, para verificar la consistencia de los datos generados, se grafica la precipitación mensual futura versus la temperatura mensual futura encontrándose, en promedio, para ambos escenarios al ajustar una relación polinómica un aumento de las precipitaciones a medida que la temperatura disminuye (ver Figura 4.8 para comportamiento en escenario A2, y Figura 4.9 para comportamiento en escenario B2, ajustándose para ambos casos una expresión polinómica presentándose en las Figuras correspondientes el  $R^2$  asociado):

**FIGURA 4.8: RELACIÓN TEMPERATURA – PRECIPITACION A2**



**FIGURA 4.9: RELACIÓN TEMPERATURA – PRECIPITACION B2**



## CAPÍTULO 5: WEAP

### 5.1- INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo, se determinan los caudales futuros entre el año 2005 y 2035 en el río Pangal tanto para el escenario A2 como B2 de cambio climático, para lo cual se requiere calibrar y validar un modelo utilizando los datos observados (se considera para la calibración un periodo de tiempo comprendido entre los años 1987 al 1997, y para la validación un intervalo definido desde el año 1997 al 2004).

Además de los resultados, se presenta un análisis tanto de las variables involucradas como de los parámetros de WEAP, para así cuantificar las variaciones en el resultado al utilizar una u otra configuración.

### 5.2.- MODELO WEAP

Como toda modelación, para poder ser implementada ésta requiere un conjunto de datos de entrada, los que han sido presentados de forma paulatina en los capítulos anteriores. Los antecedentes a utilizar son:

- Bandas de altura.
- Gradientes de precipitación y temperatura.
- Datos de terreno.
- Series futuras precipitación y temperatura escenarios cambio climático.

Considerando los antecedentes disponibles, y recordando del capítulo 2 las distintas formas que WEAP tiene para simular procesos en una cuenca aportante como son: la evapotranspiración, la infiltración y las demandas de riego; se escoge el método de la humedad del suelo para ser utilizado en la estimación de los recursos hídricos futuros (ver Tabla 5.1 para parámetros a calibrar en WEAP).

**TABLA 5.1: PARAMETROS CALIBRACION**

<b>Parámetros a Calibrar</b>
Coeficiente de Cultivo $K_c$
Índice de resistencia a la escorrentía $RRF$
Dirección preferida del flujo $f$
Temperatura de derretimiento $t_i$ °C
Temperatura de congelamiento $t_s$ °C
Estanque superior, Capacidad de Zona de Raíces $z_1$
Estanque superior, Conductividad de Zona de Raíces $k_j$
Estanque inferior, Capacidad del suelo $z_2$
Estanque inferior, Conductividad del suelo $k_{s2}$

De los parámetros usados, la mayoría se calibra dentro del programa en sí, exceptuando el parámetro de coeficiente de cultivo, el cual es función de las actividades desarrolladas

dentro de la cuenca (ver Figura 3.5, desde donde se deriva la exigua actividad agrícola presente en el área de interés).

Centrando la atención en el proceso de la calibración del modelo, no hay que olvidar que este es un proceso iterativo, donde se ingresa en un comienzo series de variables meteorológicas relevantes, junto con el valor estimativo de los parámetros involucrados en la modelación (en este caso, los parámetros hacen referencia a los valores que adoptan los componentes del método de humedad del suelo).

Al momento de realizar el primer cálculo de caudales, se desea ajustar ya sea los caudales pico y/o los caudales base. Si se busca aumentar la respuesta de los caudales máximos, se debe ajustar la escorrentía superficial, la cual se encuentra directamente afectada por parámetros como el índice de resistencia de la escorrentía y la temperatura de derretimiento, los cuales son factores que afectan la reactividad de los catchments (zona de influencia, se definen en WEAP como las componentes que definen una sub-cuenca). Por otro lado, si se requiere afectar los caudales base, se debe ajustar parámetros como la dirección preferida del flujo y la temperatura de congelamiento.

Sin embargo, analizando las expresiones consideradas en el funcionamiento de WEAP, se tiene que la relación entre los diferentes términos involucrados es no-lineal (ver ecuación 2.1), por lo que al afectar un término, se afectan de forma directa los otros, por ejemplo, otro factor de calibración, como lo es la conductividad hidráulica de la zona profunda, puede ser incrementada, aumentando la conductividad, y por tanto la descarga de los estratos profundos, con el consecuente aumento en los caudales base. Por otro lado, si se aumenta la capacidad hídrica del perfil superior, se logra un mayor flujo sub-superficial, lo que genera un aumento de los caudales máximos.

Dependiendo del elemento de caudal que se requiera mejorar (caudal base o máximo), se debe ajustar el o los parámetros correspondientes. Una vez que se han ajustado los factores de calibración necesarios, se realiza la comparación con los datos históricos de la estación existente, en este caso, la estación fluviométrica Pangal en río Pangal (etapa de validación entre los años hidrológicos 1997 al 2004).

Para establecer el grado de correspondencia entre los valores observados y modelados, existe una serie de indicadores de carácter estadístico, dentro de los que se encuentra el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (ver ecuación 5.1), y el sesgo (Bias o desviación relativa de los caudales, ver ecuación 5.2).

$$Nash = 1 - \frac{\sum_i (Q_{obs\_i} - Q_{sim\_i})^2}{\sum_i (Q_{obs\_i} - \overline{Q_{obs}})^2} \quad (5.1)$$

Donde  $Q_{sim\_i}$  es el caudal simulado en el mes  $i$ ,  $Q_{obs\_i}$  es el caudal observado en  $i$ , y  $Q_{obs}$  es el promedio de los caudales observados en el período de análisis.

En lo referente al sesgo, se tiene:

$$Bias = 100 \times \frac{(Q_{sim} - Q_{obs})}{Q_{obs}} \quad (5.2)$$

Donde  $Q_s$  y  $Q_o$  corresponden respectivamente a los caudales generados y observados para cada paso de tiempo definido.

Luego de realizar un primer ajuste de forma visual, se estiman los estadísticos antes mencionados, los cuales sirven para determinar en qué sentido se debe ajustar la calibración en los pasos subsiguientes.

Finalmente, es preciso señalar que el criterio general para interpretar los estadísticos presentados es el siguiente:

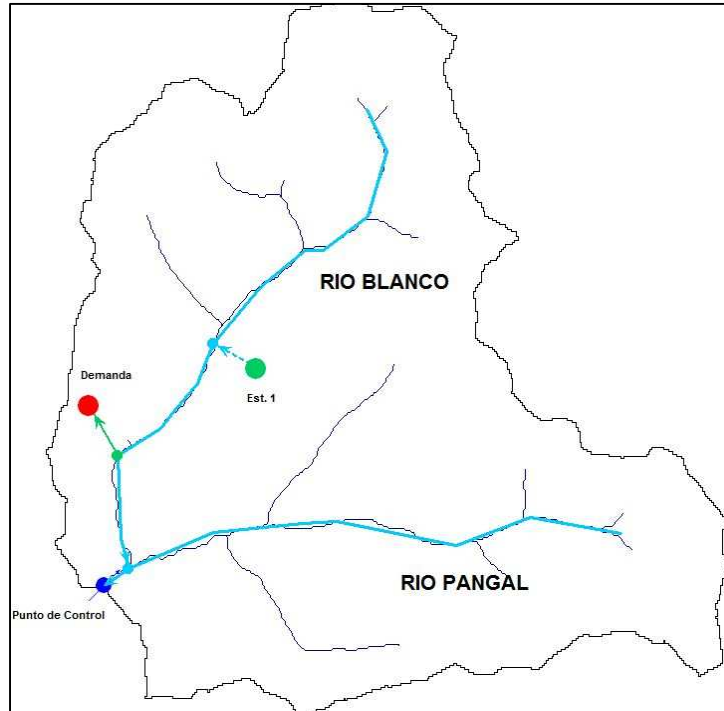
- Coeficiente de Nash- Sutcliffe: valores cercanos a 1 indican una correspondencia entre los datos observados y generados.
- Bias: entre menor el porcentaje de Bias, mejor la correspondencia entre los datos observados y generados. Un Bias positivo indica la sobre estimación y un Bias negativo indica la sub estimación de los caudales.

### **5.3.- IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO**

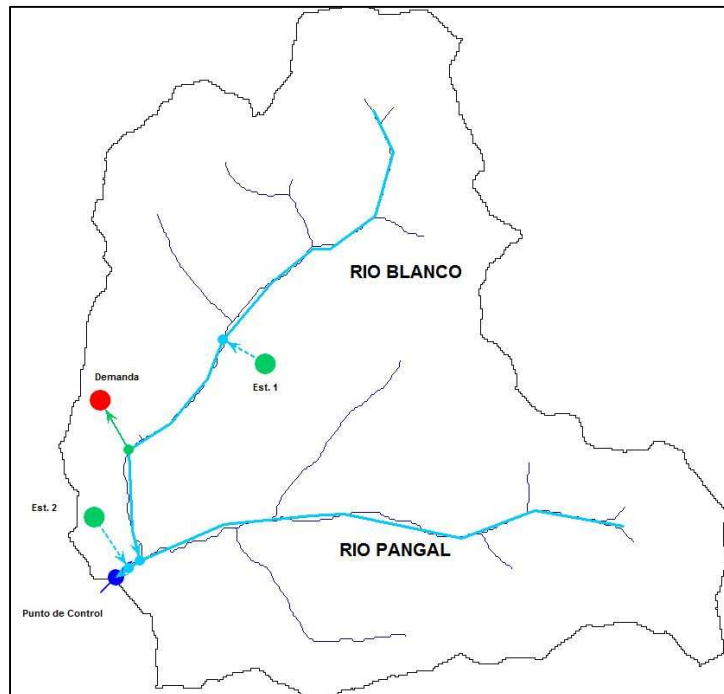
Considerando los antecedentes mencionados en el punto 5.2, se implementa el modelo de la cuenca del río Pangal con punto de control en la estación fluviométrica Pangal en río Pangal, tanto para el escenario compuesto por una banda de altura, como para dos y seis (ver Figura 5.1, 5.2 y 5.3 para esquema generado en WEAP).

En cuanto a la calibración misma, cabe mencionar que el componente clave en la construcción del modelo son los *catchments*, elementos que definen una sub-cuenca, ya que tienen incorporados de forma nativa la estructura de datos que permite ingresar parámetros que van desde el área, pasando por las series meteorológicas de interés, hasta llegar a las propiedades del suelo (para mayor detalle ver Tutorial de WEAP en <<http://www.weap21.org>>, donde se presenta metodología general para la elaboración de un escenario).

**FIGURA 5.1: MODELO 1 BANDA PANGAL EN PANGAL**

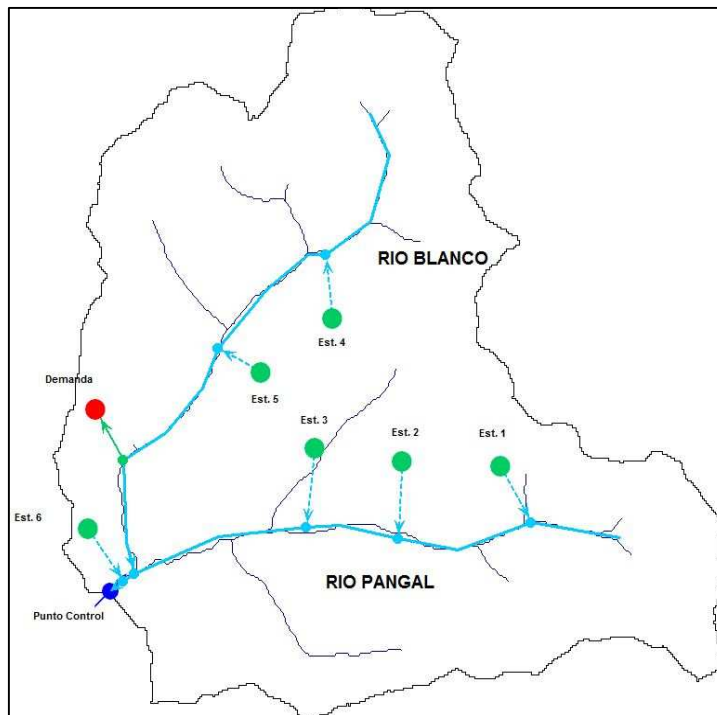


**FIGURA 5.2: MODELO 2 BANDAS PANGAL EN PANGAL**





**FIGURA 5.3: MODELO 6 BANDAS PANGAL EN PANGAL**



Donde los nodos verdes mostrados en las Figuras 5.1 a 5.3 corresponden a los catchments, el nodo rojo corresponde a la extracción minera en el río Blanco, y el nodo azul al punto de control fluviométrico en la estación Pangal en Pangal.

#### 5.4.- CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Construidos los 3 escenarios (modelo de 1 banda, modelo de 2 bandas, y modelo de 6 bandas), se calibra un modelo para la cuenca en estudio, considerándose como punto de inicio los valores de los parámetros del método de humedad de suelo adoptados por Lagos (2009), y Mardones (2009), para las cuencas del río Yeso y Elqui en Algarrobal respectivamente (ver Tabla 5.2 para valores de calibración empleados en las modelaciones antes mencionadas).

**TABLA 5.2: VALORES PARAMETROS DE CALIBRACION INICIAL**

Parámetros a Calibrar	Yeso	Elqui en Algarrobal
Coefficiente de Cultivo $K_c$	0.1	0-0.8
Índice de resistencia a la escorrentía $RRF$	-	0.8-2.1
Dirección preferida del flujo $f$	0.53	0.6-0.8
Temperatura de derretimiento $t_1$ °C	9	12.35
Temperatura de congelamiento $t_s$ °C	-3	3.4
Estanque superior, Capacidad de Zona de Raíces $z_1$	-	1,307-2,824
Estanque superior, Conductividad de Zona de Raíces $k_j$	-	700
Estanque inferior, Capacidad del suelo $z_2$	-	4,800
Estanque inferior, Conductividad del suelo $k_{s2}$	-	300

Producto de la flexibilidad que permite una cuenca dividida en 6 bandas, se calibrará para este escenario, estudiándose de forma posterior como varían los resultados en una cuenca con una menor cantidad de sub-cuencas, haciendo uso de los valores ya fijos producto de la calibración y posterior validación (una y dos bandas de altura).

#### 5.4.1- CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN 6 BANDAS

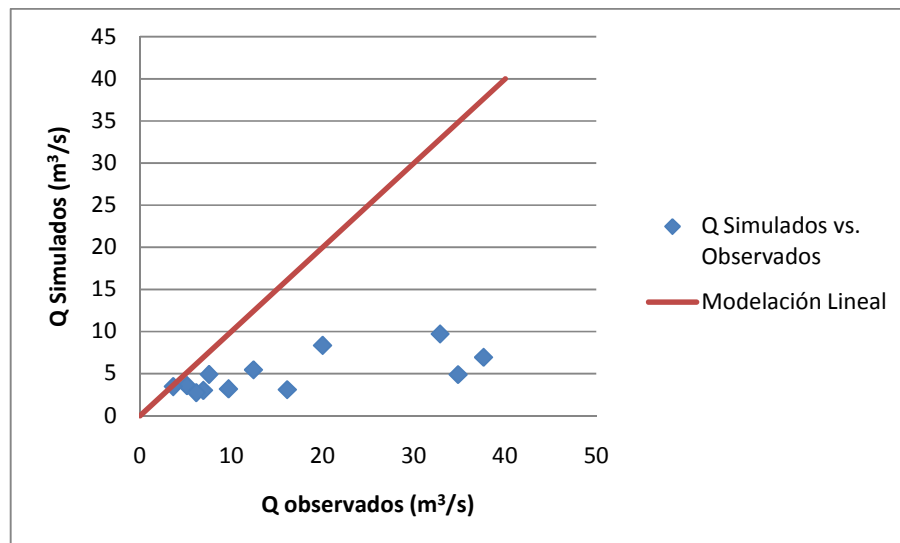
Utilizando los gradientes calculados en el punto 3.2.3, se calibra un modelo con el menor gradiente de precipitación, considerando para todos los efectos un gradiente de temperatura constante para invierno de  $-0.007^{\circ}\text{C}/\text{m}$ , y un gradiente de temperatura constante para verano de  $-0.009^{\circ}\text{C}/\text{m}$  (ver Tabla 5.3 para resultados de calibración).

**TABLA 5.3: CALIBRACIÓN PANGAL  $\Delta\text{PP}/\Delta\text{Z}=0.015 \text{ mm}/\text{m}$**

	Q Observado ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Q Modelado ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	BIAS (%)
Abril	7.54	4.89	-35.59
Mayo	5.11	3.57	-30.15
Junio	3.61	3.45	-4.40
Julio	6.92	2.99	-56.76
Agosto	6.14	2.73	-55.56
Septiembre	9.67	3.17	-67.28
Octubre	16.11	3.08	-80.89
Noviembre	34.84	4.87	-86.03
Diciembre	37.63	6.93	-81.58
Enero	32.87	9.70	-70.50
Febrero	19.98	8.35	-58.19
Marzo	12.41	5.44	-56.16
<b>Promedio</b>	<b>16.1</b>	<b>4.9</b>	<b>-</b>

Observado los resultados de la primera calibración realizada, se concluye que falta agua en el sistema, ya que los caudales en todo el período se ven sub-dimensionados, siendo el mes crítico Noviembre, presentándose un descenso de caudales desde unos  $34.84 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $4.87 \text{ m}^3/\text{s}$  (ver Figura 5.4 para comparación entre caudales observados y generados).

**FIGURA 5.4: CALIBRACIÓN PANGAL  $\Delta\text{PP}/\Delta\text{Z}=0.015 \text{ mm}/\text{m}$**



Producto de la escasez de agua que se tiene en el modelo, se decide trabajar con un mayor gradiente de precipitación, hecho que aumenta de forma directa los caudales en todo el periodo, ya que al aumentar esta componente meteorológica, aumenta tanto la escorrentía

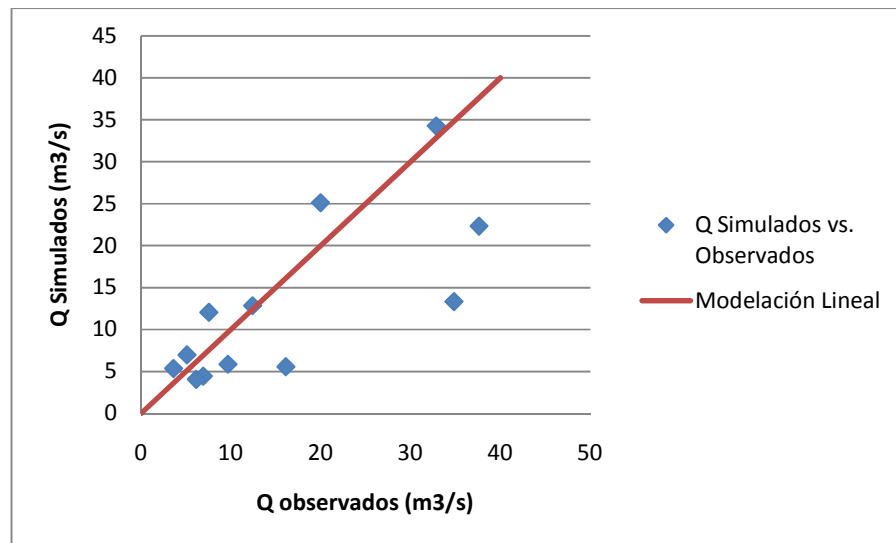
como la nieve acumulada (se mantiene el gradiente de temperatura constante, en caso que ambos gradientes sufran modificaciones esta conclusión no es directa). A continuación, en la Tabla 5.4, se presenta resultados en el escenario de estudio utilizando un gradiente de precipitaciones de 0.085 mm/m (la razón entre este gradiente y el de 0.015 mm/m es de 5.6, valor que indica el ostensible aumento del nuevo gradiente, influenciando de forma directa el agua caída en las distintas sub-cuencas definidas).

**TABLA 5.4: CALIBRACIÓN PANGAL  $\Delta PP/\Delta Z=0.085$  mm/m**

	Q Observado (m <sup>3</sup> /s)	Q Modelado (m <sup>3</sup> /s)	BIAS (%)
Abril	7.54	12.05	59.76
Mayo	5.11	6.98	36.59
Junio	3.61	5.36	48.44
Julio	6.92	4.44	-35.73
Agosto	6.14	4.06	-33.89
Septiembre	9.67	5.87	-39.34
Octubre	16.11	5.58	-65.33
Noviembre	34.84	13.32	-61.77
Diciembre	37.63	22.32	-40.68
Enero	32.87	34.25	4.19
Febrero	19.98	25.11	25.69
Marzo	12.41	12.84	3.46
<b>Promedio</b>	<b>16.1</b>	<b>12.6</b>	-

Graficando los datos para entender de mejor forma el comportamiento entre caudales observados y generados, se llega a lo presentado en la Figura 5.5.

**FIGURA 5.5: CALIBRACIÓN PANGAL  $\Delta PP/\Delta Z=0.085$  mm/m**



Comparando los resultados de esta última calibración con la inicial, se observa una mejora sustancial en la relación entre los caudales generados y observados, sin embargo, al determinar el coeficiente de Nash, se llega a que este sólo alcanza un valor de 0.36, cifra muy por debajo para ser aceptado como correcto (Mardones (2009), llegó a un coeficiente de Nash de 0.70 en la calibración y un 0.69 en la validación).

Para identificar que variable es la que genera el error en la calibración, se determina la relación a escala mensual entre el caudal simulado y la precipitación caída, llegando como se deduce en la Tabla 5.5, a que en todos los meses se tiene un volumen de agua caída mayor que el transportado por el río Pangal y Blanco en conjunto.

**TABLA 5.5: RELACIÓN Q SIMULADO VS PRECIPITACIÓN (m<sup>3</sup>/mes)**

	<b>Volumen Ríos</b>	<b>Volumen Agua Caída</b>	<b>Razón Q/PP</b>
Abril	31845567	133800289	0.2
Mayo	19024047	145484436	0.1
Junio	13899533	153532476	0.1
Julio	11520915	166519086	0.1
Agosto	10528340	149555490	0.1
Septiembre	15211691	125813772	0.1
Octubre	14475567	122019696	0.1
Noviembre	34528489	115628298	0.3
Diciembre	57854831	116062056	0.5
Enero	88764796	113469960	0.8
Febrero	65079534	114473352	0.6
Marzo	31446301	116553300	0.3

Considerando lo presentado en la Tabla 5.5, se concluye que el gradiente de temperatura es erróneo, las temperaturas resultan ser muy bajas tanto temporal como espacialmente, por lo que gran parte del volumen de agua se acumula como nieve no siendo capaz de ser derretida por las bajas temperaturas existentes.

Dado el escenario presente, se varía en un inicio los parámetros del método de humedad de suelo, no llegando a calibrar de forma aceptable los caudales (se mantiene el déficit de agua en todo el año hidrológico, junto con coeficientes de Nash del orden de 0.5). Producto de la invariabilidad del comportamiento de los caudales generados, se analiza tanto las temperaturas de derretimiento como de congelamiento, llegando a temperaturas menores de 0°C de derretimiento para tener un aumento notorio de los caudales (no tiene sentido físico el considerar esta temperatura, ya que a ese orden de magnitud el agua comienza a congelarse).

Producto de la imposibilidad de calibrar un modelo considerando de forma exclusiva los parámetros asociados a WEAP, se realiza un estudio de los gradientes de temperatura tanto para verano como invierno, hecho que se ve respaldado en que los gradientes construidos son válidos de forma exclusiva en un rango de elevaciones (considerando los gradientes construidos, se lleva a valores medios mensuales de temperatura en Enero de 0°C).

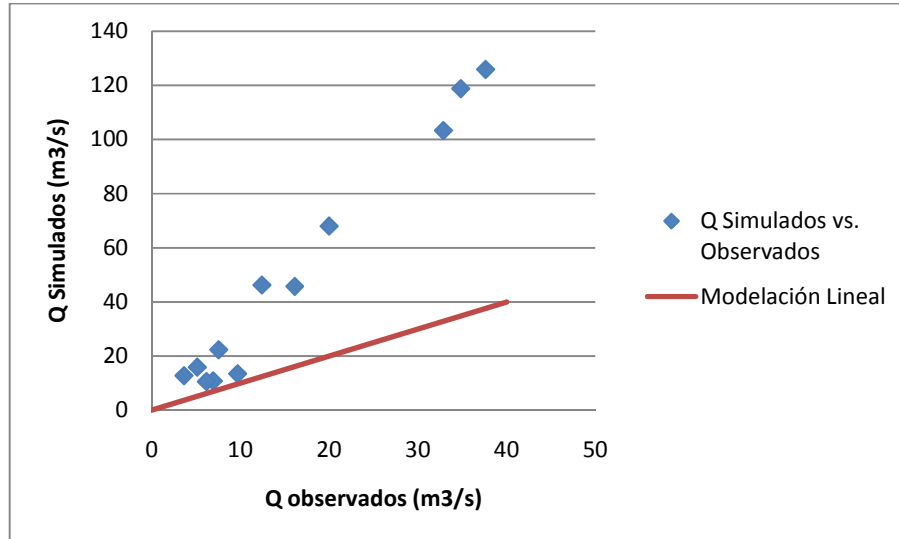
Assumiendo un gradiente constante de temperatura de -0.006 °C/m para invierno, y un gradiente constante de temperatura de -0.005°C/m para verano, se llega, utilizando un gradiente de precipitación de 0.085 mm/m, a los resultados presentados en la Tabla 5.6.

**TABLA 5.6: SEGUNDA CALIBRACIÓN PANGAL  $\Delta PP/\Delta Z=0.085$  mm/m**

	<b>Q Observado (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q Modelado (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>BIAS (%)</b>
Abril	7.54	22.37	196.51
Mayo	5.11	15.94	212.10
Junio	3.61	12.79	253.94
Julio	6.92	10.82	56.45
Agosto	6.14	10.58	72.17
Septiembre	9.67	13.49	29.48
Octubre	16.11	45.75	183.99
Noviembre	34.84	118.77	240.87
Diciembre	37.63	125.83	234.38
Enero	32.87	103.27	214.18
Febrero	19.98	68.04	240.62
Marzo	12.41	46.24	272.50
<b>Promedio</b>	<b>16.1</b>	<b>49.4</b>	-

Graficando los resultados de la Tabla 5.6, se observa una sobre-estimación de los caudales generados respecto a los observados, acontecimiento que indica que, a diferencia de los gradientes de temperatura antes empleados, está sobrando agua en el escenario (ver Figura 5.6).

**FIGURA 5.6: SEGUNDA CALIBRACIÓN PANGAL  $\Delta PP/\Delta Z=0.085$  mm/m**

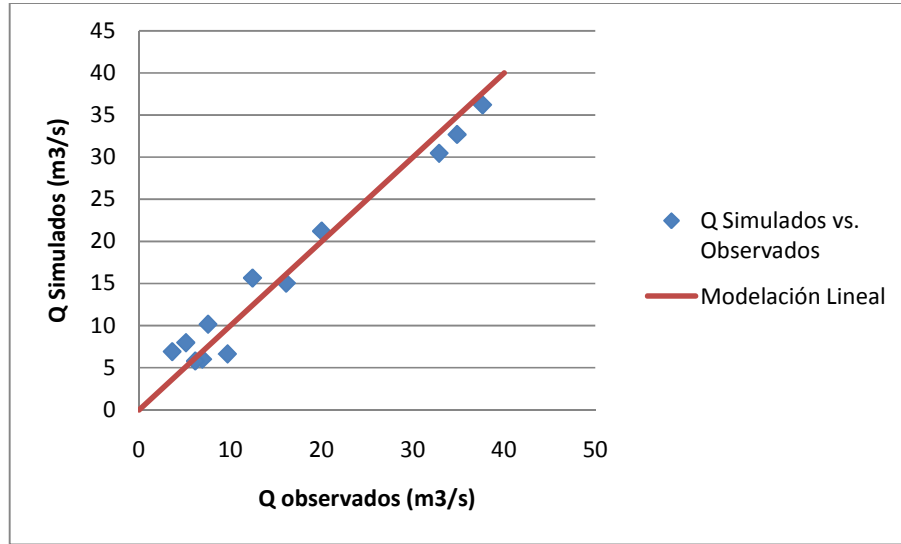


Producto de los resultados, se genera un nuevo modelo utilizando los nuevos gradientes de temperatura, junto con el gradiente de precipitación mínimo construido el cual está dado por 0.015 mm/m, llegando finalmente a constatar una estrecha relación entre los caudales observados y generados, siendo el coeficiente de Nash asociado de 0.82, el cual es un valor ostensiblemente mayor que al antes calculado de 0.36 (ver Tabla 5.7 para valores de los caudales respectivos, Figura 5.7 para relación entre los caudales, y Figura 5.8 para variación mensual de los caudales involucrados).

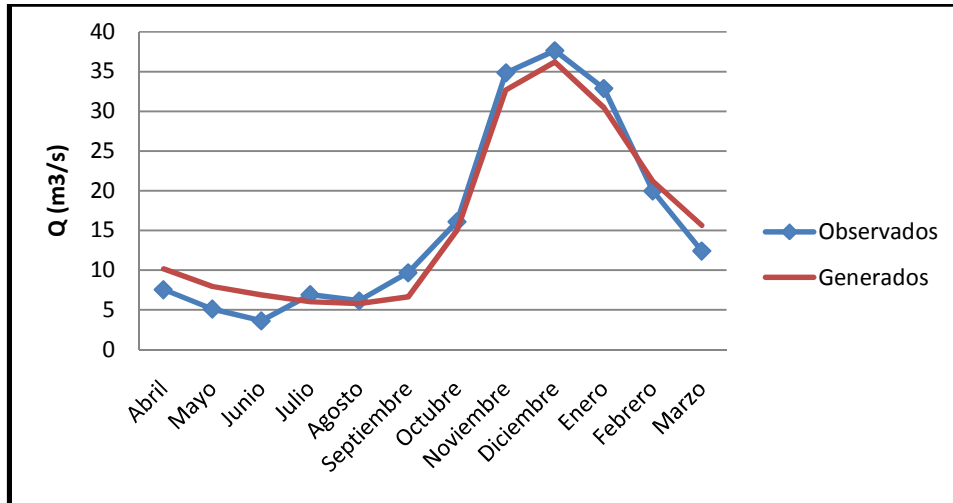
**TABLA 5.7: SEGUNDA CALIBRACIÓN PANGAL  $\Delta PP/\Delta Z=0.015$  mm/m**

	Q Observado (m³/s)	Desviación Estándar (m³/s)	Q Modelado (m³/s)	Desviación Estándar (m³/s)	BIAS (%)
Abril	7.54	2.84	10.15	1.57	34.49
Mayo	5.11	1.98	7.95	1.01	55.61
Junio	3.61	2.50	6.90	0.84	91.01
Julio	6.92	5.62	6.01	0.84	-13.09
Agosto	6.14	2.96	5.77	0.85	-6.05
Septiembre	9.67	5.18	6.62	1.02	-31.58
Octubre	16.11	8.32	15.03	4.81	-6.72
Noviembre	34.84	13.02	32.68	9.86	-6.20
Diciembre	37.63	13.74	36.19	5.15	-3.83
Enero	32.87	12.98	30.45	5.33	-7.36
Febrero	19.98	5.12	21.20	2.59	6.15
Marzo	12.41	2.95	15.63	3.39	25.91
<b>Promedio</b>	<b>16.1</b>	<b>6.43</b>	<b>16.2</b>	<b>3.10</b>	<b>11.53</b>

**FIGURA 5.7: SEGUNDA CALIBRACIÓN PANGAL  $\Delta PP/\Delta Z=0.015$  mm/m**



**FIGURA 5.8: CAUDALES MENSUALES CALIBRACIÓN 6 BANDAS**

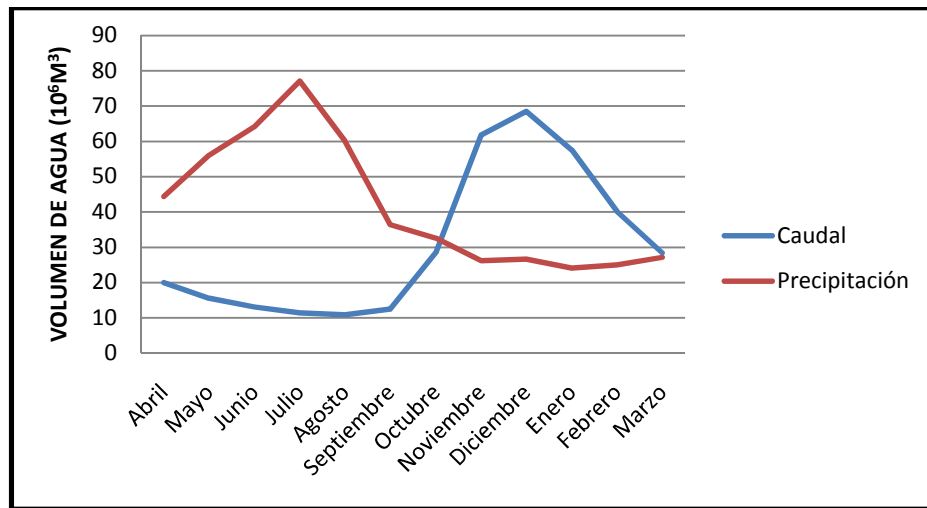


Para verificar la coherencia del modelo calibrado, se recurre al balance hídrico de la cuenca, calculando la razón a escala mensual entre el volumen de agua registrado en la estación Pangal en río Pangal, y la precipitación caída en toda la cuenca, observándose a diferencia de lo encontrado en la Tabla 5.5, una alternancia entre los dos volúmenes, lo que responde a que en los meses invernales precipita una mayor cantidad de agua la que, producto de la temperatura reinante, se almacena como nieve, y en verano un mayor caudal, hecho que es resultado directo del derretimiento de ésta última (ver Figura 5.9 para variación mensual y Tabla 5.8 para razón entre volúmenes, donde se tiene un mínimo de 0.1 en el mes de Julio, y un máximo de 3.6 en Diciembre)

**TABLA 5.8: SEGUNDA RELACIÓN Q SIMULADO VS PRECIPITACIÓN (m<sup>3</sup>/mes)**

	<b>Q Modelado</b>	<b>PP Modelado</b>	<b>Razón Q/PP</b>
Abril	19959909	44379858	0.4
Mayo	15546221	56064005	0.3
Junio	13056487	64112045	0.2
Julio	11373732	77098655	0.1
Agosto	10922421	60135059	0.2
Septiembre	12524501	36393341	0.3
Octubre	28434739	32599262	0.9
Noviembre	61836925	26207567	2.4
Diciembre	68475760	26641625	2.6
Enero	57616876	24049529	2.4
Febrero	40122628	25052921	1.6
Marzo	28473524	27132869	1.0

**FIGURA 5.9: COMPORTAMIENTO VOLÚMENES DE AGUA A ESCALA MENSUAL**

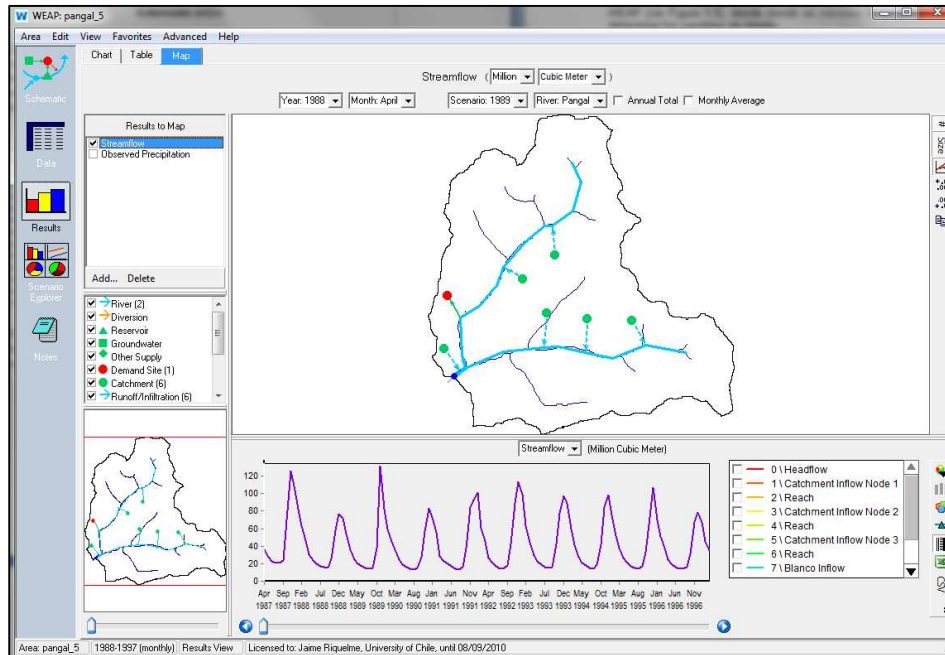


Finalmente, verificado que el modelo es consistente tanto en la estimación de los caudales generados como en los volúmenes de agua involucrados en el sistema, se presenta en la Tabla 5.9 valores de los parámetros del método de humedad de suelo considerados, existiendo variaciones mensuales tanto en el índice de resistencia a la escorrentía, como en el coeficiente de cultivo. Además, en la Figura 5.10, se adjunta captura del entorno de trabajo de WEAP, contemplándose la cuenca con sus 6 estaciones, junto con el gráfico de caudales mensuales en el punto de control en el costado inferior.

**TABLA 5.9: PARÁMETROS FINALES CALIBRACIÓN (m<sup>3</sup>/mes)**

<b>Parámetros a Calibrar</b>	<b>Pangal en río Pangal</b>
Coeficiente de Cultivo $K_c$	0-0.1
Índice de resistencia a la escorrentía $RRF$	1-1,1
Dirección preferida del flujo $f$	0.63
Temperatura de derretimiento $t_1$ °C	10
Temperatura de congelamiento $t_s$ °C	-2
Estanque superior, Capacidad de Zona de Raíces $z_1$	580
Estanque superior, Conductividad de Zona de Raíces $k_j$	850
Estanque inferior, Capacidad del suelo $z_2$	3,100
Estanque inferior, Conductividad del suelo $k_{s2}$	400

**FIGURA 5.10: INTERFAZ WEAP**



Calibrado el modelo, el siguiente paso es la validación de éste, utilizando para tales efectos los parámetros presentados en la Tabla 5.9, junto con los gradientes diferenciales definidos de 0.015 mm/m para la precipitación, de -0.006 °C/m para la temperatura en invierno, y de -0.005 °C/m para la temperatura en verano

Generadas e introduciendo en los catchments correspondientes las series de precipitación y temperatura respectivas para el periodo comprendido entre el año 1999 y el 2004 (el año 1998 fue excluido del análisis producto de la severa sequía acontecida en ese año), se llegó finalmente al ejecutar el modelo a un coeficiente de Nash de 0.70, valor inferior al de la calibración, sin embargo del orden del establecido en otros trabajos de la misma índole (Mardones, 2009). En cuanto a los resultados obtenidos, estos se presentan en la Tabla 5.10, apreciándose una sub-estimación de los caudales en los meses de invierno, y una sobre-estimación en los meses de verano.

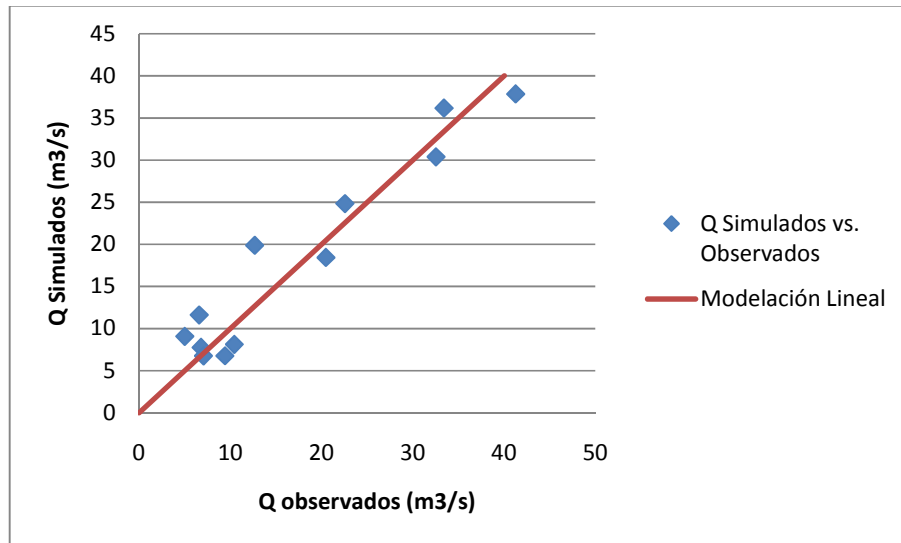
**TABLA 5.10: RESULTADOS VALIDACIÓN (m<sup>3</sup>/mes)**

	<b>Q Observado (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Desviación Estándar (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q Modelado (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Desviación Estándar (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>BIAS (%)</b>
Abril	6.59	2.32	11.59	1.67	75.97
Mayo	5.02	2.20	9.04	1.38	80.15
Junio	6.79	2.61	7.74	1.26	13.99
Julio	7.06	2.50	6.73	1.12	-4.62
Agosto	9.41	4.93	6.74	1.52	-28.33
Septiembre	10.44	2.27	8.09	2.29	-22.54
Octubre	20.47	4.45	18.42	5.09	-10.01
Noviembre	32.53	5.46	30.37	9.60	-6.66
Diciembre	41.26	14.84	37.85	4.65	-8.25
Enero	33.41	13.84	36.17	7.47	8.29
Febrero	22.56	7.69	24.83	4.79	10.09
Marzo	12.67	3.88	19.86	7.08	56.81
<b>Promedio</b>	<b>17.35</b>	<b>5.59</b>	<b>18.12</b>	<b>3.99</b>	<b>-</b>

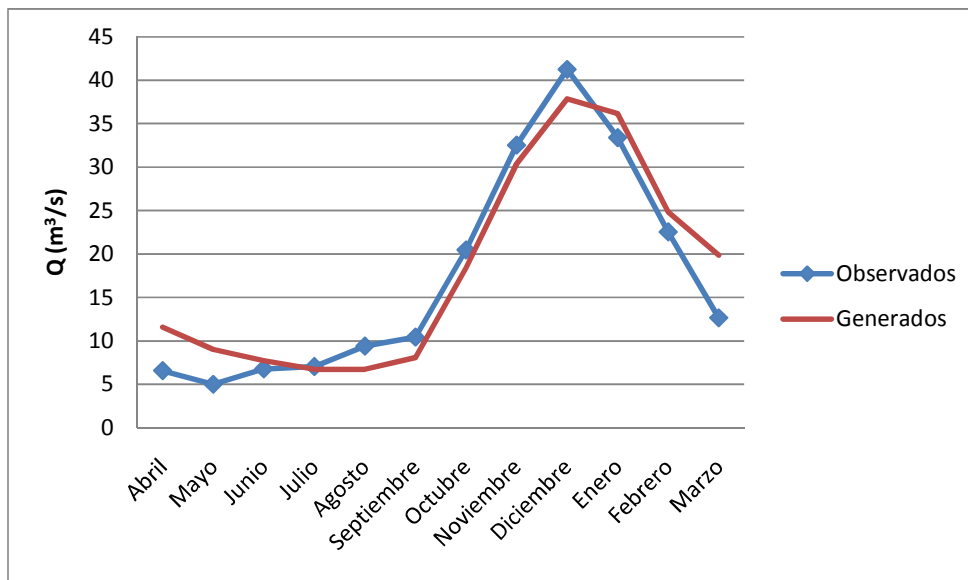


Graficando la correlación existente entre los caudales observados y generados (ver Figura 5.11), y los caudales mensuales (ver Figura 5.12), se concluye que el modelo representa de buena forma la cuenca del río Pangal frente a eventos de precipitación.

**FIGURA 5.11: CORRELACIÓN CAUDALES OBSERVADOS Y GENERADOS**



**FIGURA 5.12: CAUDALES MENSUALES VALIDACIÓN**



Calibrado y validado el modelo para una cuenca dividida en 6 bandas, a continuación se determina la respuesta que ésta ofrece siendo dividida tanto en una como en dos bandas de altura.

## 5.4.2- ANALISIS 1 BANDA

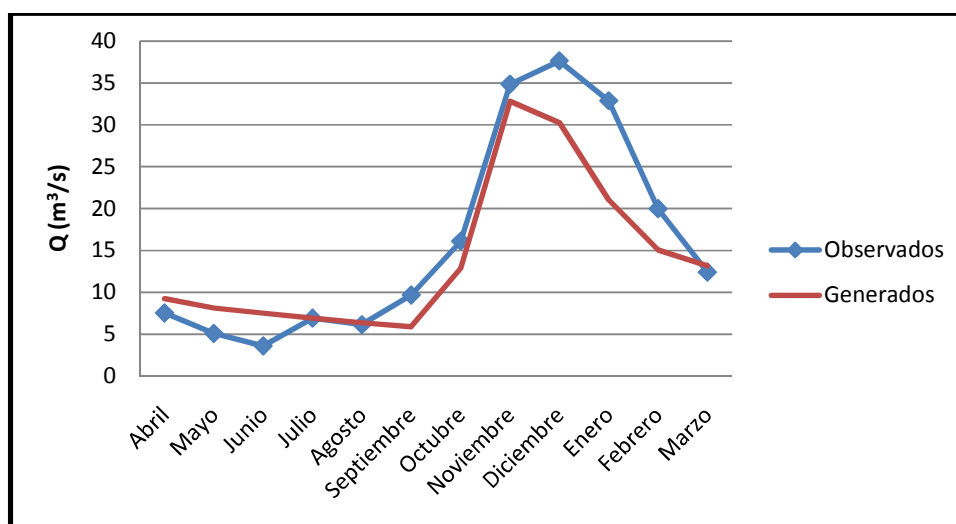
Utilizando tanto los gradientes como los parámetros del modelo calibrado y validado en el punto 5.4.1, se determinan los caudales en el periodo de calibración considerando de forma exclusiva una única banda de altura que represente a la cuenca (intervalo de análisis desde el año 1987 al 1997), llegando a una reducción del coeficiente de Nash comparado con el modelo de 6 bandas, pasando desde un 0.82 de éste último, a un valor de 0.67. A modo de resumen, se presenta en Tabla 5.11 caudales medios mensuales observados y modelados, junto con la respectiva desviación estándar mensual de los datos.

**TABLA 5.11: CALIBRACIÓN 1 BANDA  $\Delta PP/\Delta Z=0.015$  mm/m**

	Q Observado (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q Modelado (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	BIAS (%)
Abril	7.54	2.84	9.23	2.39	22.37
Mayo	5.11	1.98	8.12	2.34	58.98
Junio	3.61	2.50	7.53	2.22	108.38
Julio	6.92	5.62	6.89	2.11	-0.31
Agosto	6.14	2.96	6.37	1.99	3.65
Septiembre	9.67	5.18	5.91	1.86	-38.88
Octubre	16.11	8.32	12.87	4.56	-20.13
Noviembre	34.84	13.02	32.80	13.04	-5.85
Diciembre	37.63	13.74	30.26	4.10	-19.59
Enero	32.87	12.98	21.02	5.52	-36.03
Febrero	19.98	5.12	15.07	2.45	-24.58
Marzo	12.41	2.95	13.16	2.41	5.97
<b>Promedio</b>	<b>16.07</b>	<b>6.43</b>	<b>14.10</b>	<b>4.00</b>	-

Graficando los caudales de la Tabla 5.11, se observa una clara disminución de los caudales en los meses de verano, siendo el mes más crítico Enero, con un descenso de un 36.03% con respecto al escenario base (ver Figura 5.13).

**FIGURA 5.13: CAUDALES MENSUALES CALIBRACIÓN 1 BANDA**

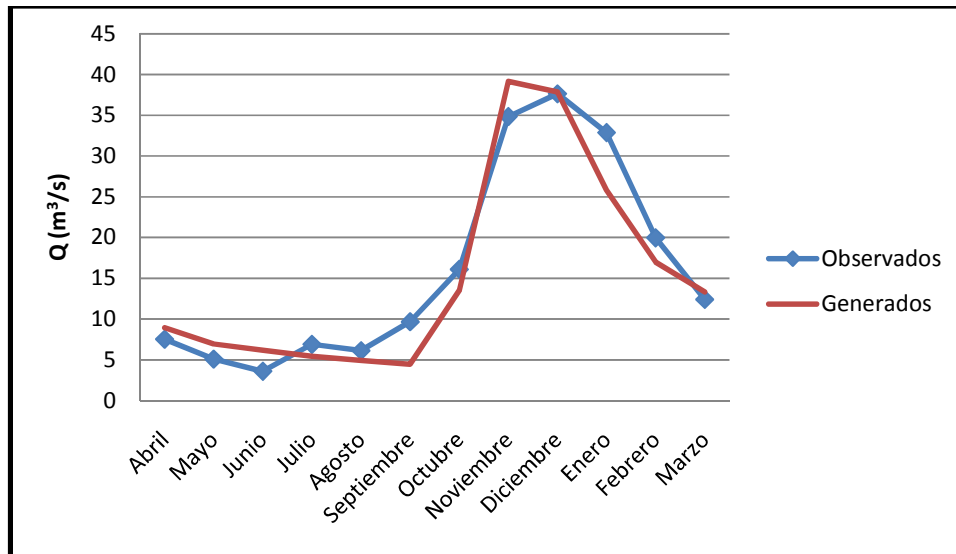


Producto de la subestimación de los caudales mensuales en el período estival, falta de agua en el sistema, es necesario recalibrar el modelo aumentando el gradiente de precipitación desde un 0.015 mm/m a un 0.016 mm/m, elevándose de esta forma el coeficiente de Nash a 0.78, siendo éste valor comparable al determinado en el modelo de 6 bandas (ver Tabla 5.12 para resultados y Figura 5.14 para caudales medios mensuales).

**TABLA 5.12: SEGUNDA CALIBRACIÓN 1 BANDA  $\Delta PP/\Delta Z=0.015$  mm/m**

	Q Observado (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q Modelado (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	BIAS (%)
Abril	7.54	2.84	8.96	0.83	18.73
Mayo	5.11	1.98	6.97	0.64	36.47
Junio	3.61	2.50	6.18	1.01	70.94
Julio	6.92	5.62	5.44	0.88	-21.31
Agosto	6.14	2.96	4.91	0.78	-20.04
Septiembre	9.67	5.18	4.50	0.70	-53.48
Octubre	16.11	8.32	13.55	4.68	-15.87
Noviembre	34.84	13.02	39.14	11.46	12.35
Diciembre	37.63	13.74	37.86	6.46	0.62
Enero	32.87	12.98	25.83	4.60	-21.43
Febrero	19.98	5.12	17.00	1.93	-14.90
Marzo	12.41	2.95	13.32	2.50	7.29
<b>Promedio</b>	<b>16.07</b>	<b>6.43</b>	<b>15.31</b>	<b>30.04</b>	-

**FIGURA 5.14: CAUDALES MENSUALES SEGUNDA CALIBRACIÓN, 1 BANDA**



Comparando la Figura 5.14 con la Figura 5.8, se concluye que, aún cuando los coeficientes de Nash son prácticamente iguales, existe una diferencia sustancial en el comportamiento hídrico de la cuenca, ya que en el modelo de 1 banda la respuesta frente al derretimiento de nieve es más temprana, desplazándose el caudal peak desde el mes de Diciembre al mes de Noviembre, junto con disminuir de forma importante los caudales medios mensuales en Enero y en Febrero (de un -7.36% de variación se pasa a un -21.43%, y de un -6.15% se llega a un -14.90% respectivamente).

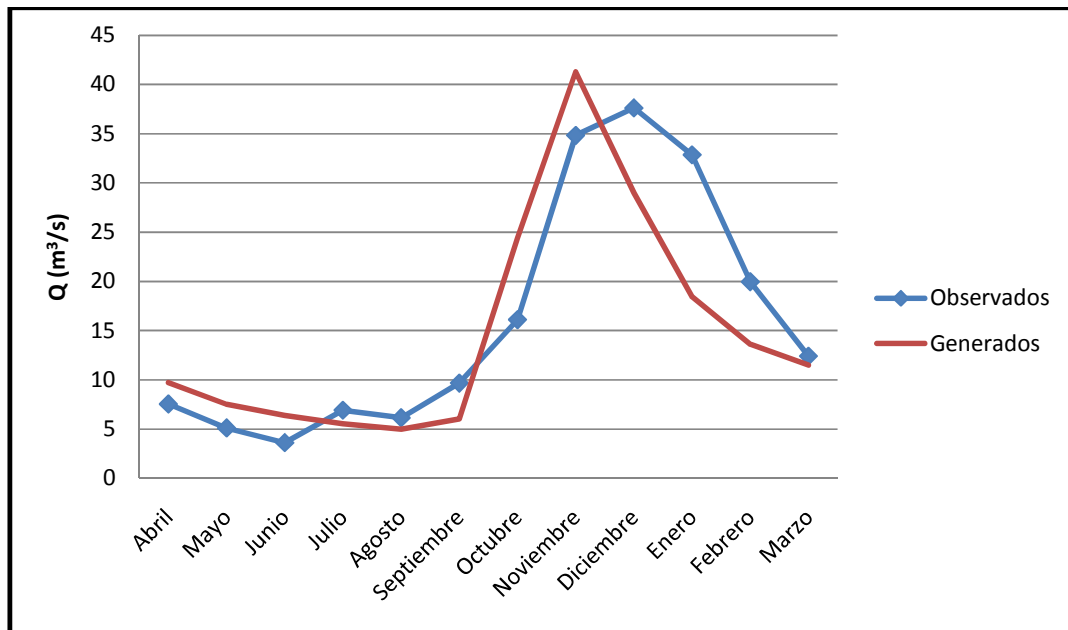
### 5.4.3- ANÁLISIS 2 BANDAS

Al igual que el análisis de 1 banda, se consideran los parámetros y gradientes definidos en la calibración y validación del modelo de 6 bandas, llegando al introducir las series de precipitación y temperatura respectivas, a un modelo con coeficiente de Nash de 0.62 (periodo considerado entre el año 1987 y el 1997), llegando a diferencias importantes de los caudales máximos en los meses estivales (ver Tabla 5.13 para resultados de la simulación, y Figura 5.15 para caudales medios mensuales en ambos escenarios).

**TABLA 5.13: CALIBRACIÓN CAUDALES 2 BANDAS**

	Q Observado (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q Modelado (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	BIAS (%)
Abril	7.54	2.84	9.72	1.40	29.21
Mayo	5.11	1.98	7.51	0.86	47.24
Junio	3.61	2.50	6.39	1.01	77.18
Julio	6.92	5.62	5.55	0.89	-19.63
Agosto	6.14	2.96	4.97	0.79	-18.93
Septiembre	9.67	5.18	6.03	1.37	-38.41
Octubre	16.11	8.32	24.43	5.04	45.89
Noviembre	34.84	13.02	41.29	8.17	16.90
Diciembre	37.63	13.74	28.97	5.66	-21.57
Enero	32.87	12.98	18.42	4.41	-42.36
Febrero	19.98	5.12	13.59	3.01	-30.69
Marzo	12.41	2.95	11.49	2.21	-6.38
<b>Promedio</b>	<b>16.07</b>	<b>6.43</b>	<b>15.31</b>	<b>2.90</b>	-

**FIGURA 5.15: CAUDALES MENSUALES CALIBRACIÓN 2 BANDAS**



Recordando que la respuesta de la cuenca considerando 1 banda arrojó inicialmente una falta de agua en el sistema, situación totalmente distinta a la existente en el presente escenario donde se tiene un desplazamiento importante del caudal peak, no se modificarán los gradientes para la corrección, sino que se estudiará la influencia que tienen los distintos parámetros del método de humedad de suelo, y las temperaturas de congelamiento y derretimiento de la nieve, en la generación de los respectivos caudales futuros.

Considerando lo presentado en la Tabla 5.9, se procede a modificar ciertos parámetros iniciales del método de humedad de suelo, llegando a:

- Aumento de la temperatura de derretimiento desde los 10 °C a unos 12 °C: Nuevo coeficiente de Nash de 0.69.
- Disminución de la temperatura de congelamiento desde los -2 °C a unos -3°C: El coeficiente de Nash aumenta a 0.72.
- Aumento de la dirección preferida del flujo de 0.63 a 0.8, junto con variaciones antes mencionadas: El coeficiente de Nash aumenta a 0.71, sin embargo aumenta la diferencia en los meses estivales entre los caudales observados y generados.

Como se deriva de los resultados, las variaciones no son capaces de alterar de forma sustancial el déficit de caudales existentes, por lo que se aumenta el gradiente de precipitación a 0.016 mm/m, llegando a un coeficiente anual de Nash de 0.75, sin embargo, no resulta posible ajustar los meses de verano, ya que existe como se presenta en la Tabla 5.14, una disminución del caudal peak con respecto a los datos de la Tabla 5.13.

**TABLA 5.14: SEGUNDA CALIBRACIÓN CAUDALES 2 BANDAS**

	<b>Q Observado (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Desviación Estándar (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q Modelado (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Desviación Estándar (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>BIAS (%)</b>
Abril	7.54	2.84	10.08	10.08	33.68
Mayo	5.11	1.98	7.51	0.82	46.96
Junio	3.61	2.50	6.45	0.98	78.67
Julio	6.92	5.62	5.63	0.85	-18.64
Agosto	6.14	2.96	5.06	0.75	-17.58
Septiembre	9.67	5.18	4.77	0.77	-50.67
Octubre	16.11	8.32	15.85	2.72	-1.64
Noviembre	34.84	13.02	37.32	6.88	7.11
Diciembre	37.63	13.74	35.04	4.61	-6.88
Enero	32.87	12.98	25.00	4.59	-23.94
Febrero	19.98	5.12	17.45	3.55	-12.66
Marzo	12.41	2.95	13.62	2.84	9.75
<b>Promedio</b>	<b>16.07</b>	<b>6.43</b>	<b>15.32</b>	<b>2.57</b>	<b>-</b>

Calibrado el modelo de 2 bandas, se presenta los resultados de la validación entre el año 1999 y 2004, encontrándose un coeficiente de Nash de 0.57, valor muy por debajo del determinado en el mismo periodo de tiempo para el modelo de 6 bandas, el cual arrojó un coeficiente de 0.7. En cuanto a los resultados, se encontró nuevamente un adelantamiento de los caudales de deshielo, encontrándose una sobre - estimación importante de éstos en el mes de Noviembre (para mayor detalle ver Tabla 5.15, donde se presenta caudales observados y generados en el intervalo de validación).

**TABLA 5.15: RESULTADOS VALIDACIÓN CAUDALES 2 BANDAS**

	<b>Q Observado (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Desviación Estándar (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Q Modelado (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Desviación Estándar (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>BIAS (%)</b>
Abril	6.59	2.32	11.10	0.56	68.51
Mayo	5.02	2.20	8.20	0.28	63.27
Junio	6.79	2.61	6.83	0.25	0.58
Julio	7.06	2.50	5.94	0.18	-15.81
Agosto	9.41	4.93	5.41	0.25	-42.55
Septiembre	10.44	2.27	5.25	0.88	-49.69
Octubre	20.47	4.45	21.45	6.94	4.79
Noviembre	32.53	5.46	38.22	10.20	17.49
Diciembre	41.26	14.84	40.31	7.31	-2.28
Enero	33.51	13.87	32.24	7.08	-3.49
Febrero	22.56	7.69	20.98	4.08	-6.99
Marzo	12.67	3.88	16.26	1.69	28.41
<b>Promedio</b>	<b>17.35</b>	<b>5.59</b>	<b>17.68</b>	<b>3.31</b>	<b>-</b>

## 5.5.- ANÁLISIS ESCENARIOS FUTUROS

De los resultados obtenidos en las calibraciones para la cuenca sub-dividida tanto en una, como dos y seis bandas, se concluye que ésta última permite representar de mejor forma los caudales de deshielo en todo el periodo, especialmente en los meses estivales, por lo que, para el análisis de las series futuras de caudales en los escenarios A2 y B2 de cambio climático, se considerará de forma exclusiva ésta configuración.

Para el análisis de los caudales futuros, se analiza las series meteorológicas generadas en el capítulo 4 (ver Anexo Digital III), encontrándose variaciones menores en los valores de las series de temperatura, sin embargo, al analizar las series de precipitación, se encuentra una variación importante de los valores medios de éstos, proponiéndose un análisis de los caudales esperados de las series tanto con una precipitación media máxima, como de una precipitación media mínima en el periodo comprendido entre el año 2005 al año 2035.

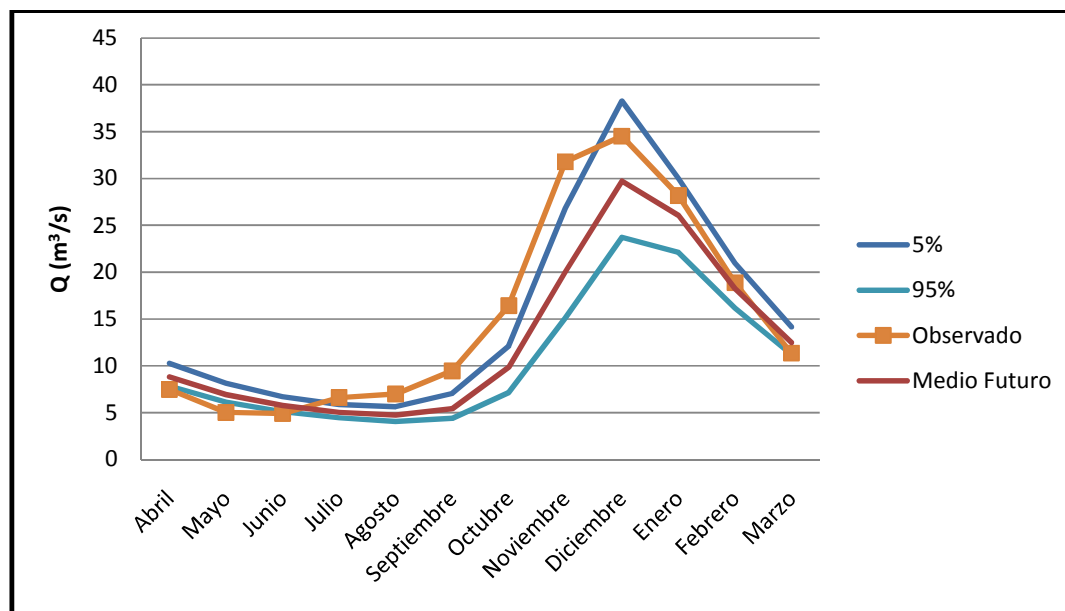
Para los valores mínimos del escenario A2, se considera la serie N°1 de precipitación, y la serie N°17 de temperatura (menor y mayor valores medios respectivos), llegando de esta forma a una importante subestimación de los caudales de deshielo como se presenta tanto en la Tabla 5.16 como en la Figura 5.16.

Junto con el análisis de los caudales medios, se presentan en la Figura 5.16 los caudales con un 5% y 95% de excedencia, encontrándose en los meses estivales que el caudal con un 5% de excedencia supera a la serie de caudales medios mensuales.

**TABLA 5.16: CAUDALES MÍNIMOS MENSUALES ESCENARIO A2**

	Q Presente (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q Futuro (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q 5% (m <sup>3</sup> /s)	Q 95% (m <sup>3</sup> /s)
Abril	7.47	2.52	8.82	1.22	11.24	9.32
Mayo	5.04	1.83	6.91	0.92	8.86	7.27
Junio	4.90	2.73	5.76	0.74	7.16	6.08
Julio	6.59	4.33	5.04	0.65	6.23	5.28
Agosto	6.99	3.91	4.75	0.64	6.36	4.82
Septiembre	9.45	4.31	5.40	0.90	8.97	5.31
Octubre	16.44	7.58	9.85	2.02	16.85	10.14
Noviembre	31.78	12.11	20.04	3.86	31.54	18.43
Diciembre	34.50	16.07	29.74	4.71	45.23	29.82
Enero	28.17	16.10	26.07	2.88	40.06	29.23
Febrero	18.86	7.87	18.26	1.70	26.43	20.37
Marzo	11.36	4.47	12.47	0.96	16.06	13.51
<b>Promedio</b>	<b>15.13</b>	<b>6.99</b>	<b>12.76</b>	<b>1.77</b>	-	-

**FIGURA 5.16: CAUDALES MÍNIMOS MENSUALES ESCENARIO A2**



Al igual que lo presentado por Figueroa (2008), a corto plazo no se observa un desplazamiento de los caudales máximos en el tiempo, sino más bien un descenso de los caudales de invierno junto con un descenso de los caudales de deshielo.

Determinado los caudales para el escenario crítico A2, se calculan los caudales medios para el escenario B2, el cual es menos severo comparado al antes presentado, utilizándose para ello la serie de precipitación N°18, correspondiente a la de menor media, y la serie de temperatura N°9, la cual tiene los mayores promedios medios mensuales en el transcurso de todo el año.

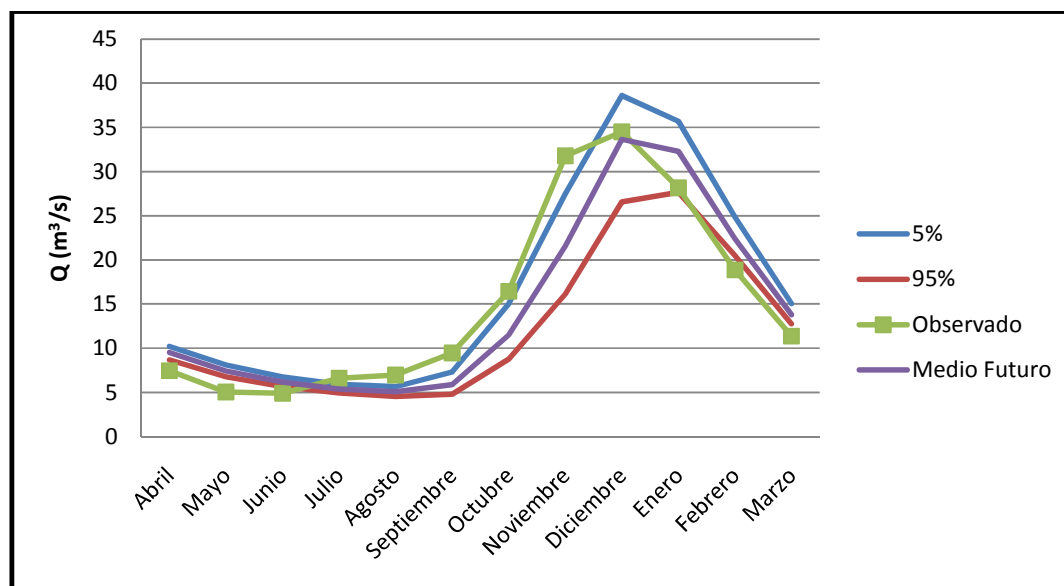
Ingresando las series meteorológicas en WEAP, se llega al mismo comportamiento observado en la Figura 5.16, no existe un desplazamiento del deshielo dentro del año, hecho que se contrapone a lo observado en los estudios de Mardones (2009), y Lagos (2009), donde al estudiar los caudales futuros entre los años 2071 y 2100, se tiene que los caudales máximos suceden en Agosto y no en Diciembre. Para mayor detalle de la

modelación en el escenario B2, ver Tabla 5.17 para valores mensuales y Figura 5.17 para comportamiento a escala mensual.

**TABLA 5.17: CAUDALES MÍNIMOS MENSUALES ESCENARIO B2**

	Q Presente (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q Futuro (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q 5% (m <sup>3</sup> /s)	Q 95% (m <sup>3</sup> /s)
Abril	7.47	2.52	9.52	1.01	11.24	9.32
Mayo	5.04	1.83	7.43	0.76	8.86	7.27
Junio	4.90	2.73	6.17	0.62	7.16	6.08
Julio	6.59	4.33	5.37	0.53	6.23	5.28
Agosto	6.99	3.91	5.05	0.54	6.36	4.82
Septiembre	9.45	4.31	5.90	0.99	8.97	5.31
Octubre	16.44	7.58	11.49	2.08	16.85	10.14
Noviembre	31.78	12.11	21.54	3.64	31.54	18.43
Diciembre	34.50	16.07	33.65	4.97	45.23	29.82
Enero	28.17	16.10	32.27	2.73	40.06	29.23
Febrero	18.86	7.87	22.39	1.52	26.43	20.37
Marzo	11.36	4.47	13.79	0.77	16.06	13.51
<b>Promedio</b>	<b>15.13</b>	<b>6.99</b>	<b>14.55</b>	<b>1.68</b>	-	-

**FIGURA 5.17: CAUDALES MÍNIMOS MENSUALES ESCENARIO B2**



Al igual que en el escenario A2 con series de precipitación mínimas, se tiene que los caudales mensuales con un 5% de excedencia sobrepasan los valores medios observados exclusivamente en los meses estivales.

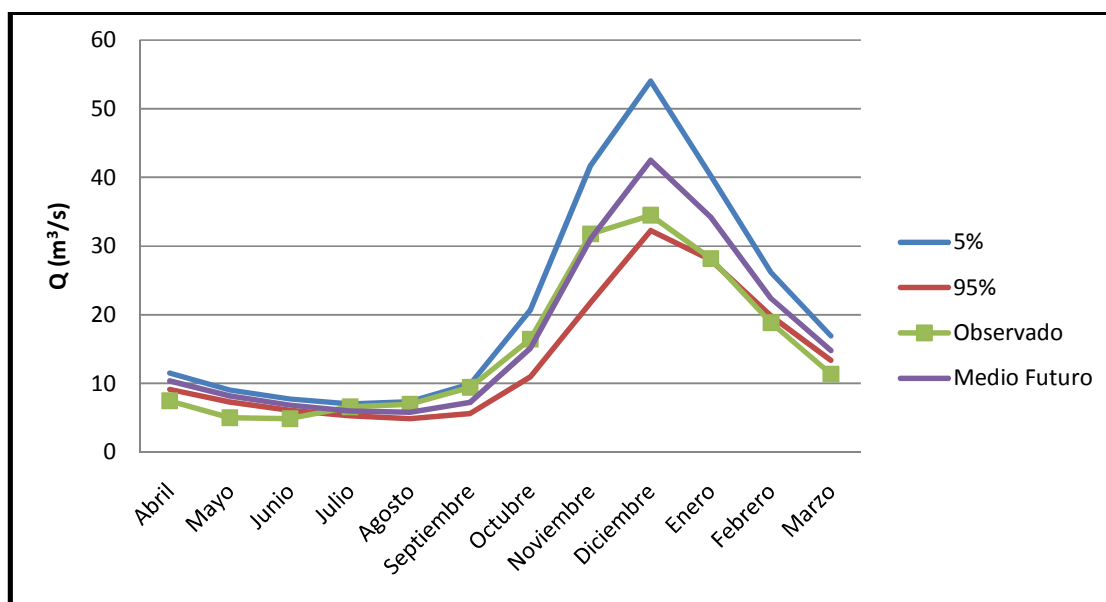
Determinadas la cuantía de los caudales mensuales asociados a las series de precipitación cuyos promedios son los mínimos, es de interés generar las series asociadas a los valores máximos de precipitación, llegando a una sobre-estimación de los caudales tanto en el escenario A2, como en el escenario B2 (ver Tabla 5.18 y 5.19 para datos mensuales y Figuras 5.18 y 5.19 para variación mensual)



**TABLA 5.18: CAUDALES MAXIMOS MENSUALES ESCENARIO A2**

	Q Presente (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q Futuro (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q 5% (m <sup>3</sup> /s)	Q 95% (m <sup>3</sup> /s)
Abril	7.47	2.52	10.35	0.99	11.49	9.15
Mayo	5.04	1.83	8.16	0.72	9.05	7.31
Junio	4.90	2.73	6.84	0.63	7.73	6.06
Julio	6.59	4.33	5.99	0.58	7.05	5.29
Agosto	6.99	3.91	5.82	0.77	7.36	4.89
Septiembre	9.45	4.31	7.25	1.58	9.91	5.62
Octubre	16.44	7.58	15.13	3.04	20.69	10.98
Noviembre	31.78	12.11	31.02	6.68	41.70	21.78
Diciembre	34.50	16.07	42.51	6.62	54.04	32.26
Enero	28.17	16.10	34.17	3.72	40.23	27.95
Febrero	18.86	7.87	22.38	2.01	26.19	19.83
Marzo	11.36	4.47	14.79	1.13	16.94	13.41
<b>Promedio</b>	<b>15.13</b>	<b>6.99</b>	<b>17.03</b>	<b>2.37</b>	-	-

**FIGURA 5.18: CAUDALES MAXIMOS MENSUALES ESCENARIO A2**



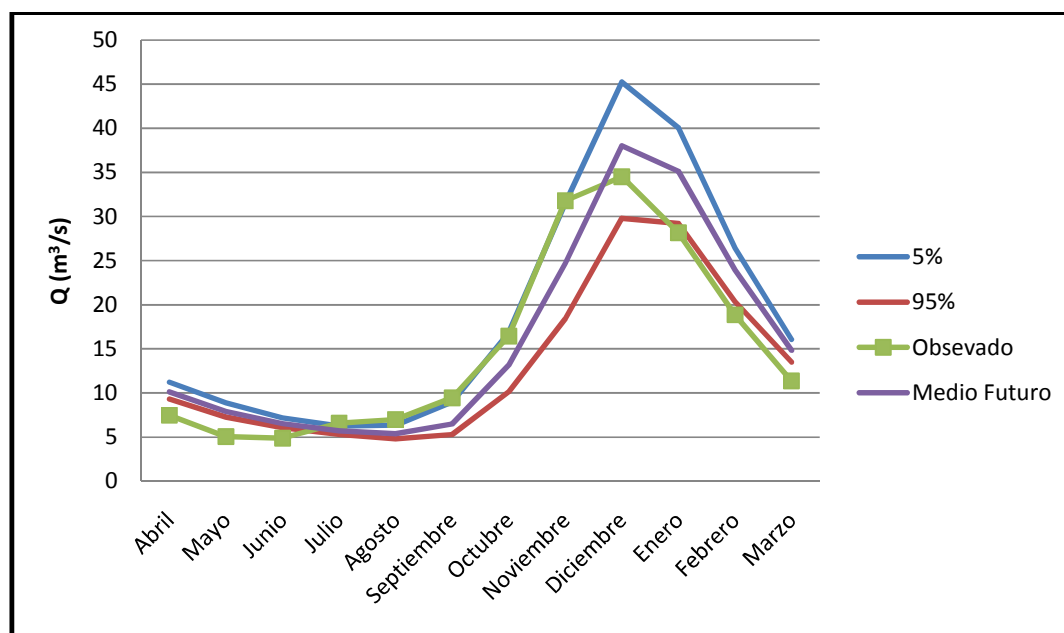
Al igual que las series mínimas, se presentan las curvas del 5% y 95% de excedencia, encontrando en el escenario antes presentado (ver Tabla 5.18), que el caudal medio futuro es mayor que el caudal observado.

El resultado anterior por si solo, permite concluir que dependiendo de la serie meteorológica ingresada, se puede tener uno u otro resultado. Ya en la calibración del modelo con la cuenca dividida en 6 bandas se llegó a, variando los gradientes tanto de precipitación como de temperatura, se tienen caudales generados mayores o menores al observado, sin embargo, éstos son parámetros de configuración, de una naturaleza totalmente distinta a las series, las que fueron generadas mediante un proceso de escalamiento.

**TABLA 5.19: CAUDALES MAXIMOS MENSUALES ESCENARIO B2**

	Q Presente (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q Futuro (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q 5% (m <sup>3</sup> /s)	Q 95% (m <sup>3</sup> /s)
Abril	7.47	2.52	10.13	0.95	11.24	9.32
Mayo	5.04	1.83	7.90	0.68	8.86	7.27
Junio	4.90	2.73	6.53	0.54	7.16	6.08
Julio	6.59	4.33	5.69	0.48	6.23	5.28
Agosto	6.99	3.91	5.38	0.53	6.36	4.85
Septiembre	9.45	4.31	6.49	1.19	8.97	5.31
Octubre	16.44	7.58	13.17	2.61	16.85	10.14
Noviembre	31.78	12.11	24.70	4.79	31.54	18.43
Diciembre	34.50	16.07	38.02	5.40	45.23	29.82
Enero	28.17	16.10	35.12	3.59	40.06	29.23
Febrero	18.86	7.87	23.95	2.00	26.43	20.37
Marzo	11.36	4.47	14.83	0.89	16.06	16.51
<b>Promedio</b>	<b>15.13</b>	<b>6.99</b>	<b>15.99</b>	<b>1.97</b>	-	-

**FIGURA 5.19: CAUDALES MAXIMOS MENSUALES ESCENARIO B2**



Finalmente, es preciso señalar que hasta el momento, se ha estudiado el escenario de cambio climático considerando un gradiente constante en el tiempo, restricción que es levantada para el gradiente de precipitación, ya que como se presentó en el estudio de la cuenca antes presentado, éste presenta variaciones de carácter temporal a medida que suceden los años sin tener una clara tendencia posible de modelar.

Para el estudio del gradiente aleatorio, se recurre a los trabajos de Figueroa (2008), quién establece que para calcular el gradiente de precipitación, se acepta que éste tiene un comportamiento aleatorio, tendiendo a una distribución normal con media y varianza conocida.

Desde un punto de vista de implementación, y considerando lo antes mencionado, el gradiente se construye generando un aleatorio en el intervalo (0,1), y mediante la distribución normal inversa.

A continuación, en la Tabla 5.20 y 5.21, se presentan resultados de simulación (para detalles ver Anexo IV Digital), para el escenario A2 con valor medio mínimo de la serie de precipitación, encontrando una disminución importante de los caudales con respecto a los existente en la actualidad (serie de precipitación N°18 y serie de temperatura N°9).

**TABLA 5.20: MODELACIÓN GRADIENTE ALEATORIO 1**

	Q Presente (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q Futuro (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q 5% (m <sup>3</sup> /s)	Q 95% (m <sup>3</sup> /s)
Abril	7.47	2.52	6.89	1.49	8.12	6.01
Mayo	5.04	1.83	5.53	1.09	6.64	4.88
Junio	4.90	2.73	4.69	0.88	5.62	4.12
Julio	6.59	4.33	4.13	0.76	4.98	3.63
Agosto	6.99	3.91	3.91	0.69	4.66	3.36
Septiembre	9.45	4.31	4.53	0.84	5.97	3.62
Octubre	16.44	7.58	8.29	1.77	11.59	6.00
Noviembre	31.78	12.11	14.46	2.92	19.13	10.60
Diciembre	34.50	16.07	20.93	3.55	26.24	15.87
Enero	28.17	16.10	20.07	2.63	23.33	15.78
Febrero	18.86	7.87	14.41	1.55	17.17	12.30
Marzo	11.36	4.47	9.38	0.89	10.91	8.11
<b>Promedio</b>	<b>15.13</b>	<b>6.99</b>	<b>9.77</b>	<b>1.59</b>	-	-

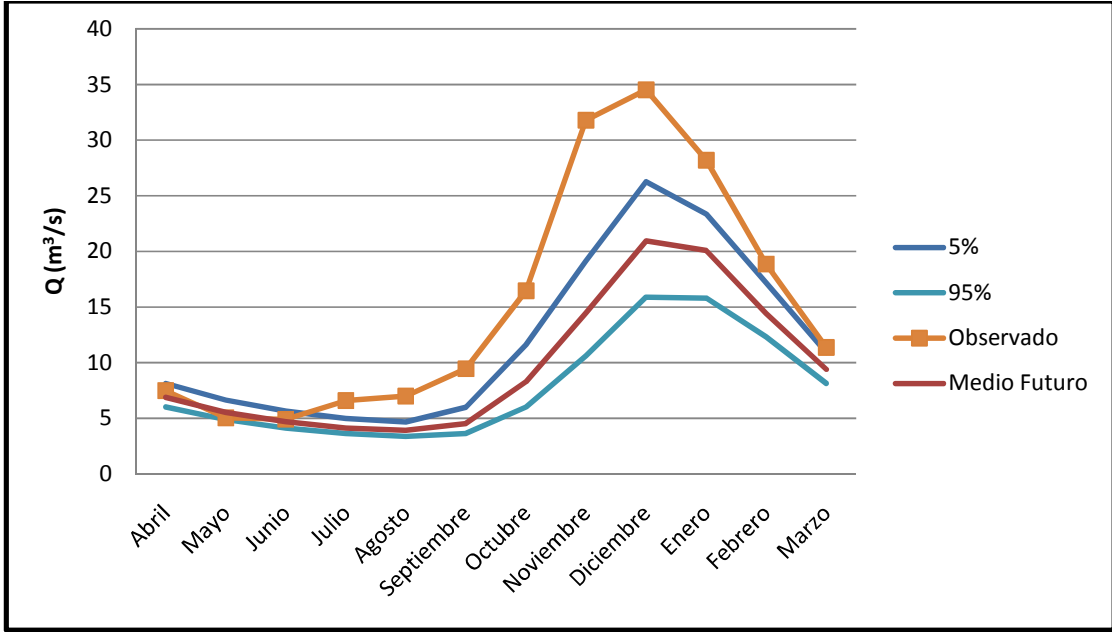
**TABLA 5.21: MODELACIÓN GRADIENTE ALEATORIO 21**

	Q Presente (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q Futuro (m <sup>3</sup> /s)	Desviación Estándar (m <sup>3</sup> /s)	Q 5% (m <sup>3</sup> /s)	Q 95% (m <sup>3</sup> /s)
Abril	7.47	2.52	7.04	1.46	8.12	6.01
Mayo	5.04	1.83	5.65	1.08	6.64	4.88
Junio	4.90	2.73	4.78	0.88	5.62	4.12
Julio	6.59	4.33	4.20	0.77	4.98	3.63
Agosto	6.99	3.91	3.97	0.71	4.66	3.36
Septiembre	9.45	4.31	4.59	0.88	5.97	3.62
Octubre	16.44	7.58	8.42	1.73	11.59	6.00
Noviembre	31.78	12.11	14.95	3.11	19.13	10.60
Diciembre	34.50	16.07	21.65	4.06	26.24	15.87
Enero	28.17	16.10	20.71	2.70	23.33	15.78
Febrero	18.86	7.87	14.74	1.42	17.17	12.30
Marzo	11.36	4.47	9.51	0.89	10.91	8.11
<b>Promedio</b>	<b>15.13</b>	<b>6.99</b>	<b>10.02</b>	<b>1.64</b>	-	-

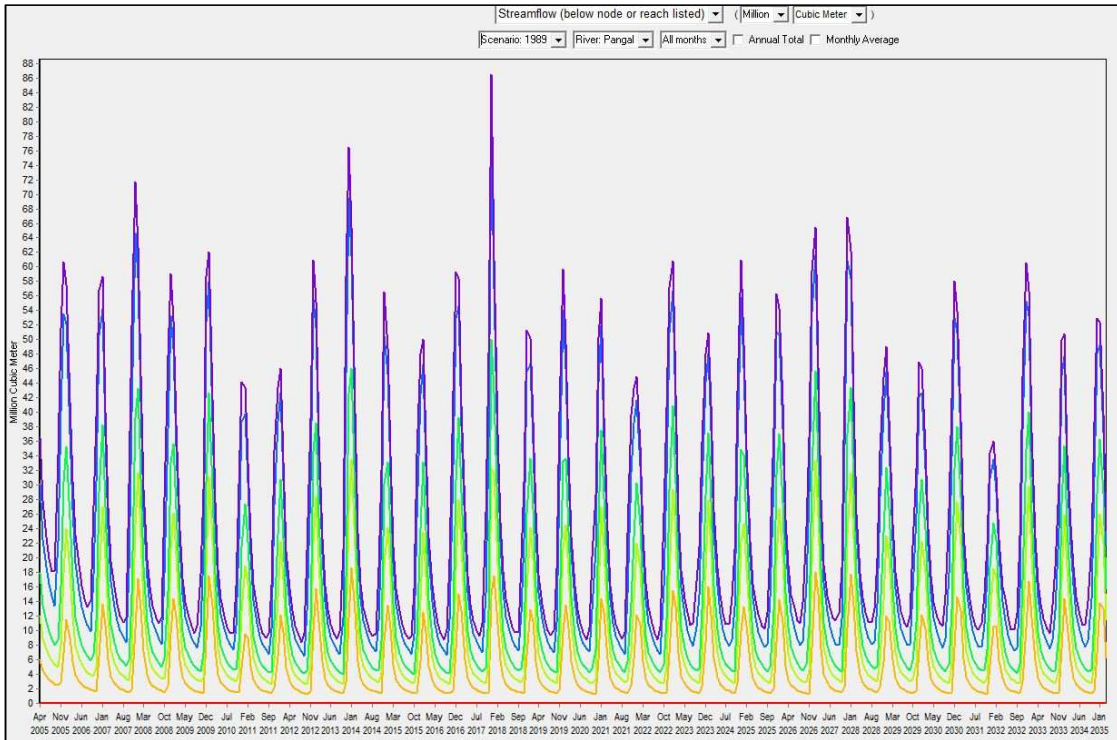
Los resultados previos indican que al considerar un gradiente variable, se tiene disminuciones del 50% del caudal para invierno, y de un 10% para verano, porcentajes mayores a los establecidos por Figueroa (2008), quien establece disminuciones máximas de un 30% considerando un modelo agregado.

Finalmente, se presentan caudales mensuales (ver Figura 5.20), junto con captura de entorno de trabajo de WEAP donde se presentan los caudales simulados (5.21)

**FIGURA 5.20: CAUDALES MENSUALES ESCENARIO A2 ALEATORIO**



**FIGURA 5.21: GENERACIÓN CAUDALES WEAP**



## **CAPÍTULO 6: COMENTARIOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

En éste capítulo se presentan conclusiones y recomendaciones con respecto a los resultados obtenidos a lo largo del presente estudio.

### Conclusiones

#### - Modelo WEAP

Haciendo uso de WEAP, se construyó un modelo que permite estimar los caudales medios del río Pangal en Pangal, llegando a un coeficiente de Nash de 0.82 para la calibración, y a un coeficiente de Nash de 0.70 para la validación, considerando en la división de la cuenca 6 bandas de altura de igual área.

El nivel de exactitud de cualquier modelo es función directa del grado de detalle con el cual se construye. En el transcurso del desarrollo de la modelación, junto con calibrar un modelo para la cuenca con 6 divisiones, se calibraron modelos considerando una y dos bandas de altura, llegando en el primer caso a un coeficiente de Nash en la calibración de 0.78, y en el segundo a un coeficiente de Nash de 0.75 para la calibración, y de 0.57 para la validación.

Comparando los 3 escenarios, es posible concluir que los modelos concentrados no tienen la capacidad para dar respuesta satisfactoria a la estimación de los recursos hídricos, ya que no se puede representar, respetando los límites que establecen las distintas componentes del método de humedad de suelo, el periodo de deshielo, producto que al considerar tanto una como dos bandas, existe un cambio en el mes donde se genera el peak de caudal medio mensual, junto con una subestimación importante de los caudales en el resto del periodo de deshielo (especialmente en los meses de Enero y Febrero).

Centrando la atención en los resultados del modelo de 6 bandas, se observó una alta correspondencia entre los caudales generados y observados, llegando a diferencias de hasta un 7% entre ambas series (las caudales base son bien representados, la diferencia principal radica en los caudales máximos).

Con respecto a la calibración, se presentó en el punto 5.4.1. un análisis acerca de la metodología seguida en la realización, constatando que los parámetros que mayor influencia tienen dentro del modelo son la temperatura de derretimiento y congelamiento, sumado al gradiente de temperatura y precipitación asignado para representar los eventos meteorológicos en la cuenca en toda su extensión.

#### - Generación de datos

Para generar las distintas series de caudales medios mensuales mediante la construcción del modelo de la cuenca del río Pangal en Pangal en WEAP, se utilizó una serie de antecedentes previos, los que corresponden a gradientes de variables meteorológicas, pasando por estudios topográficos, hasta llegar a la formulación de series alternativas futuras utilizando modelos de escalamiento (SDSM).

En cuanto a los gradientes, se observan diferencias sustanciales entre la temperatura y la precipitación, dado que la temperatura posee un comportamiento regular en el transcurso del tiempo, siendo posible definir de forma independiente un gradiente de verano y un gradiente

de invierno, no observándose variaciones de importancia año a año, sin embargo al calcular el gradiente de precipitación, se observó que éste variaba mes a mes, sin una clara tendencia al aumento o a la disminución, no siendo posible definir un gradiente promedio para todo el periodo de estudio producto de la alta desviación estándar asociada. Producto de lo anterior, se trabaja con gradientes aleatorios, o bien con un conjunto de gradientes mensuales de manera independiente.

Las series alternativas futuras de temperatura y precipitación fueron generadas utilizando SDSM, modelo de escalamiento que permite llevar datos desde un modelo regional a uno de escala local. Al igual que los gradientes, la temperatura y la precipitación tienen un comportamiento dispar, lo que se ve traducido en considerar para cada una de las variables, distintas opciones de configuración, sin embargo aún cuando existen diferencias notorias en su tratamiento, al calibrar los modelos respectivos se llegó en el caso de la temperatura a un coeficiente  $R^2$  de 0.538, y en el caso de la precipitación a un coeficiente  $R^2$  de 0.436.

#### - Resultados Futuros

En términos promedios, existe una disminución de los caudales en el periodo comprendido entre el año 2005 y 2035, observándose descensos máximos en el escenario A2, llegando a una disminución de los caudales medios mensuales de un 8.5% en el mes de Diciembre.

A diferencia de lo establecido en estudios comprendidos entre el año 2035 y 2070, no se tienen cambios en el régimen de la cuenca en el periodo estudiado, ésta sigue siendo de carácter nival (Mardones (2009) y Lagos (2009), establecen variaciones que alteran los regímenes de los ríos estudiados pasando de nival a pluvio-nival).

Aún cuando no se observan cambios en el régimen, si se constata un leve aumento de un 5% en los caudales de invierno, hecho cuya causa puede provenir del aumento de las temperaturas medias en los meses en cuestión, elevando la cota de la línea promedio de temperatura de congelamiento en unos cuantos metros, repercutiendo de forma directa en el área pluvial.

Comparando los resultados con Figueroa (2008), se llega al mismo comportamiento de los caudales, siendo éstos máximos en verano y mínimos en invierno, sin embargo al revisar los valores absolutos de los caudales medios mensuales, se llega especialmente en el caso del gradiente aleatorio, a series sub-dimensionadas.

Analizando las causas de la diferencia entre el modelo WEAP y de Figueroa, se tiene que este último considera un estudio acabado de las distintas componentes del balance hídrico, involucrando una mayor cantidad de parámetros que permiten calibrar de una forma íntegra las interacciones que ocurren en la cuenca. Sin embargo, producto de la incertidumbre generada por las series ingresadas en WEAP, es posible observar que los resultados varían sustancialmente, por lo que es posible que al considerar otras series, las diferencias porcentuales disminuyan.

#### - Incertidumbre de los Resultados

Existen múltiples fuentes de incertidumbre identificadas en el presente estudio, en primer lugar se tiene la incertidumbre asociada a la división de la cuenca, considerando los mismos parámetros físicos y gradientes de temperatura y precipitación, se llega a variaciones

importantes tanto en la cuantía de los caudales de deshielo, como en el largo del periodo de éste mismo.

Otra fuente de incertidumbre son los gradientes, al alterar éstos de forma mínima, dado que la cuenca abarca un perfil importante de alturas, una pequeña modificación en el valor de éste cambia sustancialmente la relación entre caudales observados y generados, conduciendo a variaciones importantes entre uno u otro caso.

Finalmente, el tercer foco de incertidumbre hace referencia a las series alternativas generadas, puesto que se observa una variabilidad importante al considerar series con valores estadísticos extremos (menor y mayor media), llegando a definirse un intervalo de confianza de caudales, donde utilizando el principio de continuidad, es posible establecer que existe una configuración que genera una serie de caudales medios mensuales deseada.

### Comentarios y recomendaciones

En la construcción del presente trabajo, se ha presentado de forma consistente una primicia quizás por muchos olvidada, la Hidrología es una rama del saber que se basa en estimaciones, no existen los absolutos, se llega a resultados distintos considerando una u otra configuración de los parámetros y series involucradas en el modelo hidrológico.

*Los valores de los parámetros deben tener sentido físico*, existe un sinnúmero de componentes que se pueden modificar para calibrar un modelo, llegando a determinarse en el presente trabajo, producto del impacto que generaba su variación, que los gradientes son las componentes que mayor influencia tienen en el resultado, seguidos muy de cerca por la temperatura de derretimiento y congelamiento definidas en la modelación (un punto importante no antes mencionado, es la variación implícita que sucede en la línea de nieves al aumentar las temperaturas en un futuro, ya que al mantenerse constante los valores de las temperaturas antes mencionadas, se tienen variaciones en la cota donde se ubican en el gradiente).

Dado que los gradientes son las componentes críticas en la estimación de los caudales en el punto a elección, se requiere al momento de comenzar cualquier tarea, recopilar toda la información disponible para construir la relación que mejor represente lo que efectivamente está sucediendo en la cuenca definida. Sin embargo, existe una limitante a lo anterior, no se tiene una cobertura de estaciones meteorológicas apropiadas en territorio nacional, por lo que se debe realizar, en todo trabajo, un pequeño análisis de sensibilidad del gradiente, ya que variando éste en unas pocas unidades, especialmente en cuencas de altura sobre los 1,000, se llega a resultados dispares lo que puede resultar en tomar una u otra medida de acción y/o mitigación.

En cuanto al modelo utilizado, WEAP es una herramienta que permite flexibilidad en la modelación hidrológica, teniendo la capacidad implementar modelos que guarden relación con lo que está sucediendo en la cuenca en estudio (obviando la incertidumbre que se genera en los resultados, se calibró y validó un modelo con coeficientes de NS del orden de los encontrados en la literatura). Sin embargo, como todo modelo éste tiene deficiencias, como lo es un detalle más exhaustivo del comportamiento de la nieve, como también la incorporación de un modelo que permita representar las aguas subterráneas (la subestimación encontrada al utilizar gradientes aleatorios comparado con el modelo de Figueroa, podría ser subsanada con el aporte del acuífero).

Considerando los resultados del presente trabajo, se determina que los caudales disminuirán a corto plazo, sin embargo producto de las modificaciones que sufre el clima día a día, se propone actualizar los datos del modelo de forma permanente, ya que no existe certeza absoluta de cómo evolucionará el cambio climático, lo que repercutirá de forma directa en la disponibilidad de los recursos hídricos.

Finalmente, es posible agregar que se requiere de forma inmediata la instalación de nuevas estaciones meteorológicas, junto con un análisis en profundidad del comportamiento de la nieve dentro del balance hídrico, ya que corrigiendo estas componentes, se pueden mejorar ostensiblemente las estimaciones de los caudales de deshielo, caudales que coincidentemente, sufren las mayores variaciones con respecto a los datos observados.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**Abraham, L.Z.** (2006). *Climate change impact on Lake Ziway watershed water availability, Ethiopia*. Unpublished MSc Thesis University of Applied Sciences, Cologne, pp123.

**Borgel, R.** (1983). *Geografía de Chile. Geomorfología*. Instituto Geográfico Militar, Santiago.

**Carter, T.R., Hulme, M., Lal M.** (1999). *Guidelines on the use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment*. Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, IPCC.

**Comisión Nacional de Riego (CNR, 2005).** *Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y algunas experiencias de organizaciones de usuarios del agua*.

**Committee on the Environment and Natural Resources National Science and Technology council** (2008). *Scientific Assessment of the Effects of Global Change on the United States*. Estados Unidos.

**DGA** (1986). *Mapa hidrogeológico de Chile escala 1: 2,250,000. Texto explicativo, 22p*. Santiago.

**Dirección Meteorológica de Chile (DMC, 2006 a).** *Fenómenos de El Niño - La Niña*. <[http://www.meteochile.cl/climas/climas\\_sexta\\_region.html/](http://www.meteochile.cl/climas/climas_sexta_region.html/)>.

**Dirección Nacional de Planeamiento (DNP, 2006).** *Informe de Síntesis Regional 2006, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins*.

**FAO** (2000). *Irrigation and Drainage Paper No. 56 Crop and Evapotranspiration*. <<http://www.kimberly.uidaho.edu/ref-et/fao56.pdf>>.

**Fealy, R.** (2006). *An assessment of the relationship between glacier mass balance and synoptic climate in Norway: Likely future implications of climate change*. Unpublished PhD Thesis, University of Maynooth, Ireland.

**Figuroa, R.** (2008). *Efectos del cambio climático en la disponibilidad de recursos hídricos a nivel de cuenca: implementación de un modelo integrado a nivel superficial y subterráneo*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil y Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería mención Recursos Hídricos y Medio Ambiente. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

**Gordon, C.** (2000). *The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments*. Climate Dynamics, v. 16, p.147-168.

**Intergovernmental Pannel on Climate Change** (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report*. <[http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4\\_syr\\_sp.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf)>.

**Klohn, C.** (1960). *Geología de la Cordillera de Los Andes de Chile. Provincias de Santiago, O' Higgins, Colchagua y Curicó*. Santiago: Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín n°8.

**Lagos, M.** (2009). *Vulnerabilidad futura de los Recursos Hídricos Afluentes al Embalse El Yeso*. XVII Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Sociedad chilena de Ingeniería Hidráulica.

**Mardones, G.** (2009). *Implementación y uso del modelo WEAP en cuencas nivales de la IV región para el análisis del cambio climático*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

**Santana, R.** (1968). *Les cendres volcaniques de la Vallée du Cachapoal-Rapel (Chili)*. Cahiers de Géographie de Québec, XV, N°35. N° Special, Amérique Latine.

**Stockholm Environment Institute** (2008). *WEAP Evaluation and Planning system, Tutorial*. <<http://www.weap21.org/>>.

**Wilby, R., Dawson, C.** (2007). Manual de usuario de Statistical Downscaling Model (SDSM) versión 4.2.2.

**Vargas, X.** (2004). *Apuntes del Curso Hidrología, CI41C*. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

# ANEXO

## ANEXO A: DATOS METEOROLÓGICOS

### Gradiente Temperatura

**TABLA A1: TEMPERATURAS MENSUALES (°C)**

<b>Mes</b>	<b>Convento Viejo</b>	<b>Rengo</b>	<b>Termas del Flaco</b>
Julio 1999	9.1	11.6	0.9
Agosto 1999	13.2	13.8	1.8
Septiembre 1999	15.9	15.3	1.7
Octubre 1999	19.1	14.7	5.3
Noviembre 1999	23.8	18.5	7.1
Diciembre 1999	26.4	20.6	9.4
Enero 2000	27.7	21.7	11.7
Febrero 2000	25.8	20.1	10.2
Marzo 2000	22.8	18.0	9.7
Abril 2000	18.3	14.6	8.5
Mayo 2000	14.4	11.1	3.4
Junio 2000	13.0	10.2	-0.8
Julio 2000	8.4	7.9	0.7
Agosto 2000	12.7	10.4	1.6
Septiembre 2000	14.9	11.1	1.0
Octubre 2000	20.1	15.6	5.3
Marzo 2001	25.1	20.0	9.4
Abril 2001	18.2	15.4	6.6
Mayo 2001	14.0	12.6	1.4
Junio 2001	10.7	10.3	1.4
Julio 2001	12.8	9.53	0.7
Abril 2002	17.4	14.5	4.4
Mayo 2002	13.2	10.5	3.6
Abril 2003	18.6	13.7	6.8
Mayo 2003	12.3	8.6	5.5
Junio 2003	12.8	10.3	3.0
Julio 2002	10.2	7.9	0.8
Agosto 2003	12.4	10.0	2.6
Septiembre 2003	16.5	12.6	3.4
Octubre 2003	20.7	16.7	6.7
Noviembre 2003	24.2	18.6	7.9
Diciembre 2003	24.7	19.1	9.1
Enero 2004	28.7	21.7	13.0
Febrero 2004	27.0	20.7	12.2
Marzo 2004	25.4	19.0	11.4
Abril 2004	19.2	14.5	5.8

Mayo 2004	12.6	10.0	4.4
Junio 2004	11.4	9.3	2.6
Julio 2004	11.6	9.2	1.2
Agosto 2004	13.3	10.6	1.7
Septiembre 2004	15.4	12.6	3.9
Octubre 2004	18.5	15.1	3.8
Noviembre 2004	22.5	17.9	6.6
Diciembre 2004	26.7	20.7	10.2

Gradiente Precipitaciones

**TABLA A2: PRECIPITACIONES DIARIAS ENERO 2003 (mm)**

<b>Día</b>	<b>Coltauco</b>	<b>5 km AA Cortaderal</b>	<b>Pangal en río Pangal</b>
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	5	38.2	51
21	1	45.5	48.3
22	0	1.9	6
23	0	0	0
24	0	0	0
25	0	0	0
26	0	0	0
27	0	0	0
28	0	0	0
29	0	0	0
30	0	0	0
31	0	0	0

**TABLA A3: PRECIPITACIONES DIARIAS JUNIO 2003 (mm)**

<b>Día</b>	<b>Coltauco</b>	<b>5 km AA Cortaderal</b>	<b>Pangal en río Pangal</b>
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	8.5	12.7	10.4
5	12.5	39.1	46.8
6	0	0	0
7	0	0	0
8	1	11.5	9.6
9	22	36.3	23.1
10	40.5	27.4	60.8
11	7.8	6.8	5.7
12	7.2	10.1	7.1
13	0	1.1	0.9
14	39.5	31.2	28.5
15	0	0	0.3
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	10	60.1	57.3
21	3	0	0
22	0	0.8	0.3
23	0	0	0
24	0	0	0
25	0	0	0
26	0	0	0
27	0	0	0
28	0	0	0
29	0	0	0
30	0	0	0

**TABLA A4: PRECIPITACIONES DIARIAS SEPTIEMBRE 2003 (mm)**

<b>Día</b>	<b>Coltauco</b>	<b>5 km AA Cortaderal</b>	<b>Pangal en río Pangal</b>
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	25.2	14.5	25
6	0	23.7	23.8
7	0	0.3	6.5
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	0	0	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	5	0	0
21	1	0	0
22	0	0	6
23	0	0	0
24	0	0	0
25	0	0	0
26	15.7	45.2	50.7
27	0	14.8	43.3
28	0	0	0
29	0	0	0
30	0	0	0

**TABLA A5: PRECIPITACIONES DIARIAS NOVIEMBRE 2003 (mm)**

<b>Día</b>	<b>Coltauco</b>	<b>5 km AA Cortaderal</b>	<b>Pangal en río Pangal</b>
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	1	1	0
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	35	49.8	80.8
17	0	1	12.8
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0
21	0	0	0
22	0	0	0
23	0	0	0
24	0	0	0
25	0	0	0
26	0	0	0
27	0	0	0
28	0	0	0
29	0	0	0
30	0	0	0



**TABLA A6: PRECIPITACIONES DIARIAS JUNIO 2004 (mm)**

<b>Día</b>	<b>Coltauco</b>	<b>5 km AA Cortaderal</b>	<b>Pangal en río Pangal</b>
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	17	40.5	38.4
9	43	39	36.3
10	0	0.5	0
11	0	0	0.6
12	0	0	7.6
13	0	0	0
14	0	0	0
15	1.5	9.7	15
16	0	0.8	6.1
17	0	0	0
18	0	0	0
19	36	22	29.2
20	0	1	1.1
21	1.9	0	0
22	0	7.2	8.2
23	0	0	0
24	0	0	0
25	0	0	0
26	0	0	0
27	0	0	0
28	0	0	0
29	0	0	0
30	0	0	0

**TABLA A7: PRECIPITACIONES DIARIAS NOVIEMBRE 2004 (mm)**

<b>Día</b>	<b>Coltauco</b>	<b>5 km AA Cortaderal</b>	<b>Pangal en río Pangal</b>
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0
11	1.2	6.5	6.6
12	27.3	89.5	113.1
13	0	0.3	11.6
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	0	0
20	0	0	0
21	0	0	0
22	0	0	0
23	0	0	0
24	0	2.5	6.1
25	0	0.1	0
26	0	0	0
27	0	0	0
28	0	0	0
29	0	0	0
30	0	0	0

**TABLA A8: PRECIPITACIONES DIARIAS MARZO 2005 (mm)**

<b>Día</b>	<b>Coltauco</b>	<b>5 km AA Cortaderal</b>	<b>Pangal en río Pangal</b>
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	2.8	13.5
8	0	0	0.3
9	0	0	0
10	0	0	0
11	6.3	17.5	19.4
12	0	0	0
13	0	0	0
14	0	0	0
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	0	0	0
19	0	1.0	0
20	0	1.8	1.9
21	0	0	8.3
22	0	0	0
23	0	0	0
24	0	0	0
25	0	0	0
26	0	0	0
27	0	0	0
28	0	0	0
29	0	0	0
30	0	0	0
31	0	2.8	0.3