



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCION**



**ESCUELA DE GRADUADOS**

**CENTRO DE CIENCIAS AMBIENTALES  
EULA-CHILE**

**PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y DISPONIBILIDAD DE  
AGUA, BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO, PARA DOS SUB-  
CUENCAS DEL RÍO BIOBÍO INCORPORANDO EL IMPACTO DEL APORTE  
NIVAL EN LA ZONA CORDILLERANA**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**POR**

**ALEJANDRA PATRICIA STEHR GESCHE**

**PROFESOR GUÍA**

**DR. CLAUDIO ZAROR ZAROR**

**PROFESOR CO-GUÍA**

**DR. ANDRES LOPEZ AVARIA**

**- MAYO 2008 -**



# UNIVERSIDAD DE CONCEPCION

ESCUELA DE GRADUADOS

CENTRO DE CIENCIAS AMBIENTALES EULA-CHILE



## ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HIDROLÓGICO Y DISPONIBILIDAD DE AGUA, BAJO ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO, PARA DOS SUB-CUENCAS DEL RÍO BIOBÍO INCORPORANDO EL IMPACTO DEL APOORTE NIVAL EN LA ZONA CORDILLERANA

Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Ambientales

por

Alejandra Patricia Stehr Gesche

Comisión examinadora de tesis de grado:

Dr. Claudio Zaror Zaror  
Facultad de Ingeniería  
Departamento Ingeniería Química  
Universidad de Concepción  
Profesor Guía

Dr. Andrés López Avaria  
Facultad de Ingeniería  
Departamento Ingeniería Civil  
Universidad de Concepción  
Profesor Co-Guía

Dr. Roberto Urrutia Pérez  
Centro EULA-Chile  
Universidad de Concepción

Dr. José Luis Arumi  
Facultad de Ingeniería Agrícola  
Departamento de Recursos Hídricos  
Universidad de Concepción

Examinador externo:  
Dr. Anton Huber  
Facultad de Ciencias  
Instituto de Geociencias  
Universidad Austral de Chile



Mayo 2008



*A toda mi familia, en especial  
a Omar, Isidora y Benjamín*

# INDICE

AGRADECIMIENTOS	ix
RESUMEN	x
ABSTRACT	xii
CAPITULO1: INTRODUCCION	1
1.1- CAMBIO CLIMÁTICO	2
1.1.1- Cambios climáticos esperados para la zona de estudio	3
1.2- CAMBIO CLIMÁTICO Y RECURSOS HÍDRICOS	8
1.3- LA GESTIÓN DE CUENCAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO	10
1.3.1- La experiencia nacional y regional	11
1.3.2 - Uso de modelos para gestión de cuencas ante el cambio climático	12
1.4 DISTINTOS TIPOS DE MODELOS HIDROLOGICOS	15
1.4.1 Modelación hidrológica espacialmente distribuida	16
1.4.2 Modelos distribuidos versus agregados	17
1.4.3 Modelos empíricos versus modelos físicamente basados	18
1.4.4 Procesos dominantes a diferentes escalas	18
1.5- SELECCIÓN DEL MODELO	19
1.6 EL MODELO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)	20
1.6.1 Introducción	20
1.6.2 Configuración de la cuenca	22
1.6.3 Fase terrestre del ciclo hidrológico	23
1.6.4- Rastreo	30
1.6.5 Análisis de sensibilidad	30
1.6.6 Calibración Automática	32
1.6.7 Interface gráfica	33
1.6- HIPÓTESIS	34
1.8- OBJETIVOS	34
1.8.1- Objetivo General	34
1.8.2- Objetivos Específicos	34
1.9- REFERENCIAS	35
CAPITULO 2: Hydrological modelling with SWAT under limited conditions of data availability:	
evaluation of results from a Chilean case study	42
2.1- Abstract	42
2.2- Résumé	43



2.3-	INTRODUCTION	44
2.4-	SELECTION OF THE STUDY AREA	45
2.5-	THE SWAT MODEL	46
2.6-	DATA SOURCES	47
2.6.1-	GIS data layers	47
2.6.2-	Time series	48
2.7-	MODEL CONFIGURATION	48
2.7.1-	Land Use and Soil Type	48
2.7.2-	Snow	49
2.8-	CALIBRATION AND VALIDATION	49
2.9-	DISCUSSION OF RESULTS	51
2.10-	CONCLUSIONS	53
2.11-	ACKNOWLEDGMENTS	53
2.12-	REFERENCES	54

### CAPITULO 3: Combining discharge data and MODIS imagery for evaluating the performance of SWAT

	and its snowmelt routine in a small Andean basin, Chile	63
3.1-	Abstract	63
3.2-	Résumé	64
3.3-	INTRODUCTION	65
3.4-	THE SWAT MODEL	66
3.4.1-	SWAT snowmelt hydrology	66
3.5-	MODIS SNOW COVER PRODUCT	68
3.6-	STUDY AREA	69
3.7-	USED DATA SETS	70
3.7.1-	GIS data layers	70
3.7.2-	Meteorological and hydrological data sets	70
3.7.3-	MODIS	71
3.8-	MODEL SET-UP	71
3.8.1-	Land Use and Soil Type	71
3.8.2-	Snow	71
3.9-	CALIBRATION AND VALIDATION	72
3.9.1-	Snow Cover Area (SCA) validation	73
3.10-	DISCUSSION OF RESULTS	73
3.11-	CONCLUSIONS	75
3.12-	ACKNOWLEDGMENTS	75

3.13- REFERENCES	76
CAPITULO 4: Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático, experiencia de dos cuencas del centro-sur Chileno.	85
4.1-- Resumen	85
4.2- INTRODUCCION	86
4.3- PREDICIONES SOBRE CAMBIO CLIMATICO	89
4.4- AREA DE ESTUDIO	90
4.5- METODOLOGIA	90
4.5.1- El modelo SWAT	92
4.5.2- Escenarios de cambio climático	93
4.5- RESULTADOS Y ANALISIS	95
4.5.1- Calibración y Validación del modelo SWAT para las cuencas en estudio	95
4.5.2- Resultados de la generación de escenarios	96
4.6- DISCUSION Y CONCLUSION	104
4.7- AGRADECIMIENTOS	107
4.8- REFERENCIAS	108
4.9- ANEXO 4.1	112
CAPITULO 5: Discusión y Conclusiones	115
5.1- DISCUSION GENERAL	115
5.1.1- Modelación distribuida experiencia para la cuenca del Biobío	115
5.1.2- Cambio Climático y posibles variaciones en los caudales de la cuenca del Biobío	117
5.2- CONCLUSIONES	118
5.3- FUTURAS INVESTIGACIONES	120
5.4-REFERENCIAS	122



# FIGURAS

<b>Fig. 1.1</b> Distribución del agua en el planeta (adaptado de Hinrichsen <i>et al.</i> , 1998)	1
<b>Fig. 1.2</b> Vínculos entre la población y el agua dulce (adaptado de Hinrichsen <i>et al.</i> , 1998)	2
<b>Fig. 1.3</b> Campos de temperatura superficial y sus variaciones respecto del clima actual expresadas en °C según escala de colores al pie de la figura. Periodo 2046 – 2065.(Fuente CONAMA-DGF (2006)).	4
<b>Fig. 1.4</b> Diferencias de temperaturas media diaria escenario A2 (futuro – presente) para las distintas estaciones del año. Periodo 2071 – 2100.(Fuente CONAMA-DGF (2006)).	5
<b>Fig. 1.5</b> Diferencias de temperaturas media diaria escenario B2 (futuro – presente) para las distintas estaciones del año. Periodo 2071 – 2100.(Fuente CONAMA-DGF (2006)).	6
<b>Fig. 1.6</b> Campo de precipitación y sus variaciones respecto del clima actual, expresadas en mm/día según escala de colores al pie de la figura. Periodo 2046 – 2065.(Fuente CONAMA-DGF (2006)).	7
<b>Fig. 1.7</b> Diferencias de precipitación estacional; escenario A2 (futuro – presente) para las distintas estaciones del año. Periodo 2071 – 2100.(Fuente CONAMA-DGF (2006)).	8
<b>Fig. 1.8</b> Diferencias de precipitación estacional; escenario B2 (futuro – presente) para las distintas estaciones del año. Periodo 2071 – 2100.(Fuente CONAMA-DGF (2006)).	9
<b>Fig. 1.9</b> Representación esquemática de los métodos para evaluar los recursos hídricos bajo condiciones climáticas cambiantes. GCM: modelos de circulación Global; RCM: modelos climáticos regionales; MHM: modelo hidrológicos macro escala; MWB: modelo de balance de agua macro escala; CHM: modelo hidrológico a escala de cuenca. (Xu & Singh 2004).	14
<b>Fig. 1.10</b> Superposición de las diferentes capas de información conectadas al modelo SWAT	22
<b>Fig. 1.11</b> Sub-cuencas en Cuenca Lonquimay.	23
<b>Fig. 1.13</b> Representación de la fase terrestre del ciclo hidrológico en SWAT	27
<b>Fig. 1.14</b> Muestreo LH – OAT para un modelo de 2 parámetros. X representa los puntos de LH y los puntos del OAT	31
<b>Fig. 1.15</b> Método SCE –UA (Duan <i>et al.</i> , 1994).	33
<b>Fig. 2.1</b> Location of the Vergara basin	59
<b>Fig. 2.2</b> Meteorological and gaging stations used for modelling. The figure also shows the river network extracted by means of the SWAT GIS interface	59
<b>Fig. 2.3</b> (a) Land use/cover and (b) soil types for the Vergara	60
<b>Fig. 2.4</b> Location of the 4 gaging stations used for calibration and validation stations and percentage of the total basin area cover by each one of them (Rehue and Tijeral are nested).	61
<b>Fig. 2.5</b> Calibration and validation model results (monthly output) at the different control points	62
<b>Fig 3.1</b> Sample image of the MOD10A2 product	82

<b>Fig. 3.2</b> Location of the Lonquimay basin	82
<b>Fig. 3.3</b> (a) Meteorological and gaging stations used in the SWAT model application (b) Mean monthly flows at the Lonquimay Basin outlet.	83
<b>Fig. 3.4</b> Main land use/cover classes in the Basin (classes representing > 1% of the basin area only).	83
<b>Fig. 3.5</b> Model calibration and validation results (monthly output)	84
<b>Fig. 3.6</b> Spatial expression of the percentual disagreement between snow cover derived from monthly model outputs and from MODIS imagery, at the level of the individual sub-basins (for the year 2000, only the months from March - December are considered)	84
<b>Fig. 4.1</b> Representación esquemática de los métodos para evaluar los recursos hídricos bajo condiciones climáticas cambiantes. GCM: modelos de circulación Global; RCM modelos climáticos regionales; MHM: modelo hidrológicos macro escala; MWB modelo de balance de agua macro escala; CHM: modelo hidrológico a escala de cuenca. (Xu & Singh 2004).	88
<b>Fig. 4.2</b> Ubicación de las cuencas del Río Vergara, Río Lonquimay y estaciones meteorológicas y fluviométricas utilizadas.	91
<b>Fig. 4.3</b> Caudales medios mensuales para las cuencas del Río Vergara en Tijeral y Río Lonquimay.	91
<b>Fig. 4.4</b> Esquema de desarrollo (marco genérico) e interrelación utilizado para la modelación hidrológica, adaptado de Debels <i>et al.</i> , (2007).	92
<b>Fig. 4.6</b> Salidas regionalizadas (temperatura y precipitación media anual (35°-40° S, 70°-75°O) para 6 escenarios marcadores y los diferentes GCM (MAGICC/SCENGEN v4.1). a) Ventana centrada en 2050 sólo gases invernadero. b) Ventana centrada en 2085 sólo gases invernadero. c) Ventana centrada en 2085 gases invernadero + aerosoles. d) Comparación de la variación de temperatura y precipitación media anual a partir del RCM realizado por CONAMA- DGF y escenarios generados con MAGICC/SCENGEN v4.1 modelo de circulación global HADCM3, periodo 2071-2100 (sector cuenca del Río Vergara).	97
<b>Fig. 4.7</b> Diferencias de temperaturas media diaria (futuro – presente) promedio para los meses de diciembre, enero y febrero, periodo 2071 – 2100. (a) escenario A2 y (b) escenario B2 (Fuente CONAMA-DGF (2006)).	98
<b>Fig. 4.8</b> Diferencias de precipitación estacional (promedio meses diciembre, enero y febrero), periodo 2071 – 2100. (a) escenario A2 y (b) escenario B2 (Fuente CONAMA-DGF (2006)).	98
<b>Fig.4.9</b> Variación promedio anual de precipitación versus caudal para las cuencas de Lonquimay (azul) y Vergara (rojo). (a) Escenarios centrados en 2050 considerando solo gases invernadero (b) Escenarios centrados en 2085 considerando gases invernadero y aerosoles	100
<b>Fig. 4.10</b> Curva de duración de caudales base y de los escenarios generados por MAGICC/ SCENGEN: caudal promedio de todos los escenarios modelados, situación más favorable y situación más desfavorable en la estación Vergara en Tijeral para los meses de marzo y julio. (a) Escenarios	

- centrados en 2050; los escenarios fueron generados solo considerando gases invernadero. (b) escenarios centrados en 2085; generados considerando gases invernadero y aerosoles. 101
- Fig. 4.11** Curva de duración de los caudales base, de los escenarios generados por MAGICC/ SCENGEM (variaciones mensuales considerando gases invernadero y aerosoles): caudal promedio de todos los escenarios modelados, situación más favorable y situación más desfavorable y los dos escenarios del RCM para los meses de junio y noviembre. (a) Vergara (b) Lonquimay. 102
- Fig. 4.12** Caudales promedio mensual para los 30 años modelados, la figura muestra el caudal base, los caudales obtenidos para los escenarios del RCM y la envolvente de caudales obtenidos de MAGICC/SCENGEM. (a) Vergara (b) Lonquimay 102
- Fig. 4.13** Promedios mensuales para los 30 años modelados en la cuenca del río Lonquimay. (a) Diferencias en la cantidad de nieve caída promedio en los distintos meses del año en la cuenca del río Lonquimay. (b) Diferencias en la cantidad de nieve derretida promedio en los distintos meses del año en la cuenca del río Lonquimay. 103
- Fig. 4.14** Cantidad de nieve caída durante julio (mm) en la distintas sub-cuenca de Lonquimay, escenario base, escenario más favorable y desfavorable. 103
- Fig. A1.1** Cuatro principales familias de escenarios de emisiones, basadas en las predicciones de los diferentes expertos mundiales con respecto al consumo de combustibles fósiles en el futuro. 113
- Fig. A1.2** Emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y dióxido de sulfuro para los seis SRES marcadores, A1B, A2, B1, B2, A1FI y A1T. Para CO<sub>2</sub>, y dióxido de sulfuro se muestran las emisiones antropogénicas, mientras que para CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O se muestran las emisiones totales incorporando un componente natural constante. También se muestran las correspondientes emisiones del escenario IS92a (IPCC, 2001<sup>a</sup>) basado en el reporte especial sobre Escenarios de Emisiones (Nakicenovic *et al.*, 2001). 113
- Fig. A1.3** Predicciones del efecto de estos diferentes escenarios de consumo con respecto al aumento mundial de la temperatura. También se muestra el anterior escenario IS92a como comparación. 114

# TABLAS

<b>Tabla 1.1</b> Algunos vacíos existentes entre la capacidad de los Modelos de circulación Global (GCM's) y las necesidades hidrológicas (extraída de (Xu & Singh 2004)).	13
<b>Tabla 1.2</b> Resumen de los diferentes criterios tomados en cuenta durante la selección del modelo.	20
<b>Table 2.1</b> Mean monthly discharges (m <sup>3</sup> /s) at the different control points in the Vergara basin.	57
<b>Table 2.2</b> Ranking of the 8 most sensitive parameters per sub-basin (1= most sensitive) and theirs variation range for autocalibration.	57
<b>Table 2.3</b> Statistical indicators use to evaluate model performance.	58
<b>Table 2.4</b> Statistical indicators of model performance (monthly output) calculated at the different control points within the Vergara Basin: model calibration / model validation	58
<b>Table 2.5</b> Statistical index for the validation period, separately evaluated for the low flow (November – April) and high flow (May – October) period	58
<b>Table 3.1</b> Ranking of the most sensitive parameters and their corresponding values after manual calibration	79
<b>Table 3.2</b> Modelled and observed (in bold) seasonal and annual discharge values (calibration)	79
<b>Table 3.3</b> Statistical indicators of model performance (monthly output) calculated at the outlet of the Lonquimay Basin, considering different periods for model evaluation: summer – autumn, winter - spring and the complete period	80
<b>Table 3.4</b> Results from the annual evaluation of the representation of snow cover extent: model versus MODIS imagery	80
<b>Table 3.5</b> Results from the monthly evaluation of the representation of snow cover extent: model versus MODIS imagery (percentage of total cells)	81
<b>Tabla 4.1</b> Indicadores estadísticos para las etapas de calibración y validación para las cuencas de los Ríos Vergara y Lonquimay.	95
<b>Tabla 4.2</b> Cambios mensuales y anuales esperados en las temperaturas medias y precipitaciones para las cuencas de los Ríos Vergara y Lonquimay (2071 – 2100), datos Estudio variabilidad Climática (CONAMA-DGF (2006))	99
<b>Tabla 4.3</b> Razón entre precipitación y nieve durante los meses fríos, escenario actual, escenario más favorable y desfavorable.	104

## AGRADECIMIENTOS

En los siguientes párrafos quisiera expresar mis agradecimientos a todas las instituciones y personas que hicieron posible el desarrollo de mi tesis de doctorado. En primer lugar a toda mi familia, en especial a Omar, Isidora y Benjamín quienes han sido un gran apoyo durante estos años de doctorado, además de mis papas quienes me han apoyado en todo momento y me han ayudado en todo cuanto he necesitado.

Quisiera también agradecer a Patrick Debels, Francisco Romero y Hernán Alcayaga con los cuales he trabajado durante estos últimos cuatro años en los proyectos Twinbas y Twinlatin. Ellos me han apoyado constantemente durante el doctorado ayudándome a conseguir y procesar los datos necesarios para mi trabajo, así como, con consejos e ideas que me fueron de gran utilidad para el desarrollo de mi tesis.

A todos mis colegas del Centro Eula, gracias por toda su ayuda prestada para llevar a buen fin esta tesis. Quisiera también agradecer al personal administrativo del centro EULA, especialmente a Lorena Valencia por que siempre me ayudo a solucionar cualquier problema administrativo que surgió durante el desarrollo de esta tesis, así como también, a Yely Ambiado ya que siempre estaba disponible a colaborar con lo que le pidiera.

Al profesor Dr. Raghavan Srinivasan director del Spatial Sciences Laboratory de la Universidad Texas A&M que me recibió en su laboratorio, permitiéndome conocer de mejor manera el modelo SWAT, y por todos los mails que me contesto aclarándome dudas conceptuales respecto del modelo.

A los proyectos de cooperación internacional, TWINBAS y TWINLATIN, dentro de los cuales se enmarco gran parte de mi tesis. También quiero agradecer a la Dirección General de Aguas Chilena (DGA), y particularmente a las personas de la DGA de la Región del Biobío, a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), así como también a todas las otras personas que colaboraron con datos que no hayan sido explícitamente mencionados anteriormente.

A la beca Premio Universidad que me permitió desarrollar el estudio de este doctorado.

No puedo dejar pasar esta ocasión sin agradecer a mis amigos del centro Eula y compañeros de doctorado que tantas veces me ayudaron, y a todas aquellas personas que pudiera haber omitido sin intención.

Finalmente agradezco a los miembros de la comisión examinadora cuyas correcciones y comentarios permitieron una mejor ordenación y presentación conceptual de la tesis.

## RESUMEN

El agua dulce es un elemento esencial para la sobrevivencia y desarrollo de los seres humanos y de los ecosistemas continentales. Chile es un país montañoso donde el 70% de la población se abastece del agua proveniente de las zonas alto-andinas. Como consecuencia del cambio climático global se esperan importantes cambios en los patrones de precipitación en gran parte de Sudamérica. Específicamente en el caso Chileno, el Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI, realizado por CONAMA-DGF, indica que para la zona centro sur de Chile, el régimen pluviométrico ha tenido una tendencia decreciente desde mediados de los años 1970. En cuanto a las temperaturas se refiere, en la región comprendida entre Santiago y Concepción se aprecia desde 1960 un aumento de  $+0.05^{\circ}\text{C}/\text{década}$  y de  $+0.18^{\circ}\text{C}/\text{década}$  en los promedios anuales de temperatura máxima y mínima diaria, respectivamente. Dicho informe menciona que la pluviometría disminuirá en la mayor parte del territorio y en el caso de las temperaturas dominarán los cambios positivos en todos los sectores de la cuenca para el período comprendido entre 2071 – 2100. Lo anterior, junto con la elevación de la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$ , crea un cuadro preocupante para la región centro sur del país, ya que se estima que uno de los impactos hidrológicos más importantes que se producirá será reducción de la cantidad de nieve caída en cuencas de altura, teniendo como consecuencia cambios en la disponibilidad y calidad de agua, así como complicaciones en la gestión de los embalses y sistemas de riego. Es por ello, que es importante poder cuantificar estos efectos a nivel del ciclo hidrológico de los ríos locales, ya que esto posibilita un adecuado manejo de los recursos hídricos, como una protección efectiva al medio ambiente. Actualmente en Chile se está trabajando en elaborar una propuesta nacional de gestión de cuencas “Estrategia Nacional de Gestión de Cuencas”, que nace a partir de lo estipulado en la Agenda Ambiental 2006-2010, lo cual es fuertemente respaldado por el poder ejecutivo.

De lo anterior nace la necesidad de proveer a los encargados de tomar las decisiones de herramientas que cuenten con un soporte científico y técnico sólido, para así ayudar en la gestión los recursos hídricos, de tal manera de asegurar un suministro de agua eficiente para consumo humano pero que sea compatible con las funciones del ecosistema. Para ello el adecuado entendimiento de los procesos de precipitación escorrentía, tanto al mediano como largo plazo, así como su impacto en el balance hídrico de la cuenca, es fundamental. En este sentido el desarrollo y aplicación de un modelo hidrológico juega un rol de gran importancia, ya que además permite considerar el cambio climático al relacionar las variables climáticas con los caudales. En este contexto el objetivo de esta tesis fue generar una herramienta capaz de analizar el comportamiento de las cuencas en estudio: Vergara ( $4.265\text{ km}^2$ ) y Lonquimay ( $455\text{ km}^2$ ), bajo escenarios de cambio climático tanto a macro como a meso-escala (sub-cuencas), incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana y la disponibilidad del recurso agua durante diferentes períodos del año. Para realizar la modelación y



considerando la disponibilidad de datos entre otros factores, se eligió el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT). En el caso de la cuenca del río Lonquimay también se utilizaron las coberturas de nieve entregadas por imágenes MODIS, para validar el área cubierta de nieve. La evaluación estadística de los resultados entregado por el modelo durante los periodos de calibración y validación indican que el modelo es capaz de representar de manera adecuada los caudales medios mensuales en ambas cuencas. En cuanto al cambio climático, se utilizaron una serie de escenarios climáticos con la finalidad de obtener un rango de cambios esperados en los caudales para las distintas estaciones del año. Los escenarios fueron generados con MAGICC/SCENGEN (42 escenarios) y otros dos escenarios se obtuvieron a partir de un modelo climático regional. Los resultados indican una amplia gama de impactos potenciales en términos de reducción en la magnitud de los caudales medios mensuales, siendo esta variación mayor en las épocas de primavera y verano. Este estudio permitió realizar una primera interpretación cualitativa de los potenciales impactos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Biobío.

Palabras Claves: Modelación hidrológica, SWAT, cambio climático, Chile, Biobío, Vergara, Lonquimay



## ABSTRACT

Fresh water is essential for human survival and development. It is also important to ensure a proper functioning of continental ecosystems. Chile is a mountainous country where water supply to 70% of the population is originated at the higher-Andean zones. As a result of global climate change important modifications in precipitation patterns of large parts extent of South America are expected. In the Chilean case specifically, the Study of Climatic Variability for Chile for Century XXI (“Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI”), prepared by CONAMA-DGF, indicates that the pluviometric regime in South central Chile has shown a decreasing tendency from mid 1970`s. In the case of temperature, increases around  $+0.05^{\circ}\text{C}/\text{decade}$  and  $+0.18^{\circ}\text{C}/\text{decade}$  in annual average of daily maximum and minimum temperature, respectively, have been recorded in the region located between Santiago and Concepción from 1960 until now. Moreover, rainfall is expected to decrease in most parts of Chile by 2071-2100, whereas temperatures will tend to increase in all the sectors of the Bio Bio river basin. As a result, the  $0^{\circ}\text{C}$  isotherm is also expected to rise, reducing snow accumulation in high mountainous terrains. The consequences of such scenario on the hydrological system are not well understood. Water availability and quality, as well as dams and irrigation systems will be affected by reductions in snow fall. Because of this, it is important to be able to quantify the effects that climatic change will induce on river hydrology, in order to support the identification and implementation of sustainable water management strategies.

Therefore, it is necessary to provide decision makers with management tools based on sound scientific knowledge, to ensure appropriate supply of water for human and industrial consumption, without affecting the water ecosystems. Indeed, suitable understandings of rainfall run-off processes, in the medium and long term, as well as its impact in the hydrological water balance of river basin, are key aspects that need to be well understood. In this respect, development and application of spatially distributed hydrological models play an important role, since climatic variables (such as precipitation and temperature) could be related to water flows.

In this context, the objective of this thesis was to generate a tool to analyze the behavior of two basins: Vergara (4.265 km<sup>2</sup>) and Lonquimay (455 km<sup>2</sup>), under different scenarios of climate change, incorporating the impact of snow contribution at the Andes mountain zone and seasonal water availability. The Soil and Water Assessment Tool (SWAT) was choosen as the basis for modeling,, considering the local availability of data. MODIS imagines were also used in the case of the Lonquimay basin to validate the snow cover area. Statistical evaluation of simulation results obtained during calibration and validation indicates that the model is capable to represent monthly mean flows adequately for both basins. Regarding climate change, with the aim to obtain an envelope of expected seasonal flow changes, a group of climate change scenarios were

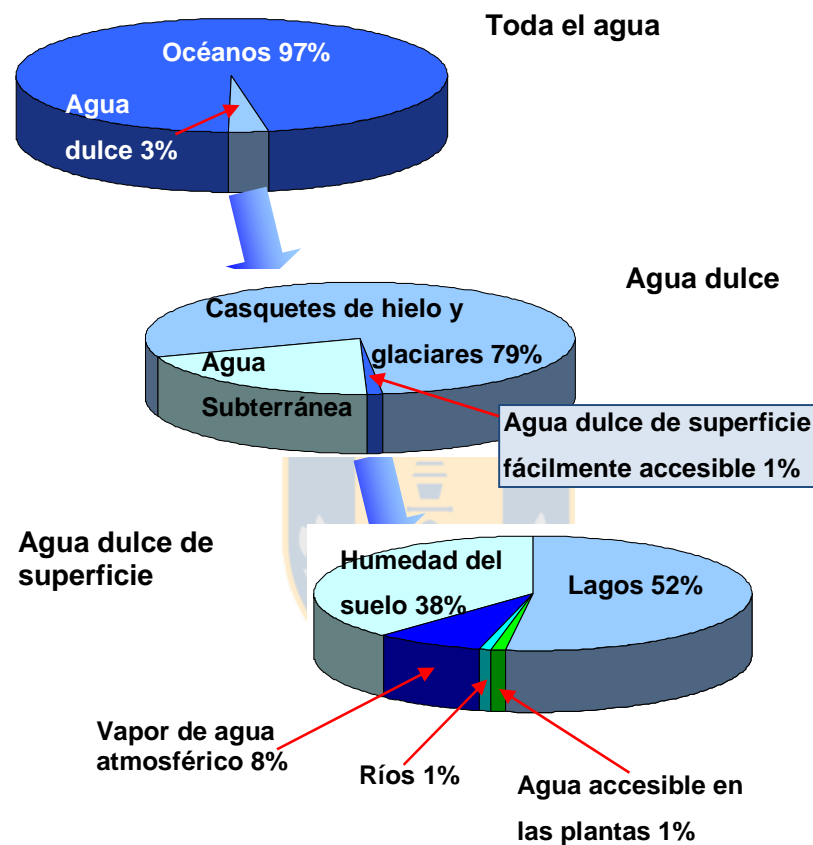
developed. Different scenarios were generated with MAGICC/SCENGEN (42 scenarios) and other two were obtained from a regional climate model. Results indicate a wide array of potential impacts in terms of reductions in mean monthly flows, being these variations greater in spring and summer. This study has led to a first qualitative assessment of potential impacts of climate change on the availability of water resources at the Biobío basin.

Key words: Hydrological modelling, SWAT, climate change, Chile, Biobío, Vergara, Lonquimay



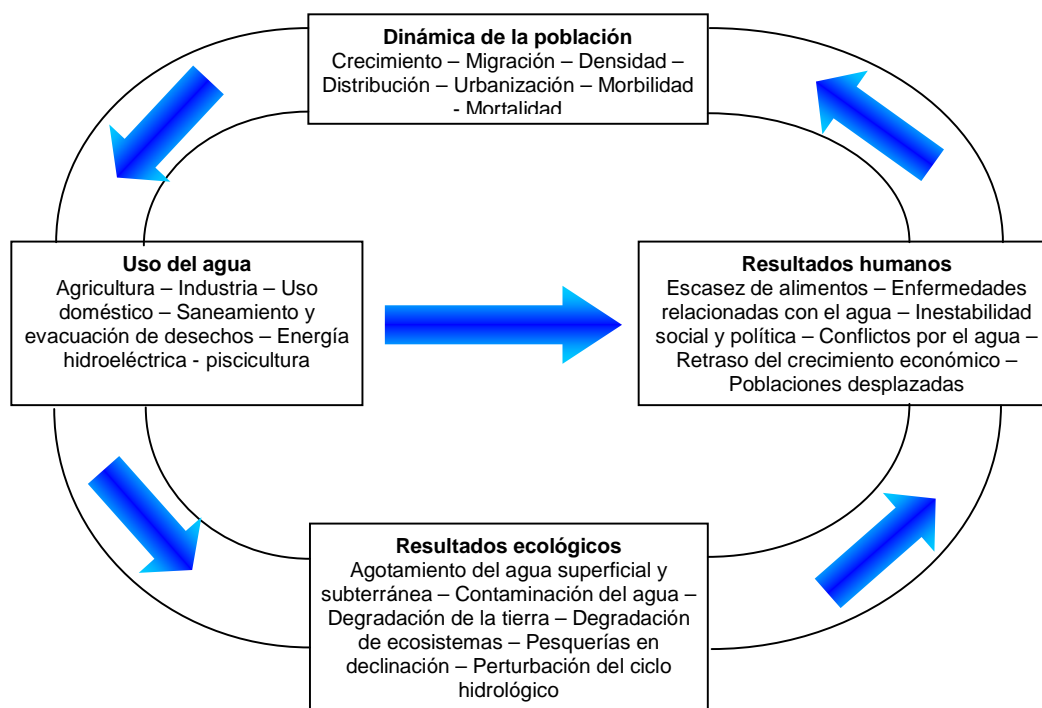
## CAPITULO1: INTRODUCCION

El agua dulce corresponde sólo al 3% del total de agua existente en el planeta (Figura 1.1). El agua es el elemento esencial para la sobrevivencia y el desarrollo de los seres humanos y de los ecosistemas continentales. De ese 3% de agua dulce un 79 % está congelada y solamente un 1% es agua dulce de superficie y fácilmente accesible (Hinrichsen *et al.*, 1998).



**Fig. 1.1** Distribución del agua en el planeta (adaptado de Hinrichsen *et al.*, 1998)

Chile es un país montañoso donde el 70% de la población se abastece del agua proveniente de las zonas alto-andinas. La Cordillera de los Andes, el cordón montañoso más importante del país, posee gran cantidad de glaciares, fuentes de agua congelada que, gracias a su proceso de acumulación y derretimiento, abastecen a los ecosistemas, a la población y a las actividades productivas del país.



**Fig. 1.2** Vínculos entre la población y el agua dulce (adaptado de Hinrichsen *et al.*, 1998)

Debido a que el agua es una necesidad básica para la existencia humana y el agua dulce es un recurso limitado en la tierra, la repercusión que puede tener el cambio climático en los recursos disponibles de agua dulce puede tener consecuencias importantes para el desarrollo sustentable (Figura 1.2). Por lo anterior es importante poder cuantificar los efectos que producirá el cambio climático a nivel del ciclo hidrológico, ya que eso posibilitará una adecuada gestión de los recursos hídricos, como así también una protección efectiva al medio ambiente.

Lo antes mencionado es de gran importancia ya que si se tiene una estimación de los posibles cambios en el ciclo hidrológico, se puede considerar este aspecto en la construcción de los sistemas de agua y en el manejo de los recursos hídricos, por ejemplo, donde se espera que la escorrentía aumente se deben construir drenajes y embalses que sean capaces de absorber estas escorrentías, en cambio en los lugares donde se prevé que la escorrentía disminuya se necesitará algún sistema de almacenamiento de agua.

## 1.1- CAMBIO CLIMÁTICO

Durante los últimos 19 años el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), ha producido una serie de publicaciones de referencia en la materia y que utilizan gran número de

responsables de políticas, científicos, otros expertos y estudiantes<sup>1</sup>. Desde su creación se han publicado cuatro informes de evaluación. Estos informes están compuestos por varios volúmenes y entregan información científica, técnica y socioeconómica sobre el cambio climático, sus causas, sus posibles efectos y medidas de respuesta correspondiente. El primer informe fue publicado en 1990, el segundo en 1995, el tercero en 2001 y el cuarto en 2007.

En el informe del Grupo II del Panel Internacional sobre cambio climático (Meehl *et al.*, 2007, Trenberth *et al.*, 2007) se menciona que los caudales punta pasarán de primavera a invierno en muchas zonas en que las nevadas son actualmente un componente importante del equilibrio hídrico. Las temperaturas más altas significan que una mayor proporción de las precipitaciones invernales será en forma de lluvias en lugar de nieve y, por lo tanto, no se almacenará en la superficie de la tierra hasta el deshielo de la primavera. Es probable que la magnitud y la frecuencia de las inundaciones aumenten en la mayoría de las regiones, y que los caudales bajos disminuyan en muchas regiones. La dirección general del cambio en los caudales extremos y en la variabilidad de éstos está en general en consonancia entre los distintos escenarios de cambio climático.

Está comprobado el hecho de que en los últimos decenios los glaciares de América Latina han perdido volumen (Carrasco *et al.*, 2005; Coudrain *et al.*, 2005). El calentamiento de las regiones de alta montaña podría dar lugar a la desaparición de una importante superficie de nieve y hielo, que podría tener efectos sobre las actividades turísticas y deportivas de montaña. Dado que estas zonas contribuyen a los flujos de los caudales de los ríos, esta tendencia también reduciría la disponibilidad de agua para riego, generación de energía hidroeléctrica y navegación (IPCC 2007, Magrin *et al.*, 2007).

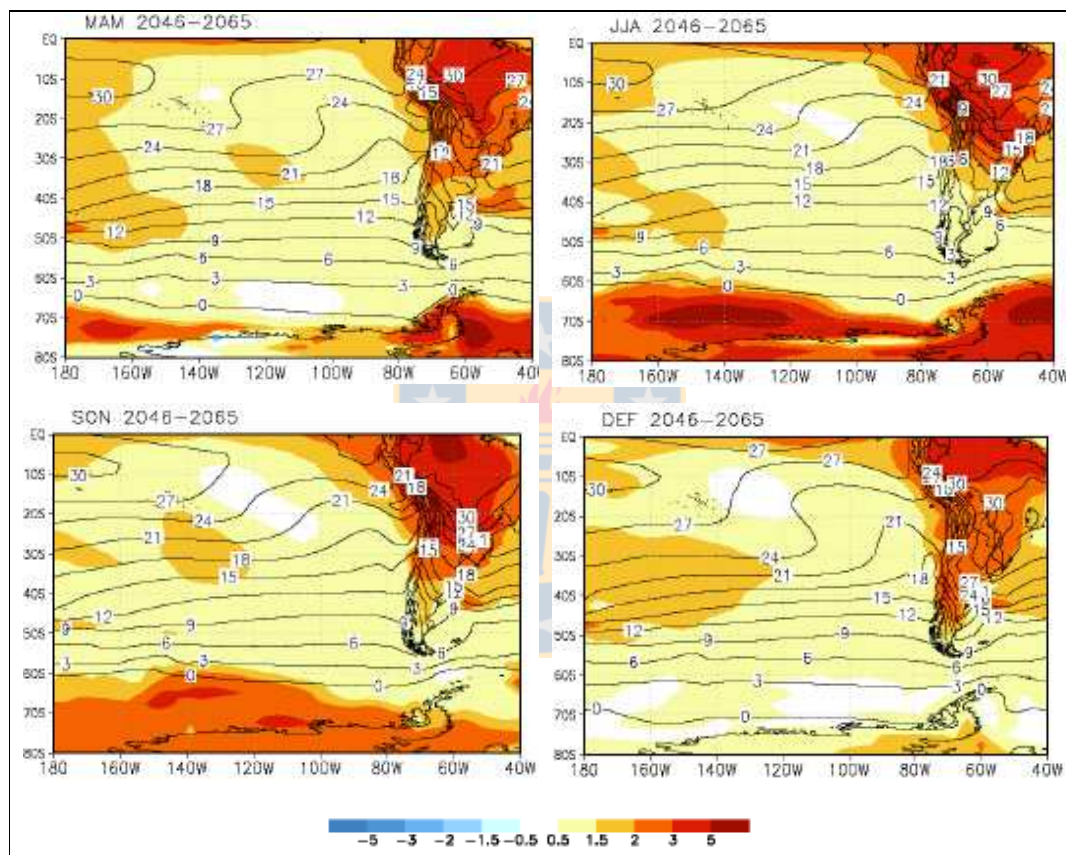
### **1.1.1- Cambios climáticos esperados para la zona de estudio**

Como consecuencia del cambio climático global se esperan importantes cambios en los patrones de precipitación en gran parte de Sudamérica (Watson *et al.*, 1997). Un análisis de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) indica una disminución media de más de 100 mm en las precipitaciones medias anuales registradas en las estaciones ubicadas en la cuenca del río Biobío. Escenarios de cambio climático global predicen una disminución para el oeste de Sudamérica (Hulme y Sheard, 1999), esperan una disminución de las precipitaciones de alrededor de 3% a 8% hasta el 2020 (comparado con el periodo 1961-1990), 4 -12% hasta 2050 y 6-18% hasta el 2080 (escenarios de emisiones B1 y A1). Estos cambios pueden tener severos efectos para el balance hídrico de los ríos (Parry *et al.*, 1999). La variación estacional del régimen es más extrema, muy lluviosa en invierno y extremadamente seca en invierno.

---

<sup>1</sup> (<http://www.ipcc.ch/about/faq/IPCC%20Introduction%20S.pdf>)

Específicamente en el caso Chileno, el Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI (CONAMA – DGF 2006) financiado por la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) y realizado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF) especifica que para la zona centro sur de Chile, el régimen pluviométrico ha tenido una tendencia positiva hasta mediados de los años 1970 y luego una tendencia decreciente. En cuanto a las temperaturas se refiere, en la región comprendida entre Santiago y Concepción se aprecian desde 1960 un aumento de  $+0.05^{\circ}\text{C}/\text{década}$  y de  $+0.18^{\circ}\text{C}/\text{década}$  en los promedios anuales de temperatura máxima y mínima diaria, respectivamente.



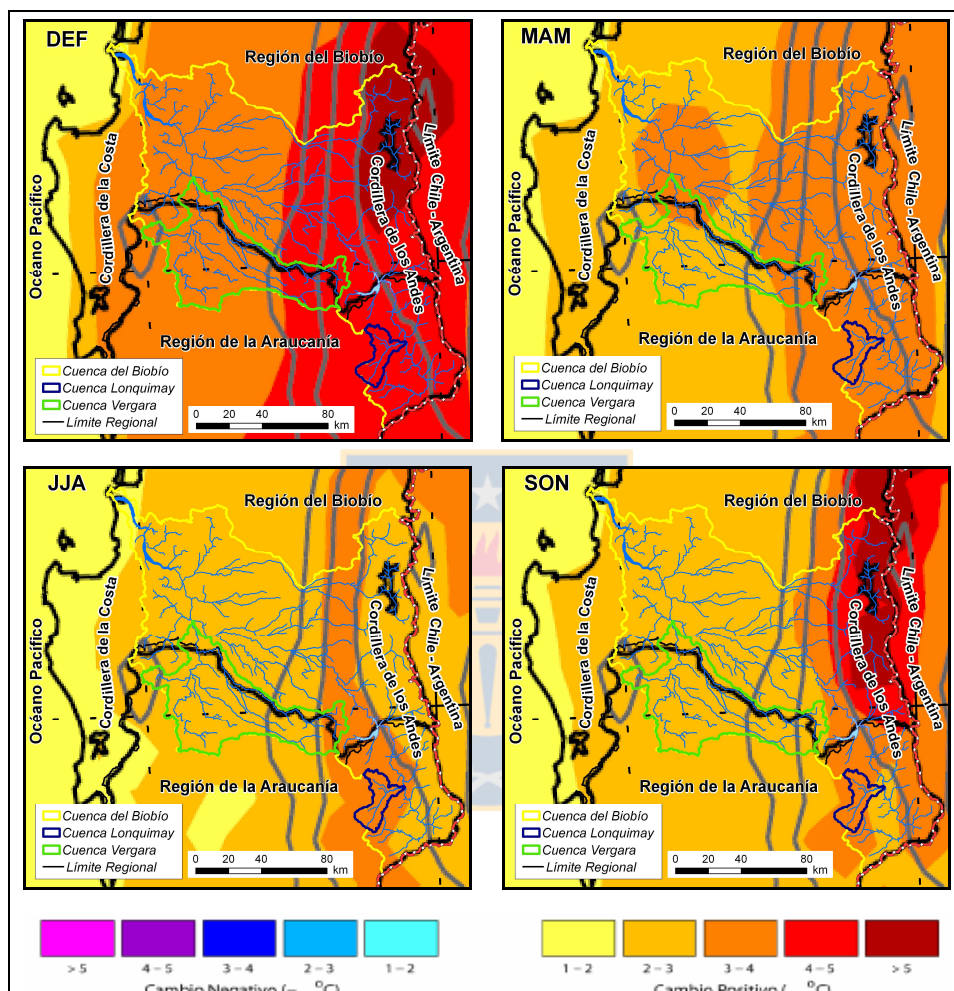
**Fig. 1.3** Campos de temperatura superficial y sus variaciones respecto del clima actual expresadas en  $^{\circ}\text{C}$  según escala de colores al pie de la figura. Periodo 2046 – 2065.(Fuente CONAMA-DGF (2006)).

Por otro lado dicho informe también menciona que debido al alza de altura que tendría la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$ , las crecidas invernales de los ríos con aporte nival se verían incrementadas y la reserva nival disminuida. En cuanto a la pluviometría esta disminuiría en la mayor parte del territorio. Lo anterior junto con la elevación de la isoterma  $0^{\circ}\text{C}$  crea un cuadro preocupante para la región centro sur del país.

Del Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI CONAMA-DGF (2006) se pueden extraer las predicciones sobre cambios esperados en las precipitaciones y temperaturas para la zona que abarca



el área de estudio, a continuación se presentan los resultados para un periodo intermedio (2046 – 2065) y las predicciones para fines del siglo. El clima intermedio se caracterizo por medio de salidas del AOGCM que luego se utilizó para forzar las simulaciones regionales (HadCM3), los resultados solo se dan para el escenario de emisiones A2 que es el más extremo en cuanto a emisiones de gases con efecto invernadero.



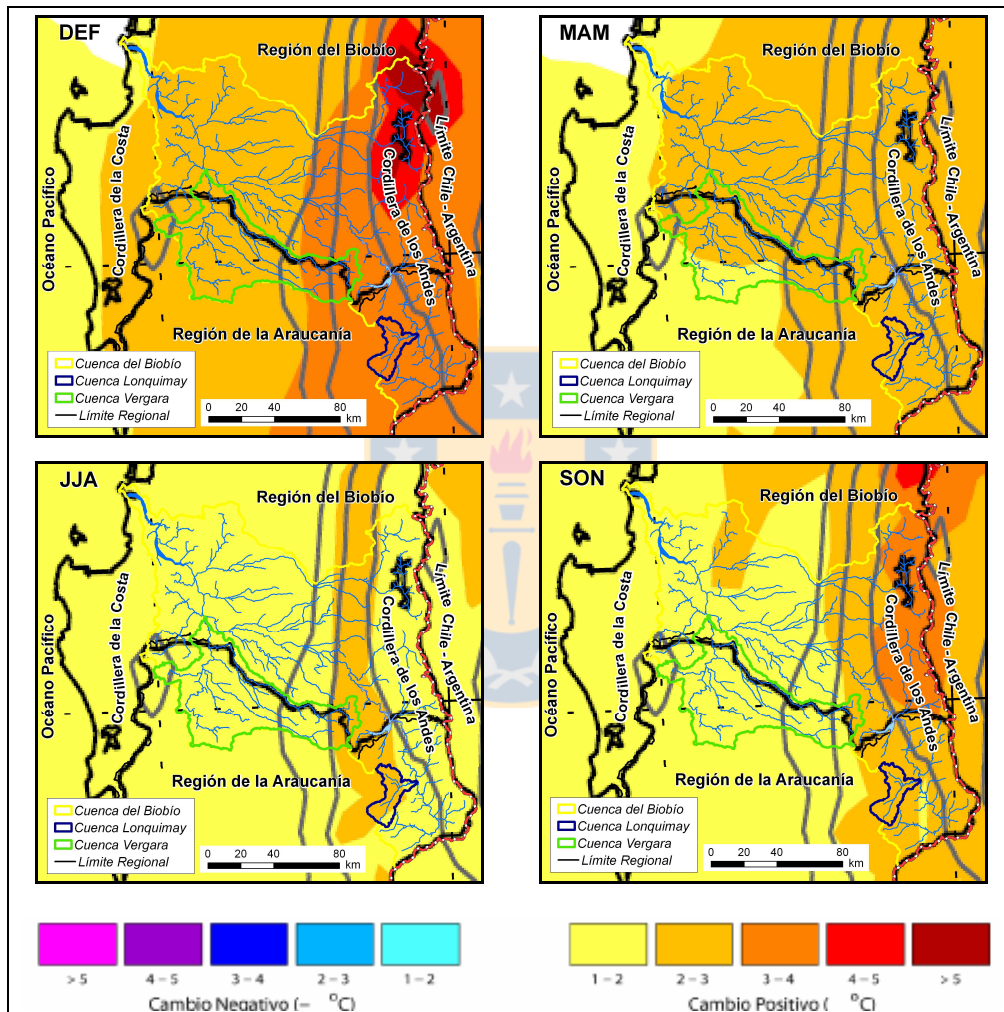
**Fig. 1.4** Diferencias de temperaturas media diaria escenario A2 (futuro – presente) para las distintas estaciones del año. Periodo 2071 – 2100.(Fuente CONAMA-DGF (2006)).

Para el caso de fines del siglo XXI, se utilizó primeramente un modelo de gran escala (HadCM3) para forzar indirectamente simulaciones regionales. El modelo atmosférico que es forzado en superficie con las salidas del modelo antes mencionado es el HadAM3, el cual tiene características muy similares al anterior pero con mayor resolución, éste a su vez forzó las simulaciones regionales generadas con el modelo PRECIS.



### Temperaturas

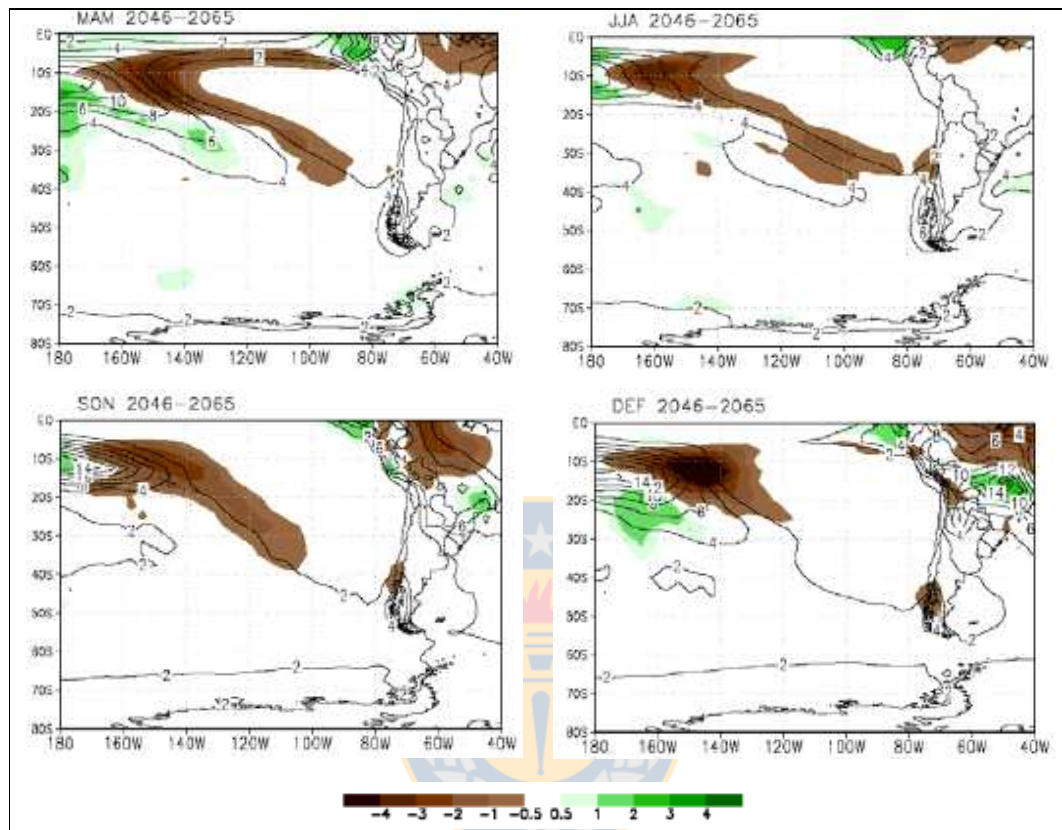
En el caso del periodo intermedio, el calentamiento se concentra sobre el territorio continental, no mostrando en la zona costera diferencias en los cambios considerando temporalidad, y se puede apreciar que se estima un aumento de entre 1.5°C y 3°C aproximadamente (Fig. 1.3). Se debe mencionar que la interpretación en detalle es difícil debido a la resolución espacial del modelo y la escala a la que acá se presenta.



**Fig. 1.5** Diferencias de temperaturas media diaria escenario B2 (futuro – presente) para las distintas estaciones del año. Periodo 2071 – 2100.(Fuente CONAMA-DGF (2006)).

Para el caso del periodo comprendido entre 2071 - 2100 (fines del siglo XXI), dominan los cambios positivos en todos los sectores de la cuenca. Para el caso de las temperaturas medias (Fig. 1.4 y 1.5), en el caso del escenario A2 se puede observar que la variación es menor en la zona costera y va aumentando hacia la cordillera. Estacionalmente el calentamiento es mayor en verano excediendo los 5°C en algunos sectores

cordilleranos. Para el escenario B2, se pueden observar las mismas tendencias anteriores, pero más moderadas, por ejemplo en verano se estima un aumento en la temperatura media de entre 3 y 4°C para la zona cordillerana.

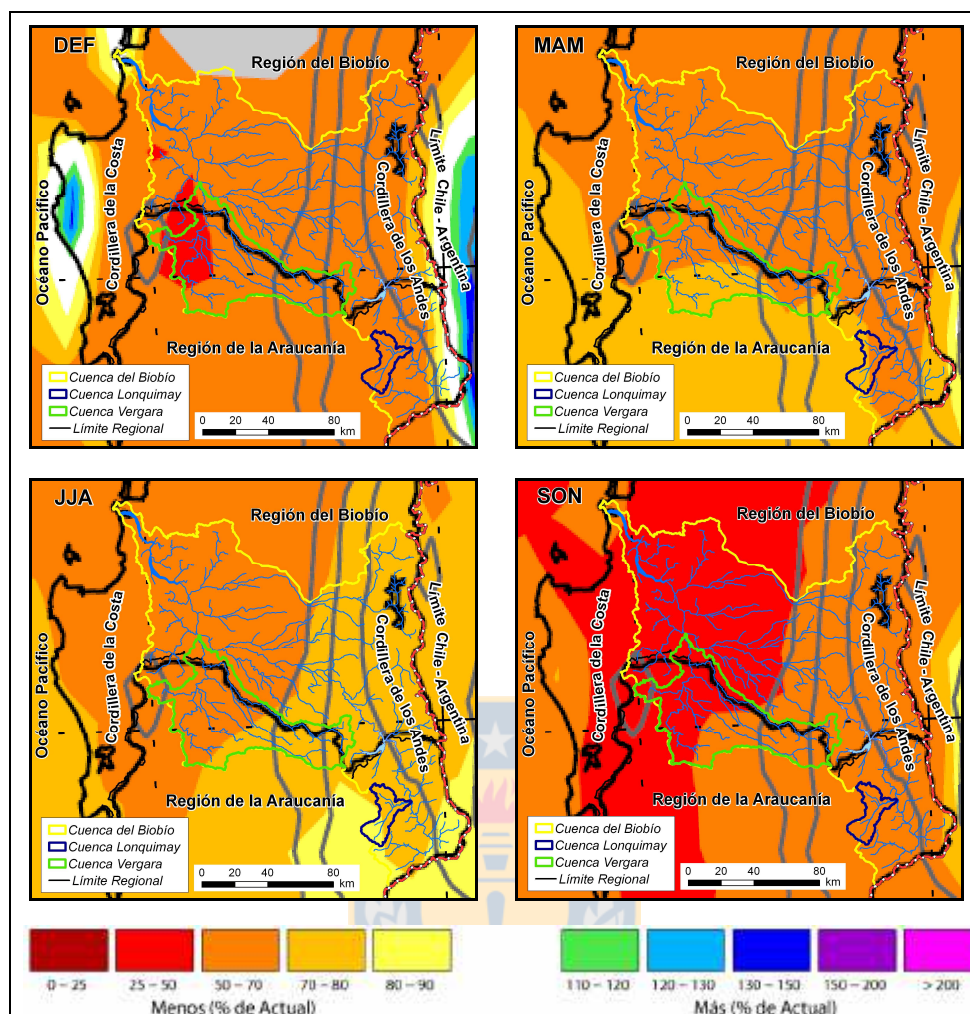


**Fig. 1.6** Campo de precipitación y sus variaciones respecto del clima actual, expresadas en mm/día según escala de colores al pie de la figura. Periodo 2046 – 2065.(Fuente CONAMA-DGF (2006)).

Los cambios esperados en el caso de las temperaturas máximas y mínimas en la zona de la cuenca del Biobío, son similares a los antes mencionados, pero cabe destacarse que los cambios en las temperaturas máximas son mayores que en las temperaturas mínimas.

### ***Precipitaciones***

De la Fig. 1.6 se puede apreciar que para el periodo 2046 – 2065, se espera una disminución de las precipitaciones de entre 1 y 2 mm/día, para la zona en la que se ubica el área de estudio, especialmente en los meses de invierno y primavera. Cabe destacar que la resolución espacial del modelo utilizado para la estimación de este periodo no permite ver adecuadamente los cambios especialmente en el sector cordillerano.



**Fig. 1.7** Diferencias de precipitación estacional; escenario A2 (futuro – presente) para las distintas estaciones del año. Periodo 2071 – 2100.(Fuente CONAMA-DGF (2006)).

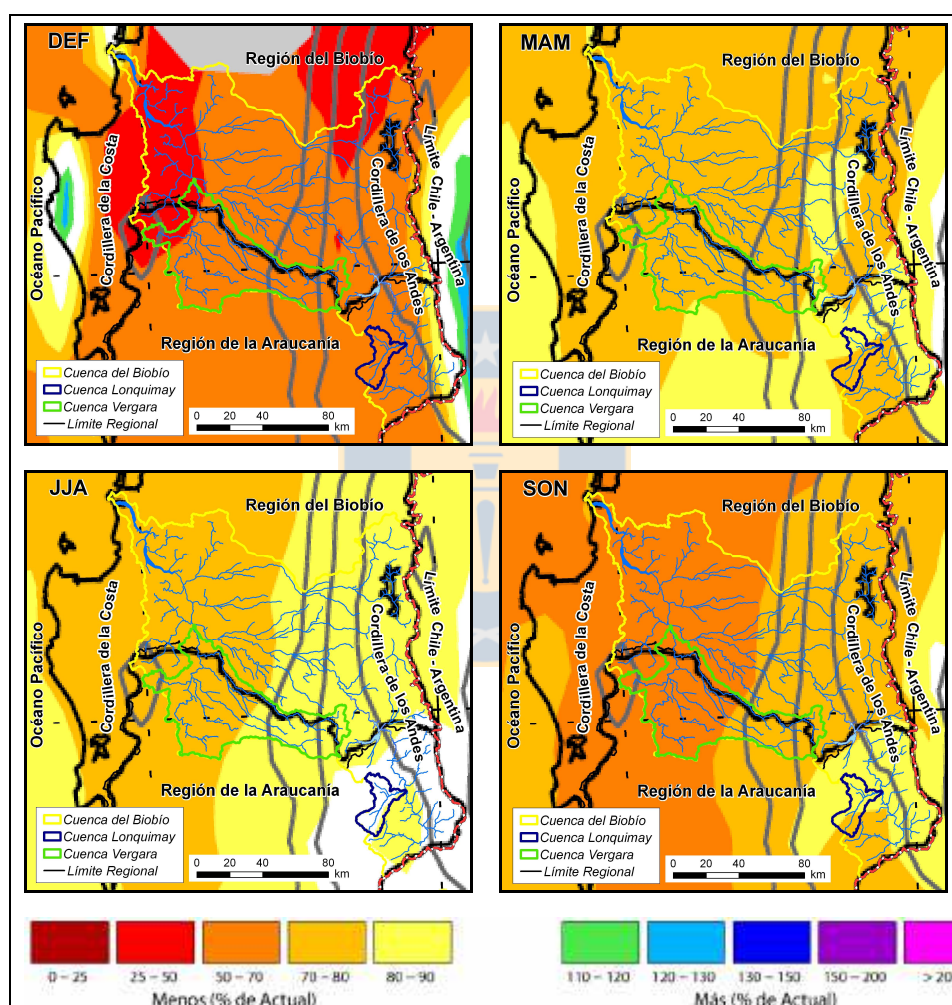
Para el caso del periodo 2071 – 2100 (Fig. 1.7 y 1.8) se espera una disminución de las precipitaciones tanto para el escenario A2 como B2, siendo esta disminución mayor en los meses primaverales.

## 1.2- CAMBIO CLIMÁTICO Y RECURSOS HÍDRICOS

El cuarto reporte del Panel Intergubernamental de Cambio del Climático (Magrin *et al.*, 2007) establece que las emisiones de gases invernadero y aerosoles debido a las actividades humanas continúan alterando la atmósfera de tal manera que se espera afecte el clima. Las consecuencias potenciales de una concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> elevada no sólo son temperaturas medias más altas, sino también cambios en la distribución temporal y espacial de precipitaciones, acompañada por un aumento en el riesgo de eventos de lluvias intensas y sequías. López-Moreno y Nogués-Bravo (2005) mencionan que muchos estudios han



reportado la sensibilidad de la cobertura nival al cambio climático y su gran influencia en la dinámica atmosférica. Para poder considerar el cambio climático el estudio clásico de caudales es sustituido por modelos hidrológicos (precipitación escorrentía), que relacionan las variables climáticas con los caudales (Harrison & Whittington, 2002; Neitsch *et al.*, 2002<sup>a</sup>; 2002<sup>b</sup>; van Griensven & Bauwens, 2005). Eckhardt y Ulbrich (2003) indican que existe una necesidad de modelos (semi-) espacialmente distribuidos que se basen en una descripción física de los procesos más relevantes, con la finalidad de poder cuantificar los efectos de los cambios antes mencionados en la disponibilidad de agua tanto a escala de cuenca como de sub-cuenca.



**Fig. 1.8** Diferencias de precipitación estacional; escenario B2 (futuro – presente) para las distintas estaciones del año. Periodo 2071 – 2100.(Fuente CONAMA-DGF (2006)).

Dentro de los cambios físicos más importantes que se proyectan producirá el cambio climático debido al calentamiento de la atmósfera, se encuentran un aumento en la frecuencia y severidad de los extremos climáticos, tales como olas de calor, sequías y un aumento en la intensidad de las precipitaciones (Stott *et al.*, 2004). También se anuncia habrá cambios en la temporalidad de los caudales y el volumen de agua en los ríos

(Whitfield *et al.*, 2002). Uno de los impactos hidrológicos más importantes que estima producirá el cambio climático son variaciones en la cantidad de nieve caída y el derretimiento de ésta en cuencas de altura (Gleick 1997, Arnell *et al.*, 2001). En estas cuencas se espera que los cambios en las temperaturas produzcan cambios en la disponibilidad y calidad de agua y complique la gestión de los embalses y sistemas de riego (Kundzewicz, *et al.*, 2007). En cuencas con un aporte nival relevante el aumento de las temperaturas tendrá tres efectos: (1) Incremento en la razón entre lluvia y nieve durante los meses fríos; (2) disminución de la temporada con nieve y (3) incremento de la tasa e intensidad del derretimiento durante los meses cálidos (Chiew, 2007). Como efecto de lo anterior se produce un aumento de la escorrentía media durante invierno, el peak de escorrentía ocurre antes en el año y se produce un secado más rápido e intenso durante el verano del suelo. El derretimiento más temprano traerá implicancias en la capacidad de almacenamiento y operación de los embalses, y también en la disponibilidad de agua almacenada para uso doméstico y de agricultura más tarde dentro del año (Gleick, 2003).

### **1.3- LA GESTIÓN DE CUENCAS ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO**

El informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo “Agua para todos, agua para la vida” (WWAP 2003) menciona “La Tierra, con sus diversas y abundantes formas de vida, que incluyen a más de 6.650 millones de seres humanos en la actualidad, se enfrenta en este comienzo del siglo veintiuno con una grave crisis del agua. Todas las señales parecen indicar que la crisis está empeorando y que continuará haciéndolo, a no ser que se emprenda una acción correctiva. Se trata de una crisis de gestión de los recursos hídricos, esencialmente causada por la utilización de métodos inadecuados. Lo anterior impone un importante desafío al mundo científicos, ya que es necesario proveer a los encargados de tomar las decisiones de herramientas que cuenten con un soporte científico y técnico. Por lo que una de las tareas de los hidrólogos e ingenieros involucrados en la gestión de recursos hídricos consiste en suministrar herramientas y conocimiento que puedan colaborar a que las decisiones se tomen de la mejor manera posible.

La Gestión Integrada de recursos hídricos (GIRH) es un concepto que ha sido utilizado en el mundo desde los años 1990 (Dublin 1992, Dublin Statement 1992, Partnership 2000, 2005). La GIRH es un proceso el cual promueve la gestión holística de la cuenca. Este concepto enfatiza la necesidad de considerar desde el agua superficial como la subterránea, así como la cantidad y calidad, la ecología y la relación entre suelo y recursos hídricos, así como también las diferentes funciones socio económicas de la cuenca (Mostert 2006). Cardwell *et al.* (2006) definen el concepto GIRH como un proceso coordinado para controlar el desarrollo y uso de ríos, lagos, océanos, humedales y otros activos del agua.

Modelos que describen el flujo de agua, la calidad del agua, ecología y economía están siendo desarrollados y utilizados en gran número y variedad para apoyar las decisiones de gestión del agua. Es importante tener en consideración que los estudios de modelación usualmente no abordan todo el proceso de planificación y gestión, pero apoyan de una manera importante el proceso (Refsgaard, 2007). Los recursos hídricos tendrán que ser gestionados para asegurar un suministro de agua eficiente para consumo humano pero que sea compatible con las funciones del ecosistema (Simonovic, 2002). Para lo anterior el adecuado entendimiento de los procesos de precipitación escurriénta, tanto al mediano como largo plazo, así como su impacto en el balance hídrico de la cuenca, es fundamental. En este sentido el desarrollo y aplicación de un modelo hidrológico juega un rol de gran importancia (Yang *et al.*, 2005). La modelación de sistemas hidrológicos es una forma relativamente barata para evaluar los efectos de corto y largo plazo de las actividades humanas sobre los procesos hidrológicos en una cuenca y para la toma de decisiones sobre la gestión de cuencas.

### **1.3.1- La experiencia nacional y regional**

Actualmente en Chile se está trabajando en elaborar una propuesta nacional de gestión de cuencas “Estrategia Nacional de Gestión de Cuencas”, lo anterior nace a partir de lo estipulado en la Agenda Ambiental 2006-2010, lo cual es fuertemente respaldado por el poder ejecutivo: “Impulsaremos una nueva política ambiental, más exigente y moderna, basada en el desarrollo sustentable y la participación social. Ningún proyecto de inversión podrá pretender hacerse rentable a costa del medioambiente. Tampoco evaluaremos proyectos aislados, sino que incorporaremos el ordenamiento territorial, el manejo integrado de cuencas, como eje de nuestra nueva política” (Michelle Bachelet, Presidenta de la República de Chile. Discurso 21 de Mayo 2006).

La “Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos” (OCDE) el año 2005 recomienda “Desarrollar un enfoque integrado de gestión de cuencas para mejorar el manejo de los recursos hídricos y forestales y para proporcionar servicios ambientales.” (OCDE CEPAL. Evaluación del Desempeño Ambiental Chile, 2005, pág. 68).

Dentro del contexto nacional ha habido algunas experiencias en cuanto a la gestión de cuencas se refiere:

- Programa Más Región, Región de Coquimbo. Equipo Técnico ad-hoc. Convenio Mideplan – AGCI-CEE- GORE Coquimbo. (CEE, MIDEPLAN- AGCI)
- Proyecto ECOMANAGE: Integrated Ecological Coastal Zone Management System; Región Aisén – Fiordo de Aysén.

- Proyecto TWINLATIN: Twinning European and Latin-American River Basins for Research Enabling Sustainable Water Resources Management; Región de Aisén - Cuenca del Río Baker.

Por su parte en la cuenca del Biobío se han efectuado dos iniciativas tendientes a la gestión integrada de recursos hídricos:

1. Gestión de los Recursos Hídricos: Corporación de Cuenca del Río Biobío. Coyne et Bellver – Europac: MOP DGA, 1997 (Banco Mundial).
2. Proyecto TWINBAS: Twinning European and third countries rivers basins for development of integrated water resources management methods.

### **1.3.2 - Uso de modelos para gestión de cuencas ante el cambio climático**

Una evaluación de los recursos de hídricos disponibles es un requisito previo para emprender un análisis del estrés de éstos y así adoptar posteriormente estrategias apropiadas de gestión para evitar efectos ambientales adversos y conflictos entre distintos usuarios (Xu & Singh 2004). Durante las últimas cinco décadas se ha experimentado un notable incremento en el consumo de agua debido al crecimiento explosivo de población, una mejora sin precedente del estándar de vida, y un enorme desarrollo económico. Esta situación ha llegado a ser aún más compleja debido al aumento de la contaminación de los recursos hídricos. Esto ha causado problemas serios impidiendo el desarrollo sustentable económico y social en muchas regiones. Lo anterior no ha sido sólo causado por factores naturales, sino también por una carencia de conocimiento de los recursos hídricos existentes y la mala gestión de éstos. Esta situación es más complicada aun si se considera el cambio climático, el cual a largo plazo, puede disminuir la disponibilidad de los recursos hídricos naturales en muchas partes del mundo, debido a posibles cambios en la distribución de las precipitaciones y al incremento de las temperaturas.

De lo anteriormente expuesto se puede deducir que uno de los impactos más importantes que puede producir el cambio climático en la sociedad será el cambio en la disponibilidad de agua local. Estos cambios hidrológicos afectarán prácticamente todos los aspectos asociados al bienestar personal de la población, impactando diversos sectores tales como productividad agrícola, energía, inundaciones, abastecimiento de agua municipal e industrial y biota. La gran importancia del agua para la sociedad y la naturaleza nos lleva a la necesidad de entender como un cambio en el clima global puede afectar la disponibilidad de agua a nivel local. En la actualidad se está realizando gran cantidad de investigación en este sentido, pero ésta es enfocada de distintas maneras, Xu & Singh (2004) mencionan que debido a la mezcla que se realiza entre los diferentes modelos climáticos e hidrológicos (Tabla 1.1), la simulación de los impactos hidrológicos del cambio climático incluyen el uso de modelos climáticos, hidrológicos y técnicas de regionalización. Xu & Singh

(2004) concluyen que después de realizar una revisión bibliográfica los científicos han utilizado los métodos mostrados en la Figura 1.9 para simular los impactos hidrológicos producidos por el cambio climático global.

**Tabla 1.1** Algunos vacíos existentes entre la capacidad de los Modelos de circulación Global (GCM's) y las necesidades hidrológicas (extraída de (Xu & Singh 2004)).

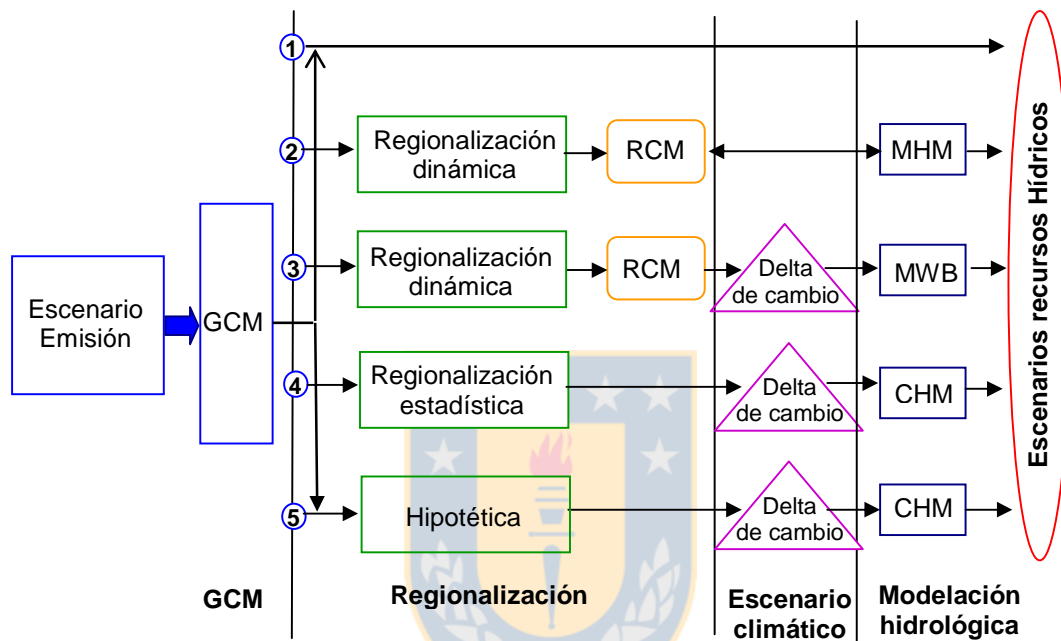
	Mejor Simulado	No tan bien simulado	Mal simulado
Desajuste de la Global		Regional	Local
Escala Espacial	500 x 500 km	50 x 50 km	0 - 50 km
Desajuste de la Media anual y Media mensual			Media diaria
Escala temporal estacional			
Desajuste de la 500 hPa		800hPa	Superficie de la tierra
Escala Vertical			
Desajuste de las Variables involucradas	Viento Temperatura Presión aire	Nubosidad Precipitación Humedad	Evapotranspiración Escorrentía Humedad suelo
Capacidad de GCM's desciende	→		
Importancia hidrológica aumenta	→		

De la Figura 1.9 caso 1 podemos extraer que una manera de obtener distintos escenarios hidrológicos es derivarlos directamente desde Modelos climáticos globales (GCM). Un GCM por lo general tiene 4 componentes: atmosférico, superficie terrestre, océano y hielos, los cuales interactúan unos con otros. La escorrentía actualmente se incorpora en las simulaciones de los GCM en dos puntos (Rowntree 1989), primero en el límite entre la atmósfera y la superficie terrestre donde se transforman los flujos en escorrentía superficial y segundo en la frontera entre océano y tierra, donde se necesitan los hidrogramas como input del modelo de océano. Kite et al., (1994) muestran algunos problemas asociados con la modelación GCM del ciclo hidrológico, particularmente la falta de una adecuada transferencia lateral de agua.

Por otro lado en grandes cuencas a nivel mundial se han simulado los recursos hídricos utilizando datos hidroclimáticos generados de GCM's como entrada a modelos hidrológicos de macro-escala (Fig. 1.9). El primero tipo (caso 2 Figura 1.9) es un balance hidrológico a macro-escala (MHM) el cual utiliza el concepto de balance hídrico y no tiene acoplamiento con los GCM's (ej. "Macro-PDM" (Arnell 1999)). El segundo caso (caso 3 Figura 1.9) es un modelo de balance de agua (MWB), que al igual que el anterior es a



escala macro pero la hidrología da énfasis a la fase terrestre (ej. VIC model (Liang *et al.*, 1994)), estos tiene como propósito mejorar la modelación de la componente terrestre del ciclo hidrológico de los modelos climáticos globales, modelos climáticos regionales y modelos meteorológicos de meso-escala. Comparando los MHM con MWB, se puede decir que el primero usa el balance de energía como concepto primario y puede ser acoplado con los GCMs y modelos climáticos regionales (MRCs), por lo que puede correr a una escala temporal menor.



**Fig. 1.9** Representación esquemática de los métodos para evaluar los recursos hídricos bajo condiciones climáticas cambiantes. GCM: modelos de circulación Global; RCM: modelos climáticos regionales; MHM: modelo hidrológicos macro escala; MWB: modelo de balance de agua macro escala; CHM: modelo hidrológico a escala de cuenca. (Xu & Singh 2004).

En el caso del cuarto método (caso 4 Figura 1.9) se deben realizar tres pasos; primero los escenarios climáticos futuros se simulan a partir de GCM; a continuación estos escenarios se regionalizan a escenarios regionales o locales con alguna herramienta estadística; y por último los escenarios obtenidos son utilizados para correr algún modelo hidrológico a escala de cuenca (CHM), previamente testeado (calibrado y validado), dentro de éstos podemos encontrar los estudios realizados por Wilby *et al.* (2002, 2006) entre otros.

Por último el quinto método (caso 5 Figura 1.9) utiliza escenarios hipotéticos como input a los modelos hidrológicos, ya que en la actualidad no es posible utilizar las precipitaciones directamente de los GCMs. Este método está compuesto por las siguientes etapas: (1) calibrar y validar un modelo hidrológico para la cuenca en estudio, utilizando condiciones meteorológicas actuales y caudales observados; (2) perturbar

las series climáticas históricas de acuerdo a un escenario climático: (3) simular las características hidrológicas de la cuenca utilizando las series climáticas perturbadas y el modelo hidrológico calibrado; (4) compara las simulaciones actuales con las producidas con los posibles escenarios de cambio.

Xu & Singh (2004) mencionan que actualmente la modelación parece ser el único recurso para poder tratar los complejos problemas ambientales y de recursos hídricos. La demanda de modelos hidrológicos para facilitar la toma de decisiones concernientes al ambiente se ha incrementado, particularmente cuando se involucra las predicciones de condiciones hidrológicas futuras resultantes de cambios de uso de suelo y clima (Matheussen *et al.*, 2000). Durante los últimos años el uso de modelos distribuidos se ha tornado más frecuente para análisis ambiental, esto porque los avances computacionales han facilitado el análisis de datos (ej. delinear una cuenca a partir de un modelo de elevación digital en sólo minutos). Además, se ha podido crear modelos con mayor integración, que simulan en conjunto con la hidrología, calidad de agua, ecología, impactos ambientales, riesgos, etc. (Sivapalan *et al.*, 1996<sup>a</sup>; Sivapalan *et al.*, 1996<sup>b</sup>; 1996<sup>c</sup>; Schneiderman *et al.*, 2002).

#### **1.4 DISTINTOS TIPOS DE MODELOS HIDROLOGICOS**

El territorio y sus procesos no pueden ser descritos en forma exacta, por lo que es necesario contar con modelos que reproduzcan de la mejor forma posible los procesos naturales y que, por otro lado, satisfagan los requerimientos de información de la sociedad. En el caso de un modelo hidrológico el sistema físico representado es por lo general la cuenca, de manera de entender de forma adecuada los procesos físicos e hidrológicos que tiene. El objetivo de una modelación hidrológica es estimar la respuesta y parámetros, para poder predecir y comprender el comportamiento de los sistemas.

Una de las principales ventajas de la simulación mediante modelos es la visión que se gana recogiendo y organizando los datos requeridos como entrada a los algoritmos matemáticos que comprenden el sistema completo. Lo anterior puede conducir a la readecuación o ampliación de las redes de monitoreo existentes de tal manera de mejorar los datos de entrada necesarios para la modelación y con esto lograr una mejor representación del sistema natural. El crecimiento en el uso de los modelos se debe a la necesidad de solucionar problemas complejos, la mejora en las técnicas de medición de los parámetros de entrada y a la actual disponibilidad de tecnología. Sin embargo no se puede perder de vista que los modelos sólo son buenos en la medida que los datos de entrada lo sean (Rasmussen *et al.*, 1998).

En la actualidad, una gran cantidad de modelos hidrológicos han sido probados en distintos ambientes y cuencas, con diferentes propiedades. Los modelos se pueden dividir en modelos determinísticos y

estocásticos. En el primer caso las variables vienen determinadas por leyes físicas (empíricas, conceptuales o teóricas) consideradas como exactas y que explican toda su variabilidad, mientras que en el segundo tipo las variables son regidas en todo o en parte por las leyes del azar, por lo que son caracterizadas en términos probabilísticos (Estrela 1992).

La modelación satisfactoria de los procesos hidrológicos es esencial para optimizar la protección y manejo de los recursos hídricos, y, como tal, para la gestión integrada de cuencas. Si el objetivo de un estudio de modelación es reproducir la dinámica diaria observada, un modelo simple agregado, bien calibrado puede ser suficiente (Beven 2001). Sin embargo, si se buscan estimaciones (extrapolaciones) para el futuro - bajo condiciones generales cambiantes (ej. cambios en uso del suelo, cambio climático) -, los modelos puramente estadístico y agregados alcanzan su límite y se requieren modelos que contengan descripciones realistas para los procesos hidrológicos (Uhlenbrook, *et al.* 2004). Una aproximación distribuida o semi-distribuida es esencial si se necesita cuantificar los efectos de los cambios de uso del suelo o de cobertura en los diversos componentes hidrológicos. La simulación de los efectos producidos por distintos escenarios de cambio climático y uso de suelo son fundamentales en la toma integrada de decisiones, con el fin de optimizar las diferentes funciones de una cuenca.

De lo anterior podemos ver que los modelos a nivel de cuenca pueden ser clasificados de acuerdo a:

- 1.- Descripción de procesos: Se puede distinguir entre modelos conceptuales o físicamente basados, distribuidos o agregados, determinísticos, estocásticos o mixtos (Van Griensven *et al.*, 2002; Van Griensven *et al.*, 2006).
- 2.- Escala tanto espacial como temporal.
- 3.- Técnicas de resolución.

#### **1.4.1 Modelación hidrológica espacialmente distribuida**

A la luz del cambio global y al poder acceder con más facilidad a la utilización de Sistemas de Información Geográficos (SIG), debido a la disponibilidad actual de éstos, la aplicación de modelos hidrológicos espacialmente distribuidos se ha vuelto cada vez más popular entre los hidrólogos (Cazorzi & Dalla Fontana, 1996; Dal, *et al.*, 2000; Jayakrishnan *et al.*, 2005). Existen diferentes modelos, y hay variación considerable en la manera que cada uno de ellos describe los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Los modelos pueden ser diferenciados por su arquitectura y estructura, la escala a la que son aplicados, la integración o falta de integración de los procesos de superficie y subsuperficie, el grado de complejidad de los datos de entrada y el número de parámetros a ser determinado (Mishra & Singh 2004). El intervalo de tiempo usado en la simulación dependerá del tipo de modelo y sus aplicaciones potenciales (de modelar solo hidrografa de la tormenta a balances de agua mensuales o anuales). Herramientas adicionales pueden ser

incorporadas, tales como análisis de error y riesgo, y calibración automatizada. La calidad de la Interfase Gráfica del Usuario puede variar sustancialmente entre los distintos modelos. Los modelos pueden ser de dominio público o pueden estar sujetos a la autorización comercial.

Dentro de los modelos que son aplicados a escala de cuenca se encuentran entre otros el 'Hydrologic Simulation Package Fortran' HPSF (Holtan & Lopez 1971) del USDAHL, el Système Hydrologique Européen (SHE) (Abbott *et al.*, 1986<sup>a</sup>; 1986<sup>b</sup>), el Hydrologic Engineering Centre Hydrologic Modeling System (HEC-HMS)(HEC 2000) y el Soil and Water Assessment Tool (SWAT) del USDA (Arnold *et al.*, 1998). Estos modelos tienen un número variable de parámetros de entrada, pero ellos usualmente usan un intervalo corto de tiempo, entregan hidrogramas, así como balance de agua y proveen la posibilidad de simulación continua (Mishra & Singh 2004).

A pesar de su detallada estructura, en la mayoría de los países, muchos de estos modelos aun no se han convertido en una herramienta estándar para práctica de la hidrología. Esto se debe principalmente a: primero muchas cuencas no cuentan con estaciones de medición de caudales y sólo se cuenta con un limitado número de datos meteorológicos e hidrológicos, haciendo la calibración de parámetros y validación virtualmente imposible y segundo, estos modelos por lo general contienen muchos parámetros (Beven 2001), los cuales son difíciles de estimar en la práctica, varían de cuenca en cuenca e incluso dentro de una misma cuenca su variación puede ser sorprendentemente alta (Hattermann *et al.*, 2005). Así, lo que se necesita para poder satisfacer la urgente demanda por herramientas prácticas que apoyen la gestión integrada de recursos hídricos, son modelos simples que entreguen simulaciones razonables y necesiten datos de entrada disponibles. A pesar de ciertas críticas (Stowhas 2003, Schneider & McCuen 2005), hoy en día los modelos que están basados en la Curva Número del Soil Conservation Service (SCS-CN) para el cálculo de la escurrentía pueden proveer una de las mejores soluciones prácticas, ya que ellos parecen satisfacer los requisitos de muchas naciones. Por esto no es ninguna sorpresa la popularidad que han alcanzado, a pesar de su carencia de sofisticación (Mishra & Singh 2004). Usando argumentos teóricos es posible aplicar el SCS-CN a cualquier cuenca para simulación hidrológica a largo plazo (Mishra & Singh 2004). Sin embargo, un mínimo nivel de investigación adicional se requerirá en orden de adaptar la curva número a los esquemas de calificación local de tipo y uso de suelo (Zhan & Huang 2004).

#### **1.4.2 Modelos distribuidos versus agregados**

Los modelos hidrológicos agregados (Moglen *et al.*, 2002) simulan una situación espacial promedio, y son por ello una simplificación mayor de la realidad que su contraparte, los modelos distribuidos. Para muchos propósitos, se pueden esperar entonces mejores resultados de los modelos distribuidos (Brath *et al.* 2004) Estos modelos involucran una representación más precisa del sistema hidrológico, al considerar la

variabilidad espacial y las entradas de los parámetros del modelo. Sin embargo, módulos completamente distribuidos de la fase terrestre en combinación con módulos dinámicos de rastreo en el río requieren mucho tiempo computacional, lo que hace su utilización para fines de modelación integrada poco práctico (van Griensven & Bauwens 2005). Algunos investigadores, preocupados sobre la gran cantidad de parámetros que se pueden alterar durante la fase de calibración, han criticado los modelos físicamente basados y completamente distribuidos (Abu El-Nasr *et al.*, 2005). Debels & Campos (comunicación personal) muestran que para el componente de rastreo de un modelo hidrológico aplicado a una pequeña cuenca en Chile, la ganancia neta de aplicar una versión del modelo completamente distribuido Wetspa (De Smedt *et al.*, 2000) es pequeña en comparación a una versión semi-distribuida del modelo.

En orden a obtener una eficiencia computacional aceptable para aplicaciones prácticas, se necesita un cierto grado de simplificación del sistema y la representación de los procesos tiene que ser justificada. Como estas simplificaciones reducen considerablemente el número de parámetros, ellas claramente estimulan la aplicación de métodos automáticos para optimización y análisis de incertidumbre. La importancia de dichos métodos para incrementar la objetividad, repetitividad y fiabilidad de los resultados del modelo es cada día más reconocida (van Griensven & Bauwens 2005). Mientras tanto los más importantes procesos deben ser bien representados. Cabe destacar que un modelo simple agregado para predecir escurrimiento a la salida de una cuenca, disponibilidad de agua en distintos puntos dentro de la cuenca, o para evaluar el impacto del cambio de uso o cobertura de suelo, necesitara por lo menos hasta cierto grado una representación distribuida de la fase terrestre (DeFries & Eshleman, 2004; Fohrer *et al.*, 2005; Van Griensven & Bauwens, 2005).

### **1.4.3 Modelos empíricos versus modelos físicamente basados**

Los modelos físicamente basados se fundamentan en nuestra comprensión de la física de los procesos hidrológicos que controlan la respuesta de las cuencas. Por lo tanto, utilizan ecuaciones matemáticas físicamente establecidas para describir estos procesos. Los modelos empíricos son una síntesis y un resumen de las observaciones de los datos, derivados con poco o nada de causalidad física que relaciona los parámetros fundamentales (Beven 2001). Se requiere tener precaución al aplicar modelos empíricos fuera de la región donde fue establecida la relación empírica.

### **1.4.4 Procesos dominantes a diferentes escalas**

Los procesos dominantes en la respuesta hidrológica difieren en las distintas escalas espaciales (Blöschl & Sivapalan 1995, Blöschl 1996.). Se puede asumir el siguiente esquema general:

- A escala de micro cuenca (ríos de cabecera menores a 1 km<sup>2</sup>), la respuesta a las precipitaciones es principalmente dominada por el procesos de generación de escurrimiento en laderas y las áreas cercanas al río (Anderson & Burt, 1990; Montgomery *et al.*, 1997). Todos los procesos que definen el

movimiento lateral del agua (superficial y subsuperficial) son controles de primer orden, así las propiedades del suelo y su uso juegan un rol clave al describir la respuesta hidrológica. En una resolución de mediano plazo, la distribución espacial de las precipitaciones se puede asumir que es mucho más uniforme que en cuencas más grandes.

- A escala de meso cuencas ( $10 - 1000 \text{ km}^2$ ), los procesos a pequeña escala se combinan de una manera compleja de tal forma de entregar una respuesta integrada. A esta escala, los procesos dentro del cauce (ej. rastreo del caudal) aumentan su importancia al incrementarse el tamaño de la cuenca, la variación espacial y temporal de las precipitaciones se torna de gran importancia.
- A escala de macro cuencas (cuencas más grandes que  $10^3 - 10^4 \text{ km}^2$ ), la distribución espacial y temporal de las precipitaciones y el rastreo del caudal domina considerablemente el comportamiento de la respuesta (Uhlenbrook *et al.*, 2004). Como ejemplo de esto un caso reciente de estudio en el río Rin es citado por Bárdossy *et al.* (2002), éste documenta la influencia marginal de las diferentes propiedades del suelo o su cobertura (ej. urbanización creciente) en inundaciones debido a grandes eventos de lluvia.

## 1.5- SELECCIÓN DEL MODELO

Como ya se mencionó en los puntos anteriores existen varios modelos para poder representar la hidrología de las cuencas. Se seleccionaron tres de ellos para compararlos y ver cuál es el más adecuado para simular la hidrología en las cuencas en estudio. La Tabla 1.2 muestra los diferentes criterios que fueron tomados en cuenta al momento de seleccionar el modelo. La información fue recopilada de los manuales de los distintos modelos.

Considerando los puntos de la Tabla 1.2 se seleccionó el modelo SWAT, para realizar la simulación hidrológica. Las razones preponderantes en esta elección fueron:

- Es una herramienta existente y bien documentada.
- La existencia de buenos manuales y de una interfase gráfica hacen al modelo atractivo para ser usado por agencias de gobierno y tomadores de decisiones.
- Con SWAT primero se modela hidrológicamente y luego esta modelación se puede extender a por ejemplo calidad de agua.
- Numerosos grupos de investigación a nivel mundial lo están utilizando, lo que contribuye mucho al desarrollo y perfeccionamiento del modelo.
- SWAT ofrece distintos métodos para el cálculo de la evapotranspiración y la escorrentía superficial, cada una con distintos requerimientos en cuanto a la cantidad de datos. Lo que permite adaptar de mejor forma el modelo a las condiciones de datos existentes en Chile.

**Tabla 1.2** Resumen de los diferentes criterios tomados en cuenta durante la selección del modelo.

<b>Criterio</b>	<b>HEC-HMS</b>	<b>HSPF</b>	<b>SWAT</b>
<i>Características</i>			
Apropiado para cuencas grandes	X	X	X
Gestión y agricultura incluidos		X	X
Procesos en el río incluidos		X	simplificado
Acumulación y derretimiento nieve			X
Interacción agua superficial / subterránea	medio	medio	medio
<i>Utilización como herramienta toma de decisiones</i>			
Utilizada frecuentemente como apoyo			X
<i>Aplicabilidad</i>			
Disponible gratuitamente	X	X	X
Código abierto		X	X
Manual extensivo	X	X	X
Foro en Internet			X
Soporte gratuito			X
Uso amigable	X		X
Interfase SIG	X		X

## 1.6 EL MODELO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)

### 1.6.1 Introducción

El modelo SWAT (Arnold *et al.*, 1998) fue desarrollado por el Servicio de investigación Agrícola (Agricultural Research Service; ARS), perteneciente al departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) durante los años 1990. Es un modelo hidrológico y de calidad de agua, físicamente basado, diseñado para modelar el transporte de agua, sedimentos y contaminantes generados y exportados desde cuencas individuales. Puede ser utilizado para predecir los impactos producidos por las prácticas de manejo de suelos sobre los balances de agua, sedimentos y calidad del agua en cuencas grandes y complejas con diferentes tipos y usos de suelo, sobre largos periodos de tiempo.

SWAT incorpora características de varios modelos desarrollados por el ARS y nace a partir del modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) (Williams *et al.*, 1985; Arnold *et al.*, 1990). Otros modelos que han contribuido al desarrollo de SWAT son CREAMS2 (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) (Knisel 1980), GLEAMS3 (Groundwater Loading Effects on



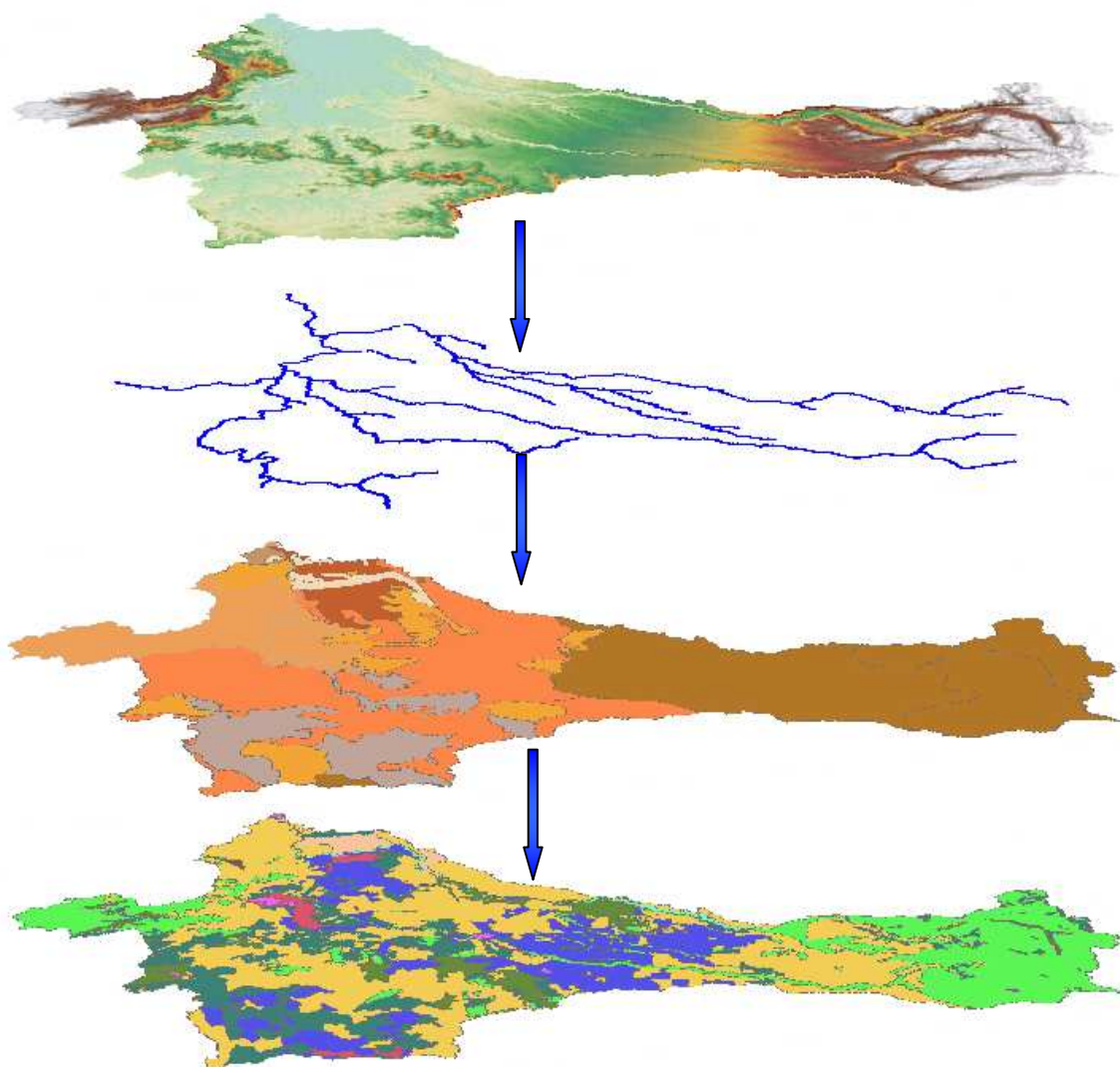
Agricultural Management Systems) (Leonard *et al.*, 1987), y EPIC4 (Erosion-Productivity Impact Calculator) (Williams *et al.*, 1984).

Este modelo puede ser clasificado como espacialmente semidistribuido, ya que utiliza una aproximación mixta entre raster y vector. La cuenca se divide en sub-cuencas, y la información es organizada para cada sub-cuenca dentro de las siguientes categorías: clima, unidades de respuesta hidrológica (HRU), embalses, agua subterránea y cauce principal que drena cada sub-cuenca. La hidrología de la cuenca está conceptualmente dividida en: a) procesos en laderas y b) procesos dentro del cauce. La carga de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas hacia el cauce, producida en cualquiera de las sub-cuencas, es controlada por los procesos en las laderas. Los procesos en el cauce determinan después el movimiento del agua, sedimentos y contaminantes desde la red hídrica hacia la salida de la cuenca. Para la modelación hidrológica, el modelo utiliza típicamente una escala de tiempo diaria. Esto hace que la aplicación de dicho modelo sea especialmente interesante en áreas donde no se cuenta con datos meteorológicos sub-diarios. La respuesta puede ser obtenida desde una escala temporal diaria hasta una anual, según los requerimientos del usuario. La unidad espacial en la cual ocurren los cálculos son las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRUs). Éstas se asumen homogéneas con respecto a sus propiedades hidrológicas (Neitsch *et al.*, 2005<sup>a</sup>) y son derivadas semiautomáticamente por el modelo, a partir de una base de datos espacial con el uso de suelo, tipo de suelo, modelo de elevación digital y ciertos criterios definidos por el usuario.

La hidrología de la cuenca es conceptualmente dividida en dos etapas mayores: (a) etapa terrestre del ciclo hidrológico y (b) etapa de transporte. La contribución de caudal en el cauce principal de cada sub-cuenca es controlado por la fase terrestre. La etapa de transporte después determina el movimiento del agua a través de la red de canales hasta los puntos internos de control (estaciones de medición de caudales) y hasta la salida de la cuenca.

Para el desarrollo de esta tesis se utilizó la versión SWAT2005 (Neitsch *et al.*, 2005<sup>a</sup>; 2005<sup>b</sup>) asociada a la nueva interfase gráfica AVSWAT-X (Di Luzio *et al.*, 2002) del modelo, donde el simulador está integrado a un SIG por medio de un preprocesador incluido en ArcView 3.2 (ESRI) (ESRI, 1999). AVSWAT-X utiliza un modelo de elevación digital (DEM), coberturas de suelo y uso de suelo, coberturas de punto de estaciones climáticas como input básicos para modelo (Fig. 1.10). En las siguientes secciones se describirán en forma resumida los procesos más importantes que influyen generación de caudales en una cuenca. Para mayor detalle de todos los otros componentes que conforman el modelo SWAT referirse a (Neitsch *et al.*, 2005<sup>a</sup>; 2005<sup>b</sup>).

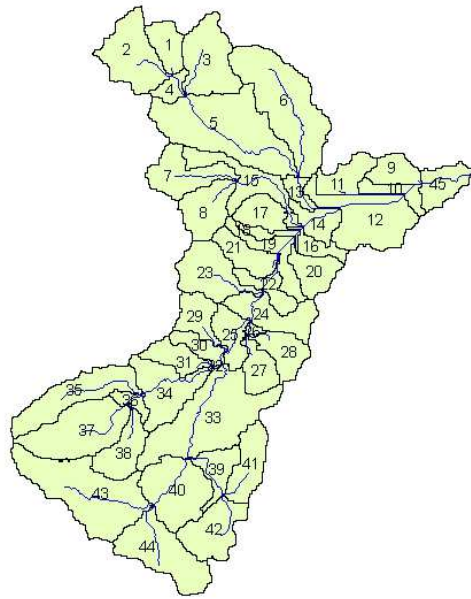




**Fig. 1.10** Superposición de las diferentes capas de información conectadas al modelo SWAT

### 1.6.2 Configuración de la cuenca

SWAT permite definir varias sub-unidades dentro de una cuenca. (Neitsch *et al.*, 2005<sup>a</sup>). El primer nivel de subdivisión es la sub-cuenca (Fig. 1.11), la que posee una posición geográfica dentro de la cuenca y está espacialmente relacionada a otra por ejemplo en la Fig. 1.11 la cuencas 44 y 43 drena a la 40. Estas son obtenidas a partir en un área umbral que define el área mínima de drenaje requerida para formar el origen de un río.



**Fig. 1.11** Sub-cuencas en Cuenca Lonquimay.

A su vez cada una de esta sub-cuencas contendrá por lo menos una unidad hidrológica de respuesta (HRU), una HRU es el área total dentro de la sub-cuenca que posee una combinación específica de uso y tipo de suelo, por lo que no están espacialmente ubicadas dentro de la sub-cuenca (agregado). No existe interacción entre las distintas HRU de cada sub-cuenca, el caudal es calculado separadamente en cada una de estas HRU y después sumado para obtener el caudal generado dentro de la sub-cuenca. En el caso que la interacción entre un área de uso de suelo con otra sea de importancia relevante, deben ser definidas como sub-cuencas no como HRU. Una regla general es que deben existir entre 1 a 10 HRU's dentro de una sub-cuenca (Holvoet 2006), si se quiere incorporar mayor complejidad es recomendable definir un mayor número de sub-cuencas. Además de las HRU's dentro de las sub-cuencas hay cauces tributarios, un cauce principal y se pueden definir adicionalmente humedales, estanques y dos tipos de represas.

### 1.6.3 Fase terrestre del ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico simulado en SWAT (Fig. 1.12) está basado en la siguiente ecuación de balance hídrico:

$$WYLD = PP - ET - \Delta SW - (PERC - GWQ) \quad (1.1)$$

Donde:

WYLD: Cantidad de agua en la (sub)cuenca. Este término incluye, escorrentía superficial, flujo lateral y caudal base.

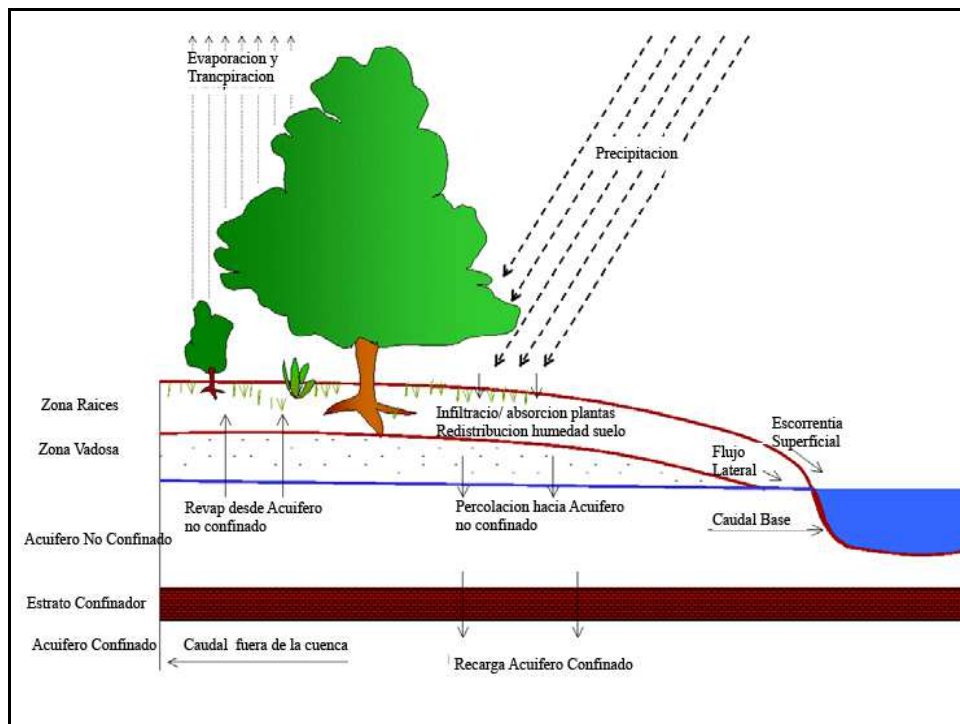
PP : Precipitación.

$\Delta SW$  : Cambio en el contenido de agua del suelo (zona vadosa).

PERC : Caudal hacia agua subterránea.

GWQ : Caudal Base contribuido al caudal total.

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar la influencia de características locales (ej. Tipo y su uso de suelo, etc.) sobre los distintos componentes del balance.



**Fig. 1.12** Representación esquemática del ciclo hidrológico (Neitsch *et al.*, 2005<sup>a</sup>)

#### 1.6.3.1- Clima

El clima de una cuenca provee los inputs de humedad y energía que controlan el balance hídrico y determina la importancia relativa de los distintos componentes ciclo hidrológico. Las variables climáticas utilizadas por SWAT son precipitación diaria, temperatura máxima/mínima del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Siendo los requerimientos mínimos, dependiendo del método utilizado para obtener la evapotranspiración y escorrentía superficial, precipitación diaria, temperatura máxima/mínima. Los

inputs utilizados pueden ser series de datos observadas o generados durante la simulación por el generador climático incorporado.

### **Bandas de elevación**

Para representar la variación orográfica de las precipitaciones y las temperaturas SWAT permite definir hasta 10 bandas de elevación por cada sub-cuenca. Para cada banda de elevación se calcula la precipitación, temperatura máxima y mínima como una función de una tasa de variación (plaps y tlaps) y la diferencia entre la elevación de la estación y la elevación promedio de la banda. Los únicos procesos que se modelan separadamente para cada banda son la acumulación, sublimación y derretimiento de la nieve. Y una vez obtenidos dichos valores para la banda se estima el valor de dentro de la sub-cuenca de la misma manera que para las precipitaciones y temperaturas.

### **Cobertura Nival**

SWAT clasifica las precipitaciones como lluvia o nieve utilizando la temperatura promedio diaria. La temperatura umbral utilizada para categorizar la precipitación como nieve o lluvia es definida por el usuario, si la temperatura promedio diaria es menor a esta temperatura umbral, entonces las precipitaciones dentro de la HRU es clasificada como nieve y es sumada como equivalente de agua a la cantidad de nieve existente. El balance de masa del paquete de nieve está dado por:

$$SWE_{day} = SWE_{(day-1)} + SF - SM - E_s \quad (1.2)$$

Donde:

$SWE$  : Equivalente de nieve en agua (mm)

$SF$  : Nieve caída (mm)

$SM$  : Nieve derretida (mm)

$E_s$  : Sublimación (mm)

Debido a variables como ventiscas, sombra y topografía, el paquete de nieve en una sub-cuenca raramente estará uniformemente distribuido sobre el área total. Los factores que contribuyen a tener una cobertura variable de nieve son generalmente similares de año a año, haciendo posible relacionar el área de nieve con la cantidad de nieve presente en una sub-cuenca en un periodo determinado. Esta correlación se expresa como una curva de disminución de área (basada en un algoritmo natural), la cual describe el aumento y recesión del paquete de nieve en función de la cantidad de nieve presente en la cuenca (Anderson, 1976

citado en Fontaine *et al.*, (2002)). Esta curva de disminución de área requiere definir una altura umbral de nieve sobre la cual habrá siempre 100% de cobertura, la cual es única para la cuenca de interés.

### **Derretimiento**

El derretimiento de la nieve es controlado por la temperatura del aire y la del paquete de nieve, la tasa de derretimiento y el área cubierta por nieve. El derretimiento se incluye junto con las precipitaciones en el cálculo del caudal y la percolación.

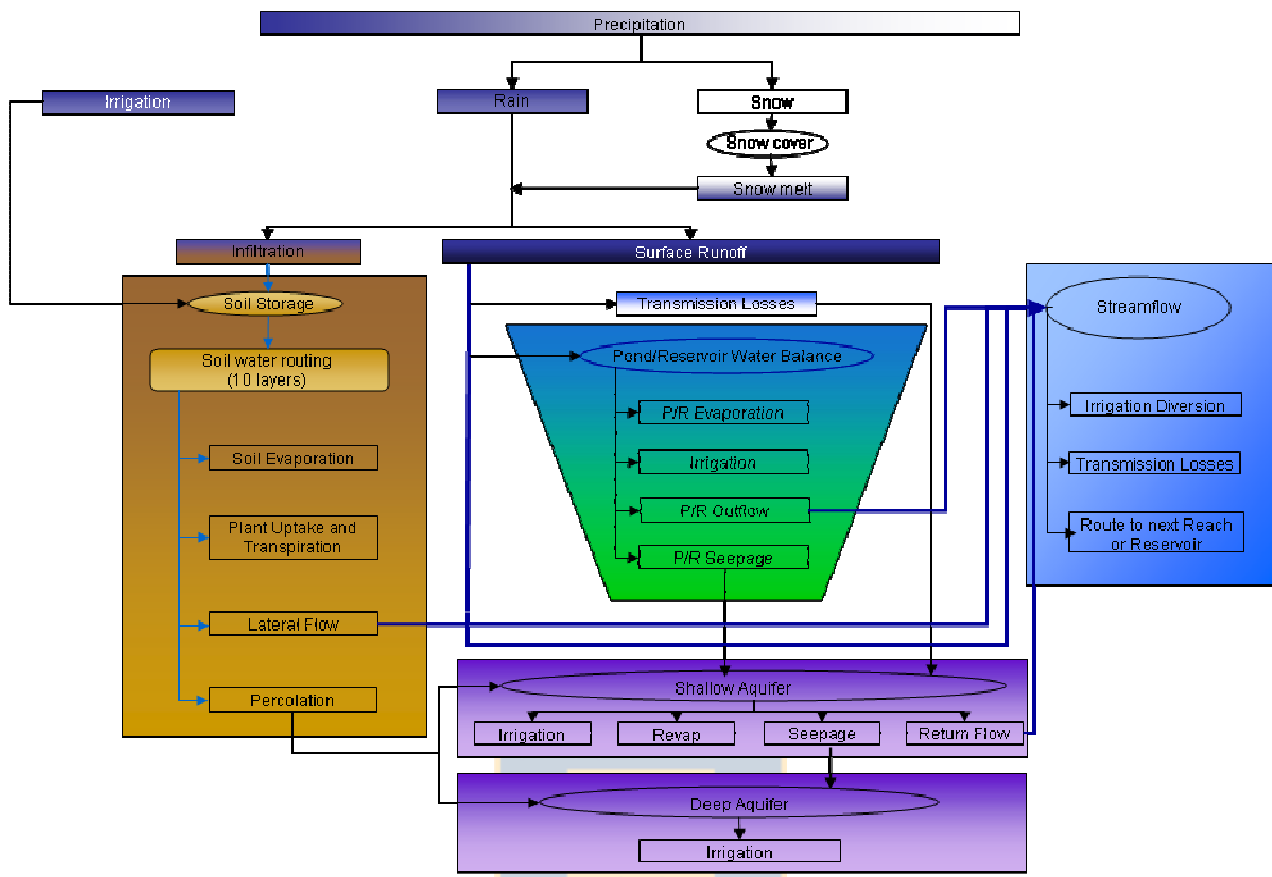
**Temperatura del paquete de nieve:** Ésta es función de la temperatura media durante el día anterior y varía como una función de la temperatura del aire. La influencia de la temperatura del día anterior en la temperatura actual del paquete de nieve es controlada por un factor de retraso, este factor inherentemente da cuenta de la densidad, la profundidad, exposición y otros factores que afectan el paquete de nieve. Al acercarse a uno el factor de retraso, la temperatura media del día incrementa su influencia en la temperatura del paquete de nieve con respecto a la temperatura del día anterior. El paquete de nieve no se derretirá hasta que este no exceda una temperatura mayor a la temperatura umbral de derretimiento.

#### **1.6.3.2- Hidrología**

La precipitación puede ser interceptada por la vegetación, o caer sobre el suelo. El agua sobre el suelo se infiltrará dentro de él o escurrirá sobre como escorrentía superficial. La escorrentía se mueve relativamente rápido hasta un cauce y contribuye a la repuesta rápida del caudal en el río. El agua infiltrada por otro lado puede ser almacenada en el suelo y después evapotranspirada o ir lentamente a través del agua subterránea hacia el sistema de agua superficial. Los potenciales caminos del movimiento del agua simulado por SWAT en cada HRU se muestran en la Fig. 1.13. A continuación se describen los principales componentes que influyen en la modelación hidrológica de SWAT, para mayor detalle consultar Neitsch *et al.*, (2005<sup>a</sup>).

### **Evapotranspiración**

SWAT da la posibilidad de modelar la evapotranspiración utilizando uno de los siguientes métodos: Penman-Monteith, Priestly-Taylor o Hargreaves. El método de Penman-Monteith proporciona una mejor descripción del proceso, pero necesita de muchos datos de entrada (radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento), alguno de los cuales son difíciles de obtener para grandes cuencas. Priestly-Taylor o Hargreaves tienen la ventaja de requerir menos datos de entrada. Bajo una condición mínima de disponibilidad de datos, Hargreaves puede ser utilizado con series de temperatura como único dato de entrada (Heuvelmans *et al.*, 2005). En el caso de esta tesis, considerando la disponibilidad de datos meteorológicos, este último será el método escogido para el cálculo de evapotranspiración.



**Fig. 1.13** Representación de la fase terrestre del ciclo hidrológico en SWAT

### Escurrimiento superficial

Para la estimación de la escurrimiento superficial, SWAT ofrece dos alternativas: a) el método de Curva Número (SCS CN) y b) el método de Green y Ampt. Para este último se necesitan datos subdiarios, mientras que el método de Curva Número se aplica utilizando series de precipitaciones diarias. En este estudio se usará el método de la Curva Número, considerando la disponibilidad típica de datos de entrada para la mayoría de las cuencas chilenas. La ecuación que describe dicho método fue propuesta por el Soil Conservation Service (SCS) en 1972:

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{día}} - I_a)^2}{(R_{\text{día}} - I_a + S)} \quad (1.3)$$

Donde:

$Q_{\text{surf}}$  : Escurrimiento acumulado debido al exceso de precipitación (mm H<sub>2</sub>O)

$R_{\text{día}}$  : Altura de precipitación para el día (mm H<sub>2</sub>O)

$I_a$  : Abstracción inicial (incluye almacenamiento en la superficie, interceptación e infiltración previo a la escurrimiento (mm H<sub>2</sub>O)

$S$  : Parámetro de retención (mm H<sub>2</sub>O)

El parámetro de retención varía espacialmente, debido a la variabilidad espacial de las características de los suelos, del uso de suelo, del manejo y de la pendiente. Para un mismo lugar, varía en el tiempo debido a cambios en el contenido de agua del suelo. El parámetro se define como:

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (1.4)$$

Donde:

CN : Valor de Curva Número para el día.

La abstracción inicial,  $I_a$ , comúnmente se aproxima a  $0.2S$ , por lo que la ecuación (1.3) queda de la siguiente forma:

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{día}} - 0.2S)^2}{(R_{\text{día}} + 0.8S)} \quad (1.5)$$

Sólo se producirá escorrentía cuando  $R_{\text{día}} > I_a$

El CN es función de la permeabilidad del suelo, uso de suelo y antecedentes de contenido de agua del suelo. El SCS posee tablas que entregan valores de CN obtenidos para tipos de suelos y usos de éste en Estados Unidos, los valores entregados en estas tablas son apropiados para una pendiente de 5%; en caso de tener pendientes distintas éstos se deben corregir.

En el método de curva número se pueden distinguir cuatro tipos de suelos A, B, C y D. Donde el tipo A tiene una alta capacidad de infiltración y el tipo D es el que tiene menor capacidad de infiltración. El National Resources Conservation Service de Estados Unidos (NRCS 2002) (Martínez de Azagra *et al.*, 2003) define estos grupos como:

**Grupo A:** Suelos con elevada capacidad de infiltración y bajo potencial de escurrimiento, aún cuando están húmedos. Se trata principalmente de suelos profundos y con texturas gruesas (arenosa o areno-limosa).

**Grupo B:** Suelos con moderada capacidad de infiltración cuando están saturados. Consisten principalmente en suelos de mediana a alta profundidad, con buen drenaje. La textura de éstos va de moderadamente finas a moderadamente gruesas (franca, franco-arenosa o arenosa).

**Grupo C:** Suelos con escasa capacidad de infiltración una vez saturados. La textura de éstos va de moderadamente fina a fina (franco-arcillosa o arcillosa).

**Grupo D:** Suelos muy arcillosos con muy baja capacidad de infiltración y elevado potencial de escurrimiento cuando están saturados.



### **Intercepción**

Es el agua interceptada por la superficie vegetal, donde es contenida y puesta a disposición para la evapotranspiración. Cuando se utiliza el método de curva número para estimar la escorrentía superficial, este término se toma en cuenta durante los cálculos de la escorrentía superficial.

### **Infiltración**

La infiltración se refiere a la entrada de agua dentro del perfil de suelo desde la superficie del suelo. Al persistir la infiltración el suelo va aumentando su humedad, causando que la tasa de infiltración decrezca con el tiempo hasta que alcanza un valor estable. La tasa inicial de infiltración depende del contenido de humedad del suelo previo a la incorporación de agua desde la superficie. La tasa final de infiltración es equivalente a la conductividad hidráulica saturada del suelo. Ya que el método de curva número utilizado para calcular escorrentía opera a una escala diaria, no es posible modelar directamente la infiltración. Por lo que la cantidad de agua entrando al suelo es calculada como la diferencia entre la cantidad de precipitación caída y la escorrentía superficial producida.

### **Redistribución**

La redistribución se refiere al movimiento continuo del agua a través del suelo una vez finalizada la entrada de agua en la superficie. La redistribución es provocada por diferencias en el contenido de agua en el perfil. Una vez que el contenido de agua es uniforme en todo el perfil de suelo ésta termina. La redistribución en SWAT es realizada por medio de técnica de almacenamiento y recorrido para predecir el flujo desde los distintos estratos de suelo hacia la zona de las raíces.

### **Flujo lateral**

Es la contribución al caudal del río que se origina debajo de la superficie, pero sobre la zona en que las rocas están saturadas con agua. El flujo lateral en el perfil de suelo (0- 2 m) es calculado simultáneamente con la redistribución. Se utiliza un modelo de almacenamiento cinemático para predecir el flujo lateral en cada estrato de suelo. El modelo toma en cuenta las variaciones en conductividad, pendiente y contenido de agua del suelo.

### **Caudal de retorno**

El caudal base es el volumen de caudal que se origina de aguas subterráneas. SWAT divide el agua subterránea en dos tipos de acuíferos, uno superficial no confinado que contribuye al caudal base y al caudal superficial dentro de la cuenca. Y un segundo acuífero profundo confinado, donde el agua que entra sale de la cuenca. El agua percolada es particionada en dos fracciones, una para cada acuífero. El agua almacenada en el

acuífero superficial, además de producir el caudal base, puede reaprovisionar de humedad al suelo en condiciones muy secas o ser removida directamente por las plantas.

### **Cauces**

Dos tipos de cauces se definen dentro de una sub-cuenca, el cauce principal y cauces tributarios. Los cauces tributarios son de orden menor saliendo desde el cauce principal dentro de las sub-cuencas. Cada cauce tributario dentro de una sub-cuenca drena solamente una porción de ésta y no recibe contribución de aguas subterráneas a su caudal. Todo el caudal de los cauces tributarios es liberado y trasladado a través del cauce principal. SWAT utiliza los atributos de los cauces tributarios para determinar el tiempo de concentración para la sub-cuenca.

Las pérdidas por transmisión son pérdidas del caudal de superficie a través de percolación desde el lecho. Este tipo de pérdidas ocurre en ríos efímeros o intermitentes, donde la contribución de agua subterránea ocurre sólo durante ciertas épocas del año

#### **1.6.4- Rastreo**

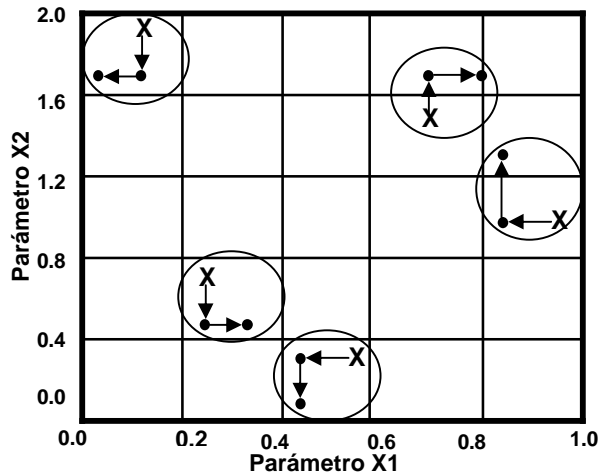
Al escurrir el agua hacia aguas abajo, una porción puede perderse debido a evaporación y transmisión a través del lecho del río. El caudal también puede ser suplementado por la caída directa de lluvia sobre el cauce. SWAT utiliza la ecuación de Manning para definir la tasa y velocidad de la escorrentía. Los métodos utilizados por SWAT para realizar el rastreo se derivan del método de la onda cinemática. El modelo permite elegir entre los siguientes métodos: a) el método de Muskingum y b) el método de almacenamiento variable. El primero de ellos modela el rastreo como una combinación de una cuña y un prisma, mientras que para el método de almacenamiento variable, para un segmento dado del río, el rastreo está basado en la ecuación de continuidad. En la presente aplicación se optó por el último método.

#### **1.6.5 Análisis de sensibilidad**

El método de análisis de sensibilidad incorporado dentro de SWAT2005, se denomina LH – OAT (muestreo Hipercubo Latino y diseño One-factor-At-a-Time), ya que combina y aprovecha las ventajas de ambos métodos. El muestreo de hipercubo latino asegura que todo el rango de todos los parámetros haya sido muestreado y la precisión del diseño OAT asegurando que los cambios en la salida de cada corrida del modelo se puedan atribuir claramente al cambio en el input (Fig. 1.14). El método es eficiente ya que si el espacio se divide en  $m$  intervalos y se desean analizar la sensibilidad de  $p$  parámetros sólo se necesitan  $m^*(p+1)$  corridas del modelo.

Para llevar a cabo esta metodología se deben realizar los siguientes pasos:

1. Dividir el espacio en N partes de igual probabilidad  $1/N$ .
2. Se toman N muestras de acuerdo a LH.
3. Secuencialmente determinar la sensibilidad a través de OAT para cada punto LH.



**Fig. 1.14** Muestreo LH – OAT para un modelo de 2 parámetros. X representa los puntos de LH y los puntos del OAT ●

**Muestreo Hipercubo Latino:** Es un camino sofisticado de realizar un muestreo aleatorio. El concepto de esta simulación está basado en la simulación de Monte Carlo, pero utiliza una aproximación de muestreo estratificada, lo que permite una estimación eficiente de la estadística de salida. Se subdivide la distribución de cada parámetro en N rangos, cada uno con una probabilidad de ocurrencia de  $1/N$ . Se generan valores aleatorios de los parámetros de tal manera que cada rango es muestreado solo una vez. El modelo es entonces corrido N veces con la combinación aleatoria de los parámetros. Este método es comúnmente aplicado en la modelación de calidad de agua debido a su robustez y eficiencia (Weijers & Vanrolleghem, 1997; Vandenberghe *et al.*, 2001)

**Diseño One-factor-At-a-Time:** es un ejemplo de integración de un método local a uno global. Como en el caso de los métodos locales, cada corrida solo cambia un parámetro, así los cambios en la salida de cada corrida se puede atribuir inequívocamente al cambio en el parámetro de entrada. El análisis de las salidas está basado en el estudio del muestreo aleatorio de los efectos elementales, que son generados de cada input considerado. Ya que este método permite analizar la sensibilidad de un gran número de parámetros es bastante apropiado para el caso del modelo SWAT.

### 1.6.6 Calibración Automática

El método de optimización seleccionado para la calibración es el *Shuffled complex evolution algorithm* (SCE-UA) el cual es un algoritmo que minimiza una función objetivo con hasta 16 parámetros (Duan *et al.*, 1992; Duan *et al.*, 1994) (Fig. 1.15). La Fig. 1.15 se puede interpretar de la siguiente manera: las líneas representan un área de función con un óptimo global y un óptimo local. Se tienen 10 poblaciones muestrales divididas en 2 comunidades (Fig. 1.15a), cada comunidad se somete a un proceso de evolución independiente, una converge al óptimo local y otra al óptimo global (Fig. 1.15b). Después se mezclan las 2 comunidades (Fig. 1.15c) y luego se realiza un segundo ciclo de evolución. En este caso las dos comunidades convergen al óptimo global (Fig. 1.15d).

Se recomienda no utilizar más de 8 parámetros (ej. 8 parámetros cuenca Vergara 3647 corridas, aprox. 3 días). Este algoritmo optimiza la función objetivo al buscar sistemáticamente sobre todo el espacio del parámetro. Para realizar la optimización se puede elegir entre dos funciones objetivos:

- 1.- La suma de los cuadrados de los residuos (SSQ), la que es similar al promedio cuadrado del error, ya que trata de hacer coincidir la serie simulada con la medida.

$$SSQ = \sum_{i=1}^n (x_{i,medido} - x_{i,simulado})^2 \quad (1.7)$$

Donde n representa el número de datos observados/simulados

- 2.- La suma de los cuadrados de las diferencias de lo medido y simulado después de rankeados (SSQR), este método trata de calzar la distribución frecuencia de las series observadas y simuladas. Al contrario de lo que sucede en el SSQ en este caso el instante de ocurrencia del valor de una variable no se considera

$$SSQ = \sum_{j=1}^n (x_{j,medido} - x_{j,simulado})^2 \quad (1.8)$$

Donde j representa el número de datos observados/simulados.

El método SCE-UA ha sido aplicado con éxito en SWAT al calibrar parámetros hidrológicos y de calidad de agua (Eckhardt & Arnold, 2001; Van Griensven & Bauwens, 2003; Eckhardt *et al.*, 2005).

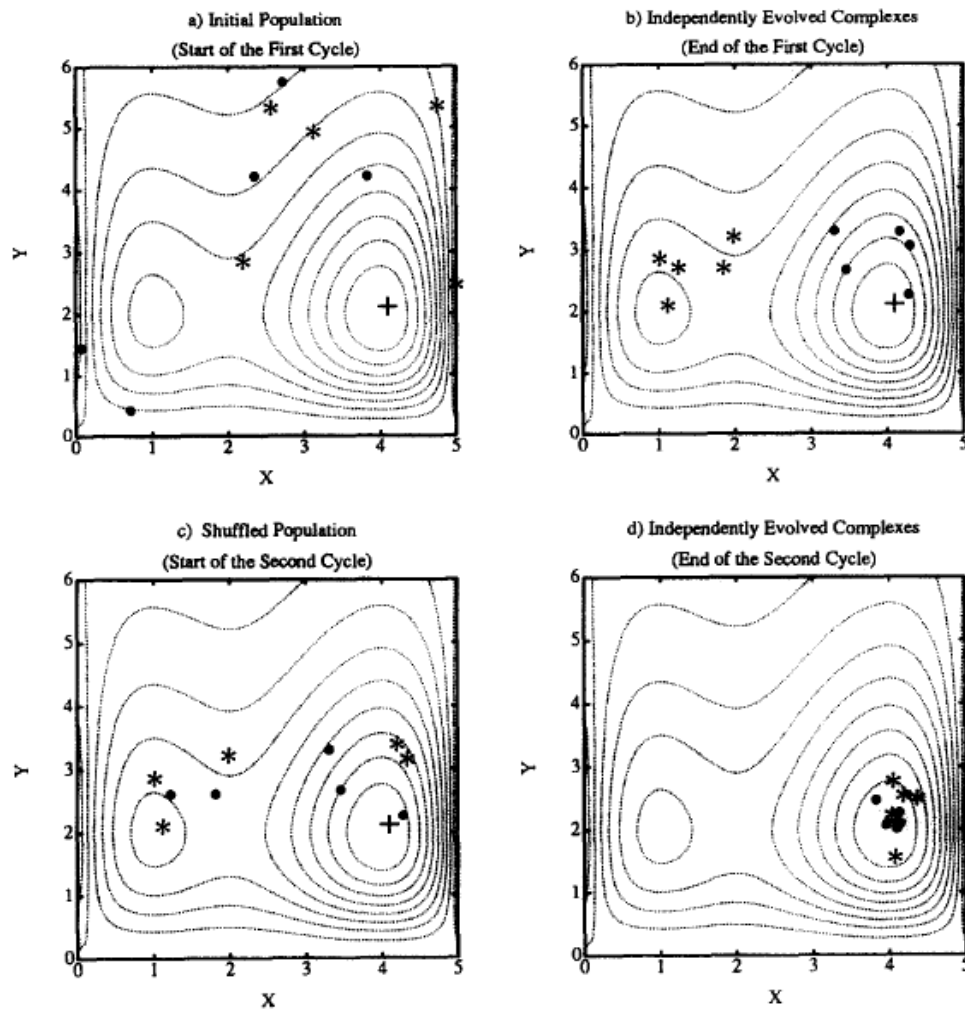


Fig. 1. Illustration of the shuffled complex evolution (SCE-UA) method.

Fig. 1.15 Método SCE –UA (Duan *et al.*, 1994).

### 1.6.7 Interface gráfica

Una de las ventajas de utilizar el modelo SWAT es que posee una interface gráfica AVSWATX GUI (Di Luzio *et al.*, 2002), integrada en ArcView que facilita mucho la utilización de éste. La interface permite tanto el pre como post procesamiento de los datos. El modelo SWAT propiamente tal corre en DOS, pero el modelo puede ser configurado a través de la GUI, al igual que los resultados pueden ser analizados a través de ésta. Un manual detallado de AVSWATX se puede obtener en Internet (<http://www.brc.tamus.edu/swat/index.html>).

## 1.6- HIPÓTESIS

Las hipótesis planteadas para esta tesis son:

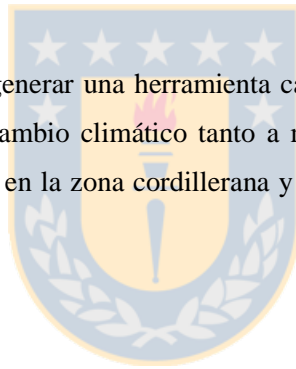
***H1:** El modelo de la curva número (escorrentía superficial) unido a un modelo en base al índice de temperaturas (derretimiento) son capaces de representar en forma adecuada la hidrología de una cuenca con escasos datos de entrada.*

***H2:** Un aumento de las temperaturas y una disminución de las precipitaciones traerá como consecuencia una disminución del caudal promedio anual, disminución de los caudales de verano y aumento de los caudales de invierno a largo plazo en las cuencas en estudio.*

## 1.8- OBJETIVOS

### 1.8.1- Objetivo General

El objetivo de este proyecto es generar una herramienta capaz de analizar el comportamiento de las cuencas en estudio bajo escenarios de cambio climático tanto a macro como a meso-escala (sub-cuencas), incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana y la disponibilidad del recurso agua durante diferentes períodos del año.



### 1.8.2- Objetivos Específicos

**OE1:** Establecer áreas de cobertura nival para las cuencas en estudio a partir de datos de percepción remota.

**OE2:** Establecer balances hídricos mensuales para una cuenca con importante aporte nival, a través de la aplicación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido (SWAT).

**OE3:** Establecer balances hídricos mensuales para una cuenca con régimen predominantemente pluvial, a través de la aplicación de un modelo hidrológico espacialmente distribuido (SWAT).

**OE4:** Determinar el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del recurso agua en las cuencas en estudio, durante el año hidrológico y en diferentes puntos estratégicos dentro de dicha cuenca.

## 1.9- REFERENCIAS

- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. & Rasmussen, J. (1986<sup>a</sup>) An introduction to the European Hydrologic System (SHE). 1. History and philosophy of a physically-based, distributed modeling system. *J. Hydrol.* **87**, 45–59.
- Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O'Connell, P. E. & Rasmussen, J. (1986<sup>b</sup>) An introduction to the European Hydrologic System (SHE). 2. Structure of physically-based, distributed modeling system. *J. Hydrol.* **87**, 61–77.
- Abu El-Nasr, A., Arnold, J. G., Feyen, J. & Berlamont, J. (2005) Modelling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi-distributed model. *Hydrol. Processes* **19**, 573-587.
- Anderson, M. G. & Burt, T. P. (1990). Process Studies in Hillslope Hydrology, Wiley, Chichester
- Arnell, N. W. (1999) A simple water balance model for the simulation of streamflow over a large geographic domain. *J. Hydrol.* **217**(3-4), 314–335.
- Arnell, N.W. C. Liu, R. Compagnucci, L. da Cunha, K. Hanaki, C. Howe, G. Mailu, I. Shiklomanov and E. Stakhiv (2001) Hydrology and water resources. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 191-234.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. & Williams, J. R. (1998) Large area hydrologic modeling and assessment - Part I: model development. *JAWRA* **34**(1), 73-89.
- Arnold, J. G., Williams, J. R., Nicks, A. D. & Sammons, N. B. (1990) SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.
- Bárdossy, A., Bronstert, A., Buiteveld, H., Busch, N., Disse, M., Engel, H., Fritsch, U., Hundecha, Y., Lammersen, R., Niehoff, D. & Ritter, N. (2002). LAHoR—Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. Project Report, IRMA-Code3/DU/1/002, 76 pp.
- Beven, K. J. (2001). Rainfall – Runoff Modelling: The Primer, JOHN WILEY AND SONS LTD
- Blöschl, G. (1996.). Scale and scaling in hydrology., Wiener Mitteilungen, Wasser–Abwasser–Gewässer, 132, Wien, Österreich.
- Blöschl, G. & Sivapalan, M. (1995) Scale issues in hydrological modelling: a review. *Hydrol. Processes* **9**, 251-290.
- Brath, A., Montanari, A. & Toth, E. (2004) Analysis of the effects of different scenarios of historical data availability on the calibration of a spatially-distributed hydrological model. *J. Hydrol.* **291**, 232-253.
- Carrasco, J., Casassa, G. & Quintana, J. (2005) Changes of the 0°C isotherm and the equilibrium line altitude in central Chile during the last quarter of the 20th century. *Hydro. Sci. J.* **50**, 933-948.



- Cardwell, H. E., Cole, R. A., Cartwright, L. A. & Martin, L. A. (2006) Integrated Water Resources Management: Definitions and Conceptual Musings. *Integrated Water Resources Management*: (135), 8-18.
- Cazorzi, F. & Dalla Fontana, G. (1996) Snowmelt modelling by combining air temperature and a distributed radiation index. *J. Hydrol.* **181**, 169 -187.
- Chiew, F.H.S. (2007) Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia. *Hydrol. Sci. J.*, **51**, 613-625.
- CONAMA -DGF, C. (2006). Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI, Comisión Nacional del Medio Ambiente. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias. Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Coudrain, A., Francou, B. & Kundzewicz, Z. (2005) Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources—Editorial. *Hydro. Sci. J.* **50**, 925-932.
- Daly, S. F., Davis, R., Ochs, E. & Pangburn, T. (2000) An approach to spatially distributed snow modelling of the Sacramento and San Joaquin basins, California. *Hydrol. Processes* **14**, 3257-3271.
- De Smedt, F., Yongbo, L. & Gebremeskel, S (2000) Hydologic modelling on a catchment scale using GIS and remotely sensed land use information. *Risk Analysis II*. Brebia, C. A. (ed.). WIT press, Southampton, Boston.
- DeFries, R. & Eshleman, K. N. (2004) Land-use change and hydrologic processes: a major focus for the future. *Hydrol. Processes* **18**, 2183-2186.
- Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J. C. & Neitsch, S. L. (2002). ArcView Interface for SWAT2000 User's Guide. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station
- Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J. C. & Neitsch, S. L. (2002). Soil and Water Assessment Tool. ArcView GIS Interface Manual: Version 2000. Published by Texas Water Resources Institute TR-193, College Station, TX. 346p. Texas Water Resources Institute, College Station
- Duan, Q., Sorooshian, S. & Gupta, V. K. (1994) Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *J. Hydrol.* **158**, 265-284.
- Dublin Statement (1992). The Dublin Statement and Report of the Conference. International Conference on Water and the Environment: Development issues for the 21st century, 26-31 January 1992, Dublin, Ireland.
- Eckhardt, K. & Arnold, J. G. (2001) Automatic calibration of a distributed catchment model. *J. Hydrol.* **251**, 103-109.
- Eckhardt, K., Fohrer, N. & Frede, H. G. (2005) Automatic model calibration. *Hydrol. Processes* **19**, 651-658.
- Eckhardt, K. & Ulbrich, U. (2003) Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *J. Hydrol.* **281**, 244-252.
- ESRI Environmental Systems Research Institute Inc. (ESRI). Arc View Gis 3.2. *Environmental Systems Research Institute Inc. (ESRI). Arc View Gis 3.2.*

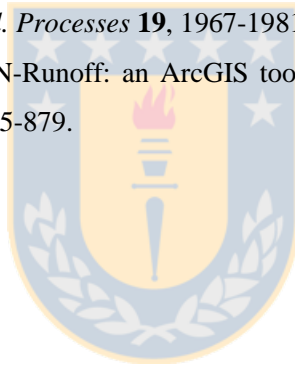
- Estrela, T. (1992) Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos. Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- Fohrer, N., Haverkamp, S. & Frede, H.-G. (2005) Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions: development of sustainable land use concepts for low mountain range areas. *Hydrol. Processes* **19**, 659-672.
- Fontaine, T. A., Cruickshank, T. S. & Arnold, J. G. (2002) Development of a snowfall - snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *J. Hydrol.* **262**, 209-223.
- Gleick, P. H. (1997) Climate Change and Water Resources. *AWWA* **89**(11), 107-110.
- Harrison, G. P. & Whittington, H. W. (2002) Vulnerability of Hydropower Projects to Climate Change. *IEE P-Gener Transm D* **149**(3), 249-255.
- Gleick, P.H. (2003) Water use. *Annu. Rev. Env. Resour.*, **28**, 275-314.
- Hattermann, F., Wattenbach, M., Krysanova, V. & Wechsung, F. (2005) Runoff simulations on the macroscale with the ecohydrological model SWIM in the Elbe catchment-validation and uncertainty analysis. *Hydrol. Processes* **19**, 693-714.
- Hinrichsen, D., Robey, B. & Upadhyay, U. D. (1998) Soluciones para un mundo con escasez de agua. Population Reports, Serie M, No. 14. Baltimore, Johns Hopkins School of Public Health, Population Information Program.
- Holtan, H. N. & Lopez, N. C. (1971). USDHAL-70 Model of Watershed Hydrology. Technical Bulletin 1435, U.S. Department of Agriculture.
- Holvoet, K. (2006). Monitoring and modelling the dynamic fate and behaviour of pesticides in river systems at catchment scale. PhD thesis, Ghent University, Belgium, pp. 242.
- Hulme, M. & Sheard, N. (1999) Climate change Scenarios for Argentina. *Climate change Scenarios for Argentina*. Norwich, UK, 6pp.
- IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jayakrishnan, R., Srinivasan, R. & Arnold, J. G. (2005) Advances in the application of the SWAT model for water resources management. *Hydrol. Processes* **19**, 749-762.
- Kite, G. W., Dalton, A. & Dion, K. (1994) Simulation of streamflow in a macroscale watershed using general circulation model data. *Water Resour. Res.* **30**, 1547-1599.
- Knisel, W. G. (1980). CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Rept. No. 26.
- Kundzewicz, Z.W., L.J. Mata, N.W. Arnell, P. Döll, P. Kabat, B. Jiménez, K.A. Miller, T. Oki, Z. Sen and I.A. Shiklomanov (2007): Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007: Impacts*,

- Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210.
- Leonard, R. A., Knisel, W. G. & Still, D. A. (1987) GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. *GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems*. **30**(5), 1403-1428.
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. & Burges, S. J. (1994) A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *J. Geophys. Res.* **99**(D7), 14415–14428.
- López-Moreno, J. I. & Nogués-Bravo, D. (2005) A generalized additive model for the spatial distribution of snowpack in the Spanish Pyrenees. *Hydro Process* **19**(16), 3167-3176.
- Magrin, G., C. Gay García, D. Cruz Choque, J.C. Giménez, A.R. Moreno, G.J. Nagy, C. Nobre and A. Villamizar, 2007: Latin America. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 581-615.
- Martínez de Azagra, A., Mongil, J. & Del Río, J. (2003). Pequeña guía de uso del modelo MODIPÉ. [www.asificacion.com](http://www.asificacion.com). 28p.
- Matheussen, B., Kirschbaum, R. L., Goodman, I. A., O'Donnell, G. M. & Lettenmaier, D. P. (2000) Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River basin (U.S.A. and Canada). *Hydrol. Process.* **14**, 867–885.
- Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao, 2007: Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Mishra, S. K. & Singh, V. P. (2004) Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number. *Hydrol. Processes* **18**, 1291-1313.
- Moglen, G., Beighley, E. & Edward, R. (2002) Spatially explicit hydrologic modeling of land use change. *JAWRA* **Feb.**
- Montgomery, D. R., Dietrich, W. E., Torres, R., Anderson, S. P., Heffner, J. T. & Loague, K. (1997) Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall. *Water Resour. Res.* **33**(1), 91-109.
- Mostert, E. (2006) Integrated Water Resources Management in The Netherlands: How Concepts Function. *J. of Contemporary Water Research and Education* (135), 19 -27.

- Neitsch, S. L., Arnold, J. C., Kiniry, J. R., Sirinivasan, R. & Williams, J. R. (2005<sup>a</sup>). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2005. Texas, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple
- Neitsch, S. L., Arnold, J. C., Kiniry, J. R., Sirinivasan, R. & Williams, J. R. (2005<sup>b</sup>). Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation. Version 2005. Texas, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple
- Neitsch, S. L., Arnold, J. C., Kiniry, J. R., Williams, J. R. & King, K. W. (2002<sup>a</sup>). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station
- Neitsch, S. L., Arnold, J. C., Kiniry, J. R., Williams, J. R. & King, K. W. (2002<sup>b</sup>). Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station
- NRCS (2002). Part 630. Hydrology. National Engineerin Handbook. Washington D.C:
- Parry, M., Fischer, C., Livermore, M., Rosenzweig, C. & Iglesias, A. (1999) Climate change and world food security: a new assessment. . *Global Environ. Chang.* **9**, 51-67.
- Partnership, G. W. (2000). Integrated Water Resources Management. Global Water Partnership.
- Partnership, G. W. (2005). Toolbox Integrated Water Resources Management. Global Water Partnership.
- Rasmussen, P. E., Goulding, K. W. T., Brown, J. R., Grace, P. R., Janzen, H. H. & Körschens, M. (1998) Long-term Agroecosystem Experiments: Assessing Agricultural Sustainability and Global Change. *Science* **282**, 893-896.
- Refsgaard, J. C. (2007). Hydrological Modelling and River Basin Management; Doctoral Thesis. Faculty of Natural Science, University of Copenhagen.
- Rowntree, P. (1989) The Needs of Climate Modellers for Water Runoff Data. Workshop on Global Runoff Data Sets and Grid Estimation, 10–15 November 1988, Koblenz. World Climate Programme, WMO, June 1989, Geneva.
- Schneider, L. E. & McCuen, R. H. (2005) Statistical Guidelines for Curve Number Generation. *J. Irrig. Drain E-ASCE* **May/June**, 282-290.
- Schneiderman, E. M., Pierson, D. C., Lounsbury, D. G. & Zion, M. S. (2002,) Modelling the hydrochemistry of the Cannonsville watershed with generalized watershed loading functions (GWLF). *J. Am. Water Resour. Assoc.* **38**(5), 1323–1347.
- Simonovic, S. P. (2002) World water dynamics: global modeling of water resources. *J. Environ. Manage.* **66**, 249-267.
- Sivapalan, M., Ruprecht, J. K. & Viney, N. R. (1996<sup>a</sup>) Water and salt balance modelling to predict the effects of land-use changes in forested catchments. 1. Small catchment water balance model. *Hydrol. Process* **10**, 393–411.

- Sivapalan, M., Viney, N. R. & Jeevaraj, C. G. (1996<sup>b</sup>) Water and salt balance modelling to predict the effects of land-use changes in forested catchments. 3. Coupled model of water and salt balances. *Hydrol. Process.* **10**, 413–428.
- Sivapalan, M., Viney, N. R. & Jeevaraj, C. G. (1996<sup>c</sup>) Water and salt balance modelling to predict the effects of land-use changes in forested catchments. 3. The large catchment model. *Hydrol. Process* **10**, 429–446.
- Stott, P. A., Stone, D. A. & Allen, M. R. (2004) Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature* **432**, 610-614.
- Stowhas, L. (2003). Uso del metodo de la curva numero en cuencas heterogenas. XVI Congreso de Ingenieria Hidráulica, Santiago, Chile.
- Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai (2007): Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Uhlenbrook, S., Roser, S. & Tilch, N. (2004) Hydrological process representation at the meso-scale: the potential of a distributed, conceptual catchment model. *J. Hydrol.* **291**, 278-296.
- van Griensven, A. & Bauwens, W. (2003) Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models. *Water Resour. Res.* **39**(12), 1348.
- van Griensven, A. & Bauwens, W. (2005) Application and evaluation of ESWAT on the Dender basin and the Wister Lake basin. *Hydrol. Processes* **19**, 827-838.
- van Griensven, A., Francos, A. & Bauwens, W. (2002) Sensitivity analysis and auto-calibration of an integral dynamic model for river water quality. *Water Sci. Technol.* **45**(9), 325–332.
- van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T. & Sirinivasan, R. (2006) A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *J. Hydrol.* **324**, 10-23.
- Vandenbergh, V., van Griensven, A. & Bauwens, W. (2001) Sensitivity analysis and calibration of the parameters of ESWAT: Application to the river Dender. *Wat. Sci. Tech* **43**(7), 295-301.
- Watson, R., Zinyowera, M. C., Moss, R. H. & Dokken, D. J. (1997) IPCC Special Report on the Regional Impacts of Climate Change: An assessment of vulnerability.
- Weijers, S. R. & Vanrolleghem, P. A. (1997) A procedure for selecting parameters in calibrating the activated sludge model no.1 with full-scale plant data. *Wat. Sci. Tech* **36**(5), 69-79.
- Whitfield, P., Reynolds, C. J. & Cannon, A. J. (2002) Modelling streamflow in present and future climates: Examples from the Georgia Basin, British Columbia. *Can. Water Resour. J.* **27**, 427-456.

- Wilby, R. L., Dawson, C. W. & Barrow, E. M. (2002) SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environ. Modell. Softw.* **17**, 147-159.
- Wilby, R. L., Whitehead, P. G., Wade, A. J., Butterfield, D., Davis, R. J. & Watts, G. (2006) Integrated modelling of climate change impacts on water resources and quality in a lowland catchment: River Kennet, UK. *J Hydrol* **330**(1-2), 204 -220.
- Williams, J. R., Jones, C. A. & Dyke, P. T. (1984) A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* **27**(1), 129-144.
- Williams, J. R., Nicks, A. D. & Arnold, J. G. (1985) Simulator for water resources in rural basins. *J. Hydraul Eng-ASCE* **111**(6), 970-986.
- WWAP (2003). Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo "Agua para todos, agua para la vida".
- Xu, C.-Y. & Singh, V. P. (2004) Review on Regional Water Resources Assessment Models under Stationary and Changing Climate. *Water Resour Manag* **18**, 591 -612.
- Yang, T.-C., Yu, P.-S. & Chen, C.-C. (2005) Long-term runoff forecasting by combining hydrological models and meteorological records. *Hydrol. Processes* **19**, 1967-1981.
- Zhan, X. & Huang, M.-L. (2004) ArcCN-Runoff: an ArcGIS tool for generating curve number and runoff maps. *Environ Modell Softw* **19**, 875-879.



## **CAPITULO 2: Hydrological modelling with SWAT under limited conditions of data availability: evaluation of results from a Chilean case study<sup>2</sup>**

---

**ALEJANDRA STEHR, PATRICK DEBELS, FRANCISCO ROMERO, HERNAN ALCAYAGA**

Centre for Environmental Sciences EULA-CHILE, University of Concepción, PO Box 160-C, Concepción, Chile

[pdebels@udec.cl](mailto:pdebels@udec.cl)

### **2.1- Abstract**

The Biobío Basin is of high strategic importance for Chilean development, both at the regional as well as at the national level. For this reason advances in the general understanding of, and in the capacity to describe and predict, in a spatially explicit way, the impact of climate and anthropogenic forcing on the hydrology of the Biobío River Basin is urgently needed. The work presented here pretends to set the basis for future modelling applications within Biobío by analyzing the applicability of a readily available modelling tool, the SWAT model, to a sub-basin of it. Modelling results show that the model has a good performance in most parts of the study basin. Considering this, the performed SWAT model application for the Vergara Basin confirms that SWAT is a useful tool and can already be used to make preliminary assessments of the potential impact of land use and climate changes on basin hydrology.

### **Key words**

Hydrological modelling; SWAT; calibration; Chile; Biobío

---

<sup>2</sup> Stehr, A., Debel, P., Romero, F. & Alcayaga, H. (in press) Hydrological modelling with SWAT under limited conditions of data availability: evaluation of results from a Chilean case study. Hydrological Sciences Journal.



## **Modélisation hydrologique avec SWAT sous des conditions limitées de dates d'entrée: évaluation des résultats d'une application au Chili**

### **2.2- Résumé**

Au Chili, les eaux du Bassin du Biobío sont d'une haute importance stratégique pour le développement, tellement dans les régions comme au niveau national. Pour cette raison, il est important d'avancer dans la compréhension générale de l'hydrologie du bassin, d'une manière de pouvoir décrire et faire des prédictions sur les impacts des changements climatiques et des pressions anthropogènes. Le travail présenté ici prétends établir la base pour les futurs efforts de modélisation du Biobío, en analysant l'applicabilité d'un modèle existant, le SWAT. Le modèle est appliqué a un bassin intérieur, le Vergara. Les résultats indiquent que le modèle a une bonne performance dans presque la totalité du bassin étudié. L'application du modèle SWAT pour le Bassin du Vergara peut être considérée comme un outil de travail qui peut déjà être utilisé pour faire des évaluations préliminaires de l'impact potentiel des changements climatiques et de l'utilisation de la terre sur l'hydrologie dans le bassin.

#### **Mots clefs**

modélisation hydrologique; SWAT; calibrage;Chili; Biobío



## 2.3- INTRODUCTION

The integrated management and adequate allocation of water resources between different water uses under changing conditions of land use and climate are major challenges which many societies already face, or will need to face during the next decades (Simonovic 2002). In this context, the analysis of the impact of land use and climate changes on river hydrology and surface water availability can be addressed by means of spatially distributed rainfall-runoff model applications (Harrison & Whittington, 2002; Eckhardt & Ulbrich, 2003; Haverkamp *et al.*, 2005). Well-known models that are commonly applied at the basin-scale are the 'Hydrologic Simulation Package Fortran' (HSPF; Holtan & Lopez 1971), the Système Hydrologique Européen (SHE; Abbott *et al.*, 1986<sup>a</sup>, 1986<sup>b</sup>), the Soil and Water Assessment Tool (SWAT; Arnold *et al.*, 1998) and the Hydrologic Engineering Centre Hydrologic Modeling System (HEC-HMS; HEC 2000), amongst others. These models that produce hydrographs as well as water yields and provide possibilities for continuous simulation, can be operated at different time steps, and have varying numbers of input parameters. (Mishra & Singh 2004). However, for practical applications in meso- or macro-scale basins, in Chile as well as in many other places of the world, available meteorological data will restrict choice to those models that offer possibilities for using daily (or coarser) data for performing water balance calculations. Most applications of the previously described models found today in the literature correspond to case studies from the developed world, where data availability may be well different from what is typically encountered elsewhere.

In Central Chile, the Biobío Basin (24.371 km<sup>2</sup>) is of high strategic importance for economical development, both at the regional as well as at the national level. The continuously growing pressures on the basin's water resources together with the need to preserve the basins' unique aquatic biodiversity, make it very difficult to achieve a consented and sustainable equilibrium between availability and demand, unless a better understanding of basin hydrology and of its sensitivity to climate variability and climate and land use changes can be provided. For this reason, advances in the general understanding and in the specific capacity to describe and predict - in a spatially explicit way - the impact of climate and anthropogenic forcing on the hydrology of the Biobío River Basin is urgently needed. In this context, the work presented in this manuscript pretends to set the basis for future modelling applications within Biobío, by analyzing the applicability of the SWAT model (*Soil & Water Assessment Tool*; Arnold *et al.*, 1998, Neitsch *et al.*, 2002<sup>a</sup>, 2002<sup>b</sup>), to the Vergara Basin (4.265 km<sup>2</sup>), a sub-basin of the Biobío River System that is especially important for the forestry industry (plantations). Selection of SWAT for this project was based on the following reasons: it is an existing, readily available and well-documented modular modeling tool. Its Graphical User Interface (GUI), AVSWAT (Di Luzio *et al.*, 2002), comes embedded in the popular and widely used GIS environment Arcview 3.2 (ESRI, 1999). Both the availability of good manuals as well as the ArcView-based GUI are

aspects that make the model also attractive to potential end-users, such as government agencies and decision-makers. With SWAT, basic applications can be built for hydrological modeling, and later extended e.g. for analyzing water quality issues as well. An additional interesting aspect of SWAT is the ongoing development that is taken place, with contributions coming from different groups, from different parts of the world. SWAT also offers different options for calculating runoff and evapotranspiration, each option having different requirements with regard to input data. This is important, as in Chile, just as in many other places in the world, meteorological data are typically available at the daily time step only. By using the SCS Curve Number approach option for runoff calculations, and the Hargreaves method for evapotranspiration (both offered by SWAT), this limitation can easily be addressed. Departing from the former analysis, one of our goals was to test the practical applicability of SWAT on a case study basin for which data availability can be described as 'typical of many Chilean basins'. It is thought that interpretation of the results obtained from this case study holds the potential for users from other parts of the world to evaluate the appropriateness -under similar conditions of basin characteristics and data availability- of this tool for their specific water resources applications.

## **2.4- SELECTION OF THE STUDY AREA**

The Biobío River Basin is the third largest Chilean basin. It is located in Central Chile, between 36°45' - 38°49' S and 71°00' - 73°20' W. The basin stretches from the continental divide in the E (Andes, Chilean-Argentinean border) to the Pacific Ocean in the W. It covers approximately 3% of the Chilean continental territory, and is influenced by the temperate climates of the South as well as by the Mediterranean climate of Central Chile. Due to its location in a climatic transition zone, the study area is rich in biodiversity, which is characterized by a high degree of species endemism. At the same time, the area constitutes the country's most important centre for forestry activities (both pulp mills and exotic species forestry plantations) and contains a major portion of the Chilean agricultural soils. The basin also plays a predominant role in the national energetic supply (hydroelectricity), and its main river, the Biobío, is the principal provider of drinking water for one of Chile's major cities: the city of Concepción (700.000 inhabitants). The flow regime of the Biobío River is pluvio-nival, with a very marked difference in discharge between dry and wet season: maximum and minimum monthly mean values near the mouth are 1823 m<sup>3</sup>/s and 279 m<sup>3</sup>/s during the months of July (winter; *wet season*) and February (summer; *dry season*), respectively. In the Central Valley part of the basin (where most agricultural activities take place), irrigation practices are very important during the Austral Summer.

The main tributaries to the Biobío are the Duqueco, Bureo, Vergara and Laja Rivers. Together these rivers drain 50% of the basin's total surface area. The rainfall-runoff modelling application described in this

paper focuses on one of these sub-basins: the Vergara River Basin. This sub-basin has an area of 4.265 km<sup>2</sup>, covering approximately a 17% of the total surface area of Biobío. It is located in the southern part of the Biobío Basin (Fig. 2.1), between 37°29' - 38°14' S and 71°36' - 73°20' W. Maximum and minimum mean monthly discharges occur during the month of July and February-March respectively (Table 2.1). Its selection as a test area for the application of the SWAT model is based on (i) the availability of a typical set of basic input data which should allow for the model to be calibrated and validated; (ii) the absence of hydropower infrastructure as well as of major irrigation works; and (iii) the reduced amount of snowfall in the basin, and the consequent small contribution of snowmelt to total river discharge. These last 2 aspects are considered important: the snowmelt contributions as well as the presence of major flow deviations and/or abstractions would require special attention during the modelling, due to their impact on the timing and magnitude of observed discharge values. This would require additional processes to be modeled, and thus further complicate the calibration and validation process (more uncertainty involved; more parameters that can be tuned). The philosophy behind the selected approach here is that if the model can be successfully applied to a relatively “simple” test-case such as the Vergara Basin, then in successive steps more complex sub-basins may be addressed, e.g. those where one or a (progressive) combination of several of the features mentioned above are represented. Once all successive modelling steps have been successfully completed, then finally the modelling of the entire Biobío Basin may be attempted. The former should be considered as a long-term goal, as current conditions of data availability (e.g. on snow water equivalent) still constitute a serious restraint. However, on the short-term the selected sub-basin constitutes an interesting test-case for evaluating impacts of land use change on basin hydrology, as major conversions between agriculture and forestry land use have been experienced in this area over the past decades.

## 2.5- THE SWAT MODEL

Development of the “Soil and Water Assessment Tool” (SWAT, Arnold *et al.*, 1998, Neitsch *et al.*, 2002<sup>a</sup>, 2002<sup>b</sup>) was started in the 1990s at the United States Department of Agriculture (USDA). SWAT is a process based and spatially semi-distributed hydrological and water quality model designed to calculate and route water, sediments and contaminants from individual drainage units (“sub-basins”) throughout a river basin towards its outlet. It is a versatile tool that has been used in many parts of the world to predict the impact of management practices on water, sediment and agricultural chemical yields in large complex basins with varying soils, land use and management conditions, over long periods of time (Eckhardt *et al.*, 2005).

A complete description of the SWAT model can be found in Neitsch *et al.* (2002<sup>a</sup>, 2002<sup>b</sup>). In what follows, we limit ourselves to a short overview of the most relevant aspects related to the hydrology component, as this has been the main focus of attention in the presented work.

Within the SWAT conceptual framework, the representation of the hydrology of a basin is divided into two major parts: (a) the land phase of the hydrological cycle; and (b) the routing of runoff through the river network. For modelling the land phase, the river basin is divided in sub-basins, each one of which is composed of one or several Hydrological Response Units (HRUs). HRUs are areas of relatively homogeneous land use/land cover and soil types. The characteristics of the HRUs define the hydrological response of a sub-basin. For a given time step, the contributions to the discharge at each sub-basin outlet point is controlled by the HRU water balance calculations (“land phase”). The river network then connects the different sub-basin outlets, and the routing phase determines movement of water through this network towards internal control points, and finally towards the basin outlet (Neitsch *et al.*, 2002<sup>a</sup>).

For the land phase water balance, within SWAT evapotranspiration can be calculated using one of either three methods: Penman–Monteith, Hargreaves or Priestley–Taylor. Penman–Monteith offers a better process description, but has high input data requirements which for practical applications will be hard to fulfill in many parts of the world. Although less physically-based, Hargreaves or Priestley–Taylor have the advantage of less stringent input data needs; under minimal conditions of data availability, Hargreaves can even be used with temperature as the only required measured input time series (Heuvelmans *et al.*, 2005). For surface runoff calculations, SWAT gives the user the option between two alternatives: (a) the use of the Soil Conservation Service Curve Number (SCS CN) procedure, and (b) the Green & Ampt infiltration method. For the latter method, input data at a finer-than-daily time resolution are required, whereas the Curve Number method is lumped over time (Johnson 1998): the SCS CN approach can typically be applied using daily rainfall values. Runoff contributions from snowmelt can be incorporated by means of the use of a temperature index, a method commonly used in water resources management applications (Walter *et al.*, 2005).

Due to this flexibility, SWAT has been used in many parts of the world (USA, Europe, India, New Zealand, etc; Abu El-Nasr *et al.*, 2005; Cao *et al.*, 2006; Gosain *et al.*, 2005; Govender & Everson, 2005; Tripathi *et al.*, 2006). However, at present, almost no case study applications of SWAT in Latin-America have been documented in the international scientific literature.

## **2.6- DATA SOURCES**

### **2.6.1- GIS data layers**

The 90m-resolution topography data from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM DEM, final version) was used as a basis for the modelling process (Fig. 2.1). The GIS layer representing land use/cover in the basin (Fig. 2.3a) was based on an interpretation of aerial photographs (scale 1:70.000/1:115.000 from 1996-1998; CONAMA-CONAF-BIRF 1999), combined with information from the “Chilean Inventory of

Native Vegetation Resources". The methodology used is based on the land occupation map developed by the Center of Phytosociological and ecological studies L. Emberger, Montpellier, Francia (Etienne & Prado 1982, CONAMA-CONAF-BIRF 1999). The GIS layer representing the different soils in the basin (Fig. 2.3b) was obtained from the "Agrological Study of the VIII and IX Region" (CIREN 1999<sup>a</sup>, 1999<sup>b</sup>).

### 2.6.2- Time series

Input data sets available for the study area consisted of 11 years of time series (1992 -2002) of daily precipitation and temperature, observed at 16 and 3 stations, respectively (Fig. 2.2). Additionally, flow data from 4 gaging stations located within the basin were used for calibration and validation purposes. Data sets were obtained from the National Water Databank (*Banco Nacional de Aguas*) of the Chilean General Water Directorate (DGA), as well as from private forestry companies which operate meteorological stations in the zone. In correspondence with the available input data, the SCS CN approach and the Hargreaves method were used for calculating runoff and evapotranspiration, respectively. Station density may be low as compared to densities typically encountered in many parts of the developed world (for some examples of densities, see e.g.: Samaniego & Bárdossy (2005)). However, they are representative of general Chilean conditions (especially the central part), and similar to those of many other parts of Latin-America and the world.

## 2.7- MODEL CONFIGURATION

One of the first steps in model setup consists of the identification of the calculation units (or HRUs) for the water balance. For this purpose, the river network for the Vergara Basin was extracted from the digital elevation data (DEM), using standard analytical techniques contained in the AVSWAT GIS interface (a minimum upstream contributing area of 50 km<sup>2</sup> was used as a threshold value for defining river cells). A total of 51 sub-basins were defined and a total of 272 HRUs (unique land use/soil combinations within sub-basins) were generated.

### 2.7.1- Land Use and Soil Type

Due to the lack of locally established values for the parameters (such as SCS CN, LAI, etc.) that describe the hydrological characteristics of the different land use types in the basin, each locally observed crop or land use type was associated with a "crop/land use type" contained in the SWAT model database. For most cases, locally grown crops were also contained in the SWAT database. For those local crops/land uses that were not represented in this model database, as a first approximation the parameter values corresponding to the most closely related land use types from the database were used. As can be seen in Figure 3a, the most important major types of land uses/cover in the basin are: Forestry Plantations, Native Forest and Agriculture, covering respectively 40%, 23% and 22% of the total basin area.

For each soil series, the hydrological group (Fig. 2.3b) –which is required for the application of the CN method- was derived from the description of soil texture contained in the “Agrological Study of the VIII and IX Region” (CIREN 1999<sup>a</sup>, 1999<sup>b</sup>). This was done in agreement with the recommendations given by the US Department of Agriculture (USDA 1986). Conductivity values were obtained from Lui et al. (2002) cited by Campos (2005), horizon depth from CIREN (1999<sup>a</sup>, 1999<sup>b</sup>) and the available water capacity was estimated using Soil Water Characteristics calculator (Saxton & Willey 2005, Saxton & Rawls 2006).

### **2.7.2- Snow**

In the upper part of the basin, where snowfall may occur during winter, ten elevation bands were considered. Parameterization of the snowmelt module (e.g. mean air temperature at which precipitation is equally likely to be rain or snow, threshold temperature for snow melt, maximum and minimum melt factors) were obtained based on data from the Chilean literature (Peña *et al.*, 1985, Escobar 1992). The precipitation and temperature lapse rate were obtained using the available meteorological data sets.

## **2.8- CALIBRATION AND VALIDATION**

The SWAT model includes a large number of parameters which describe the different hydrological conditions and characteristics across the basin. During a calibration process, model parameters are subject to adjustments, in order to obtain model results that correspond better to discharge rates observed in the field. The range of parameter values used in the calibration process must be physically plausible (Eckhardt *et al.*, 2005), so that the model can be applied afterwards for assessing the impact of e.g. change scenarios and/or management options.

Time series of discharge data from 4 limnigraph stations (“control points”) were used for calibration and validation purposes. One of the stations corresponds to a sub-basin (“Rehue”) which is nested in a bigger sub-basin (“Tijeral”), which is also gaged. Together, the 4 stations cover 80.5% of the total drainage area of the Vergara Basin (Fig. 2.4). For the calibration period, the model was run using rainfall and temperature data from 1998-2002 as input. The first 2 years of the modelling period were reserved for “model warm-up”.

Prior to the calibration exercise, a sensitivity analysis was executed for each control point, in order to determine the 8 parameters to which the model results are most sensitive. At each point, these 8 parameters are then used in the calibration process. A ranking of the “most sensitive” parameters, determined by means of a LH-OAT analysis (*Latin Hypercube Sampling- One at A Time; incorporated in the latest model version, SWAT2005*) (Van Griensven *et al.*, 2006) is given in Table 2.



An automated calibration procedure implemented in SWAT2003 called “PARASOL” (*Parameter Solution Method*; van Griensven & Bauwens 2003) was applied separately to each one of the 4 sub-basins. This procedure used the Shuffle complex evolution algorithm as optimization method, which is a global search algorithm for the minimization of a single function for up to 16 parameters (Duan *et al.*, 1992). It combines the direct search method of the simplex procedure with the concept of a controlled random search, a systematic evolution of points in the direction of global improvement, competitive evolution and the concept of complex shuffling (van Griensven & Bauwens 2003). To obtain the optimum solution the Sum of the Squares of the Residuals (SSQ) was used; this is similar to the Mean Square Error method (MSE), as it aims to match a simulated series to a measured time series. The parameters and variation range considered in the autocalibration are given in Table 2.2. The upper and lower bound of: GWQMN, GW\_REVAP, ESCO, GW\_delay, canmx and Sol\_z were selected considering the default values cited by (Van Liew *et al.*, 2005) and the range of SLOPE, rchrg\_dp, sol\_K, CN2 and SOL\_AWC were selected on the basis of the results of previous SWAT calibration studies (eg.: Eckhardt *et al.*, 2005; Van Liew *et al.*, 2005; Sirinivasan 2005 personal communication). Additionally, the Surface Lag Time (SURLAG) for flow routing was also included in the calibration process, in this case the variation range (0.5 - 10) was chosen considering recommendations done by Van Liew *et al.* (2005). In the case of the nested sub-basins Rehue and Tijeral, calibration was done first for the “internal” basin.

Even though the SWAT performs the simulation at a daily level, and considering the final objective of the project were model development is part of, model calibration was evaluated at the level of monthly output data. The statistical indicators used for evaluating model performance are: Relative Root Mean Squared Error (RRMSE); Mean Absolute Error (ABSERR); the Nash-Sutcliffe Modelling Efficiency Index (EF); the goodness-of-fit ( $R^2$ ) and the % of deviation from observed stream flow (PBIAS). Table 2.3 gives the equations used for calculating these indicators, whereas Table 2.4 gives the value obtained for each one of these indicators during the calibration period. The closer the values of RRMSE and ABSERR to zero, and those of  $R^2$  and EF to unity, the better the model performance is evaluated (Abu El-Nasr *et al.*, 2005). For PBIAS, the optimal value is 0; a negative value indicates an overestimation of observed discharge values, whereas a positive value indicates underestimation. Van Liew *et al.* (2005) specify the following criteria for interpreting model performance:

- (a) An absolute value for PBIAS of less than 20% is considered “good”, values between  $\pm 20\%$  and  $\pm 40\%$  are considered “satisfactory”, and those greater than  $\pm 40\%$  are considered “not satisfactory”;
- (b) An EF index value greater than 0.75 is considered “good”, values between 0.75 and 0.36 are considered “satisfactory” and values below 0.36 are considered “not satisfactory”.

From the results shown in Table 2.4, it can be seen that best model performance is obtained for the sub-basin that closes at Tijeral (i.e. the biggest of the studied sub-basins). Poorest results are obtained for Renaico, which has a relatively bigger proportion of its surface area within the Andes, and for which the representativity of available weather stations may be bad. Overall performance for Rehue (a sub-basin of Tijeral) is poorer than for Tijeral as a whole, but water yield for Rehue is proportionally much lower than for the remaining part of the Tijeral basin, so pre-calibration of the Rehue model has a relatively low impact on calibration & model performance at Tijeral. In general the performance over the 3-year calibration period ranges from “very good” to “satisfactory” according to the criteria mentioned above.

## Validation

For model validation, a time series of discharge data from the 1992-1999 period was used. Again, the first 2 years from this period were discarded for the evaluation of model performance, as they were considered to correspond to “model warm-up”. The evaluation was thus based on output generated for the years 1994-1999. Table 2.4 gives the values of the different statistical indicators. It can be seen that for the Renaico sub-basin (and to a lesser extend for Mininco), model performance during validation is substantially better than during the calibration period. A possible explanation can be found in the extreme discharge rates observed during the calibration period (Fig. 2.5); such extreme discharges are typically (still) not well represented by the model.

## 2.9- DISCUSSION OF RESULTS

The accuracy of model results was evaluated at the 4 control points for which time series of observed discharge data were available. Evaluation was done by means of different statistical indicators and by a visual interpretation of observed versus modeled (calibration and validation) discharge time series (Fig. 2.5). Best model performance (Table 2.4) was obtained for the Tijeral sub-basin, where the Nash-Sutcliffe index (EF) calculated from monthly runoff values was 0.93 for both the calibration and validation period. The EF index for other sub-basins ranged from “good” to “satisfactory” for the calibration period; based on this same index the model performs “good” for all sub-basins during validation. For the indicator PBIAS, Tijeral and Mininco present a good performance, whereas Rehue and Renaico can be considered satisfactory. However, over the long term as well as for the peak flows the model typically underestimates the runoff. One possible explanation for this may be found in an inadequate description of the rainfall input field, caused by the limited number of available meteorological stations, as well as by their poor representation in areas of higher altitudes (orographic effects). It is relevant to remember in this context that climate information represents the main forcing data for a hydrological model (Hattermann *et al.*, 2005). Even when the importance of spatial variability of rainfall in simulating runoff was recognized already more than three decades ago (Osborn and

Keppel, 1966; Rodda, 1967; Dawdy and Bergman, 1969), the assumption of uniform rainfall over relatively large surface areas remains a common practice in many hydrological modeling applications (Chaubey *et al.*, 1999). In this context, discrete improvements in model performance may still be expected from the testing of alternative interpolation techniques, rather than by using the 'nearest neighbor' assignment (~Thiessen Polygons) which is the standard method in AVSWAT. For this reason, future research on the Vergara Basin will include an evaluation of the effects of better descriptions of the spatially variable rainfall input fields, using methods such as: Inverse Distance Weighting, Kriging, Co-Kriging, Radial Basis Functions, etc. (Daly *et al.*, 1994; Goovaerts, 2000; Hattermann *et al.*, 2005; Hevesi *et al.*, 1992; Hutchinson, 1998, 2000; Martínez-Cob, 1995).

For the Tijeral sub-basin, which represents 54% of the study area, the total volumetric error over the calibration and validation period was approx. 12% and +3%, respectively. The volumetric error for the other sub-basins ranged from +8 to +32% (calibration set) and from +8 to +33% (validation set).

Model performance was further analyzed separately for the period of low flows (November to April) and high flows (May to October). Table 2.5 shows the Nash-Sutcliffe EF and PBIAS calculated from pooled monthly output data for the dry and rainy season respectively, for the three stations for which the long validation time series were available. According to EF, in all the sub-basins the model performed better during the high flows period than during the low flows period. Results for the low flow period in the Renaico sub-basin were not satisfactory according to this parameter. PBIAS was good for both periods in Tijeral and Renaico, but was not satisfactory for the low flow period in Mininco. In this context, it can be noted that of the three stations included in the analysis, Mininco also has the lowest mean monthly discharge values for the low flow period.

The sensitivity analysis showed a high sensitivity of model results to the SCS CN2 parameter (Table 2.2). National or regional databases relating Curve Number to local land use/cover and/or soil types are currently not available for Chile. Development of such a database based on (i) local empirical data combined with (ii) the results from modelling applications may improve both model performance as well as its usefulness for practical management purposes. It may be worthwhile to further analyze the spatial and temporal variability of CN2 as well as the pre-specified ranges used in the calibration process. Substantial additional research at the national level will be required in this area. In the currently used version of the AVSWAT model, the standard option included for describing the spatial variability of rainfall fields (assignment of nearest station rainfall value to each sub-basin) is rather simplistic. Improvements in this area by means of the testing of different interpolation techniques (e.g., Hattermann *et al.*, 2005) may further contribute to better model performance, especially where orographic effects are important. Potential

improvements however will depend at least partially on the local availability of weather station data (especially critical at higher altitudes) and on the length and quality of the available time series.

## **2.10- CONCLUSIONS**

Under local conditions of data availability, the performed SWAT model application for the Vergara Basin confirms that SWAT is a useful tool that can already be used to make preliminary assessments of the potential impact of land use and climate changes on the hydrology of this basin. These assessments will consequently be based on the best currently available knowledge for the study area. However, further improvements in model performance should be sought. Meanwhile, when using outcome from the model, the limitations inherent to the used modelling approach should be taken into consideration.

The present work should be considered as a first step in the development of a bigger model application involving the entire Biobio basin. However, current conditions of data availability do not yet allow such an application. Current results can already be used to establish priorities for obtaining additional field data sets, which on the long term should allow such an application.

Future research on the Vergara model itself should address the aspects of spatial variability of rainfall fields, inter- and intra-annual variability of CNs and the development of a regional/national database relating CN to local land use/cover types.

## **2.11- ACKNOWLEDGMENTS**

The present research was conducted in the framework of the TWINBAS project, which was co-financed by the European Community through its Sixth Framework Programme for Research and Technological Development (Priority Area “Global Change and Ecosystems”; Contract N° 505287). The authors wish to express their sincere gratitude to the Chilean General Water Directorate DGA, and in particular to the staff of the Biobío Division; the Chilean Meteorological Directorate (DMC); the Chilean National Environmental Commission CONAMA (Bío Bío Division), the “Mininco” and “Bosques Arauco” Forestry Companies, as well as to all other data providers not explicitly mentioned above. We also wish to thank the 2 anonymous reviewers for their valuable contributions to the further improvement of the manuscript.

## 2.12- REFERENCES

- Abu El-Nasr, A., Arnold, J.G., Feyen, J. & Berlamont, J. (2005) Modelling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi-distributed model. *Hydrol. Processes* **19**: 573-587.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S. & Williams, J.R. (1998) Large area hydrologic modeling and assessment - Part I: model development. *JAWRA* **34**(1): 73-89.
- Campos, A. (2005) Modelo Hidrológico integrado a un sistema de información geográfico para una cuenca agroforestal de la VIIIª Región. Thesis, Universidad de Concepción, Concepción, Chile.
- Cao, W., Bowden, W. B., Davie, T. & Fenemor, A. (2006) Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrol. Processes* **20**: 1057-1073.
- Chaubey, I., Haan, C. T., Salisbury, J. M. & Grunwald, S. (1999) Quantifying model output uncertainty due to the spatial variability of rainfall. *JAWRA* **35**(5):1113-1123.
- CIREN (1999<sup>a</sup>) Estudio Agrológico, VIII Región, Tomos I y II., Centro de Información de Recursos Naturales, Chile. *Estudio Agrológico, VIII Región, Tomos I y II., Centro de Información de Recursos Naturales, Chile.*
- CIREN (1999<sup>b</sup>) Estudio Agrológico, IX Región. Centro de Información de Recursos Naturales, Chile. *Estudio Agrológico, IX Región. Centro de Información de Recursos Naturales, Chile.*
- Corporación Nacional Forestal - Comisión Nacional del Medio Ambiente - Banco Interamericano de Reconstrucción y Fomento (CONAMA-CONAF-BIRF) (1999). Catastro y evaluación de los recursos vegetacionales nativos de Chile. Informe Regional: Octava Región. CONAF-CONAMA, Santiago, Chile
- Daly, C., Neilson, R.P. & Phillips, D.L. (1994) A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *J. Appl. Meteor.* **33**:140-158.
- Dawdy, D.R. & Bergman, J. M. (1969). Effect of Rainfall Variability on Streamflow Simulation. *Water Resour. Res.* **5**:958-966.
- Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J. C. & Neitsch, S. L. (2002). ArcView Interface for SWAT2000. User's guide. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Duan, Q., Gupta, H.V. & Sorooshian, S. (1992) Effective and efficient global minimalization for conceptual rainfall -runoff models. *Water Resour. Res.* **28**: 1015-1031.
- Eckhardt, K., Fohrer, N. & Frede, H.G. (2005) Automatic model calibration. *Hydrol. Processes* **19**: 651-658.
- Eckhardt, K. & Ulbrich, U. (2003) Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *J. Hydrol.* **281**: 244-252.
- Environmental Systems Research Institute Inc. (ESRI). (1999). Arc View Gis 3.2.

- Escobar, F. (1992) Aplicacion del modelo "SRM3-11" (Snowmelt runoff model) en cuencas de los Andes centrales. Segundas Jornadas de Hidráulica Francisco Javier Domínguez, Santiago, Chile.
- Etienne, M. & Prado, C. (1982). Descripción de la Vegetación mediante cartografía de ocupacion de tierras. Ciencias Agrícolas N°10, Universidad de Chile, Facultad de Cs. Agrarias y Forestales. UNESCO-MAB.
- Gosain, A.K., Rao, S., Srinivasan, R. & Reddy, N.G. (2005) Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model. *Hydrol. Processes* **19**: 673-682.
- Goovaerts, P. (2000) Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *J. Hydrol.* **228**:113-129.
- Govender, M. & Everson, C.S. (2005) Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model. *Hydrol. Processes* **19**: 683-692.
- Hattermann, F., Krysanova, V., Wechsung, F. & Wattenbach, M. (2005) Runoff simulations on the macroscale with the ecohydrological model SWIM in the Elbe catchment - validation and uncertainty analysis. *Hydrol. Processes*, **19**: 693-714.
- Harrison, G.P. & Whittington, H.W. (2002) Vulnerability of Hydropower Projects to Climate Change. *IEE P-Gener Transm D* **149**(3): 249-255.
- Haverkamp, S., Fohrer, N. & Frede, H.G. (2005) Assessment of the effect of land use patterns on hydrologic landscape functions: a comprehensive GIS-based tool to minimize model uncertainty resulting from spatial aggregation. *Hydrol. Processes* **19**: 715-727.
- HEC (2000) Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual, Version 2, Hydrologic Engineering Center; U. S. Army Corps of Engineers: Davis, CA.
- Heuvelmans, G., Garcia-Qujano, J.F., Muys, B., Feyen, J. & Coppin, P. (2005) Modelling the water balance with SWAT as part of the land use impact evaluation in a life cycle study of CO2 emission reduction scenarios. *Hydrol. Processes* **19**: 729-748.
- Hevesi, J.A., Istok, J.D. and Flint, A.L. (1992). Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate statistics. Part I: Structural analysis. *J. Appl. Meteor.* **31**:661-676.
- Hutchinson, M.F. (1998) Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines: II analysis of topographic dependence. *GIDA* **2**(2): 168-185.
- Hutchinson, M.F. (2000) ANUSPLIN Version 4.1. User Guide. . Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia.
- Johnson, R.R. (1998) An investigation of curve number applicability to watersheds in excess of 25000 hectares (250 km<sup>2</sup>). *J. Environ. Hydrol.* **6** (Paper 7): 10.
- Lui, Y., Gembremeskel, S., De Smedt, F. & Pfister, L. (2002) Flood prediction with Wetspa model on catchment scale. Flood Defense 2002, Science Press New York Ltd.
- Martínez-Cob, A. (1995). Multivariate geostatistical analysis of evapotranspiration and precipitation in mountainous terrain. *J. Hydrol.* **174**:19-35.



- Mishra, S.K. & Singh, V.P. (2004) Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number. *Hydrol. Processes* **18**: 1291-1313.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.C., Kiniry, J.R., Williams, J.R. & King, K.W. (2002<sup>a</sup>). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.C., Kiniry, J.R., Williams, J.R. & King, K.W. (2002<sup>b</sup>) Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Osborn, H.B. & Keppel, R.V. (1966) Dense rain gauge network as a supplement to regional networks in semiarid regions. In: Symp. on the design of hydrologic networks, Quebec, Canada. IASH Publication No. 68, University of Gent, Gentbrugge, pp. 675-687.
- Peña, H., Vidal, F. & Escobar, F. (1985). Estimación de tasas de derretimiento de nieve. VII Congreso Nacional, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Concepción, Chile.
- Rodda, J. C. (1967) The systematic errors in rainfall measurement. *J. Inst. Water Eng.* **21**:173-177.
- Samaniego, L. & Bárdossy, A. (2005) Robust parametric models of runoff characteristics at the mesoscale. *J. Hydrol.* **303**: 136-151.
- Saxton, K. E. & Rawls, W. J. (2006) Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci Soc Am J* **70**: 1569-1578.
- Saxton, K. E. & Willey, P. H. (2005). The SPAW Model for Agricultural Field and Pond Hydrologic Simulation. Chapter 17 in: Mathematical Modeling of Watershed Hydrology, V. P. Singh and D. Frevert, (Ed.); CRC Press LLC. (In press).
- Simonovic, S. P. (2002) World water dynamics: global modeling of water resources. *J. Environ. Manage.* **66**: 249-267.
- Tripathi, M.P., Raghuwanshi, N.S. & Rao, G.P. (2006) Effect of watershed subdivision on simulation of waterbalance components. *Hydrol. Processes* **20**: 1137–1156.
- USDA (1986). Urban Hydrology for small Watersheds, TR 55.
- van Griensven, A. & Bauwens, W. (2003) Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models. *Water Resour. Res.* **39**(12): 1348.
- van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T. & Sirinivasan, R. (2006) A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *J. Hydrol.* **324**: 10-23.
- Van Liew, M.W., Arnold, J.G. & Bosch, D.D. (2005) Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model. *Trans. Am. Soc. Agric.* **48**(3): 1025-1040.
- Walter, M.T., Brooks, E.S., McCool, D.K., King, L.G., Molnau, M. & Boll, J. (2005) Process-based snowmelt modeling: does it require more input data than temperature-index modeling? *J. Hydrol.* **300**: 65-75.



**Table 2.1** Mean monthly discharges (m<sup>3</sup>/s) at the different control points in the Vergara basin.

	<b>Tijeral</b>	<b>Rehue</b>	<b>Mininco</b>	<b>Renaico</b>
<b>Maximum</b>	153.70 (July)	16.79 (July)	43.57 (July)	90.17 (June)
<b>Minimum</b>	7.52 (February)	0.28 (February)	2.16 (February)	6.71 (March)
<b>Mean</b>	56.32	5.85	16.21	42.66

**Table 2.2** Ranking of the 8 most sensitive parameters per sub-basin (1= most sensitive) and theirs variation range for autocalibration.

<b>PARAMETER</b>	<b>DESCRIPTION</b>	<b>P 1</b>	<b>P 2</b>	<b>P 3</b>	<b>P 4</b>	<b>Range</b>
<b>GWQMN</b>	Threshold water depth in the shallow aquifer for flow	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	0 -5000 mm
<b>GW_REVAP</b>	Groundwater revap coefficient		<b>4</b>		<b>8</b>	0.02 – 0.20
<b>ESCO</b>	Soil evaporation compensation factor	<b>7</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	0 -1
<b>SLOPE</b>	Average slope steepness	<b>8</b>			<b>5</b>	-5% – 5 %
<b>CN2</b>	Initial SCS CN II value	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	-15% - 15%
<b>SOL_AWC</b>	Available water capacity	<b>3</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	-10% – 10 %
<b>GW_DELAY</b>	Groundwater delay		<b>8</b>			0 -50 days
<b>rchrq_dp</b>	Deep aquifer percolation fraction	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	0.5 - 1
<b>canmx</b>	Maximum canopy storage	<b>6</b>		<b>5</b>		0 – 10 mm
<b>sol_k</b>	Saturated hydraulic conductivity	<b>5</b>		<b>8</b>	<b>6</b>	-10% – 10 %
<b>sol_z</b>	Soil depth		<b>7</b>	<b>7</b>		-25% – 25%

P1: Tijeral; P2: Minico; P3: Renaico; P4: Rehue

**Table 2.3** Statistical indicators use to evaluate model performance.

Name	Formula	Name	Formula
Relative Root Mean Square Error	$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \cdot \frac{1}{\bar{O}}$	Goodness of fit	$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2$
Mean Absolute Error	$ABSERR = \frac{\sum_{i=1}^n  O_i - S_i }{n}$	PBIAS	$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \cdot 100$
Nash-Sutcliffe Modelling Efficiency	$EF = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$	$O_i$ : Observed streamflow in m <sup>3</sup> /s $S_i$ : Simulated streamflow in m <sup>3</sup> /s $\bar{O}$ : Mean observed streamflow during evaluation period in m <sup>3</sup> /s	

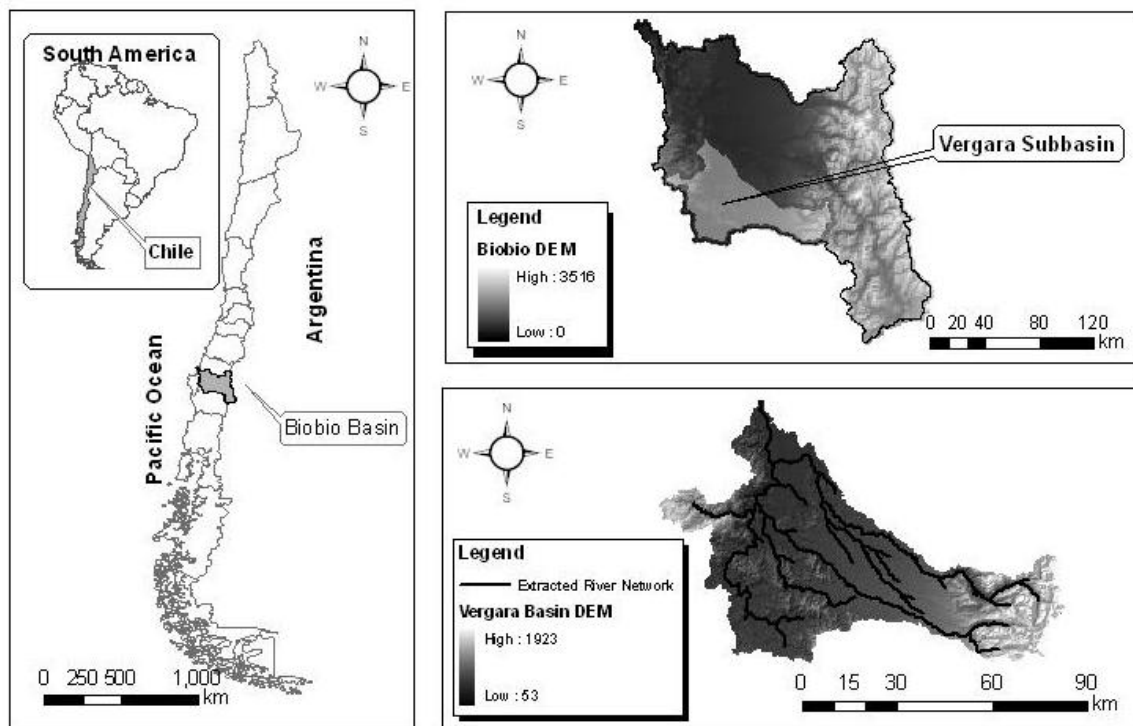
**Table 2.4** Statistical indicators of model performance (monthly output) calculated at the different control points within the Vergara Basin: model calibration / model validation

Index	Tijeral	Rehue	Mininco	Renaico
RRMSE	0.30 / 0.31	0.51 / 0.63*	0.50 / 0.33	0.82 / 0.42
ABSERR	11.64 / 8.24	1.99 / 2.15*	6.31 / 2.98	24.16 / 9.12
<b>EF</b>	<b>0.93 / 0.93</b>	<b>0.82 / 0.75*</b>	<b>0.72 / 0.92</b>	<b>0.54 / 0.82</b>
R <sup>2</sup>	0.96 / 0.93	0.88 / 0.80*	0.76 / 0.94	0.71 / 0.83
PBIAS	11.78 / 2.77	21.35 / 32.75*	8.32 / 9.13	32.04 / 7.88

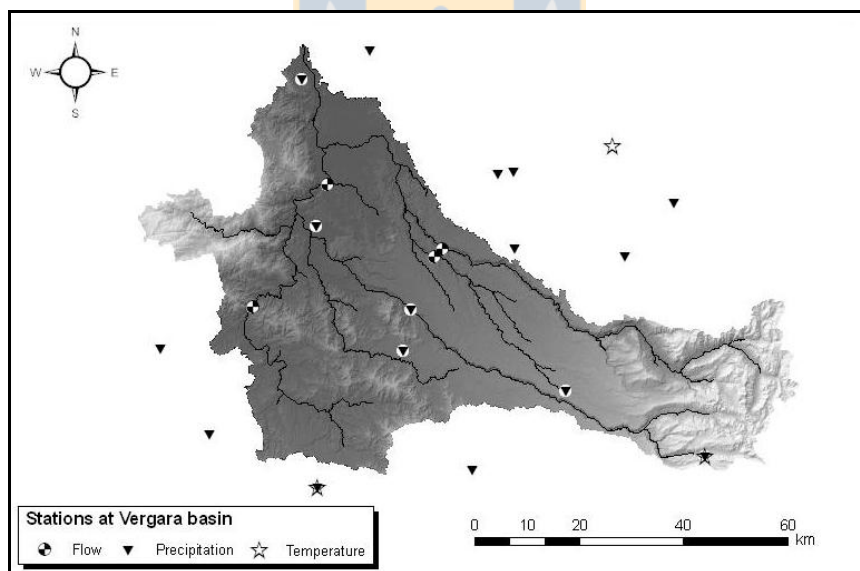
\* Results based on data from the period July 1997 to December 1999 only

**Table 2.5** Statistical index for the validation period, separately evaluated for the low flow (November – April) and high flow (May – October) period

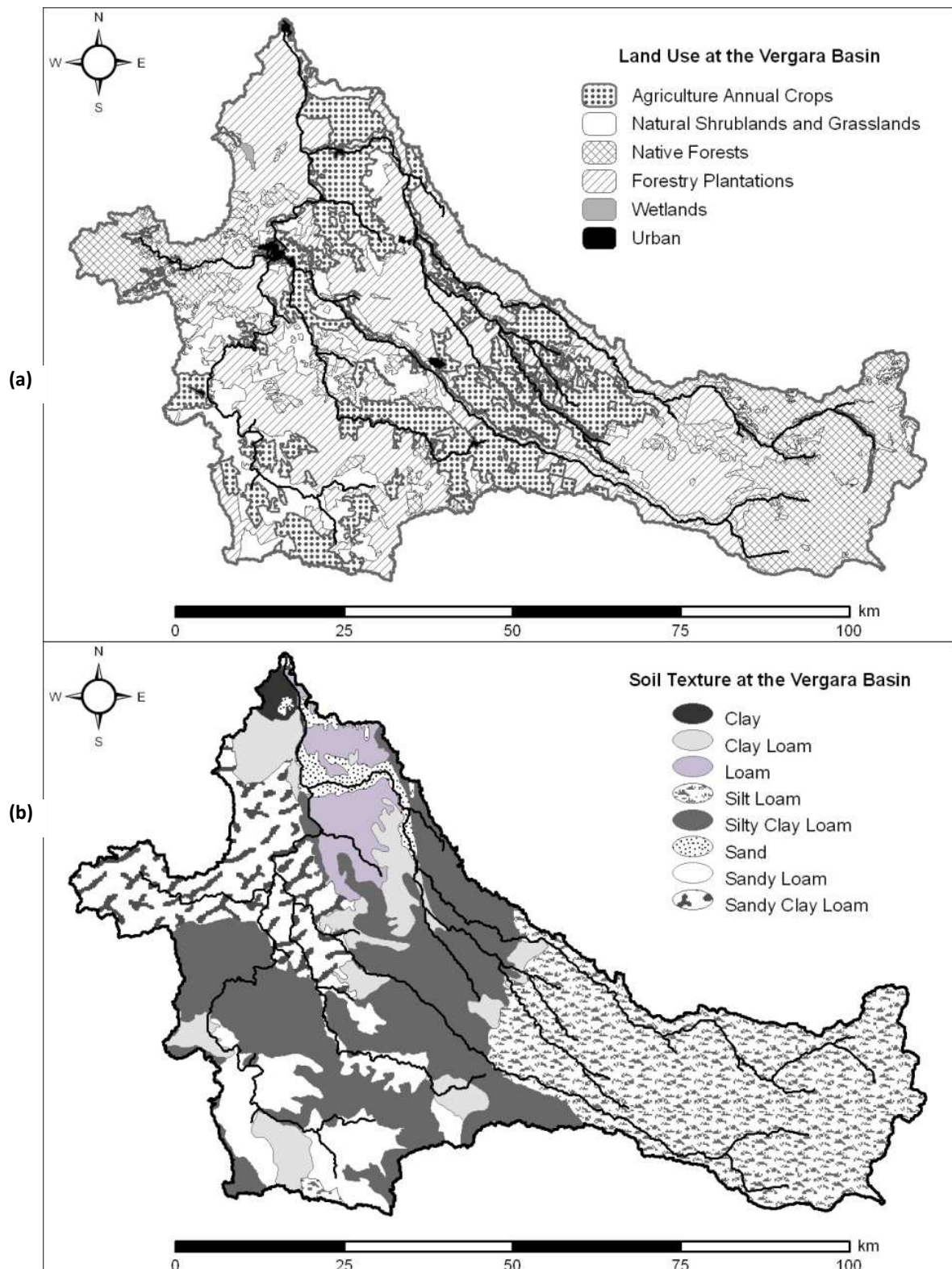
Basin	EF		PBIAS	
	Low	High	Low	High
<b>Tijeral</b>	0.69	0.89	-3.14	3.62
<b>Mininco</b>	0.63	0.89	47.72	1.96
<b>Renaico</b>	0.24	0.71	5.21	8.47



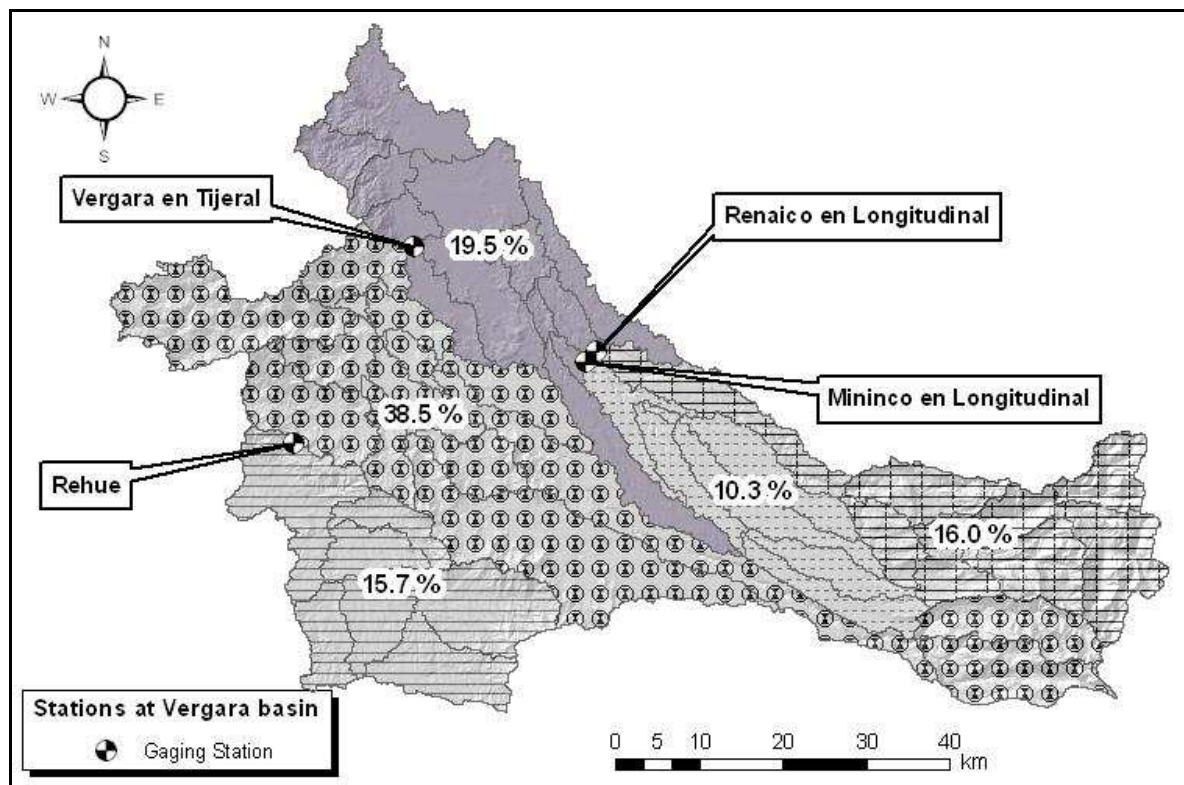
**Fig. 2.1** Location of the Vergara basin



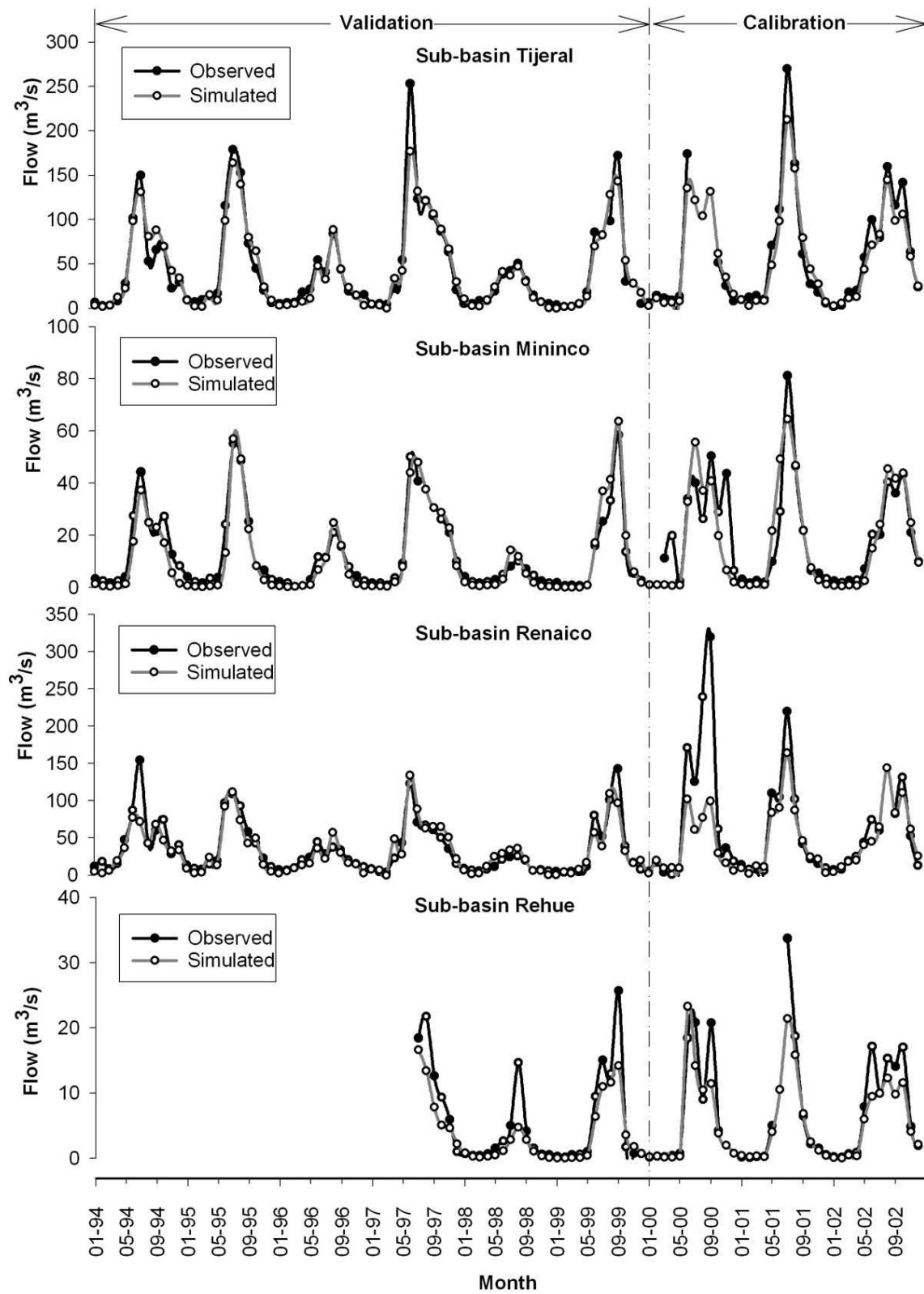
**Fig. 2.2** Meteorological and gaging stations used for modelling. The figure also shows the river network extracted by means of the SWAT GIS interface



**Fig. 2.3** (a) Land use/cover and (b) soil types for the Vergara



**Fig. 2.4** Location of the 4 gaging stations used for calibration and validation stations and percentage of the total basin area cover by each one of them (Rehue and Tijeral are nested).



**Fig. 2.5** Calibration and validation model results (monthly output) at the different control points



## **CAPITULO 3: Combining discharge data and MODIS imagery for evaluating the performance of SWAT and its snowmelt routine in a small Andean basin, Chile<sup>3</sup>**

---

**ALEJANDRA STEHR<sup>1</sup>, PATRICK DEBELS<sup>1,2</sup>, JOSE LUIS ARUMI<sup>3</sup>, FRANCISCO ROMERO<sup>1</sup> & HERNAN ALCAYAGA<sup>1</sup>**

1 Centre for Environmental Sciences EULA-CHILE, University of Concepción, PO Box 160-C, Concepción, Chile

[astehr@udec.cl](mailto:astehr@udec.cl)

2 Centre for Environmental Studies CIEMA-UNI, National Engineering University, PO Box 5595, Managua, Nicaragua

3 Department of Water Resources, Facultad de Ingeniería Agrícola, University of Concepción, Avenida Vicente Méndez 595, Chillán, Chile.

### **3.1- Abstract**

The present paper focuses on the application of the SWAT model for the Lonquimay river basin (Central-Chilean Andes), a small sub-basin of the Biobío in which snow accumulation and snowmelt dynamics play an important role. Under the absence of local measurements of snow coverage, remotely sensed snow cover information (MODIS) was combined with discharge time series in order to validate the model representation of stream hydrology and spatial snow cover extent. Obtained results showed a satisfactory to good general model performance in terms of representation of long term or annual mean discharge at the basin outlet, as well as a reasonably good description of snow cover extent under most circumstances. The case study further also provides an example quantitative indication of how good a model may perform under limited availability of input meteorological data sets. In the current work, the MODIS snow products have been used for validation purposes only. The future inclusion of MODIS information directly into the model calibration process itself is suggested, as a means to further improve the obtained results.

### **Key words**

Snow; hydrological modelling; SWAT; MODIS snow product; Chile; Biobío

---

<sup>3</sup> Stehr, A., Debels, P., Arumi, J.L., Romero, F. & Alcayaga, H. (enviado). Combining discharge data and MODIS imagery for evaluating the performance of SWAT and its snowmelt routine in a small Andean basin, Chile. Hydrological Sciences Journal.



## **L'usage des dates de décharge en combinaison avec des images MODIS pour l'évaluation de la performance du modèle SWAT y de sa routine de neige pour un petit bassin versant des Andes, Chili**

### **3.2- Résumé**

Le présent manuscrit décrit l'application du modèle SWAT pour le bassin versant du Lonquimay (Andes du Chili Central), un petit bassin appartenant au bassin du Biobío, y dans lequel la dynamique des neiges joue un rôle important. Sous l'absence de mesures locales de la couverture de neige, la couverture neigeuse détecté au moyen des images MODIS a été combinée avec les séries de décharges afin de valider le modèle hydrologique y sa représentation de la couverture neigeuse. Les résultats obtenus ont montré une performance du modèle qui varie de bonne a satisfaisante en ce qui concerne la représentation à long terme ou annuelle du décharge à la sortie du bassin, ainsi qu'une bonne description de la couverture espaciale neigeuse dans la plupart des cas. L'étude de cas du Lonquimay en outre donne une bonne indication quantitative de la performance du modèle sous des conditions de disponibilité limitée des ensembles de données d'entrée météorologiques. Dans le travail présenté, les images MODIS ont été utilisés aux fins de validation seulement. Des futurs efforts pourraient être dirigés vers l'inclusion de l'information dérivé du MODIS directement dans le processus de calibration, comme un moyen d'améliorer les résultats obtenus.

### **Mots clefs**

Neige; modélisation hydrologique; SWAT; produit neige de MODIS; Chili; Biobío

### 3.3- INTRODUCTION

The United Nations report regarding World Water Resources Development (WWAP, 2003) mentions that the Earth, at the beginning of the XXI century, is facing a serious water crisis. All signals seem to indicate that this crisis is getting worse and that it will continue doing so, unless remedial action is taken. Such remedial action may consist of -, amongst others- an improved integrated management of water resources at the level of the river basin. Such an improvement of management actions, however, poses an important challenge to the scientific community, since it will be necessary to provide decisions makers with validated tools that count with sufficient scientific and technical support.

Rapid economic growth and increasing pressures on natural resources have led the Chilean authorities to set Integrated Basin Management as a priority on the short-term environmental agenda. Within such a context, decision makers should be provided with sound scientific and technical support (Refsgaard, 2007), since water resources management should be aimed at ensuring efficient water supply for human use, at the same time that key aquatic ecosystem functions are preserved. In this regard, an improved understanding of regional or local rainfall–runoff processes at both medium and longer time scales, as well as of their impacts on the basins water balance, is urgently needed. The development and application of hydrological models can play an important role (Yang *et al.*, 2005) in providing this improved understanding.

In mountainous basins with temperate or mediterranean climate, large volumes of snow can be stored at higher elevations, and subsequently be released during spring and summer snowmelt events (Verbunt *et al.*, 2003). This natural process is critical to sustain agricultural activities, hydropower, urban water supplies and wildlife habitat. Adequate modeling and simulation of snow accumulation and melting generates essential knowledge for improved decision-making, and has thus been attracting increasing attention in recent years (Skaugen *et al.*, 2003; Garen & Marks, 2005; López-Moreno & Nogués-Bravo, 2005). However, in the case of the Chilean Andes (and many other places around the world) there is a lack of both meteorological input and hydrological validation data which complicates the analysis of those hydrological processes that take place in this important part of many of the country's river basins.

Results reported in this paper are based on research conducted under an EC FP6 project covering a wide array of research activities on Integrated Water Resources Management. In a prior effort, the Vergara Basin, a sub-basin (located in Chile's fertile Central Valley) of the strategically important Biobío Basin was selected for a first modeling application, in which snowmelt contributions played a very limited role (Stehr *et al.*, accepted). The present work aims to extend this first effort, through the construction of a model application for the Lonquimay sub-basin of Biobío, which is located in the Andes Mountain Range, and where

snow accumulation and melt are important components of the hydrological cycle. For this purpose, the existing SWAT model (*Soil & Water Assessment Tool*; Arnold *et al.*, 1998, Neitsch *et al.*, 2002<sup>a</sup>, 2002<sup>b</sup>) was used. Observed discharge series were used for calibration, and combined with remote sensing snow cover products (MODIS) for the purpose of model validation. The use of MODIS imagery can provide a reasonable estimate of snow cover extent, especially in those areas where little ground-observed snow cover information is available (Ghanbarpour *et al.*, 2007). Results presented in this work are expected to be of interest to other potential users from other parts of the world presenting similar conditions of basin characteristics and limited data availability.

### 3.4- THE SWAT MODEL

The “Soil and Water Assessment Tool” (SWAT) is a physically based and spatially distributed hydrological and water quality model designed to calculate and route runoff, sediments and contaminants from individual drainage units (sub-basins) throughout a river basin towards its outlet. Development of SWAT started in the 1990s at the United States Department of Agriculture (USDA) (Arnold *et al.*, 1998; Di Luzio *et al.*, 2002). Due to its flexibility, SWAT has been used in many parts of the world (USA, Europe, India, New Zealand, etc; (Abu El-Nasr *et al.*, 2005; Gosain *et al.*, 2005; Govender & Everson, 2005; Cao *et al.*, 2006; Tripathi *et al.*, 2006)). A detailed description of the SWAT model can be found in Neitsch *et al.* (2002<sup>a</sup>). In what follows, a short overview is given of the most relevant aspects related to the SWAT snow module, as this has been the main focus of attention in the presented work. In the model, runoff contributions from snowmelt are accounted for by means of the use of the temperature index method (Fontaine *et al.*, 2002), a commonly used method in water resources management applications (Walter *et al.*, 2005).

#### 3.4.1- SWAT snowmelt hydrology

In SWAT, processes related to snowmelt hydrology are basically represented at the sub-basin level (Fontaine *et al.*, 2002). Each sub-basin generated in SWAT can be divided into 10 elevation bands, in order to incorporate temperature and precipitation variations with respect to altitude (Hartman *et al.*, 1999). For each sub-basin, a different precipitation and temperature lapse rate *plaps* (mm H<sub>2</sub>O/km) and *tlaps* (°C/km), respectively, can be defined, which is then used to account for the differences in precipitation and temperature (equation 3.1) between these elevation bands:

$$P_B = P + (Z_B - Z) \frac{plaps}{days_{pcp, yr} * 1000} \quad \text{and} \quad T_B = T + (Z_B - Z) \frac{tlaps}{1000} \quad (3.1)$$

where  $P$  (mm H<sub>2</sub>O),  $T$  (°C) and  $Z$  (m) are the sub-basin precipitation, temperature and recording gage elevation, respectively;  $P_B$ ,  $T_B$  and  $Z_B$  are the adjusted precipitation, temperature and mean elevation for each elevation band  $B$ . The variable  $days_{pcp, yr}$  represents the mean annual number of days with precipitation.

Snowpack is represented in SWAT by means of the variable *snow water equivalent SWE* ((mm H<sub>2</sub>O); equation 2)). It increases with snowfall  $SF$  (mm H<sub>2</sub>O) (snowfall occurs if the mean daily temperature is below the critical temperature  $SFTMP$  (°C)), and decreases with snowmelt  $SM$  (mm H<sub>2</sub>O) or sublimation  $E_s$  (mm H<sub>2</sub>O).

$$SWE_{day} = SWE_{(day-1)} + SF - SM - E_s \quad (3.2)$$

Snowmelt is controlled by the air and snowpack temperature, the melting rate and the areal coverage of snow. The  $SM$  release will be zero until snowpack temperature exceeds a threshold temperature  $TMLT$  (°C). The snowpack temperature (equation 3.3) is a function of the mean daily temperature during the preceding days and varies as a dampened function of air temperature (Anderson, 1976). The influence of the previous day's snowpack temperature on the current day's snowpack temperature is controlled by a lagging factor  $TIMP$  which intrinsically accounts for snow pack density, snow pack depth, exposure and other factors known to affect snow pack temperature.

$$T_{snowpack(day)} = T_{snowpack(day-1)} * (1 - TIMP) + T_{av} * TIMP \quad (3.3)$$

where  $T_{snowpack(day)}$  and  $T_{snowpack(day-1)}$  are the snowpack temperature (°C) on a given day and on the day preceding it, respectively, and  $T_{av}$  (°C) is the mean air temperature for that same given day. An areal depletion curve (equation 3.4) based on a natural logarithm is used in SWAT to describe the seasonal growth and recession of the snowpack (Anderson, 1976). This curve requires a threshold depth of snow  $SNO_{100}$  to be defined; areas with a snow depth above this threshold value will have a permanent snow cover. The threshold depth for permanent snow cover will depend on a series of factors, such as: vegetation distribution, wind loading of snow, wind scouring of snow, interception and aspect. The value will be unique to the watershed of interest.

$$sno_{cov} = \frac{SNO}{SNO_{100}} \left( \frac{SNO}{SNO_{100}} + \exp \left( cov_1 - cov_2 \frac{SNO}{SNO_{100}} \right) \right)^{-1} \quad (3.4)$$

where  $sno_{cov}$  is the fraction of area covered by snow,  $SNO$  is the water content of the snow pack on a given day (mm H<sub>2</sub>O),  $SNO_{100}$  is the threshold depth of snow at 100% coverage (mm H<sub>2</sub>O),  $cov_1$  and  $cov_2$  are coefficients that define the shape of the curve. The values used for  $cov_1$  and  $cov_2$  are determined by solving equation 3.4 using two known points: 95% coverage at 95%  $SNO_{100}$  and 50% coverage at a user specified fraction of  $SNO_{100}$ .

Snow depth over an elevation band is assumed to be constant when the  $SWE$  exceeds  $SNO_{100}$ ; i.e. the areal depletion curve affects snow melt only when the snow pack water content is between zero and  $SNO_{100}$ . Snowmelt is calculated as a linear function of the difference between the average snow pack maximum air temperature  $T_{snowpack}$  and the base or threshold temperature for snowmelt:

$$SM = b_{mlt} * sno_{cov} \left[ \frac{T_{snowpack} + T_{mx}}{2} - TMLT \right] \quad (3.5)$$

where  $T_{mx}$  is maximum air temperature on a given day and  $b_{mlt}$  (mm H<sub>2</sub>O/day-°C), (equation 3.6) is the melt factor for that day.

$$b_{mlt} = \frac{SMFMN + SMFMX}{2} + \frac{SMFMN - SMFMX}{2} \sin\left(\frac{2\pi}{365}(d_n - 81)\right) \quad (3.6)$$

Equation 6 has been adapted for application in the Southern Hemisphere.  $SMFMN$  is the melt factor for June 21,  $SMFMX$  is the melt factor for December 21, and  $d_n$  represents the day of the year.

### 3.5- MODIS SNOW COVER PRODUCT

The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) is a major instrument on the Earth Observing System, which employs a cross-track scan mirror, collecting optics, and a set of individual detector elements to provide imagery of the Earth surface and clouds in 36 discrete and narrow spectral bands ranging in wavelength from 0.405 to 14.385  $\mu m$ . It provides medium-to-coarse resolution imagery with a high temporal repeat cycle (1-2 days). The main purpose of MODIS is to facilitate the study of global vegetation and land cover, vegetation properties, global land surface changes, surface albedo, surface temperature and snow and ice cover, on a daily or nearly daily basis.

The MODIS snow cover products are one of the many geophysical products derived from MODIS data. Global snow cover extent has been mapped by MODIS since shortly after the launch of the Terra

satellite, and a global daily snow cover map has been produced since February 2000. The MODIS snow cover products are provided both on a daily basis and as 8-day composites at 500-m resolution over the Earth's land surfaces. For this purpose, an algorithm based on the normalized difference of a visible and a shortwave infrared band is used (Hall *et al.*, 2002). The MOD10A2 (Fig. 3.1) products are composites of eight days of snow maps in the sinusoidal grid. An eight-day compositing period was chosen in the present study because it corresponds to the exact ground track repeat period of the Terra and Aqua platforms.

The MODIS snow maps have been compared with ground observations and snow maps produced by The National Operational Hydrologic Remote Sensing Center, USA (NOHRSC) (Hall *et al.*, 2002; Klein & Barnett, 2003; Tekeli *et al.*, 2005; Aulta *et al.*, 2006). Though none of these snow products has been determined to be the “gold standard”; in general these products are shown to be in good agreement with ground data (Hall *et al.*, 2002; Tekeli *et al.*, 2005). A validation done by Klein & Barnett (2003), in a study on the Upper Rio Grande River Basin, USA, showed an 86% agreement between the MODIS and NOHRSC snow maps, but the MODIS snow maps typically indicate a higher snow cover proportion than the NOHRSC maps. When comparing MODIS and NOHRSC products with ground observations (SNOTEL measurements), an overall accuracy of 94% and 76% was obtained by Klein & Barnett (2003) for MODIS and NOHRSC respectively. Another validation study for the MOD10\_L2 version 4 gave an accuracy of 92% when comparing the MODIS product for the Lower Great Lakes Region, USA, with observed data sets and an accuracy of 86% when comparing the MODIS with snow depth records from measuring stations of the United States National Weather service (NWS) (Aulta *et al.*, 2006).

### 3.6- STUDY AREA

The Biobío River Basin is the third largest Chilean basin. It is located in Central Chile, between 36°45' - 38°49' S and 71°00' - 73°20' W. The basin stretches from the continental divide in the E (Andes, Chilean-Argentinean border) to the Pacific Ocean in the W. It covers approximately 3% of the Chilean continental territory and is influenced by the temperate climates of the South as well as by the Mediterranean climate of Central Chile. The area constitutes the country's most important centre for forestry activities (both pulp mills and exotic species forestry plantations) and contains a major proportion of the Chilean agricultural soils. The basin also plays a key role in the national energy supply (hydropower). The Biobío river features a pluvio-nival flow regime, with a very marked difference in discharge between dry and wet season: maximum and minimum monthly mean values near the mouth are 1823 m<sup>3</sup>/s and 279 m<sup>3</sup>/s during the months of July (Austral winter; *wet season*) and February (Austral summer; *dry season*), respectively.

The rainfall-runoff modelling application described in this paper focuses on a sub-basin of Biobío that is located in the Andes Mountain Range ( $38^{\circ}20' - 38^{\circ}41' \text{ S}$  and  $71^{\circ}13' - 71^{\circ}35' \text{ W}$ ; Fig. 3.2). With an area of  $455 \text{ km}^2$ , this sub-basin accounts for approximately 1.86% of the total surface area of Biobío. Elevation values in the sub-basin range from 880 m a.m.s.l. (Lonquimay gauging station) to 2533 m a.m.s.l.. Approximately 66% of the basin has elevation values inferior to 1500 m; only 2.3% of the sub-basin has elevation values superior to 2000 m. Flow regime is pluvio-nival, with maximum and minimum mean monthly discharges occurring during the months of June ( $45.75 \text{ m}^3/\text{s}$ ) and March ( $8.96 \text{ m}^3/\text{s}$ ), respectively (Fig 3b). A snowmelt peak produces during October. The selection of the Lonquimay sub-basin as a test area for the application of the SWAT snowmelt model is based on: (a) the importance of snowmelt in the Biobío Basin for hydropower generation, water supply and irrigation; (b) the local availability of a minimum amount of meteorological and streamflow data; (c) the absence of reservoirs or important flow regulations/abstractions in the sub-basin that would modify the natural hydrological regime; (d) the previous factors allow for a basic evaluation of the feasibility for adequately representing the snow accumulation and snow melt processes in this and other Andean sub-basins of Biobío by means of SWAT.

### **3.7- USED DATA SETS**

#### **3.7.1- GIS data layers**

The 90m-resolution topography data from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM DEM, final version) was used as a basis for the construction of the model application (Fig. 3.2). The GIS layer representing land use/cover in the basin (Fig. 3.4) was based on an interpretation of aerial photographs (scale 1:70.000/1:115.000 from 1996-1998), combined with information from the “Chilean Inventory of Native Vegetation Resources” (CONAMA-CONAF-BIRF 1999). Soil types for the Lonquimay sub-basin have not been identified (and are catalogued as “not recognized”) in the “Agrological Study of the IX Region” (CIREN, 1999); for modeling purposes they were assumed to be identical to those of the (geographically closely related) “Santa Barbara” soil class, which corresponds to a Silty Loam soil.

#### **3.7.2- Meteorological and hydrological data sets**

Data sets were obtained from the National Water Databank (“Banco Nacional de Aguas”) of the Chilean General Water Directorate (DGA). Available meteorological data sets for the study area consist of an 11-years time series (1992 - 2002) of daily precipitation and temperature, observed at 3 meteorological stations (Fig. 3.3a). Additionally, flow data from 1 flow gaging station (1995 – 2002) located at the outlet of the basin was used for calibrating and validating stream flow.



### **3.7.3- MODIS**

To validate the areal extent of the snow cover as it is estimated by the model, the MOD10A2 snow product (Hall et al., 2006) –which is weekly updated- was used. Firstly, images were reprojected to WGS84 UTM 19S using the MODIS Reprojection Tool (MRT). Basin images were then reclassified as snow (1) and no snow (0), and then aggregated at the monthly level.

### **3.8- MODEL SET-UP**

One of the first steps in the setup of a SWAT model application for a new study site (basin) consists of the identification and delimitation of the calculation units (or HRUs) for the water balance. For this purpose, the Lonquimay sub-basin river network was extracted from the digital elevation data (DEM), using standard analytical techniques contained in the AVSWATX GIS interface (a minimum upstream contributing area of 5 km<sup>2</sup> was used as a threshold value for defining river cells). As a result of this process, a total of 45 sub-basins were defined, and 87 HRUs (unique land use/soil combinations) were generated.

#### **3.8.1- Land Use and Soil Type**

Due to the lack of locally established values for SWAT model parameters (such as SCS CN, LAI, etc.) that describe the hydrological characteristics of different land use types, each locally observed land use was associated with a “land use type” contained in the SWAT model database. As a first approximation, the original parameter values corresponding to the SWAT database were used in the model. As can be seen from Fig. 3.4, the most important type of land use/cover in the sub-basin corresponds to Native Forest, covering a 61% of the total area.

For the soil series, the hydrological group -which is required for the application of the CN method-, was derived from the description of soil texture contained in the “Agrological Study of the IX Region” (CIREN, 1999). This was done in agreement with the recommendations given by the US Department of Agriculture (USDA, 1986). Conductivity values were obtained from Liu et al. (2002). Horizon depth was taken from CIREN (1999), and the available water capacity was estimated using the Soil Water Characteristics Calculator (Saxton & Rawls, 2006). In correspondence with the available input data, the SCS CN approach and the Hargreaves method were used for calculating runoff and evapotranspiration, respectively.

#### **3.8.2- Snow**

For snow modeling purposes, ten elevation bands -each one of them covering 10% of a sub-basins area- were considered for each of the 45 sub-basin. Parameterization of the snowmelt module (e.g. mean air

temperature at which precipitation is equally likely to be rain or snow, threshold temperature for snow melt, and maximum and minimum melt factors) were initially based on data from the Chilean literature (Peña et al., 1985; Escobar, 1992) and then adjusted through a calibration process. In this application, a single precipitation and temperature lapse rate was obtained for the whole of the basin, using the available meteorological data sets in combination with the “Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km” MOD11A1 product.

### 3.9- CALIBRATION AND VALIDATION

Before calibration, the sensitivity analysis module incorporated in SWAT (Van Griensven *et al.*, 2006) was used with the purpose of ranking the model’s most sensitive parameters (Table 3.1). Only the snowfall/snowmelt routine parameters were considered at this stage. Based on these results, a manual calibration was done, which was followed by a second sensitivity analysis in which all 28 model parameters were considered. The resulting six most sensitive model parameters were: baseflow alpha factor, channel effective hydraulic conductivity, initial SCS CN II value, surface runoff lag time, available water capacity and the Manning's n value for the main channel. Upon completion of this process, the automated calibration procedure implemented in SWAT2005 called “PARASOL” (*Parameter Solution Method*; Van Griensven & Bauwens 2003) was applied, using the Sum of the Squares of the Residuals (SSQ) for obtaining the optimum solution. Upper and lower parameter value bounds used for autocalibration were established based on recommendations made by (Van Liew *et al.*, 2005) and based on personal experience from previous work on the Biobío Basin (Stehr *et al.*, accepted). In the present study, model calibration results were evaluated at the level of monthly output data. Statistical indicators used for evaluating model performance are: the goodness-of-fit ( $R^2$ ), the Nash-Sutcliffe Modelling Efficiency Index (EF) and the percentual bias or % deviation from observed stream flow (PBIAS). Discharge time series from the 1992-1998 period were used for calibration purposes, reserving the first three years of this period for model warm-up. Evaluation of model performance was thus based on output generated for the years 1995-1998. In the case of validation, the corresponding time series covered the period 1999 – 2002. Table 3.2 gives the values of the different statistical indicators obtained from the calibration and validation process.

The closer the values of  $R^2$  and EF to unity, the better the model performance is evaluated (Abu El-Nasr *et al.*, 2005). For PBIAS, the optimal value is 0; a negative value indicates an overestimation of observed discharge values, whereas a positive value indicates underestimation. Van Liew *et al.* (2005) specify the following general criteria for interpreting performance of a hydrological model:

- (a) An absolute value for PBIAS of less than 20% is considered “good”, values between  $\pm 20\%$  and  $\pm 40\%$  are considered “satisfactory”, and those greater than  $\pm 40\%$  are considered “not satisfactory”;
- (b) An EF index value greater than 0.75 is considered “good”, values between 0.75 and 0.36 are considered “satisfactory” and values below 0.36 are considered “not satisfactory”.

### 3.9.1- Snow Cover Area (SCA) validation

Taking into account the existing availability of MODIS imagery, images covering the three-year period 2000 – 2002 were collected and used for the SCA validation process. For each month, cells indicating presence of snow within each sub-basin were counted and the corresponding area covered by snow was calculated. Subsequently, sub-basins were classified as 0 (having no snow cover) or 1 (having a snow cover). Snowpack was calculated using the values obtained for snowfall, snowmelt and sublimation by means of equation 2. In a similar way as was done in the case of the MODIS images, modelled snowpack values were reclassified for each sub-basin, using a value of 0 for representing no snow and a value of 1 for snow. In this case, a value of 0 was assigned only if snowfall, snowmelt, sublimation and snowpack were all zero. After reclassification, values obtained from the modeling process were subtracted from the MODIS results, with zero values indicating agreement between the imagery and model results; a value of -1 indicates that model results reveal presence of snow where the MODIS imagery does not, and a value of 1 indicates that the model does not represent the presence of snow in areas where the MODIS imagery does.

### 3.10- DISCUSSION OF RESULTS

“Good” overall calibration and validation period model performance was obtained for discharge data at the Lonquimay basin outlet for the PBIAS criterion, whereas performance for EF ranged from “Good” to “Satisfactory” for the calibration and validation period, respectively. A more detailed look at Table 3.2 and Fig. 3.5 shows that at both the monthly, seasonal and annual level the model tended to underestimate the higher flows (mainly winter and spring), whereas low flows (which mostly occur during summer and autumn) are typically overestimated. Analysis of results for the different seasons by means of the EF,  $R^2$  and PBIAS criteria (Table 3.3) shows that the best overall performance occurs during winter (in terms of correspondence between observed and modeled river flows). Representation of summer discharges for both the calibration and validation period would be considered as only “Satisfactory” (as compared to “Good” for the other seasons) for PBIAS and as “Not Satisfactory” for EF, according to the criteria given by Van Liew *et al.* (2005), cited above. Global runoff water balance over the modelled period is slightly positively biased (meaning an underestimation of total outflow).

Validation of snow results given by the model using MODIS images shows that there is a good average agreement of 79% between modeled and “observed” snow cover over the three-year period 2000 - 2002. In 5% of the cases, the model predicts snow where the image does not, whereas in 16% of all cases images represent snow where the model does not (Table 4). As can be seen from Fig. 3.6, the biggest and smallest discrepancies between model and images corresponded to the years 2000 and 2002, respectively. Especially the increase in units represented as “having a snow cover” by the model where the image does not is noticeable for 2000; however, the main difference still is the lack of representation of MODIS-snow covered areas in SWAT (Table 3.4). The higher discrepancies for the year 2000 may be related to the precipitation input patterns for the basin, where the total modelled water balance input to the basin for 2000 is approximately half that of 2002 (more erratic rainfall patterns under dry(er) years?). However, a considerably higher number of modelled years would be needed in order to enable the establishment of sound conclusions with regard to this last point. From Table 5, it can be observed that at the monthly level, October and November presented the greatest number of discrepancies between results based on SWAT versus MODIS. Also in these cases, in general the model does not represent part of the snow cover detected by MODIS. Modelled discharge values for this period (October and November; years 2000 and 2001) are also typically below the measured monthly values (high positive PBIAS), whereas summer discharges are typically overestimated by the model.

Considering also the fact that peak flows during the wet season as well as total model period runoff are underestimated by the model, at least a partial explanation for unsatisfactory or sub-optimal model behavior may be found in the inadequate representation of the spatial precipitation fields used in this application. This would be caused by the reduced number of available meteorological stations (a problem common to many Latin-American river basins), and by the absence of meteorological stations in the higher parts of the basin (where both precipitation values and variability are expected to be high). In addition to this, a potentially inadequate representation of soil types and profiles for the Lonquimay Basin by means of the Santa Barbara Series (a consequence of the lack of locally determined soil type information) might lead to an overestimation of infiltration and groundwater storage, especially for the steep and high-laying areas which would both have a thin (or even no) soil cover and thus in reality cause considerable contributions to the quick flow component. The underestimation of snow cover over such areas during spring may also lead to a higher groundwater recharge contributing to (overestimated) base flows at a later stage, and to an underrepresentation of snow-accumulation and snow melt dynamics and thus reduced contributions from snowmelt during spring (the effects of snow melt on observed mean river flows for October-November can clearly be observed from Fig. 3.3b).

### **3.11- CONCLUSIONS**

Results obtained from the presented SWAT model application for the Lonquimay sub-basin, located in the Central-Chilean Andes, show a satisfactory to good general model performance in term of representation of long term or annual mean discharge at the basin outlet. Besides the traditional calibration and validation based on river flow, MODIS snow products were used to evaluate the representation of snow cover extent as it is generated by means of the calibrated SWAT model snow routine. Although a reasonably good description of snow cover extent could be obtained under most circumstances, the present case study shows the limitations inherent to the low density of stations providing meteorological input data in the case of basins featuring high altitudinal gradients. Location and density of monitoring stations undoubtedly play a determinant role in the general accuracy of model results, and the present case study provides an example quantitative indication of how good a model may perform under limited availability of input meteorological data sets. Improvements in model behavior may however still be obtained in future work through the incorporation of an improved description of basin soil types and characteristics (especially for those parts of the basin that can be reasonably assumed to have a very thin or non-existing soil cover), as well as through the use of differential seasonal temperature lapse rates (analysis of temperature data obtained from MODIS produced a different lapse rate value for the different seasons). Although the extent of glacier-covered areas in the basin is reduced, the glacier melt module proposed by Schaper et al. (1999) can be adapted and incorporated in SWAT. In the current work, the MODIS snow products have been used for validation purposes only. This has allowed gaining improved insight into the performance of the SWAT model and of its snowfall – snow melt routine. Future efforts may be directed towards the incorporation of MODIS information directly into the process of model parameter calibration itself, in an attempt to further improve model results. Such incorporation would depart from the inherent assumption that the MODIS representation of snow cover is good.

### **3.12- ACKNOWLEDGMENTS**

The present research was conducted in the framework of the TWINBAS and TWINLATIN projects, which were both financed by the European Community through its Sixth Framework Programme for Research and Technological Development (Priority Area “Global Change and Ecosystems”; Contract N° 505287 and Contract N° 018436). The authors wish to express their sincere gratitude to the Chilean General Water Directorate DGA, in particular to the staff of the Biobío Division; the Chilean Meteorological Directorate (DMC), as well as to all other data providers that have not been explicitly mentioned above.

### 3.13- REFERENCES

- Abu El-Nasr, A., Arnold, J. G., Feyen, J. & Berlamont, J. (2005) Modelling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi-distributed model. *Hydrol. Processes* **19**, 573-587.
- Anderson, E. A. (1976) A Point Energy and Mass Balance Model for Snow Cover. NOAA Technical Report NWS 19, U.S. Department of Commerce, National Weather Service, Washington, D.C.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. & Williams, J. R. (1998) Large area hydrologic modeling and assessment - Part I: model development. *JAWRA* **34**(1), 73-89.
- Aulta, T. W., Czajkowskia, K. P., Benkoa, T., Cossa, J., Strublec, J., Spongberg, A., Templinc, M. & Grossd, C. (2006) Validation of the MODIS snow product and cloud mask using student and NWS cooperative station observations in the Lower Great Lakes Region. *Remote Sens Environ* **105**(4), 341-353.
- Cao, W., Bowden, W. B., Davie, T. & Fenemor, A. (2006) Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrol. Processes* **20**, 1057-1073.
- CIREN (1999) Estudio Agrológico, IX Región. Centro de Información de Recursos Naturales, Chile.
- Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J.C. & Neitsch, S.L. (2002). ArcView Interface for SWAT2000 User's Guide. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station
- Escobar, F. (1992). Aplicacion del modelo "SRM3-11" (Snowmelt runoff model) en cuecnas de los Andes centrales. Segundas Jornadas de Hidráulica Francisco Javier Domínguez, Santiago, Chile
- Fontaine, T. A., Cruickshank, T. S. & Arnold, J. G. (2002) Development of a snowfall - snowmelt routine for mountainous terrain for the soil water assessment tool (SWAT). *J. Hydrol.* **262**, 209-223.
- Garen, D. C. & Marks, D. (2005) Spatially distributed energy balance snowmelt modelling in a mountainous river basin: estimation of meteorological inputs and verification of model results. *J. Hydrol.* **315**, 126-153.
- Ghanbargpour, M. R., Saghafian, B., Saravi, M. M. & Abbaspour, K. C. (2007) Evaluation of spatial and temporal variability of snow cover in a large mountainous basin in Iran. *Nord Hydrol.* **38**(1), 45-58.
- Gosain, A. K., Rao, S., Srinivasan, R. & Reddy, N. G. (2005) Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model. *Hydrol. Processes* **19**, 673-682.
- Govender, M. & Everson, C. S. (2005) Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model. *Hydrol. Processes* **19**, 683-692.
- Hall, D. K., Riggs, G. A. & Salomonson, V. V. (2006, updated weekly). MODIS/Terra snow cover 8-day L3 global 500m grid V004, [March 2000 to December 2003]. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center. Digital media.
- Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., DiGirolamo, N. E. & Bayr, K. J. (2002) MODIS snow-cover products. *Remote Sens Environ* **83**, 181-194.



- Hartman, M. D., Baron, J. S., Lammers, R. B., Cline, D. W., Band, L. E., Liston, G. E. & Tague, C. (1999) Simulation of snow distribution and hydrology in mountain basin. *Water Resour. Res.* **35**(5), 1587-1603.
- Klein, A. G. & Barnett, A. C. (2003) Validation of daily MODIS snow cover maps of the Upper Rio Grande River Basin for the 2000 - 2001 snow year. *Remote Sens Environ* **86**, 162 - 176.
- López-Moreno, J. I. & Nogués-Bravo, D. (2005) A generalized additive model for the spatial distribution of snowpack in the Spanish Pyrenees. *Hydro Process* **19**(16), 3167-3176.
- Lui, Y., Gembremeskel, S., De Smedt, F. & Pfister, L. (2002). Flood prediction with wetspa model on catchment scale. Flood Defense 2002, Science Press New York Ltd.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.C., Kiniry, J.R., Williams, J.R. & King, K.W. (2002<sup>a</sup>). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.C., Kiniry, J.R., Williams, J.R. & King, K.W. (2002<sup>b</sup>) Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Peña, H., Vidal, F. & Escobar, F. (1985). Estimación de tasas de derretimiento de nieve. VII Congreso Nacional, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica, Concepcion, Chile
- Refsgaard, J. C. (2007). Hydrological Modelling and River Basin Management; Doctoral Thesis. Faculty of Natural Science, University of Copenhagen.
- Saxton, K. E. & Rawls, W. J. (2006) Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70**, 1569-1578.
- Schaper, J., Martinec, J. & Seidel, K. (1999) Distributed mapping of snow and glaciers for improved runoff modelling. *Hydrol. Processes* **13**, 2023 - 2031.
- Skaugen, T., Beldring, S. & Udnas, H. (2003) Dynamical properties of the spatial distribution of snow. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **7**(5), 744–753.
- Stehr, A., Debels, P., Romero, F. & Alcayaga, H. (accepted) Hydrological modelling with SWAT under limited conditions of data availability: evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrol. Sci. J.*
- Tekeli, A. E., Akyürek, Z., Sorman, A. A., Sensoy, A. & Sorman, A. Ü. (2005) Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey. *Remote Sens. Environ.* **97**, 216-230.
- Tripathi, M. P., Raghuwanshi, N. S. & Rao, G. P. (2006) Effect of watershed subdivision on simulation of waterbalance components. *Hydrol. Processes* **20**, 1137–1156.
- USDA (1986). Urban Hydrology for small Watersheds, TR 55.
- Van Griensven, A. & Bauwens, W. (2003) Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models. *Water Resour. Res.* **39**(12), 1348.



- Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T. & Sirinivasan, R. (2006) A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *J. Hydrol.* **324**, 10-23.
- Van Liew, M. W., Arnold, J. G. & Bosch, D. D. (2005) Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model. *Trans. Am. Soc. Agric.* **48**(3), 1025-1040.
- Verbunt, M., Gurtz, J., Jasper, K., Lang, H., Warmerdam, P. & Zappa, M. (2003) The hydrological rol of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling. *J. Hydrol.* **282**, 36 - 55.
- Walter, M. T., Brooks, E. S., McCool, D. K., King, L. G., Molnau, M. & Boll, J. (2005) Process-based snowmelt modeling: does it require more input data than temperature-index modeling? *J. Hydrol.* **300**, 65-75.
- WWAP (2003) 1<sup>st</sup> World Water Development Report: "Water for People, Water for Life". United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Berghahn Books. 576pp.
- Yang, T.-C., Yu, P.-S. & Chen, C.-C. (2005) Long-term runoff forecasting by combining hydrological models and meteorological records. *Hydrol. Processes* **19**, 1967-1981.



**Table 3.1** Ranking of the most sensitive parameters and their corresponding values after manual calibration

Rank	Sensitivity Analysis 1		Value	Unit
1	Snowfall temperature	SFTMP	0.9	°C
2	Maximum melt factor for snow	SMFMX	5.0	mm H2O/°C-day
3	Minimum melt factor for snow	SMFMN	1.244	mm H2O/°C-day
4	Snowmelt base temperature	SMTMP	1.57	°C
5	Snow pack temperature lag factor	TIMP	1.0	
6	Temperature lapse rate	TLAPS	-5.0	°C

**Table 3.2** Modelled and observed (in bold) seasonal and annual discharge values (calibration)

Year	Seasonal Flow (m <sup>3</sup> /s)				Annual Mean Flow (m <sup>3</sup> /s)
	Summer	Autumn	Winter	Spring	
1995	16.02	22.81	46.45	30.66	29.13
	<b>14.61</b>	<b>19.04</b>	<b>54.27</b>	<b>44.41</b>	<b>33.45</b>
1996	15.00	18.95	15.58	12.34	15.24
	<b>13.65</b>	<b>15.78</b>	<b>15.49</b>	<b>16.07</b>	<b>14.78</b>
1997	12.20	29.46	44.74	31.59	29.94
	<b>8.47</b>	<b>30.07</b>	<b>59.72</b>	<b>35.84</b>	<b>33.99</b>
1998	15.41	10.06	17.57	12.45	13.89
	<b>12.26</b>	<b>6.30</b>	<b>12.40</b>	<b>12.41</b>	<b>10.58</b>
Avg	14.66	20.32	31.08	21.76	22.05
	<b>12.24</b>	<b>17.80</b>	<b>35.47</b>	<b>27.18</b>	<b>23.20</b>

**Table 3.3** Statistical indicators of model performance (monthly output) calculated at the outlet of the Lonquimay Basin, considering different periods for model evaluation: summer – autumn, winter - spring and the complete period

Index	Calibration							Validation						
	Su <sup>1</sup>	A <sup>2</sup>	W <sup>3</sup>	Sp <sup>4</sup>	SA <sup>*</sup>	WS <sup>**</sup>	All	Su <sup>1</sup>	A <sup>2</sup>	W <sup>3</sup>	Sp <sup>4</sup>	SA <sup>*</sup>	WS <sup>**</sup>	All
EF	0.14	0.82	0.86	0.51	0.83	0.76	0.81	-1.27	0.32	0.34	0.38	0.36	0.36	0.56
R <sup>2</sup>	0.89	0.92	0.93	0.66	0.93	0.83	0.87	0.24	0.32	0.35	0.77	0.37	0.51	0.57
PBIAS	-28.24	0.45	7.60	19.58	-9.01	12.80	4.88	-39.01	3.08	2.20	29.55	-10.96	15.87	7.86

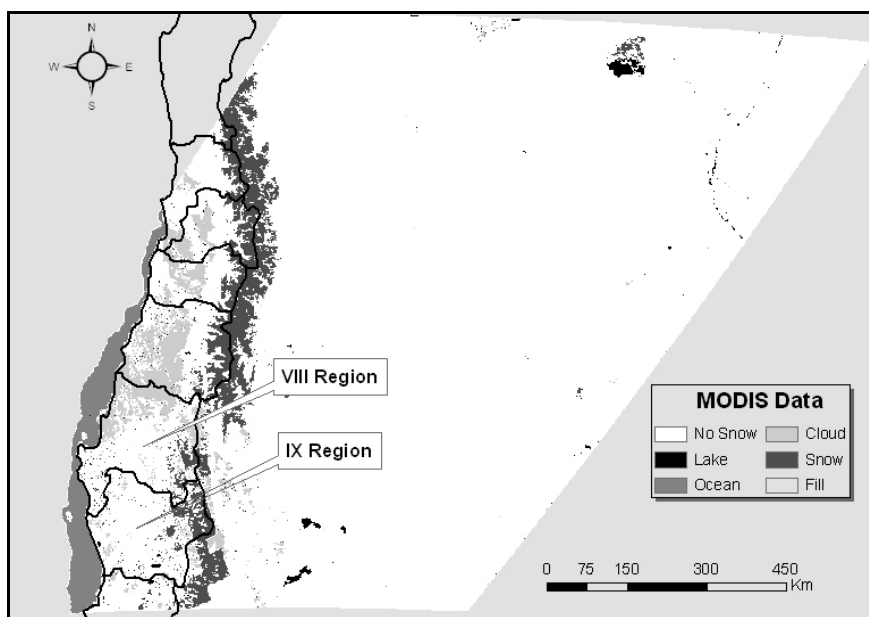
: <sup>1</sup>Summer; <sup>2</sup>Autumn; <sup>3</sup>Winter; <sup>4</sup>Spring; \*Summer – Autumn; \*\*Winter – Spring

**Table 3.4** Results from the annual evaluation of the representation of snow cover extent: model versus MODIS imagery

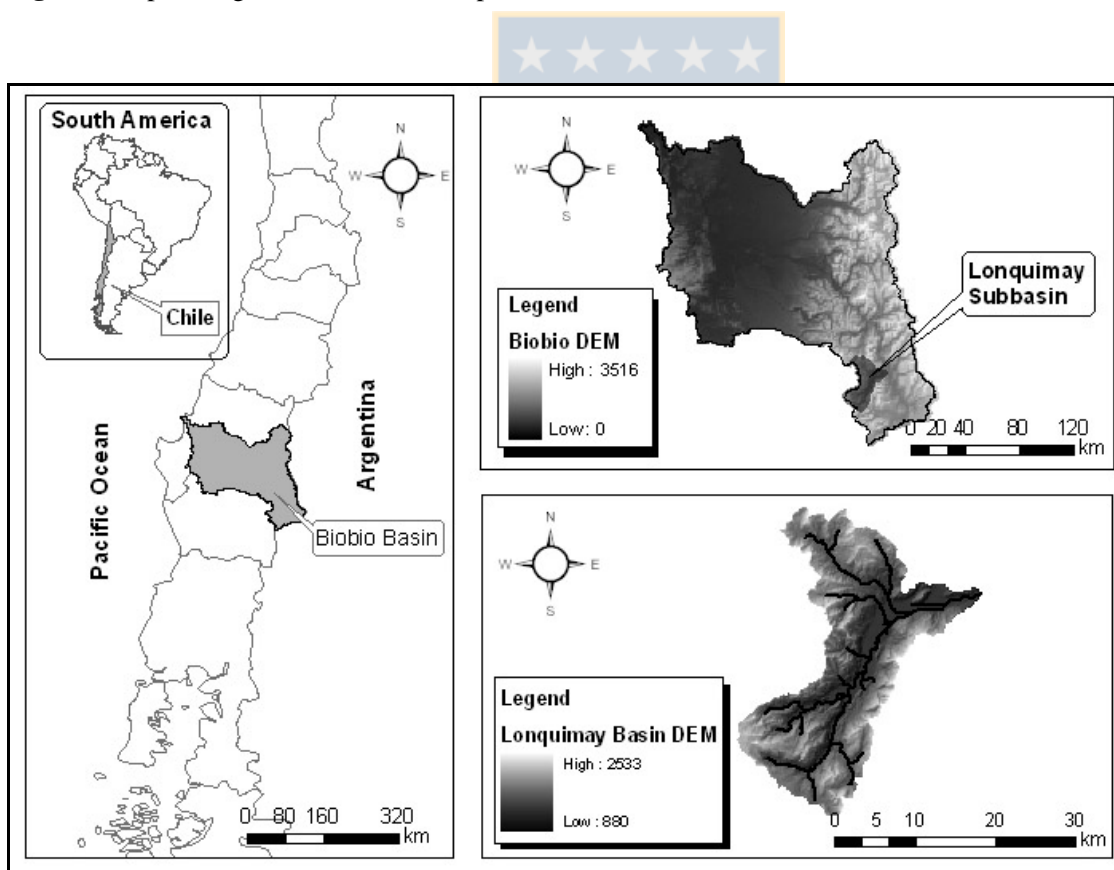
Year	N° of evaluated cells	model-imagery agreement		Modelled “no”; MODIS “yes” <sup>1</sup>		Modelled “yes”; MODIS “no” <sup>2</sup>		1+2
		N°	%	N°	%	N°	%	%
2000	450	328	73	83	18	39	9	27
2001	540	417	77	95	18	28	5	23
2002	540	461	86	67	12	12	2	14

**Table 3.5** Results from the monthly evaluation of the representation of snow cover extent: model versus MODIS imagery (percentage of total cells)

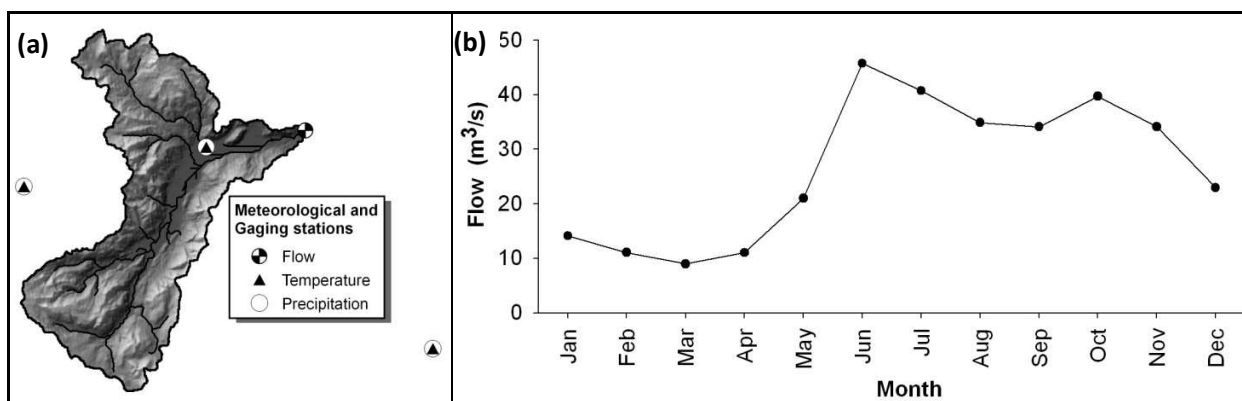
	model-imagery agreement			Modelled “no”; MODIS “yes” <sup>1</sup>			Modelled “yes”; MODIS “no” <sup>2</sup>		
	2000	2001	2002	2000	2001	2002	2000	2001	2002
January		84	100		16	0		0	0
February		98	93		2	7		0	0
March	29	89	98	71	11	2	0	0	0
April	29	85	71	4	13	27	67	2	2
May	89	96	87	4	0	0	7	4	13
June	96	53	98	4	0	2	0	47	0
July	93	91	96	7	0	0	0	9	4
August	91	87	96	2	13	0	7	0	4
September	93	76	98	2	24	2	5	0	0
October	44	36	62	56	64	36	0	0	2
November	85	33	56	13	67	44	2	0	0
December	80	100	71	20	0	29	0	0	0



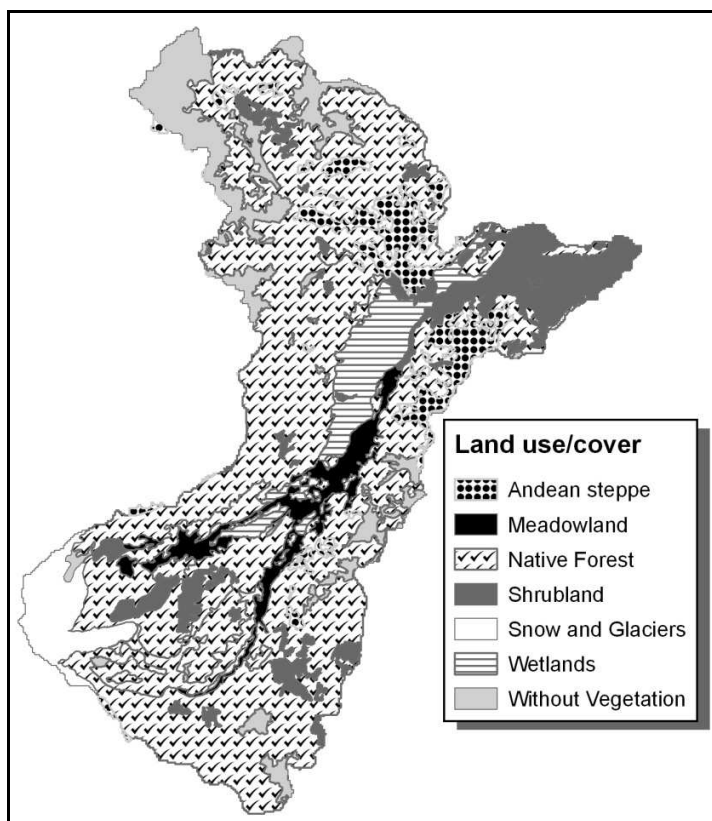
**Fig 3.1** Sample image of the MOD10A2 product



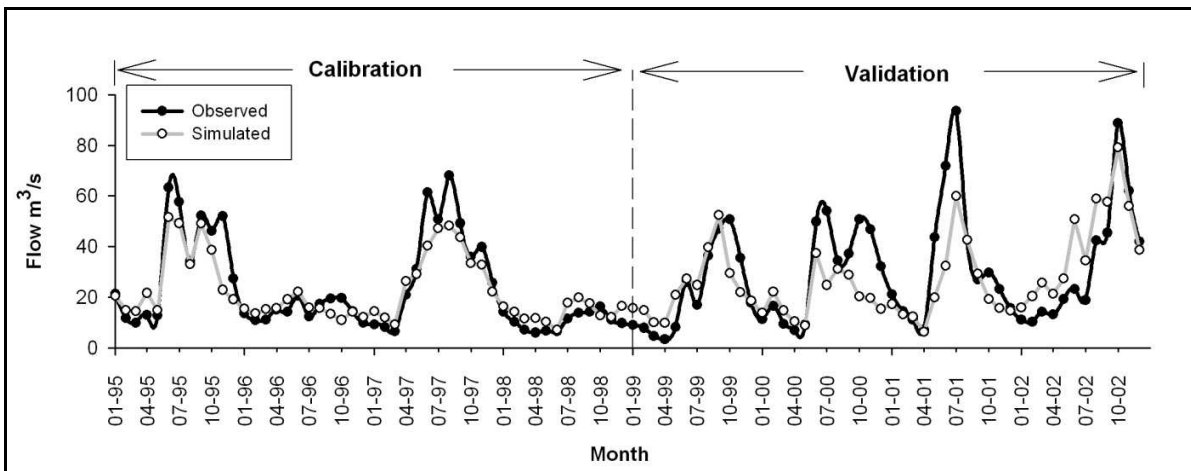
**Fig. 3.2** Location of the Lonquimay basin



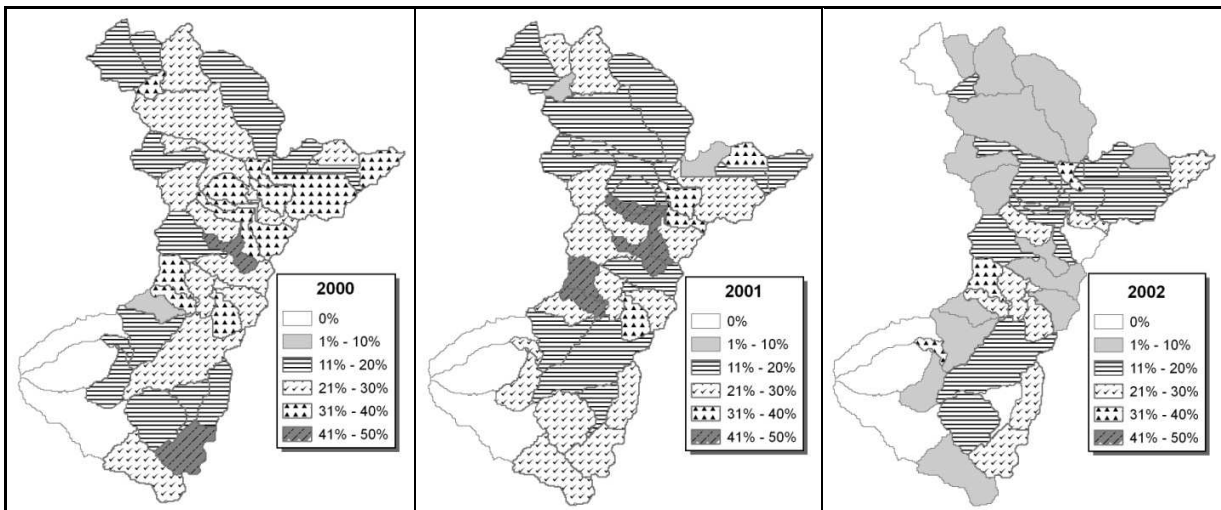
**Fig. 3.3** (a) Meteorological and gaging stations used in the SWAT model application (b) Mean monthly flows at the Lonquimay Basin outlet.



**Fig. 3.4** Main land use/cover classes in the Basin (classes representing > 1% of the basin area only).



**Fig. 3.5** Model calibration and validation results (monthly output)



**Fig. 3.6** Spatial expression of the percentual disagreement between snow cover derived from monthly model outputs and from MODIS imagery, at the level of the individual sub-basins (for the year 2000, only the months from March - December are considered)



## **CAPITULO 4: Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático, experiencia de dos cuencas del centro-sur Chileno<sup>4</sup>.**

---

**ALEJANDRA STEHR<sup>1</sup>, PATRICK DEBELS<sup>1</sup>, JOSE LUIS ARUMI<sup>2</sup>**

1 Centro de Ciencias Ambientales EULA-CHILE, Universidad de Concepción, Casilla Postal 160-C, Concepción, Chile

[astehr@udec.cl](mailto:astehr@udec.cl)

2 Departamento de Recursos Hídricos, Facultad de Ingeniería Agrícola. Universidad de Concepción, Chile

### **4.1-- Resumen**

Durante los últimos años se ha observado un cambio progresivo de las condiciones climáticas a nivel mundial, que ha traído como consecuencia aumentos de la frecuencia y severidad de fenómenos como inundaciones y sequías. Por lo anterior, es necesario contar con herramientas que permitan tomar decisiones en forma informada. Actualmente una forma de evaluar el efecto del cambio climático sobre la hidrología de una cuenca es utilizar un modelo hidrológico distribuido, el cual una vez calibrado y validado es perturbado con cambios (% variación precipitación y  $\Delta$  de cambio en la temperatura) obtenidos de distintos escenarios climáticos futuros. El objetivo de este trabajo es modelar la respuesta hidrológica de dos sub-cuencas del río Biobío a distintos escenarios de cambio climático. Los resultados indican que para la mayor parte de los escenarios de cambio climático modelados se producirá una reducción en la magnitud de los caudales medios mensuales y anuales, siendo esta variación mayor en las épocas de primavera y verano. Permitiendo estos resultados realizar una primera interpretación cualitativa de los potenciales impactos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca del río Biobío.

### **Palabras claves**

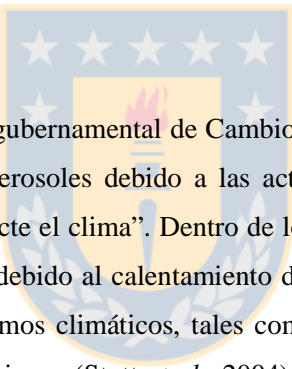
Cambio climático; modelación hidrológica; SWAT; Chile; Biobío

---

<sup>4</sup> En preparación.

## 4.2- INTRODUCCION

Futuros cambios climáticos impactarán la disponibilidad de recursos hídricos, por lo que una evaluación de los recursos disponibles es un requisito previo para emprender cualquier proyecto que afecte su uso, pues ésta permitirá adoptar estrategias apropiadas de gestión para evitar efectos ambientales adversos y futuros conflictos entre distintos usuarios. Durante las últimas cinco décadas se ha producido un notable aumento en el consumo de agua debido al aumento explosivo de población, un aumento sin precedente del estándar de vida, y un enorme desarrollo económico (Xu & Singh, 2004). Esta situación es aún más compleja si se considera el aumento de la contaminación de los recursos de hídricos durante los últimos años. Lo anterior ha causado serios problemas impidiendo el desarrollo sustentable económico y social en muchas regiones, no sólo causado por factores naturales, sino también por una carencia de conocimiento de los recursos hídricos existentes y la mala gestión de éstos. Lo anterior se torna aún más complicado al considerar el cambio climático, el cual a largo plazo, puede disminuir la disponibilidad de los recursos hídricos naturales en muchas partes del mundo, debido a posibles cambios en la distribución de las precipitaciones y al incremento de las temperaturas.



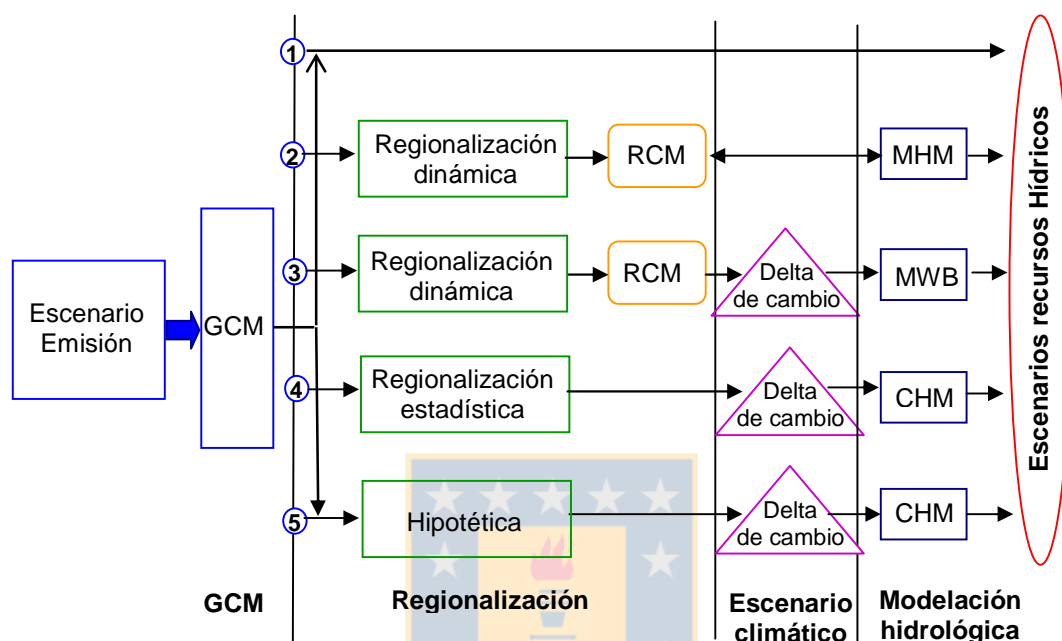
El Tercer Reporte del Panel Intergubernamental de Cambio del Climático (IPCC 2001) establece que “las emisiones de gases invernadero y aerosoles debido a las actividades humanas continúan alterando la atmósfera de tal manera que se espera afecte el clima”. Dentro de los cambios físicos más importantes que se proyectan producirá el cambio climático debido al calentamiento de la atmósfera, se encuentran un aumento en la frecuencia y severidad de los extremos climáticos, tales como olas de calor y sequías, además de un aumento en la intensidad de las precipitaciones (Stott *et al.*, 2004). También se anuncia habrá cambios en la temporalidad de los caudales y el volumen de agua en los ríos (Whitfield *et al.*, 2002). En cuencas con un aporte nival relevante el aumento de las temperaturas tendrá tres efectos (Gleick, 1986; López-Moreno & Nogués-Bravo, 2005): (1) Incremento en la razón entre precipitación y nieve durante los meses fríos; (2) disminución de la temporada con nieve y (3) incremento de la tasa e intensidad del derretimiento durante los meses cálidos. Lo anterior producirá como efecto un aumento de la escorrentía media durante invierno, el máximo de escorrentía ocurrirá antes en el año y se producirá un secado más rápido e intenso durante el verano del suelo. El calentamiento de las regiones de alta montaña podría dar lugar a la desaparición de una importante superficie de nieve y hielo, que podría tener efectos sobre las actividades turísticas y deportivas de montaña. Dado que estas zonas contribuyen a la cantidad de caudal presente en los ríos, esta tendencia también reduciría la disponibilidad de agua para riego, generación de energía hidroeléctrica (la capacidad de almacenamiento y operación de los embalses) y disponibilidad de agua almacenada para uso doméstico y de agricultura más tarde dentro del año (Gleick, 1997; Arnell *et al.*, 2001; Kundzewicz, *et al.*, 2007; Chiew 2007).

Watson *et al.* (1997) indican que como consecuencia del cambio climático global se esperan importantes cambios en los patrones de precipitación en gran parte de Sudamérica. Por otro lado Hulme y Sheard (1999) esperan una disminución de las precipitaciones de alrededor de 3% al 8% hasta el 2020 (comparado con el periodo 1961-1990), 4 -12% hasta 2050 y 6-18% hasta el 2080 (escenarios B1 bajo A1 alto). La variación estacional del régimen es más extrema, muy lluviosa en invierno y extremadamente seca en verano. En el caso Chileno específicamente, el Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI CONAMA-DGF (2006) estima que para las temperaturas, para el periodo comprendido entre 2071 - 2100 (fines del siglo XXI), dominará el aumento de éstas en todos los sectores de la cuenca del Río Biobío, estacionalmente el calentamiento es mayor en verano excediendo los 5°C en algunos sectores cordilleranos. En el caso de las precipitaciones durante este mismo periodo se espera una disminución, siendo ésta mayor en la costa que en la cordillera, unos de los escenarios estima incluso entre 25 – 50% menos de precipitaciones que en la actualidad. Por otro lado dicho informe también menciona que debido al alza de altura que tendría la isoterma 0°C, las crecidas invernales de los ríos con aporte nival se verían incrementadas y la reserva nival disminuida.

La gran importancia del agua para la sociedad y la naturaleza genera la necesidad de entender como un cambio en el clima global puede afectar la disponibilidad de agua a nivel local. Actualmente, muchos modelos están siendo desarrollados y utilizados para apoyar las decisiones de gestión del agua. El uso de modelos distribuidos se ha tornado durante los últimos años más frecuente para análisis ambiental, esto porque los avances computacionales han facilitado el análisis de datos y se han podido crear modelos con mayor integración, que simulan en conjunto con la hidrología, calidad de agua, ecología, impactos ambientales, riesgos, etc. (Sivapalan *et al.*, 1996<sup>a</sup> Sivapalan, *et al.*, 1996<sup>b</sup> 1996<sup>c</sup> Schneiderman, *et al.*, 2002). La demanda de modelos hidrológicos para facilitar la toma decisiones concernientes al ambiente se ha incrementado, particularmente cuando se involucra las predicciones de condiciones hidrológicas futuras resultantes de cambios de uso de suelo y clima (Matheussen *et al.*, 2000). Es importante tener en consideración que los estudios de modelación usualmente no abordan todo el proceso de planificación y gestión, pero apoyan de una manera importante el proceso (Refsgaard, 2007).

Para gestionar los recursos hídricos en forma eficiente es necesario el adecuado entendimiento de los procesos de precipitación escorrentía, tanto al mediano como largo plazo, así como su impacto en el balance hídrico de la cuenca. Es en este sentido que el desarrollo y aplicación de un modelo hidrológico juega un rol de gran importancia (Yang *et al.*, 2005). Para poder considerar el cambio climático el estudio clásico de caudales es sustituido por modelos hidrológicos que se basen en una descripción física de los procesos más relevantes, que relacionan las variables climáticas con los caudales (Di Luzio *et al.*, 2002; Harrison & Whittington, 2002; Dankers & Christensen, 2005; Eckhardt, 2005; Vandenberghe *et al.*, 2005). Es importante

mentar que la modelación de sistemas hidrológicos es una forma relativamente de bajo costo para evaluar los efectos de corto y largo plazo de las actividades humanas sobre los procesos hidrológicos en una cuenca y para la toma de decisiones sobre la gestión de cuencas. Siendo lo anterior de gran importancia sobre todo en países en vías de desarrollo donde los recursos disponibles son escasos.



**Fig. 4.1** Representación esquemática de los métodos para evaluar los recursos hídricos bajo condiciones climáticas cambiantes. GCM: modelos de circulación Global; RCM modelos climáticos regionales; MHM: modelo hidrológicos macro escala; MWB modelo de balance de agua macro escala; CHM: modelo hidrológico a escala de cuenca. (Xu & Singh 2004).

Hoy en día se está realizando gran cantidad de investigación respecto a la disponibilidad de recursos hídricos y el cambio climático, la cual está siendo enfocada de distintas maneras (Xu & Singh 2004), incluyéndose el uso de modelos climáticos, hidrológicos y técnicas de regionalización (Fig.4.1). El presente trabajo corresponde a una parte del proyecto TWINBAS, que cubre varias actividades de investigación relacionadas con la gestión integrada de recursos hídricos. El objetivo de esta parte de la investigación es extender el trabajo previo realizado (Stehr *et al.*, (en prensa); Stehr *et al.*, (enviado)), modelando la respuesta hidrológica de dos sub-cuencas del río Biobío al cambio climático. Además de analizar las diferencias en los resultados obtenidos en el área bajo estudio a partir de modelar la respuesta hidrológica utilizando datos climáticos futuros desde un moldeo climático regional (RCM Informe Variabilidad Climática DGF-CONAMA) versus tasas de cambio obtenidas de modelos de circulación global (GCM) utilizando MAGICC/SCENGEN (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change/Scenario Generator). Continuando con la investigación previamente realizada para modelar las condiciones históricas y

futuras se utiliza el modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool; (Arnold *et al.*, 1998; Neitsch *et al.*, 2002<sup>a</sup>; 2002b)), el cual es un modelo hidrológico físicamente basado y espacialmente distribuido.

### 4.3- PREDICIONES SOBRE CAMBIO CLIMATICO

La valoración de la vulnerabilidad al cambio climático tiene como objetivo asegurar la mejor utilización de los recursos hídricos; evaluando los impactos positivos y negativos, así como las medidas de adaptación para dar respuesta a dichos impactos. Para lo anterior, es necesario obtener una representación cuantitativa de los cambios climáticos y los efectos que éstos producirán en la hidrología. Una manera de realizar lo anterior es utilizar escenarios climáticos. Un escenario de cambio climático es una descripción espacial y temporal, físicamente consistente, de rangos plausibles de las condiciones climáticas futuras, basada en un cierto número de suposiciones y de la actual comprensión científica de nuestro sistema climático. La creación de los escenarios de cambio climático es una etapa de gran importancia dentro de los estudios de vulnerabilidad, pues de ellos depende la dirección de los resultados de la evaluación. Existe una gran variedad de métodos para crear los escenarios de cambio climático, los cuales se pueden agrupar en: escenarios sintéticos (también conocidos como incrementales), análogos, y aquellos que pueden construirse a partir de salidas de modelos de circulación general.

Una de las herramientas más confiables para investigar la posible respuesta del clima a futuras variaciones en la composición de la atmósfera son los llamados modelos climáticos globales (GCM) (IPCC 2001). Estos son modelos matemáticos que incorporan en sus ecuaciones la descripción de los procesos físicos y de las interacciones fundamentales entre las componentes más importantes del sistema climático -atmósfera, hidrósfera, litósfera y biósfera. Existen varias limitaciones que restringen la utilidad de las salidas de GCM para evaluación de impactos (IPCC 2001), por ejemplo, la gran cantidad de recursos necesarios para realizar cada una de las simulaciones de GCM y almacenar sus salidas y la diferencia de sensibilidad del clima entre los distintos modelos. Hasta ahora la mayoría de los estudios han utilizado la información de variación climática proporcionada por GCM sin ninguna posterior regionalización. Esto se debe fundamentalmente a la disponibilidad de esta información y al desarrollo relativamente reciente de técnicas de regionalización (Mata & Nobre 2006). Una de las formas más directas de obtener escenarios espaciales de más alta resolución es aplicar proyecciones de gruesa escala a la línea base climática observada de alta resolución - método del factor de cambio (Arnell & Reynard 1996, Arnell 2003, Diaz-Nieto & Wilby 2005). Este método (Fig. 4.1) se utiliza a menudo cuando la salida de modelos de circulación regional (RCM) es inasequible para estudios de sensibilidad o cuando se necesitan evaluaciones rápidas de múltiples escenarios climáticos (Wilby *et al.*, 2004). Para esto, primero es establecida la climatología de referencia para el sitio o región de interés. En segundo lugar, se calculan los cambios en las variables meteorológicas equivalentes para la grilla GCM más

cercana al sitio. Luego el cambio sugerido por el GCM se aplica a toda la serie meteorológica de referencia. Este método posee varias limitaciones, que deben ser tomadas en consideración al interpretar los resultados de su aplicación (Wilby *et al.*, 2004); (i) el procedimiento asume que el patrón espacial del clima permanece constante; (ii) la secuencia temporal no es cambiada, así que el método puede no ser útil cuando son importantes los cambios entre los periodos seco / húmedo.

#### 4.4- AREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Biobío (24.371 km<sup>2</sup>) es la tercera cuenca Chilena más grande, cubriendo aproximadamente el 3% del territorio nacional. Está ubicada en el Centro Sur de Chile, entre 36°45' - 38°49' Latitud Sur y 71°00' - 73°20' Longitud Oeste. La cuenca se extiende desde la Cordillera de los Andes en el Este hasta el Océano Pacífico en el Oeste. Está influenciada por el clima templado del sur de Chile así como también por el clima mediterráneo de Chile Central. Esta cuenca constituye el centro forestal más importante del país, contiene una gran proporción de los suelos agrícolas del país y también juega un rol preponderante en el abastecimiento eléctrico nacional (hidroelectricidad). Este artículo se enfoca en dos sub-cuencas pertenecientes a la cuenca del río Biobío; la primera ubicada en el sector de la Cordillera de los Andes (Lonquimay) y la segunda (Vergara) ubicada en el sector suroeste de la cuenca (Fig. 4.2). La cuenca del Lonquimay (38°20' - 38°41' S and 71°13' - 71°35' O) cubre aproximadamente el 3% del área total de la cuenca del Biobío, con un área de 455 km<sup>2</sup>. El punto más bajo está ubicado a 880 msnm y el punto más alto a 2533 msnm (Fig. 4.2). El régimen fluviométrico es pluvionival, con caudales máximos y mínimos durante los meses de junio y marzo respectivamente y un máximo nival en octubre (Fig. 4.3).

La cuenca del Río Vergara está ubicada entre 37°29' - 38°14' S y 71°36' - 73°20' O, cubriendo un área de 4.265 km<sup>2</sup> (aproximadamente 17% de la cuenca del Biobío). El punto más bajo está ubicado a 53 msnm y el punto más alto a 1923 msnm (Fig. 4.2). El régimen fluviométrico es pluvial, ocurriendo los caudales máximos y mínimos durante julio y febrero respectivamente (Fig. 4.3).

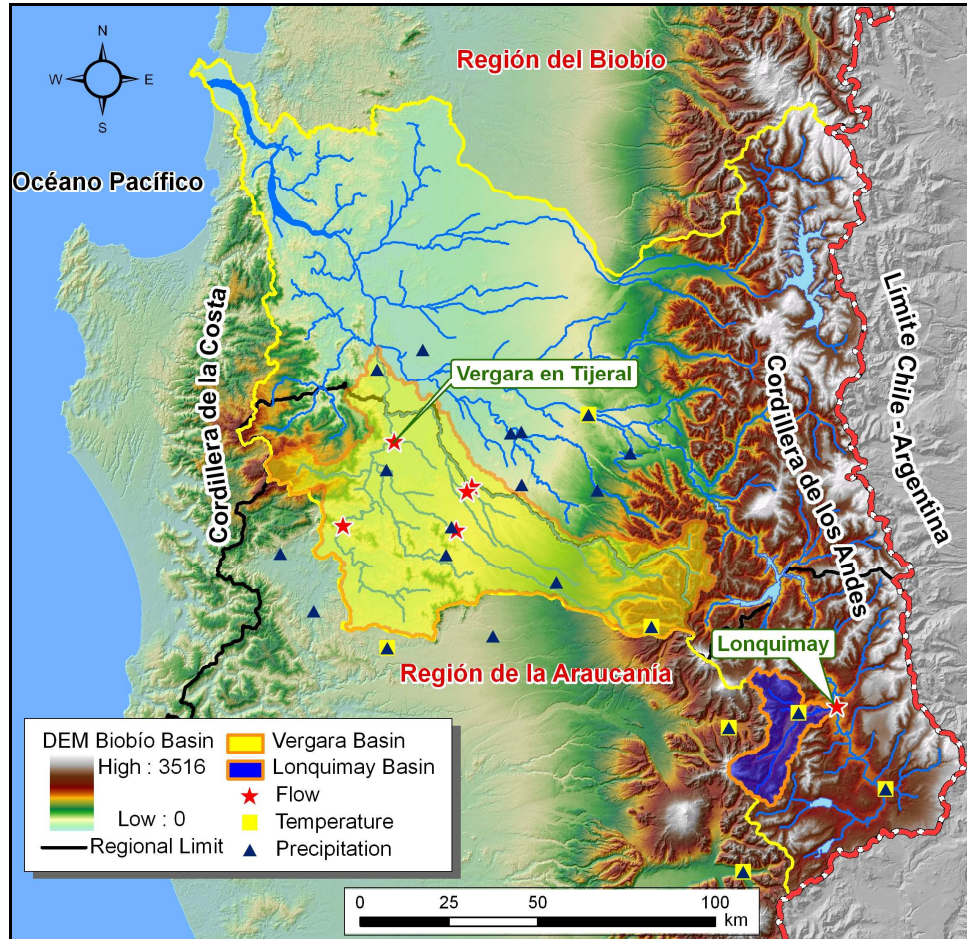
#### 4.5- METODOLOGIA

El desarrollo de esta investigación se dividió en cuatro etapas:

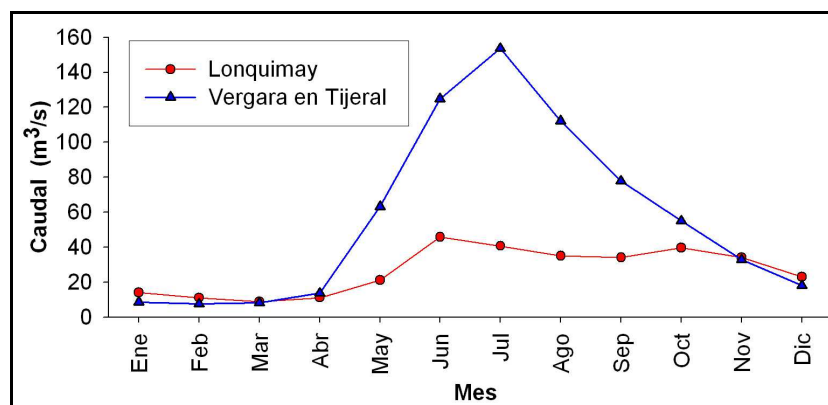
- Calibración y validación un modelo hidrológico para la cuenca en estudio, utilizando condiciones meteorológicas actuales y caudales observados.
- Generación de escenarios climáticos para la zona de estudio.
- Simulación de las características hidrológicas de la cuenca utilizando las series climáticas perturbadas (escenarios) y el modelo hidrológico calibrado.



- Comparación de la hidrología actual en cada una de las cuencas con la obtenida de la aplicación de los escenarios de cambio climático



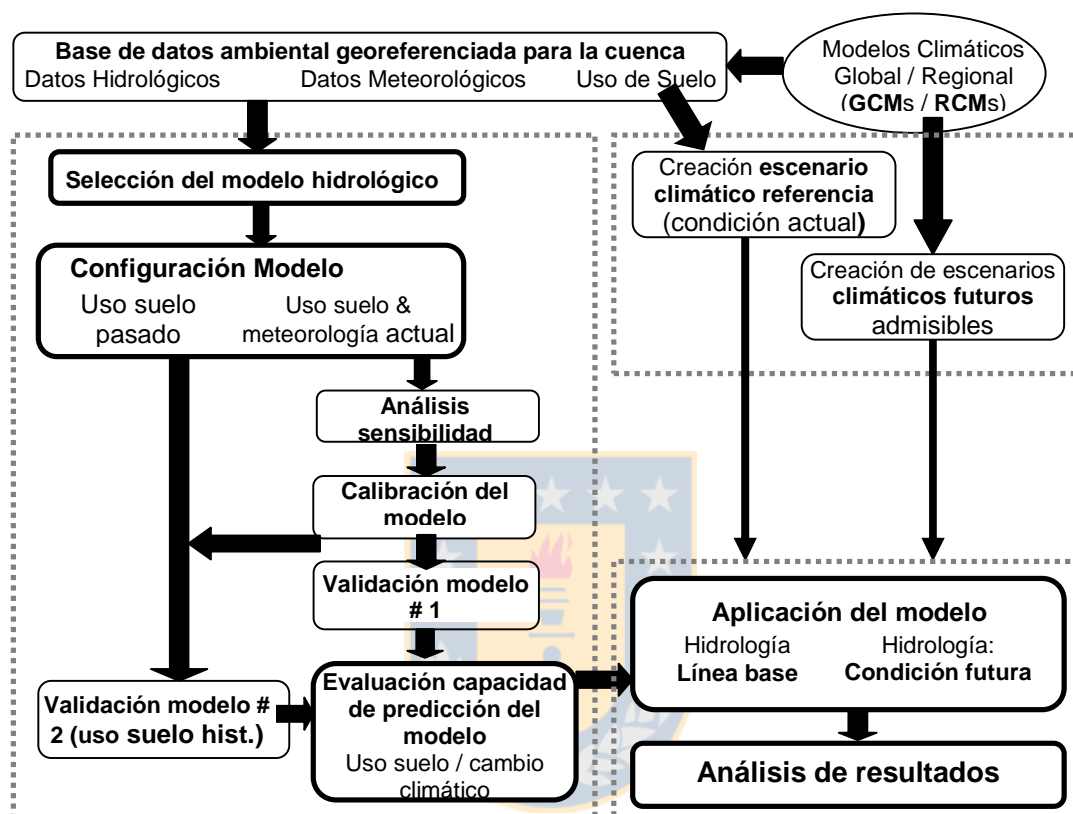
**Fig. 4.2** Ubicación de las cuencas del Río Vergara, Río Lonquimay y estaciones meteorológicas y fluviométricas utilizadas.



**Fig. 4.3** Caudales medios mensuales para las cuencas del Río Vergara en Tijeral y Río Lonquimay.



La Fig. 4.4 muestra como se entrelazan cada una de estas etapas, en las próximas secciones se explicará en forma breve las componentes más importantes de las etapas uno y dos antes mencionadas como son el modelo SWAT utilizado para la modelación hidrológica, y como fueron creados los distintos escenarios de cambio climático. Después de ello se presentan los resultados de las etapas tres y cuatro.



**Fig. 4.4** Esquema de desarrollo (marco genérico) e interrelación utilizado para la modelación hidrológica, adaptado de Debels *et al.*, (2007).

#### 4.5.1- El modelo SWAT

Para realizar la modelación hidrológica en las dos sub-cuencas seleccionadas se utilizó el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool), el cual es un modelo hidrológico y de calidad de agua espacialmente distribuido y físicamente basado, diseñado para calcular y transportar agua, sedimentos y contaminantes desde unidades individuales de drenaje (sub-cuencas) hasta la salida de la cuenca. SWAT (Arnold *et al.*, 1998; Di Luzio *et al.*, 2002) se desarrolló en los años 1990 en el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA). Debido a su flexibilidad SWAT ha sido utilizado en muchas partes del mundo (EEUU, Europa, India, Nueva Zelandia, etc; (Abu El-Nasr *et al.*, 2005; Eckhardt 2005; Gosain *et al.*, 2005; Govender & Everson 2005; Cao *et al.*, 2006; Tripathi *et al.*, 2006)). En SWAT la hidrología de la cuenca se divide conceptualmente en dos grandes fases: la fase terrestre del ciclo hidrológico y la fase de propagación.

La contribución al caudal del cauce principal de cada una de las sub-cuencas es controlado por la fase terrestre, mientras que la fase de propagación determina el movimiento del agua a través de la red hídrica hasta los distintos puntos de control (puntos donde se tienen caudales medidos) y la salida de la cuenca. Una completa descripción del modelo SWAT puede ser encontrada en Neitsch *et al.* (2002).

Este modelo permite la incorporación de factores de cambio en las precipitaciones y temperaturas, facilitando de esta forma las simulaciones de escenarios climáticos futuros. Para lo anterior se encuentra implementada una sencilla metodología mediante la cual se ajusta toda la serie de precipitaciones y temperaturas utilizadas como escenario base.

$$P_{\text{día}} = P_{\text{día}} * \left( 1 + \frac{\text{ajuste}_{\text{pcp}}}{100} \right) \quad (4.1)$$

Donde  $P_{\text{día}}$  es la precipitación que cae sobre la sub-cuenca para un día determinado y  $\text{ajuste}_{\text{pcp}}$  es el porcentaje de cambio estimado en la precipitación.

$$T_{\text{max}} = T_{\text{max}} + \text{ajuste}_{\text{tmp}} \quad T_{\text{min}} = T_{\text{min}} + \text{ajuste}_{\text{tmp}} \quad (4.2)$$

Donde  $T_{\text{max}}$  es la temperatura máxima diaria,  $T_{\text{min}}$  es la temperatura mínima diaria y  $\text{ajuste}_{\text{tmp}}$  es el cambio estimado para temperatura. Los términos de ajuste se pueden variar mes a mes, con la finalidad de poder simular variaciones estacionales de las condiciones climáticas.

#### 4.5.2- Escenarios de cambio climático

MAGICC/SCENGEN (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change/Scenario Generator) es uno de los generadores de escenarios climáticos más ampliamente utilizados, es un software amigable que toma los escenarios de emisiones para gases invernadero, aerosoles y dióxido de sulfuro como input y entrega como salida temperaturas globales medias, aumento del nivel del mar y clima regional. La reciente versión 4.1 (Wigley 2003<sup>a</sup>, Wigley 2003<sup>b</sup>) actualiza la versión 2.4 de MAGICC/SCENGEN (Hulme *et al.*, 2000; Wigley *et al.*, 2000) utilizada por el tercer informe de evaluación IPCC y maneja todos los escenarios de emisión SRES y entre otras mejoras permite investigar los cambios en variabilidad y hacer proyecciones probabilísticas. SCENGEN es un algoritmo de regionalización que utiliza un método de escalamiento para entregar salidas de clima e información de cambios interpolados a una grilla de 5° x 5°. Estos resultados regionales están basados en las salidas de 17 Modelos de Circulación Global-Océano atmósfera (GCM-OA) los cuales se pueden utilizar por separado o en forma combinada.

MAGICC/SCENGEN consta de dos módulos diferenciados. Por una parte de un modelo climático simple que emula el comportamiento de los modelos 3D (Harvey et al., 1997). Estos modelos entregan valores de temperatura media global en superficie y la implicancia de ésta en el nivel medio de la superficie del mar para unas ciertas emisiones de gases de efecto invernadero y de dióxido de azufre. La segunda componente es fundamentalmente una base de datos que contiene los resultados de un gran número de experimentos con GCM-OA, así como datos correspondientes al clima en un periodo de referencia para poder expresar las proyecciones climáticas en forma de cambios con respecto al periodo de referencia. Los diferentes campos en la base de datos esencialmente almacenan patrones normalizados que se modifican con los valores globales del modelo climático simple. El modelo climático simple en el caso de MAGICC se trata de un modelo acoplado de ciclo de gases, temperatura global media y nivel del mar global medio.

Para la generación de escenarios climáticos dentro de nuestro estudio se utilizaron siete GCM incorporados en MAGICC/SCENGEN<sup>5</sup>, considerando gases invernadero y aerosoles y seis escenarios marcadores (SRES; A1FI, A1T, A1B, A2, B2, B1<sup>6</sup>) (IPCC 2001), obteniéndose un total de 42 escenarios. Se modelaron los cambios para dos ventanas de tiempo de 30 años centradas en 2085 y 2050 respectivamente, considerando escenarios de cambio anual y mensual. Para correr el modelo SWAT perturbado con los cambios entregados se asume que la distribución espacial y temporal de las precipitaciones permanece constante cambiando solamente el valor. La línea base se tomó del RCM CONAMA – DGF (1961 – 1990) ya que coincide con el periodo base considerado por MAGICC para las series GCM de temperatura (1961 -1990) pero difiere del utilizado en el caso de precipitaciones (1981 – 2000). Esta línea base fue escogida para poder comparar las diferencias en los resultados obtenidos al perturbar un modelo hidrológico con variaciones provenientes de GCM versus las series obtenidas de un RCM local.

### ***Estudio de Variabilidad Climática CONAMA-DGF***

Del Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI CONAMA-DGF (2006) se pueden extraer las predicciones sobre cambios esperados en las precipitaciones y temperaturas para fines del siglo XXI para la zona que abarca el área de estudio. Para ello se utilizó primeramente un modelo de gran escala (HadCM3, resolución media 300 x 300 km) para forzar indirectamente simulaciones regionales. El modelo atmosférico que es forzado en superficie con las salidas del modelo antes mencionado es el HadAM3, el cual tiene características muy similares al anterior pero con mayor resolución, éste a su vez forzó las simulaciones

---

<sup>5</sup> HADCM3 (UK Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Europe), ECHAM4.5 (German Climate Research Centre, Germany), GFDL (US Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, USA), CCSR/NIES (Centre for Climate Systems Research, University of Tokyo, Japan), CCCMa (Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis), NCAR/PCM (National Center for Atmospheric Research, USA) y CSIRO (Commonwealth Scientific and Ind. Research Organization, Australia).

<sup>6</sup> Ver el Anexo 1 donde se explican cada uno de estos escenarios de emisiones.

regionales generadas con el modelo PRECIS, con una resolución espacial de 25 km. Las distintas variables de salidas de este modelo (ej. temperatura media, máxima y mínima, y precipitación) se encuentran disponibles para cada uno de los puntos de la grilla del dominio geográfico (18°S – 57°S y 62°O – 85°O). Así, para cada punto de grilla y variable, se tienen tres series diarias de 30 años: una del clima actual y 2 del clima futuro en el período 2070-2100 (escenarios marcadores A2 y B2).

## 4.5- RESULTADOS Y ANALISIS

### 4.5.1- Calibración y Validación del modelo SWAT para las cuencas en estudio

Para la modelación se utilizó el modelo de elevación digital SRTM DEM, versión final de resolución 90 m. En el caso del uso y tipos de suelo se recurrió a información nacional disponible. Los datos meteorológicos (precipitaciones y temperaturas) se obtuvieron del Banco Nacional de Aguas perteneciente a la Dirección General de Aguas de Chile. Mayor descripción de los datos utilizados puede ser encontrada en (Stehr, *et al.*, en prensa, Stehr *et al.*, enviada).

Para ambas cuencas antes de efectuar la calibración de caudales, se realizó un análisis de sensibilidad (Van Griensven *et al.*, 2006), para así seleccionar los parámetros a calibrar. Para la calibración se aplicó el procedimiento automático PARASOL (*Parameter Solution Method*; Van Griensven & Bauwens, 2003), implementado en SWAT2005.

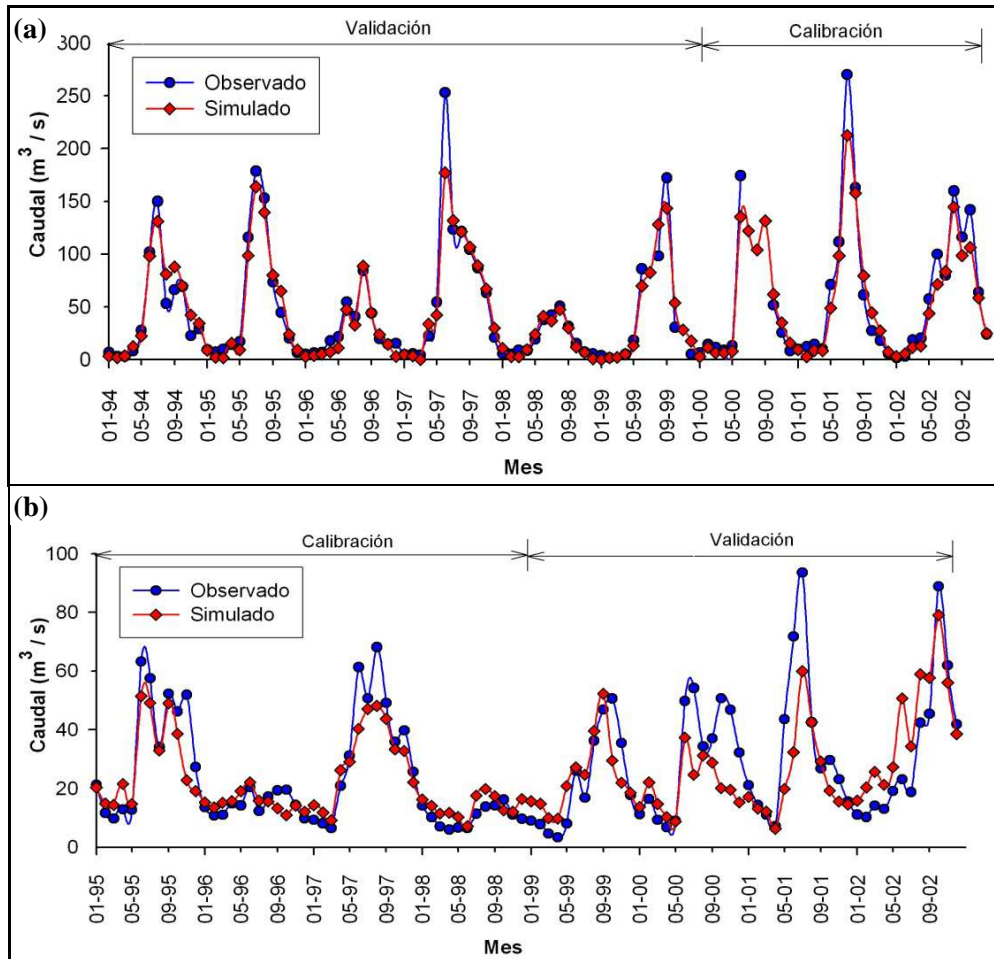
**Tabla 4.1** Indicadores estadísticos para las etapas de calibración y validación para las cuencas de los Ríos Vergara y Lonquimay.

	Vergara*		Lonquimay	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación
EF	0.93	0.93	0.81	0.56
PBIAS	11.78	2.77	4.88	7.86
R <sup>2</sup>	0.96	0.93	0.87	0.57

\*Estos parámetros corresponde a los obtenidos en la estación DGA Vergara en Tijeral.

La calibración y validación fueron realizadas a nivel mensual y para evaluar el comportamiento del modelo se utilizaron tres distintos indicadores estadísticos (eficiencia de Nash-Stucliffe (EF), PBIAS y R<sup>2</sup>) y concordancia entre las gráficas de caudales observados versus modelados. El modelo se considera tiene un mejor comportamiento mientras EF y R<sup>2</sup> más cercanos a 1 se encuentren, PBIAS más cercano a 0 y la gráfica indique una buena correspondencia entre los caudales modelados y observados. Los resultados indican una buena performance del modelo para ambas cuencas (Tabla 4.1) durante calibración, y durante la etapa de

validación ésta es satisfactoria para Lonquimay y buena para Vergara. Asimismo del gráfico (Fig. 4.5), se puede apreciar que existe una buena concordancia entre los caudales observados y modelados, siendo la excepción algunos caudales altos.

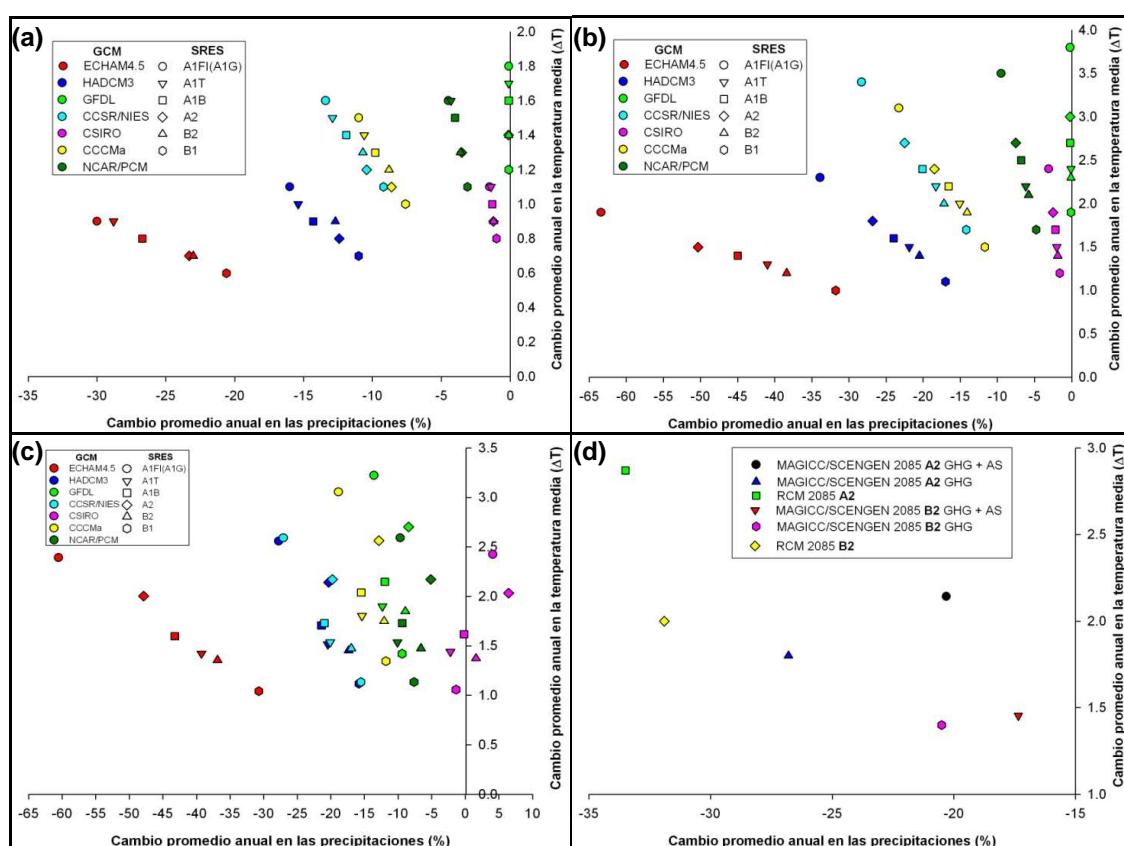


**Fig. 4.5** Calibración y validación (resultados mensuales) para (a) Cuenca del Río Vergara (b) Cuenca del Río Lonquimay

#### 4.5.2- Resultados de la generación de escenarios

Las Fig. 4.6 muestra los resultados obtenidos (variaciones anuales) de la aplicación de MAGICC/SCENGEN, tanto para el periodo centrado en 2050 (Fig. 4.6a) como para el centrado en 2085 (Fig. 4.6b y 4.6c). Los resultados regionalizados muestran que para el área de interés ( $35^{\circ}$ - $40^{\circ}$  S,  $70^{\circ}$ - $75^{\circ}$ O) el modelo pronostica para los seis escenarios marcadores SRES combinados con los 7 GCM, con respecto al período de referencia un incremento en las temperaturas y una disminución en las precipitaciones, difiriendo eso sí considerablemente las magnitudes de cambio entre los distintos escenarios generados a partir de distintos GCM, pero no así la variación inter SRES para cada GCM. Con las series de datos obtenidas del

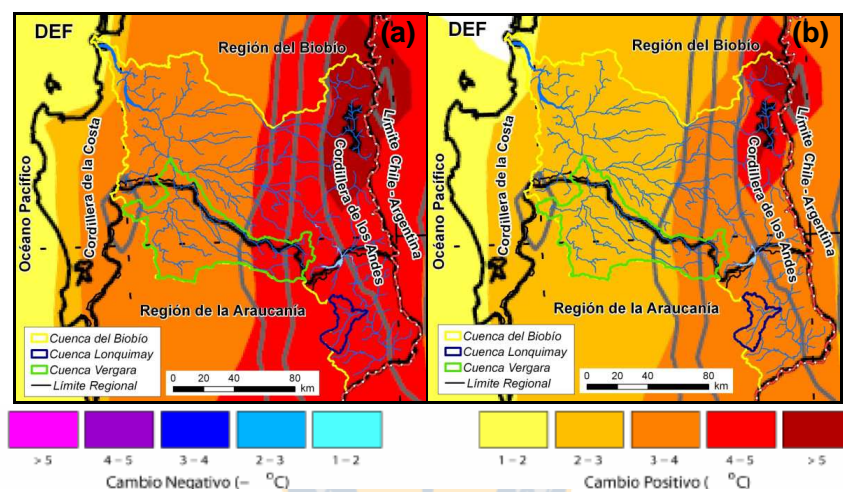
RCM CONAMA- DGF (2006) se estimó la variación promedio anual de cambio para un periodo de 30 años (2071-2100), tanto para las precipitaciones (% variación) y las temperaturas (delta de cambio), con la finalidad de comparar si la magnitud de los cambio predichos tiene correspondencia con lo estimado por MAGICC/SCENGEN (Fig. 4.6d). Se aprecia que los cambios que pronostica el RCM para Chile son mayores que los cambios predichos por MAGICC/SCENGEN, tanto para el escenario A2 y B2 considerando el mismo GCM de partida, pero todos se ubican en el segundo cuadrante (-/+), encontrándose dentro de la envolvente formada por los 42 escenarios (7GCM\*6SRES). Por otro lado se observa que para todos los casos gran parte de los escenarios predice mayores disminuciones de precipitación que las esperadas por Hulme y Sheard (1999) (4 -12% hasta 2050 y 6-18% hasta el 2080 (escenarios B1 bajo A1 alto))



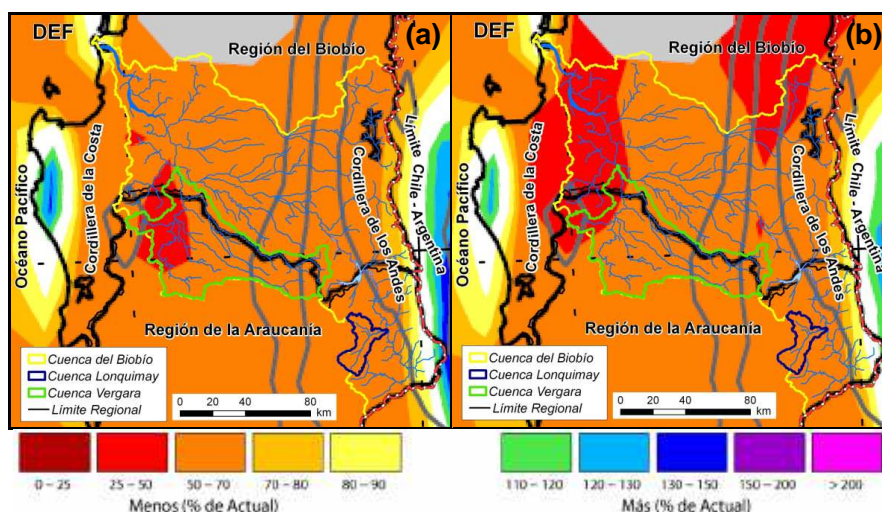
**Fig. 4.6** Salidas regionalizadas (temperatura y precipitación media anual (35°-40° S, 70°-75°O) para 6 escenarios marcadores y los diferentes GCM (MAGICC/SCENGEN v4.1). a) Ventana centrada en 2050 sólo gases invernadero. b) Ventana centrada en 2085 sólo gases invernadero. c) Ventana centrada en 2085 gases invernadero + aerosoles. d) Comparación de la variación de temperatura y precipitación media anual a partir del RCM realizado por CONAMA- DGF y escenarios generados con MAGICC/SCENGEN v4.1 modelo de circulación global HADCM3, periodo 2071-2100 (sector cuenca del Río Vergara).



Del Estudio de Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI (CONAMA-DGF 2006) para el periodo comprendido entre 2071 – 2100 (fines del siglo XXI) se aprecia que en el caso de las temperaturas existe una tendencia al alza en todos los sectores de la cuenca del Biobío. Para el caso de las temperaturas medias en el caso del escenario A2 se puede observar que la variación es menor en la zona costera y va aumentando hacia la cordillera. Estacionalmente el calentamiento es mayor en verano (Fig. 4.7) excediendo los 5°C en algunos sectores cordilleranos. Para el escenario B2, se pueden observar las mismas tendencias anteriores, pero más moderadas, por ejemplo en verano se estima un aumento en la temperatura media de entre 3 y 4°C para la zona cordillerana.



**Fig. 4.7** Diferencias de temperaturas media diaria (futuro – presente) promedio para los meses de diciembre, enero y febrero, periodo 2071 – 2100. (a) escenario A2 y (b) escenario B2 (Fuente CONAMA-DGF (2006)).



**Fig. 4.8** Diferencias de precipitación estacional (promedio meses diciembre, enero y febrero), periodo 2071 – 2100. (a) escenario A2 y (b) escenario B2 (Fuente CONAMA-DGF (2006)).



Los cambios esperados en el caso de las temperaturas máximas y mínimas en la zona de la cuenca del Biobío, son similares a los antes mencionados, siendo los cambios en las temperaturas máximas mayores a los de las temperaturas mínimas. En el caso de las precipitaciones para este mismo periodo, se puede apreciar una disminución mayor en la costa que en la cordillera. En el caso del escenario A2 (Fig. 4.8a), la mayor disminución de precipitaciones se espera ocurra en primavera, donde en un sector de la cuenca se pronostica llueva entre 25 – 50% de lo que llueve actualmente. Para el caso de B2 (Fig. 4.8b), las mayores disminuciones se esperan en el sector costero y especialmente para los meses de verano. Cabe destacar que el escenario A2 presenta en promedio mayores disminuciones que B2. En el caso de las dos sub-cuencas seleccionadas dentro de la cuenca del Biobío, se estima un aumento de las temperaturas medias y una disminución de las precipitaciones (Tabla 4.2), siendo estos cambios mayores en los meses de primavera y verano que en los de otoño e invierno.

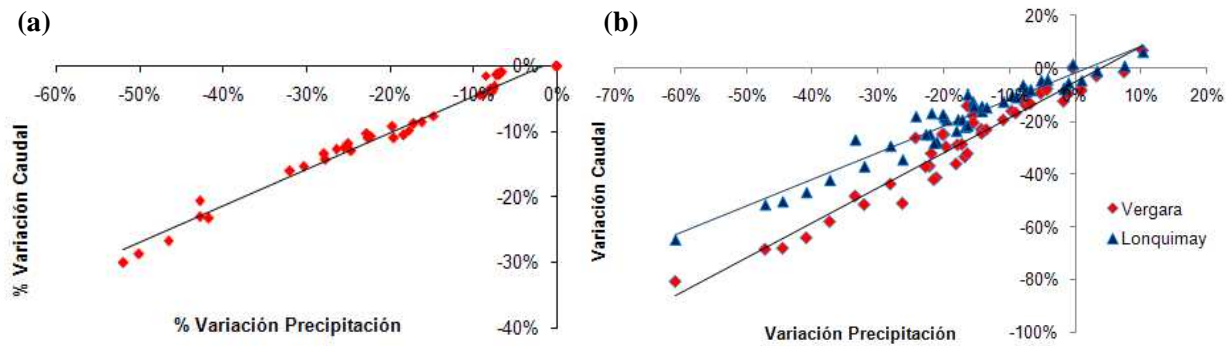
**Tabla 4.2** Cambios mensuales y anuales esperados en las temperaturas medias y precipitaciones para las cuencas de los Ríos Vergara y Lonquimay (2071 – 2100), datos Estudio variabilidad Climática (CONAMA-DGF (2006))

	Vergara				Lonquimay			
	A2		B2		A2		B2	
	%ΔPP	ΔT	%ΔPP	ΔT	%ΔPP	ΔT	%ΔPP	ΔT
Enero	-58.0	3.9	-56.3	2.7	-66.1	4.7	-58.9	3.3
Febrero	-67.6	3.4	-63.9	2.7	-52.8	4.5	-52.8	3.6
Marzo	-12.3	3.9	-17.6	2.7	-2.4	4.3	-15.2	3.0
Abril	-26.0	3.8	-24.7	2.9	-27.8	4.4	-27.8	3.3
Mayo	-29.9	2.9	-25.2	2.0	-29.4	3.0	-20.2	2.0
Junio	-30.4	2.0	-19.1	1.2	-27.6	2.2	-17.8	1.5
Julio	-34.8	2.0	-27.6	1.1	-25.3	2.8	-16.9	1.4
Agosto	-28.7	2.3	-20.7	1.9	-18.9	3.2	-14.5	2.4
Septiembre	-23.8	2.4	0.0	1.7	-17.5	3.6	7.8	2.4
Octubre	-49.7	2.1	-26.0	1.4	-40.4	3.3	-12.5	2.1
Noviembre	-51.6	2.7	-29.2	1.7	-44.8	3.3	-24.6	2.3
Diciembre	-51.3	2.9	-41.3	2.1	-48.7	3.0	-39.1	2.2
Anual	-33.5	2.9	-21.9	2.0	-27.7	3.5	-15.4	2.4

#### 4.5.3- Resultados de la modelación bajo los distintos escenarios de cambio

La Fig. 4.9 muestra que el modelo SWAT predice una relación prácticamente lineal ( $R^2 = 0.93$  en ambas cuencas) entre el cambio promedio anual de los caudales y las precipitaciones para el periodo

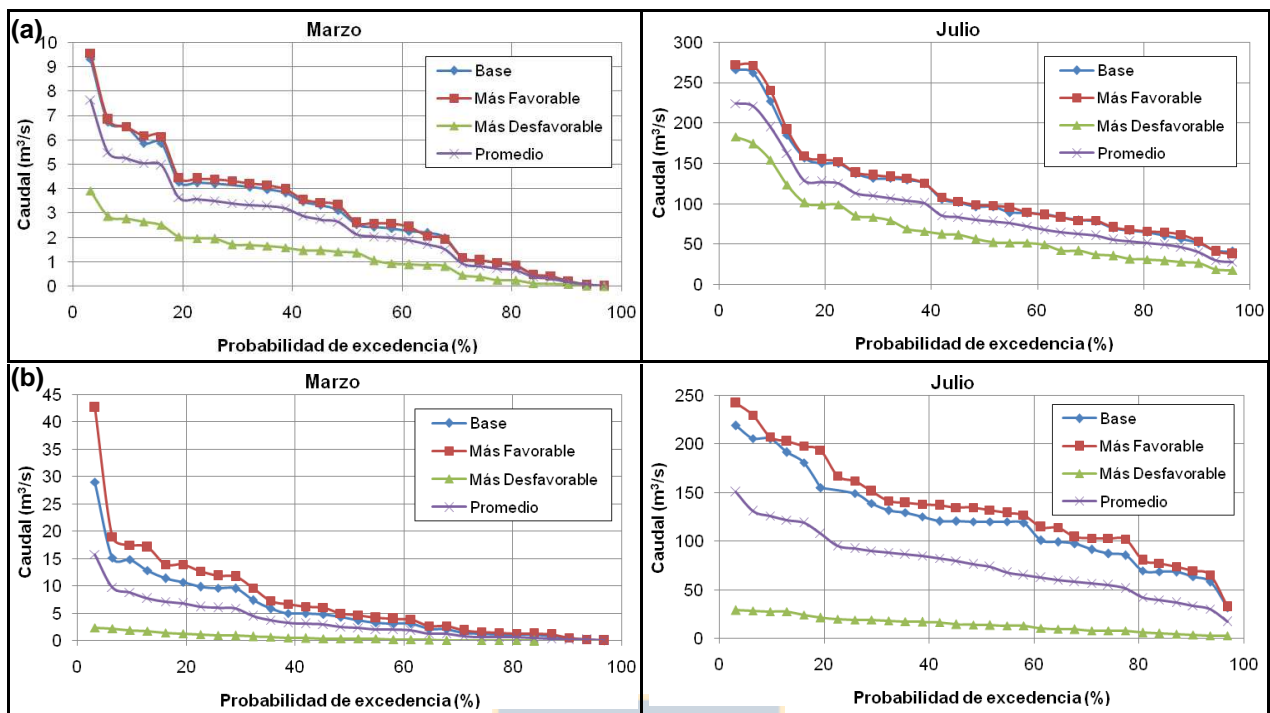
modelado de 30 años. Se puede ver que para la cuenca del Río Vergara un cambio en el porcentaje promedio de las precipitaciones anuales produce un mayor cambio que en la cuenca del Río Lonquimay. Este es un resultado esperado considerando la metodología del factor de cambio utilizada para la generación de los escenarios en combinación con la configuración actual del modelo hidrológico.



**Fig.4.9** Variación promedio anual de precipitación versus caudal para las cuencas de Lonquimay (azul) y Vergara (rojo). (a) Escenarios centrados en 2050 considerando solo gases invernadero (b) Escenarios centrados en 2085 considerando gases invernadero y aerosoles

Si por otro lado se comparan las envolventes de las curvas de duración (Fig. 4.10), que tiene como límite superior el escenario que entrega el caudal modelado más alto (situación más favorable) y como límite inferior el escenario que entrega el caudal modelado más bajo (situación más desfavorable) dentro de todos los escenarios modelados (44), se puede apreciar que en el caso de los escenarios generados considerando gases invernadero y aerosoles la situación más desfavorable es más crítica que en el caso de haber considerado sólo gases invernadero para la generación de éstos.

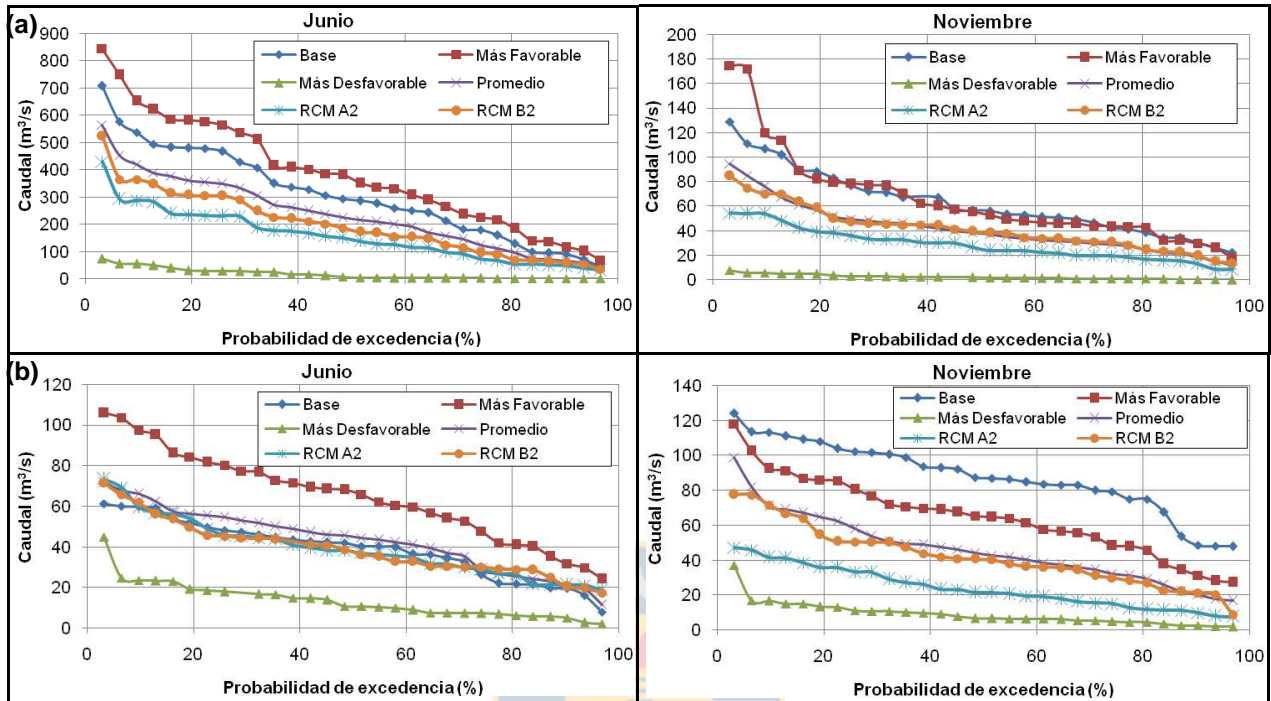
Al comparar ambas cuencas utilizando los mismos porcentajes de variación para generar los escenarios (Fig. 4.11), se aprecia que para el mes de junio en la cuenca del Río Vergara, hay una clara diferencia entre la envolvente de las curvas de duración de los caudales obtenidos a partir del escenario RCM A2 y B2 y el caudal base, no produciéndose esto en Lonquimay donde las curvas de duraciones generadas para los caudales obtenidos a partir del escenario RCM A2 y B2 y base son prácticamente coincidentes. Lo anterior no se manifiesta para el mes de noviembre como se puede apreciar en la Fig. 4.11. En junio incluso para ambas cuencas se pronostica un posible aumento de los caudales, lo cual no sucede en noviembre, donde todos los escenarios indican disminución de caudales, especialmente en la cuenca de Lonquimay, donde esta disminución es mayor, debido a la disminución de la cantidad de nieve derretida, como se muestra en la Fig. 4.15.



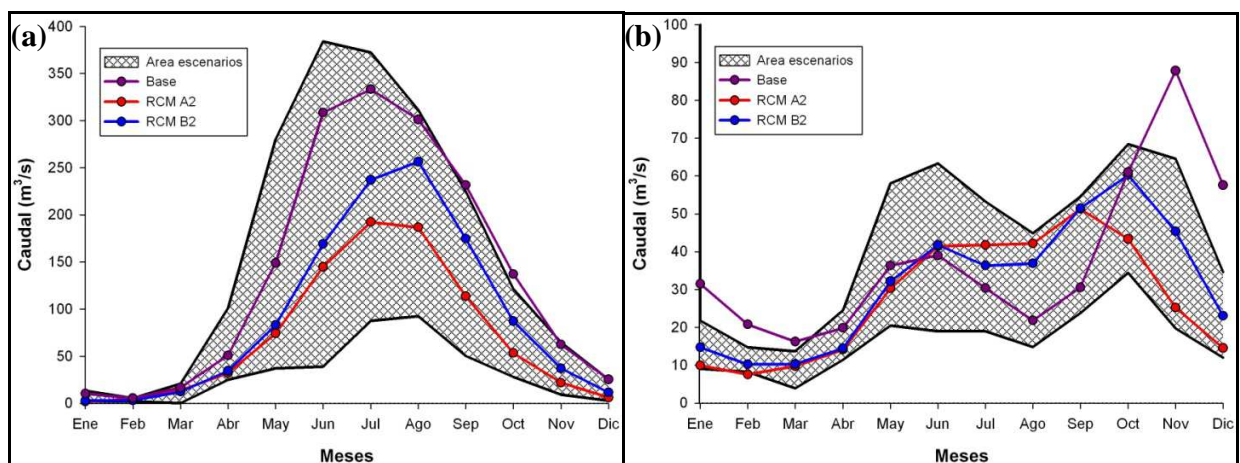
**Fig. 4.10** Curva de duración de caudales base y de los escenarios generados por MAGICC/ SCENGEM: caudal promedio de todos los escenarios modelados, situación más favorable y situación más desfavorable en la estación Vergara en Tijeral para los meses de marzo y julio. (a) Escenarios centrados en 2050; los escenarios fueron generados solo considerando gases invernadero. (b) escenarios centrados en 2085; generados considerando gases invernadero y aerosoles.

En el caso de los promedios mensuales de caudales sobre el periodo de estudio (Fig. 4.12), en la cuenca Vergara, los caudales base caen dentro de la envolvente producida por los escenarios obtenidos de MAGICC, esto se debe a que hay 3 escenarios que predicen un aumento en las precipitaciones con respecto a la situación base. Se aprecia que los escenarios obtenidos del RCM caen dentro de esta envolvente, pero indican una disminución de los caudales promedio mensual para todos los meses. En el caso de la cuenca Lonquimay, se puede apreciar una disminución con respecto al escenario base durante los meses de primavera y verano en todos los escenarios, lo cual tiene estrecha relación con la disminución que se presenta en la cantidad de nieve caída durante el invierno (Fig. 4.13a y Fig. 4.14), que en todos los escenarios disminuyen, ya sean aumenten o disminuyan las precipitaciones. En la Fig. 4.14 se muestra la cantidad de nieve promedio (equivalente en agua mm) que cae bajo las condiciones actuales para el mes de julio, en cada una de las subcuencas consideradas en la modelación, y en cómo esta varía en el caso más favorable y desfavorable de los escenarios. Se advierte que la menor disminución predicha se mueve entre 62 a 150 mm y en el peor de los escenarios 250 – 410 mm. Esto hace que el caudal máximo debido al derretimiento decrezca y se adelante, en uno o dos meses dependiendo del escenario (Fig. 4.13b). Esto es de gran relevancia ya que esta cuenca está

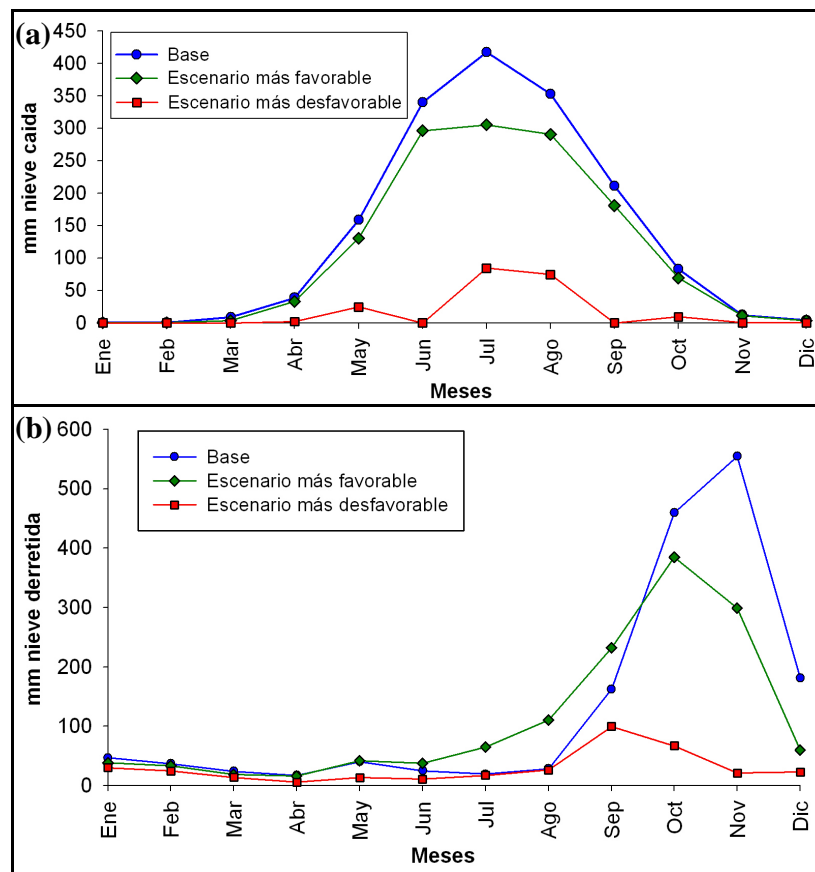
ubicada en el sector cordillerano, aguas arriba de dos importantes embalses hidroeléctricos (13% de la capacidad nacional instalada al 2007).



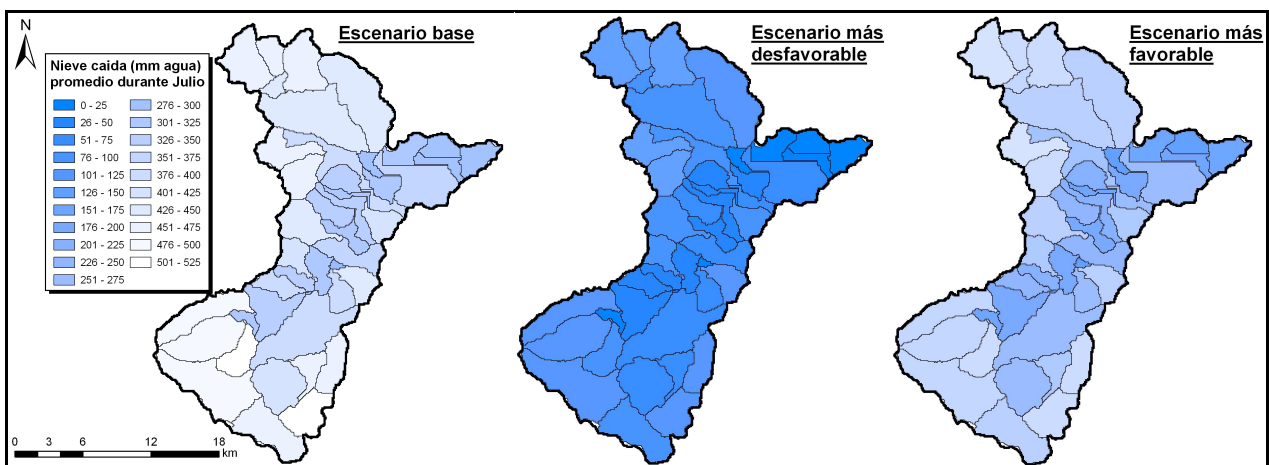
**Fig. 4.11** Curva de duración de los caudales base, de los escenarios generados por MAGICC/ SCENGEN (variaciones mensuales considerando gases invernadero y aerosoles): caudal promedio de todos los escenarios modelados, situación más favorable y situación más desfavorable y los dos escenarios del RCM para los meses de junio y noviembre. (a) Vergara (b) Lonquimay.



**Fig. 4.12** Caudales promedio mensual para los 30 años modelados, la figura muestra el caudal base, los caudales obtenidos para los escenario del RCM y la envolvente de caudales obtenidos de MAGICC/SCENGEN. (a) Vergara (b) Lonquimay



**Fig. 4.13** Promedios mensuales para los 30 años modelados en la cuenca del río Lonquimay. (a) Diferencias en la cantidad de nieve caída promedio en los distintos meses del año en la cuenca del río Lonquimay. (b) Diferencias en la cantidad de nieve derretida promedio en los distintos meses del año en la cuenca del río Lonquimay.

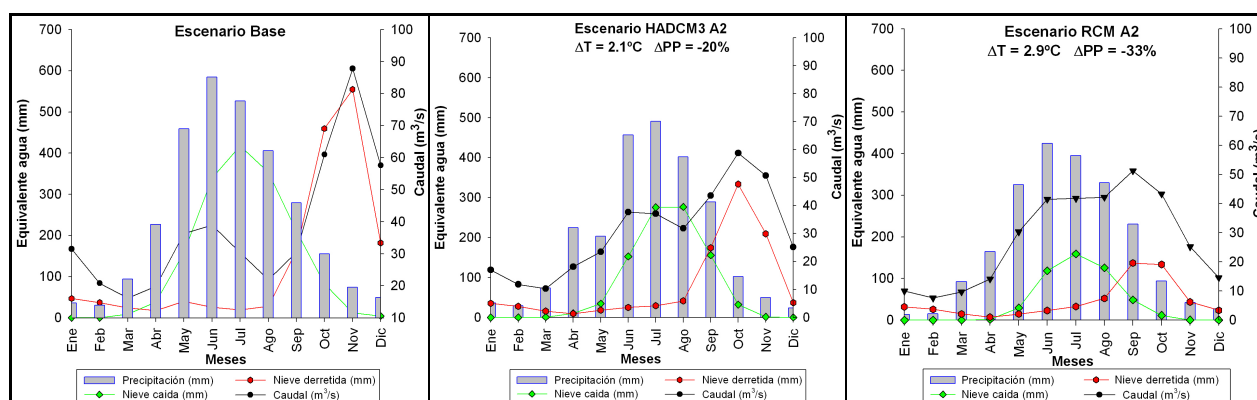


**Fig. 4.14** Cantidad de nieve caída durante julio (mm) en la distintas sub-cuenca de Lonquimay, escenario base, escenario más favorable y desfavorable.



**Tabla 4.3** Razón entre precipitación y nieve durante los meses fríos, escenario actual, escenario más favorable y desfavorable.

Mes	Base	Favorable	Desfavorable
Mayo	2.89	5.76	7.24
Junio	1.72	2.27	1.87
Julio	1.26	1.86	2.28
Agosto	1.15	1.62	1.82



**Fig. 4.15** Promedios mensuales para los 30 años modelados, caudal, precipitación, nieve caída y derretida para (a) Escenario base (b) Escenario generados por MAGICC, centrado en 2085; generados considerando gases invernadero y aerosoles (c) Escenario obtenido de los resultados del RCM CONAMA-DGF (2006).

## 4.6- DISCUSION Y CONCLUSION

Los resultados actualmente disponibles con respecto a los impactos hidrológicos producidos por los diversos escenarios de cambio climático, obtenidos a partir de la aplicación del modelo SWAT calibrado y validado previamente, a las cuencas del Vergara y Lonquimay indican una amplia gama de impactos potenciales en términos de reducción en la magnitud de los caudales medios mensuales y anuales. El promedio de caudales obtenidos de SWAT al modelar con los 44 escenarios de cambio climático considerados en este trabajo indican una reducción promedio 28% (rango -81% a 7%; 42 escenarios indican reducción, 1 escenario indica ningún cambio y 1 escenarios indica aumento) de los caudales medios anuales para la cuenca del Vergara, mientras que para la cuenca del Lonquimay esta reducción promedio es de 19% (rango -65% a 6%; 41 escenarios indican reducción y 3 escenarios indica aumento). Siendo esta variación mayor en las épocas de primavera y verano especialmente en la cuenca del Lonquimay. Este rango de diferencias en las salidas del modelo hidrológico es una consecuencia de la incertidumbre existente actualmente con respecto a

la respuesta del clima a determinados escenarios de emisiones, así como la incertidumbre en las futuras emisiones. Esto se refleja en la gran diversidad de GCMs y de escenarios de emisiones existentes, lo que produce una divergencias / convergencias en las salidas de los distintos modelos para las distintas regiones del mundo (Ruosteenoja *et al.*, 2003), así como a nivel regional/local, según lo expresado con el uso de 44 escenarios climáticos (42 obtenidos de MAGICC/SCENGEN y 2 del RCM CONAM-DGF).

La hidrología de la cuenca del río Vergara según lo modelado a través de SWAT parece ser muy sensible a los cambios en la precipitación, y la reducción porcentual de los caudales es típicamente más alta que la reducción porcentual correspondiente de precipitación. En cuanto a la cuenca de Lonquimay se refiere, esta cuenca es altamente sensible al cambio en las precipitaciones y las temperaturas, ya que al elevarse éstas se deposita menos nieve y se corrobora lo expresado por Gleick (1986), Chalecki (1999) y López-Moreno & Nogués-Bravo (2005) quienes mencionan que se producirá un aumento en la razón entre lluvia y nieve durante los meses de invierno, además de una disminución de la temporada con nieve y el caudal medio mensual máximo se adelantará con respecto a lo que sucede actualmente, en nuestro caso se estima que éste se puede adelantar hasta en dos mes dependiendo del escenario utilizado, de noviembre a septiembre (Fig. 4.15).

La diferencia en los resultados obtenidos para los diferentes escenarios simulados basados en GCM se puede explicar por la metodología utilizada, ej. cambio uniforme a nivel mensual en temperatura y precipitaciones y de las limitaciones intrínsecas de los modelos de GCM. Por lo tanto, los valores obtenidos de las simulaciones realizadas en este estudio dan un orden de la magnitud de cambios plausibles, una banda dentro de los cuales podrían moverse los futuros cambios. La incertidumbre en los resultados se debe en parte a la incertidumbre del modelo hidrológico utilizado, más las incertidumbres de los modelos climáticos GCM.

Como ya fue mencionado arriba, además de las muchas incertidumbres en los GCM, las incertidumbres en los escenarios climáticos pueden también causar desviaciones en las predicciones (Giorgi *et al.*, 2001; Mearns *et al.*, 2003), por que se aconseja utilizar técnicas downscaling y RCMs (Ackerman *et al.*, 1998). Según lo expresado por Nurmohamed *et al.* (2007) los escenarios climáticos regionales futuros, pueden ser utilizados para estudiar los impactos "verdaderos" que produciría el cambio climático sobre las descarga de los ríos, pero al observar los resultados obtenidos dentro de esta investigación podemos apreciar que los escenarios obtenidos a partir de los resultados de un RCM para la zona los cuales indican una disminución promedio del caudal medio anual de 48% (A2) y 32% (B2) para la cuenca del Vergara y para la cuenca del Lonquimay una disminución promedio del caudal medio anual de 27% (A2) y 17% (B2) , quedando estos valores dentro de la envolvente de los otros 42 escenarios generados (rango Vergara -81% a 7% y rango Lonquimay -65% a 7%) a partir de GCM utilizando MAGICC/SCENGEN (Fig. 4.12). Analizando los cambios pronosticados en el caudal medio mensual para dos meses del año uno representativo de los meses de



invierno y otro de los de verano, se tiene que para el mes de agosto en la cuenca del Vergara se obtiene del RCM una disminución del caudal de 38% (SRES A2) y 15% (SRES B2) (rango: -85% a 3%), mientras que en la cuenca de Lonquimay éste aumentaría en 93% (SRES A2) y 69% (SRES B2) (rango: -47% a 105%). Para el mes diciembre en cambio se obtiene una disminución del promedio del caudal medio mensual para ambas cuencas; Vergara 76% (SRES A2) y 55% (SRES B2) (rango: -98% a -1%) y Lonquimay 75% (SRES A2) y 60% (SRES B2) (rango: -80% a -40%). Considerando la incertidumbre involucrada en cada uno de estos modelos, nosotros creemos que es más beneficioso contar con un rango de posibles cambios que dos puntos aislados. No hay que también perder de vista el gran costo que conlleva la elaboración de modelos climáticos regionales versus la utilización de MAGICC/SCENGEN el que es de libre acceso (sin costo), lo cual en el caso Chileno (país en vías de desarrollo) es de gran importancia, ya que los recursos son escasos y se deben utilizar eficientemente.

La incertidumbre en los resultado puede ser disminuida en cierta medida al mejorar la calidad de las salidas del modelo utilizado (SWAT), una forma de realizar esto es mejorando la calidad de la información ingresada al modelo, por ejemplo, en el caso de la cuenca de Lonquimay que está ubicada en la parte superior de la cuenca del Biobío, es urgente la instalación de estaciones ubicadas a una altura mayor de los 2000 msnm que midan tanto las precipitaciones líquidas, como sólidas, así como la densidad y altura del paquete de nieve y otras variables meteorológicas (viento, radiación, temperatura, etc.). Lo anterior adquiere aun más relevancia si se considera que es del agua proveniente de la parte alta de la cuenca desde donde se abastecen los embalses de generación hidroeléctrica, por lo que contar con estimaciones futuras con menor incertidumbre ayuda a mejorar la gestión de éstos y generar posibilidades de adaptación. Por otro lado realizando una adecuada gestión es posible evitar futuros conflictos entre los distintos usuarios de la cuenca (ej. hidroeléctrica vs riego).

El uso de escenarios relativamente plausibles de cambio climático indica que una reducción considerable en los caudales medios mensuales no puede ser excluida dentro de las posibilidades para el futuro, y bajo tales condiciones se requerirán medidas de adaptación. La disminución de caudales puede también impactar negativamente la calidad del agua, necesariamente en el caso de descargas puntuales, especialmente en el periodo de caudales de estiaje, pudiendo esto producir un deterioro del ecosistema. A pesar de que dentro de esta investigación no se realizó una evaluación precisa de los impactos ecológicos del cambio climático, se puede inferir de los resultados que una reducción en los caudales de verano puede impactar por ejemplo la cantidad de hábitat disponible para una ciertas especies de peces (García *et al.*, 2007).

Desde una perspectiva social, se puede definir la vulnerabilidad como una función de la exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación. Lo mostrado en este trabajo tiene relación con un análisis cuantitativo

del componente de exposición y la sensibilidad del sistema hidrológico. De esto, como ya se mencionó arriba, se puede realizar una evaluación cualitativa preliminar de la sensibilidad de ciertos componentes (biológicos, físicos, etc.). Una evaluación avanzada de la vulnerabilidad de la sociedad al cambio climático requiere una mejor interpretación en términos de sensibilidad por ejemplo del sistema productivo así como de la capacidad de adaptación de los distintos sectores productivos y sociales, lo cual requiere de investigaciones complementarias a ésta. Sin embargo de los resultados actualmente disponibles, ya se puede deducir, que se requerirá una cierta capacidad de adaptación de la población que habita en la cuenca con la finalidad de reducir la vulnerabilidad a niveles aceptables para la sociedad.

A pesar que sólo se modelaron 2 sub-cuencas (20% del área total) de la cuenca del Biobío, los resultados obtenidos permiten realizar una primera interpretación cualitativa de los potenciales impactos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca. Estos indican que el cambio climático puede sumarse como un factor de estrés extra dentro de la cuenca del Biobío. Cuando los impactos combinados de reducción en los caudales debido al cambio climático, con transferencia de agua a otras cuencas adyacentes, incremento en los patrones de consumo humano de agua, aumento en las actividades industriales en la cuenca y potenciales impactos de los cambios de uso del suelo dentro de esta, se contrastan contra la creciente conciencia ambiental (ej. nuevas normativas en cuanto calidad de agua para la protección de los ecosistemas), se hace claro la necesidad de tomar medidas de mitigación tales como, una racionalización del uso del agua en la cuenca y una toma de decisiones consensuada entre los distintos actores involucrados con respecto al desarrollo y futuros escenarios de uso del agua se refiere.

#### **4.7- AGRADECIMIENTOS**

La presente investigación se llevó a cabo en el marco de los proyectos TWINBAS y TWINLATIN, los cuales son cofinanciados por la Comunidad Europea a través del Sexto Programa Marco para Investigación y Desarrollo Tecnológico (Área prioritaria “Cambio Global y Ecosistemas”; Contrato N° 505287 y Contrato N° 018436). Los autores quieren su sincera gratitud a la Dirección General de Aguas Chilena (DGA), y particularmente a las personas de la DGA de la Región del Biobío, a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), así como también a todas las otras personas que colaboraron con datos que no hayan sido explícitamente mencionados anteriormente.

## 4.8- REFERENCIAS

- Abu El-Nasr, A., Arnold, J. G., Feyen, J. & Berlamont, J. (2005) Modelling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi-distributed model. *Hydrol. Processes* **19**, 573-587.
- Ackerman, S. A., Strabala, K. I., Menzel, W. P., Frey, R. A., Moeller, C. C. & Gumley, L. E. (1998) Discriminating clear sky from clouds with MODIS. *J. Geophys. Res* **103**, 32141--32157.
- Arnell, N. W. (2003) Relative effects of multi-decadal climatic variability and changes in the mean and variability of climate due to global warming: future streamflows in Britain. *J Hydrol* **270**, 19-213.
- Arnell, N.W. C. Liu, R. Compagnucci, L. da Cunha, K. Hanaki, C. Howe, G. Mailu, I. Shiklomanov and E. Stakhiv (2001) Hydrology and water resources. *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.J. McCarthy, O.F. Canziani, N.A. Leary, D.J. Dokken and K.S. White, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, 191-234.
- Arnell, N. W. & Reynard, N. S. (1996) The effects of climate change due to global warming on river flow in Great Britain. *J Hydrol* **183**, 397-424.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. & Williams, J. R. (1998) Large area hydrologic modeling and assessment - Part I: model development. *JAWRA* **34**(1), 73-89.
- Cao, W., Bowden, W. B., Davie, T. & Fenemor, A. (2006) Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrol. Processes* **20**, 1057-1073.
- CONAMA-DGF (2006). Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI, Comisión Nacional del Medio Ambiente. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias. Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Chalecki, E. L. a. P. H. G., Vol. , No. , pp. (1999) A framework of ordered climate effects on water resources: A comprehensive bibliography. *JAWRA* **35**(6), 1657-1665.
- Chiew, F.H.S. (2007) Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia. *Hydrol. Sci. J.*, **51**, 613-625.
- Dankers, R. & Christensen, O. B. (2005) Climate change impact on snow coverage, evaporation and river discharge in the sub-arctic tana basin, Northern Fennoscandia. *Clim Change* **69**, 367 - 392.
- Debels, P., Stehr, A., Aguayo, M., Alcayaga, H., Romero, F., Navarro, R., Daza, R. & R. Camus (2007). Hydrological Modelling, Economic Evaluation and Public Participation in the Context of a Twinning Project: Results from a Case Study on the Biobío Basin, Chile. Expert meeting on Regional Impacts, Adaptation, Vulnerability and Mitigation – Integrating Analysis of Regional Climate Change and Response Options, IPCC TGICA, START & PACE/USP, June 2007, Nadi, Fiji.
- Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J. C. & Neitsch, S. L. (2002). ArcView Interface for SWAT2000 User's Guide. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station
- Diaz-Nieto, J. & Wilby, R. L. (2005) A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: impacts on low flows in the River Thames, United Kingdom. *Climatic Change* **69**, 245 - 268.
- Eckhardt, K. (2005) How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrol. Processes* **19**, 507-515.
- García, A., Jorde, K., Habit, E. & Parra, O. (2007). Downstream environmental effects of Ralco and Pangué Dam operations: changes in habitat quality for native fish species, Biobío River, Chile. . 32<sup>nd</sup> Congress of IAHR, The International Association of Hydraulic Engineering & Research. Harmonizing the demands of art and nature in hydraulics, July 1-6 2007, Venice, Italy.

- Giorgi, F., Hewitson, B. C., Christensen, J. H., Hulme, M., vonStorch, H., Whetton, P. H., Jones, R. G., Mearns, L. O. & Fu, C. (2001) Regional Climate Information—Evaluation and Projections', in Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., and Xiaoxu, D. (eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Chapter 10, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 583–638.
- Gleick, P. H. (1986) Methods for evaluating the regional hydrologic impacts of global climatic changes. *J. Hydrol* **88**, 97-116.
- Gleick, P. H. (1997) Climate Change and Water Resources. *AWWA* **89**(11), 107-110.
- Gosain, A. K., Rao, S., Srinivasan, R. & Reddy, N. G. (2005) Return-flow assessment for irrigation command in the Palleru river basin using SWAT model. *Hydrol. Processes* **19**, 673-682.
- Govender, M. & Everson, C. S. (2005) Modelling streamflow from two small South African experimental catchments using the SWAT model. *Hydrol. Processes* **19**, 683-692.
- Harrison, G. P. & Whittington, H. W. (2002) Vulnerability of Hydropower Projects to Climate Change. *IEE P-Gener Transm D* **149**(3), 249-255.
- Harvey, L.D.D., J. Gregory, M. Hoffert, A. Jain, M. Lal, R. Leemans, S.C.B. Raper, T.M.L. Wigley, and J.R. de Wolde, 1997: An introduction to simple climate models used in the IPCC Second Assessment Report. IPCC Technical Paper II [Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, D.J. Griggs, and K. Maskell (eds.)]. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 50 pp
- Hulme, M. & Sheard, N. (1999) Climate change Scenarios for Argentina. Climate change Scenarios for Argentina. Norwich, UK: 6pp.
- Hulme, M., Wigley, T. M. L., Barrow, E. M., Raper, S. C. B., Centella, A., Smith, S. & Chipanshi, A. (2000) Using a climate scenario generator in vulnerability and adaptation assessments: MAGICC and SCENGEN Version 2.4 Workbook. Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, 60pp. Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, 60pp.
- IPCC (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- IPCC (2001<sup>a</sup>). *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N.A., Dokken, D. J. and White, K. S.(eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1032 pp.
- Kundzewicz, Z.W., L.J. Mata, N.W. Arnell, P. Döll, P. Kabat, B. Jiménez, K.A. Miller, T. Oki, Z. Sen and I.A. Shiklomanov (2007): Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210.
- López-Moreno, J. I. & Nogués-Bravo, D. (2005) A generalized additive model for the spatial distribution of snowpack in the Spanish Pyrenees. *Hydro Process* **19**(16), 3167-3176.
- Mata, L. & Nobre, C. (2006) Impacts, vulnerability and adaptation to climate change in Latin America. Background paper commissioned by the Secretariat of the United Nations Framework Convention on Climate Change. Lima, Peru, 67 pp.
- Matheussen, B., Kirschbaum, R. L., Goodman, I. A., O'Donnell, G. M. & Lettenmaier, D. P. (2000) Effects of land cover change on streamflow in the interior Columbia River basin (U.S.A. and Canada). *Hydrol. Process.* **14**, 867–885.

- Mearns, L. O., Giorgi, F., Whetton, P., Pabon, D., Hulme, M. & Lal, M. (2003) Guidelines for use of climate scenarios developed from regional climate model experiments, DDC of IPCC TGCIA (final version), pp. 1-38.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Arnulf Grüber, Yong Jung, T., Kram, T., Lebre La Rovere, E., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N. & Dadi, Z. (2001). IPCC Special Report on Emissions Scenarios
- Neitsch, S.L., Arnold, J.C., Kiniry, J.R., Williams, J.R. & King, K.W. (2002<sup>a</sup>). Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.C., Kiniry, J.R., Williams, J.R. & King, K.W. (2002<sup>b</sup>) Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 2000. Texas, Texas Water Resources Institute, College Station.
- Nurmohamed, R., Naipal, S. & De Smedt, F. (2007) Modeling hydrological response of the Upper Suriname river basin to climate change. *J Spatial Hydrol* **7**(1), 1 - 22.
- Refsgaard, J. C. (2007). Hydrological Modelling and River Basin Management; Doctoral Thesis. Faculty of Natural Science, University of Copenhagen.
- Ruosteenoja, K., Carter, T. R., Jylhä, K. & Tuomenvirta, H. (2003) Future climate in world regions: an intercomparison of model-based projections for the new IPCC emissions scenarios. Finnish Environment Institute. Helsinki, Finland.
- Schneiderman, E. M., Pierson, D. C., Lounsbury, D. G. & Zion, M. S. (2002) Modelling the hydrochemistry of the Cannonsville watershed with generalized watershed loading functions (GWLF). *J. Am. Water Resour. Assoc.* **38**(5), 1323–1347.
- Sivapalan, M., Ruprecht, J. K. & Viney, N. R. (1996<sup>a</sup>) Water and salt balance modelling to predict the effects of land-use changes in forested catchments. 1. Small catchment water balance model. *Hydrol. Process* **10**, 393–411.
- Sivapalan, M., Viney, N. R. & Jeevaraj, C. G. (1996<sup>b</sup>) Water and salt balance modelling to predict the effects of land-use changes in forested catchments. 3. Coupled model of water and salt balances. *Hydrol. Process.* **10**, 413–428.
- Sivapalan, M., Viney, N. R. & Jeevaraj, C. G. (1996<sup>c</sup>) Water and salt balance modelling to predict the effects of land-use changes in forested catchments. 3. The large catchment model. *Hydrol. Process* **10**, 429–446.
- Stehr, A., Debels, P., Romero, F. & Alcayaga, H. (en prensa) Hydrological modelling with SWAT under limited conditions of data availability: evaluation of results from a Chilean case study. *Hydrolog Sci J.*
- Stehr, A., Debels, P., Arumi, J. L., Romero, F. & Alcayaga, H. (enviado) Combining discharge data and MODIS imagery for evaluating the performance of SWAT and its snowmelt routine in a small Andean basin, Chile
- Stott, P. A., Stone, D. A. & Allen, M. R. (2004) Human contribution to the European heatwave of 2003. *Nature* **432**, 610-614.
- Tripathi, M. P., Raghuwanshi, N. S. & Rao, G. P. (2006) Effect of watershed subdivision on simulation of waterbalance components. *Hydrol. Processes* **20**, 1137–1156.
- Van Griensven, A. & Bauwens, W. (2003) Multiobjective autocalibration for semidistributed water quality models. *Water Resour. Res.* **39**(12), 1348.
- Van Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T. & Sirinivasan, R. (2006) A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *J. Hydrol.* **324**, 10-23.

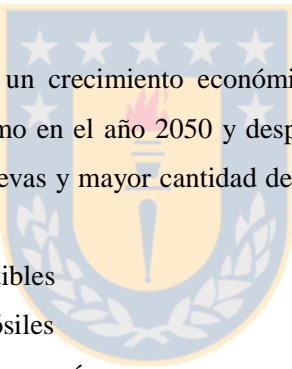
- Vandenberghe, V., Van Griensven, A., Bauwens, W. & Vanrolleghem, P. A. (2005) Propagation of uncertainty in diffuse pollution into water quality predictions: application to the River Dender in Flanders, Belgium. *Water Sci. Technol.* **51**, 347-354.
- Watson, R., Zinyowera, M. C., Moss, R. H. & Dokken, D. J. (1997) IPCC Special Report on the Regional Impacts of Climate Change: An assessment of vulnerability. *IPCC Special Report on the Regional Impacts of Climate Change: An assessment of vulnerability*.
- Whitfield, P., Reynolds, C. J. & Cannon, A. J. (2002) Modelling streamflow in present and future climates: Examples from the Georgia Basin, British Columbia. *Can. Water Resour. J.* **27**, 427-456.
- Wigley, T. M. L. (2003<sup>a</sup>) MAGICC/SCENGEN 4.1: Technical Manual, National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA, October 2003, 14 pp. MAGICC/SCENGEN 4.1: Technical Manual, National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA, October 2003, 14 pp.
- Wigley, T. M. L. (2003<sup>b</sup>) MAGICC/SCENGEN 4.1: User Manual, National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA, October 2003, 23 pp. *MAGICC/SCENGEN 4.1: User Manual*, National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA, October 2003, 23 pp.
- Wigley, T. M. L., Raper, S. C. B., Hulme, M. & Smith, S. (2000) The MAGICC/SCENGEN Climate Scenario Generator: Version 2.4, Technical Manual, Climatic Research Unit, UEA, Norwich, UK, 48pp. The MAGICC/SCENGEN Climate Scenario Generator: Version 2.4, Technical Manual, Climatic Research Unit, UEA, Norwich, UK, 48pp.
- Wilby, R. L., Charles, S. P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P. & Mearns, L. O. (2004) Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Xu, C.-Y. & Singh, V. P. (2004) Review on Regional Water Resources Assessment Models under Stationary and Changing Climate. *Water Resour Manag* **18**, 591 -612.
- Yang, T.-C., Yu, P.-S. & Chen, C.-C. (2005) Long-term runoff forecasting by combining hydrological models and meteorological records. *Hydrol. Processes* **19**, 1967-1981.



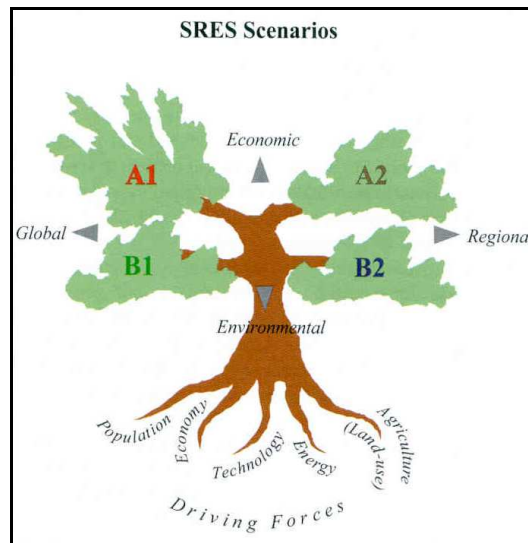
## 4.9- ANEXO 4.1

### Escenarios de emisiones

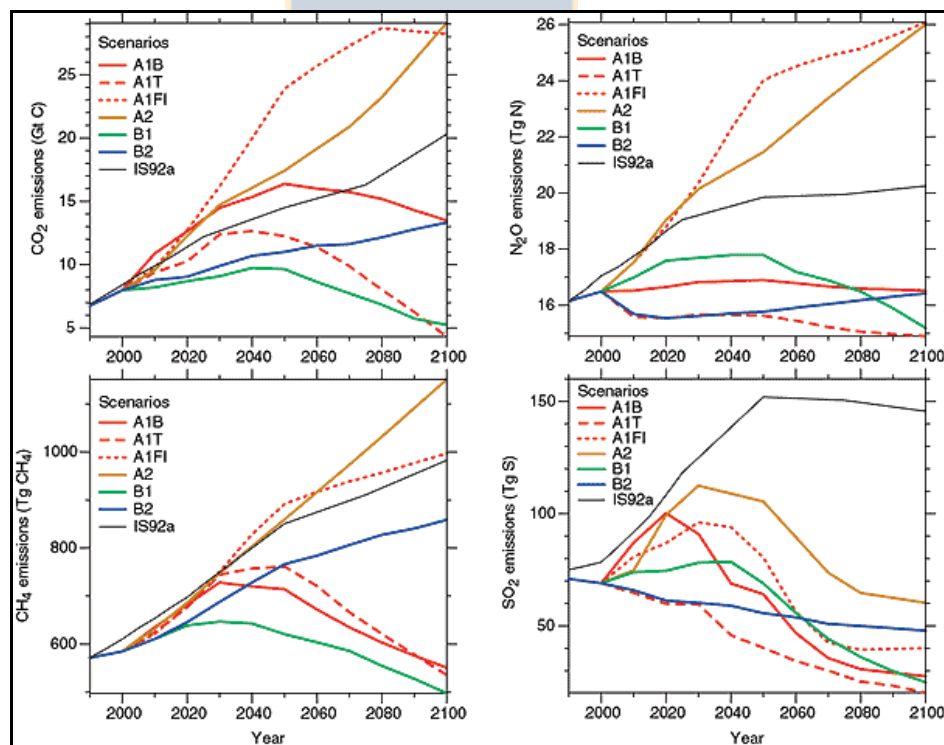
Las emisiones de CO<sub>2</sub> y de otros gases invernadero están relacionadas con factores tales como el aumento de la población, el crecimiento económico, el costo y la disponibilidad de fuentes de energía, las pautas de producción y consumo, y cambios de prácticas en el uso de la Tierra, entre otros. En 1996 el IPCC comenzó el desarrollo de un nuevo set de escenarios de emisiones para reemplazar los escenarios IS92. El nuevo set de escenarios aprobados es descrito en el Reporte Especial Sobre Escenarios de Emisiones (SRES) (Nakicenovic *et al.*, 2001). Se desarrollaron cuatro diversas líneas principales para describir consistentemente las relaciones existentes entre los forzantes que conducen las emisiones y su evolución con el fin de instalar el contexto adecuado para la cuantificación de dichos escenarios. En total se crearon 40 escenarios abarcando un amplio rango de las principales fuerzas conducentes demográficas, económicas y tecnológicas de gases invernadero y emisiones de sulfuros. Cada escenario representa una cuantificación específica de las cuatro líneas principales, todos los escenarios basados en la misma línea constituyen una familia. Las cuatro principales familias (Fig. A1.1) son:

- 
- A1:** Describe un mundo con un crecimiento económico muy rápido, en el cual la población mundial alcanza su máximo en el año 2050 y después de eso comienza a declinar. Hay una introducción rápida de nuevas y mayor cantidad de tecnologías. A1 posee tres subgrupos, los cuales son:
    - A1FI:** Uso intensivo de Combustibles
    - A1T:** Uso de combustibles no fósiles
    - A1B:** Balanceado entre todas las energías
  - A2:** Describe un mundo de dependencia regional propia y preservación de la cultura local. En este escenario los patrones de fertilidad de las regiones convergen lentamente, aumentando gradualmente la población y el crecimiento económico per cápita, los cambios tecnológicos son más lentos y más fragmentados que para las otras familias.
  - B1:** Describe un mundo convergente con la misma población que A1, pero con énfasis en soluciones globales para la economía, sustentabilidad ambiental y social, incluyendo la introducción de tecnologías limpias y eficientes.
  - B2:** Pone énfasis en soluciones locales para la sustentabilidad económica, ambiental y social. La población se incrementa más lento que en A2. Comparado con A1 y B1 el desarrollo económico es intermedio y menos rápido, y los cambios tecnológicos son más diversos.



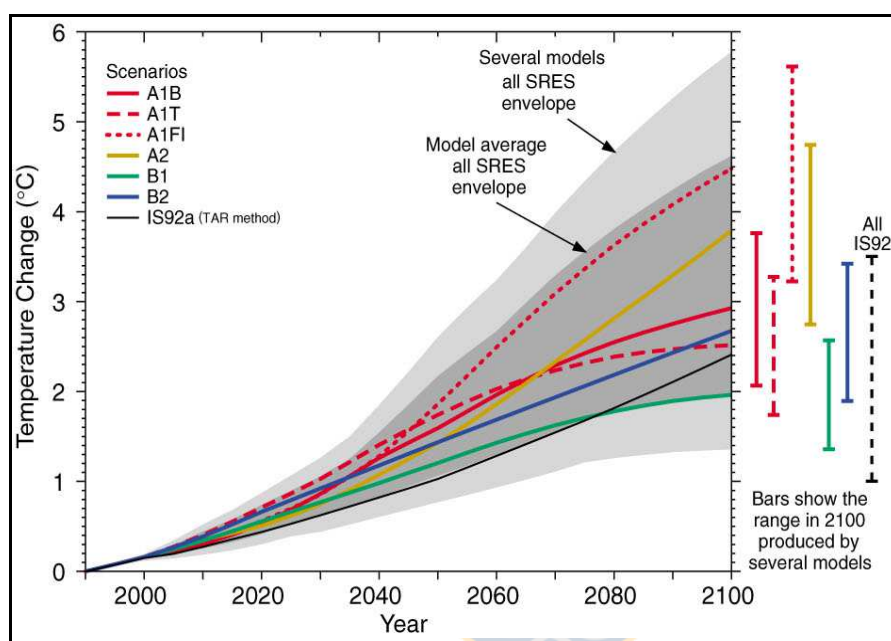


**Fig. A1.1** Cuatro principales familias de escenarios de emisiones, basadas en las predicciones de los diferentes expertos mundiales con respecto al consumo de combustibles fósiles en el futuro.



**Fig. A1.2** Emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y dióxido de sulfuro para los seis SRES marcadores, A1B, A2, B1, B2, A1FI y A1T. Para  $\text{CO}_2$ , y dióxido de sulfuro se muestran las emisiones antropogénicas, mientras que para  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  se muestran las emisiones totales incorporando un componente natural constante. También se muestran las correspondientes emisiones del escenario IS92a (IPCC, 2001<sup>a</sup>) basado en el reporte especial sobre Escenarios de Emisiones (Nakicenovic *et al.*, 2001).

Los SRES no incluyen iniciativas climáticas adicionales, es decir, no existe ningún escenario que explícitamente suponga la implementación de por ejemplo las metas del Protocolo de Kyoto. Los SRES marcadores son ni más ni menos probables que cualquier otro escenario, pero son considerados como ilustrativos de una familia en particular. Las emisiones antropogénicas para los tres principales gases invernadero CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O junto con las emisiones antropogénicas dióxido de sulfuro se muestran en la Fig. A1.2 para los seis SRES marcadores. La Fig. A 1.3 presenta las predicciones de temperatura obtenidas para los seis SRES marcadores.



**Fig. A1.3** Predicciones del efecto de estos diferentes escenarios de consumo con respecto al aumento mundial de la temperatura. También se muestra el anterior escenario IS92a como comparación.

## CAPITULO 5: Discusión y Conclusiones

---

### 5.1- DISCUSION GENERAL

A continuación se entrega un resumen general de los principales resultados logrados y las conclusiones generales obtenidas durante la realización de este trabajo. Por último se presenta una breve discusión de futuras preguntas de investigación dejadas abierta o nacidas a partir de esta investigación.

#### 5.1.1- Modelación distribuida experiencia para la cuenca del Biobío

La gestión de cuencas hidrográficas desempeña un rol fundamental en las regiones donde parte importante del desarrollo social y económico depende del agua y sus problemas asociados, tales como conflictos por el uso de esta (problemas entre usuarios aguas arriba y aguas; generación hidroeléctrica versus riego), externalidades de la utilización de ésta (ej. contaminación) y sequías e inundaciones. Los modelos son herramientas útiles que pueden mostrar con detalles los impactos de distintas acciones (cambios uso de suelo, cambio climático, aumento del uso, etc.) sobre una cuenca o área de estudio, y así apoyar la toma de decisiones a nivel local, regional y de país.

Los modelos de aguas superficiales se aplican más apropiadamente cuando el objetivo del análisis es responder a preguntas relativas a la escurriencia y caudales máximos y mínimos para un cierto periodo (horas / días), almacenamiento de agua y caudales durante temporadas (días / meses), e infiltración neta durante largos periodos de tiempo (años). En particular, los modelos de escurriencia se utilizan para simular y predecir los caudales a través del sistema fluvial. Estos modelos permiten evaluar directamente cambios producidos en el balance hídrico debido a cambios climáticos y cambios en el uso del suelo. En general estos modelos son rigurosos en la simulación de los procesos climáticos.

La calibración y validación del modelo son pasos críticos y necesarios en la utilización de cualquier modelo. En las fases de validación / calibración el modelo es evaluado para determinar si puede representar razonablemente los procesos para los que se desea aplicar según los objetivos del estudio. Para el caso de la cuenca del río Vergara, la precisión de los resultados del modelo se verifico en 4 puntos, utilizando diferentes índices estadísticos utilizados con frecuencia para la evaluación de la performance de modelos hidrológicos (Abu El-Nasr *et al.*, 2005; Van Liew *et al.*, 2005). Se puede decir que para gran parte de la cuenca el modelo se comporta de buena forma tanto para el periodo de calibración como validación, no habiendo ningún área de la cuenca que presente resultados no satisfactorios. Por otro lado, en la cuenca de Lonquimay el modelo se calibró y valido en un punto a la salida de esta, presentado resultados satisfactorios a buenos. No obstante lo anterior, por lo general el modelo subestima los valores de caudal máximo en ambas cuencas estudiadas,

punto que ha sido comentado previamente en la literatura (Gassman *et al.*, 2007; Wang & Melesse, 2005; Van Liew *et al.*, 2005).

Una explicación de lo anterior puede ser la no adecuada representación espacial (número de estaciones) y del gradiente de precipitaciones (estaciones en la parte alta de la cuenca), ya que la información meteorológica es el un input que fuerza al modelo hidrológico (Hattermann *et al.*, 2005). Ya que aunque se reconoce la importancia de la variabilidad espacial de las precipitaciones al simular, muchos modelos hidrológicos aun asumen una distribución uniforme en extensas áreas (Chaubey *et al.*, 1999), en el caso de SWAT a cada sub-cuenca se le asigna la estación geográficamente más cercana. Para solucionar en parte lo anterior se propondrá en posteriores investigaciones, especialmente en la cuenca del río Vergara donde la información disponible lo permite, incluir una evaluación de los efectos de una mejor descripción espacial de la precipitación utilizando métodos como el inverso de la distancia, Kriging, Co-Kriging, Radial Basis Functions, etc. (Daly *et al.*, 1994; Goovaerts, 2000; Hattermann *et al.*, 2005; Hevesi *et al.*, 1992; Hutchinson, 1998, 2000; Martínez-Cob, 1995).

El análisis de sensibilidad mostró que para ambas cuencas estudiadas dentro los seis parámetros más sensibles se encuentran el valor inicial del SCS CN II y la capacidad de agua disponible del suelo (Available water capacity). En la actualidad no existen bases de datos nacionales/regionales que relacionen el valor de CN con datos locales de uso de suelo y/o tipos de suelos. La actual descripción de los suelos es muy restringida (granulometría, materia orgánica) no incorporando propiedades físicas tales como conductividad hidráulica o cantidad de agua disponibles en suelos, que son parámetros frecuentemente utilizados por los distintos modelos hidrológicos, debido a lo cual se debe recurrir a estimaciones de estos parámetros en base a literatura para comenzar el proceso de calibración.

Siempre que sea posible, se debe tratar de hacer uso de nuevos tipos de datos (Refsgaard, 2007). Las nuevas técnicas para recopilación de datos satelitales sobre las condiciones de superficie y datos geofísicos sobre características del subsuelo son prometedoras, y no han sido aun plenamente explotadas. Lo anterior adquiere aun más importancia en países subdesarrollados o en vías de desarrollo donde los recursos son escasos y deben ser aprovechados de la mejor forma posible. Es por ello, conociendo las necesidades de país, que dentro esta tesis se utilizaron imágenes satelitales de libre acceso (MODIS) para la validación de los resultados nivales del modelo desarrollado. Lo anterior se utilizó como una forma de subsanar la falta de mediciones de datos nivales en la cuenca del Biobío y así poder validar de mejor forma el modelo hidrológico, no sólo comparando el caudal modelado sino también la dinámica de acumulación y derretimiento de nieve. Los resultados obtenidos indican que la utilización de datos de percepción remota es una herramienta útil para

la validación, dando buenos resultados en esta primera incursión en su manejo y dejando abierto el camino a la incorporación de datos de percepción remota también en el proceso de calibración.

Después de calibrado y validado el modelo, es importante dejar documentado en forma adecuada el análisis realizado por el modelo, de manera que los distintos usuarios de éste entiendan de manera apropiada las "preguntas" que fueron simuladas. La documentación permite a los tomadores de decisiones y a otros usuarios comprender el proceso por el cual se seleccionó el modelo, su aplicación y las limitaciones en su dominio de aplicación con el fin de reducir la incertidumbre asociada a su utilización. De esta manera los tomadores de decisiones podrán interpretar y comprender en forma correcta las limitaciones de los resultados obtenidos del proceso modelado. Los modelos al ser aplicados y utilizados adecuadamente, con datos apropiados y reconociendo sus limitaciones, son valiosas herramientas que pueden apoyar la toma de decisiones para la protección de las aguas. La selección de un instrumento de análisis para predicción de cantidad y calidad depende de la escala temporal de estudio, la experiencia del modelador, características del lugar, la necesidad de complejidad y transparencia del modelo y la disponibilidad de datos, la cual es un componente clave para garantizar la fiabilidad y exactitud de los resultados.

#### **5.1.2- Cambio Climático y posibles variaciones en los caudales de la cuenca del Biobío**

En los últimos años se ha visto un cambio en los valores de temperatura y precipitación tanto en el mundo como en Chile. El IPCC (2007) indica que desde los años 1970 a la fecha la temperatura media del mundo ha aumentado en 0.55°C, este fenómeno también se ha podido contemplar en Chile donde durante los últimos 45 años la temperatura en la zona central ha aumentado en 0.05 °C/década y 0.18 °C/década en los promedios anuales de temperatura máxima y mínima, respectivamente (CONAMA-DGF 2006). Esto ha llevado a la necesidad de desarrollar métodos que permitan analizar las consecuencias que esto puede producir a futuro, que puedan aplicarse a cuencas con datos escasos y al mundo real de gestión de recursos hídricos. Los resultados actualmente disponibles con respecto a los impactos hidrológicos producidos por los diversos escenarios de cambio climático, obtenidos a partir de la aplicación del modelo SWAT calibrado y validado previamente, a las cuencas del Vergara y Lonquimay, indican una amplia gama de impactos potenciales en términos de reducción en la magnitud de los caudales medios mensuales. Siendo esta variación mayor en las épocas de primavera y verano. Esta amplia gama de diferencias en las salidas es una consecuencia de la incertidumbre existente actualmente con respecto a la respuesta del clima a determinados escenarios de emisiones, así como la incertidumbre en las futuras emisiones. Esto se refleja en la gran diversidad de Modelos Climáticos Regionales y de escenarios de emisiones existentes, lo que produce una divergencias / convergencias en las salidas de los distintos modelos para las distintas regiones del mundo (Ruosteenoja *et al.*, 2003), así como a nivel regional/local, según lo expresado con el uso de 44 escenarios climáticos.

Al presentar los resultados obtenidos del modelo ya perturbado con las señales de cambio climático a la comunidad, no hay que olvidar que las predicciones climáticas y el modelo en sí, no están exentas de incertidumbre, las cuales pueden causar desviaciones en las predicciones (Giorgi *et al.*, 2001; Mearns *et al.*, 2003). Si se tuvieran predicciones perfectas sobre la evolución del cambio climático, se podría predecir su impacto en el medio ambiente que nos rodea. Es este paradigma el que actualmente motiva a la mayoría de los estudios sobre el impacto del cambio climático, no sólo en el ámbito de la investigación hidrológica, sino en todos los ámbitos directamente influidos por el clima, por ejemplo, ecología, producción agrícola, consumo de energía, etc. Esto significa, que el factor limitante en los estudios sobre el impacto del cambio climático, es nuestra capacidad para predecir el clima futuro. Incluso si los modelos climáticos progresan rápidamente al incorporar una descripción matemática más detallada del sistema climático y sus fuerzas motrices, la predicción de su evolución será siempre obstaculizada por la predicción de la evolución de las emisiones de gases invernadero.

Se debe enfatizar que el estudio sobre los efectos del cambio climático en cualquier campo de aplicación debe continuar y, especialmente, en la hidrología. El análisis de sus repercusiones no sólo se debe ver desde el punto de vista de anticipación a futuros estados, ya sean deseables o indeseables, del sistema para ahorrar costos en un amplio sentido. Además de ello, un importante resultado de cualquier análisis de impacto debe ser no sólo una mejor comprensión del comportamiento hipotético futuro del sistema, sino también de la situación actual.

## **5.2- CONCLUSIONES**

Los resultados obtenidos de la modelación con SWAT bajo condiciones locales de disponibilidad de datos (meteorológicos, fluviométricos, usos de suelo, propiedades de los suelos, etc.) para las cuencas de los ríos Vergara y Longuimay, ubicadas en la zona centro sur de Chile, indican un buen desempeño del modelo en términos de la representación de caudales medios mensuales en distintos puntos de control (estaciones fluviométricas) dentro de las cuencas. Lo anterior satisface los objetivos específicos dos y tres del presente trabajo los cuales dicen relación con el establecimiento de balances hídricos mensuales para cuencas con diferentes regímenes de caudales, una con régimen nivo-pluvial (Longuimay; OE2; capítulo 3) y la otra con régimen predominantemente pluvial (Vergara; OE3; capítulo 2).

Dentro de este trabajo además de realizar una calibración y validación tradicional (observado vs simulado) de los caudales obtenidos del modelo, se utilizaron datos de percepción remota, específicamente el producto de nieve de MODIS, para evaluar si la representación de la extensión del área de nieve generada con el modelo SWAT previamente calibrado, corresponde con el área que entregada por MODIS. Los resultados

obtenidos en esta parte del trabajo muestran que MODIS entrega una buena descripción del área de nieve en la cuenca en la mayoría de los casos concordante con lo obtenido de la modelación. Esta validación se enmarca dentro del primer objetivo específico de este trabajo el cual dice relación con el establecimiento de cobertura nival para las cuencas en estudio a partir de datos de percepción remota (capítulo 3).

A pesar de que en este trabajo sólo se modelaron 2 sub-cuencas (20% del área total) de la cuenca del Biobío, los resultados obtenidos, permiten realizar una primera interpretación cualitativa de los potenciales impactos del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos en la cuenca para diferentes épocas del año. Indicando estos resultados que a pesar de la gran incertidumbre y variabilidad que existe en lo que al cambio climático se refiere (los distintos modelos climáticos indican un cambio entre 1°C a 3.2°C en la temperatura para fines del siglo XXI para la zona estudiada) la mayoría de los escenarios predice una disminución en los caudales para las distintas estaciones del año, pudiendo llegar la variación promedio anual del caudal, en el escenario más pesimista, hasta a un 60%. Con lo anterior se cumple con el cuarto objetivo específico presentado en esta tesis, el cual era: determinar el impacto del cambio climático sobre la disponibilidad del recurso agua en las cuencas en estudio, durante el año hidrológico y en diferentes puntos estratégicos dentro de dicha cuenca.

En cuanto al objetivo general del presente trabajo se refiere, se puede decir, que éste se cumplió a cabalidad, ya se generó una herramienta capaz de analizar el comportamiento de las cuencas de los ríos Vergara y Lonquimay bajo escenarios de cambio climático tanto a macro como a meso-escala (sub-cuencas), incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana y la disponibilidad del recurso agua durante diferentes períodos del año.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo se concluye que bajo condiciones locales de disponibilidad de datos el modelo SWAT, el cual es un modelo que utiliza el método de curva número para la modelación de la escorrentía superficial además de un modelo en base al índice de temperatura para la modelación del derretimiento y acumulación de nieve, es capaz de representar en forma adecuada la hidrología de la cuenca del río Vergara y de la cuenca del río Lonquimay aceptándose por lo tanto la primera hipótesis planteada en el trabajo

En cuanto a la segunda hipótesis, que estipula que un aumento de las temperaturas y una disminución de las precipitaciones, traerá como consecuencia una disminución del caudal promedio anual, una disminución caudales de verano y aumento caudales de invierno a largo plazo en la cuencas en estudio, se puede decir que bajo los escenarios de cambio climático generados dentro de este trabajo la hidrología de la cuenca del río Vergara según lo modelado a través de SWAT parece ser muy sensible a los cambios en la precipitación.



Respecto a la cuenca de Lonquimay, esta cuenca es altamente sensible al cambio en las precipitaciones y las temperaturas, produciéndose un aumento en la razón entre lluvia y nieve durante los meses de invierno, además de una disminución de la temporada con nieve. En el caso de los caudales la figura 4.12 indica que en algunos escenarios el caudal podría aumentar en invierno pero en la mayoría de los escenarios éste disminuiría tanto en invierno como en verano, lo que en parte se contrapone con lo dicho en la hipótesis. Es por ello que la hipótesis es aceptada pero enfatizando que lo más probable es que en el largo plazo los caudales de invierno también disminuyan.

### 5.3- FUTURAS INVESTIGACIONES

El presente trabajo debe ser considerado como un primer paso para el desarrollo de una aplicación mayor, abarcando a toda la cuenca del Biobío. Sin embargo, las condiciones actuales de disponibilidad de datos no permiten aun esto. Basado en lo anterior y con la finalidad de poder extender este trabajo a toda la cuenca del Biobío, así como a otras cuencas, a continuación se presenta una breve reseña sobre posibles investigaciones que podrían comenzar a partir de esta tesis.

#### **Cambios al modelo**

Durante el desarrollo y el análisis de los resultados obtenidos de la modelación de una cuenca con importante aporte nival al caudal, se encontraron ciertas falencias del modelo al ser utilizado en una cuenca Chilena y de alta montaña. Por ejemplo el modelo no incorpora modelación del derretimiento de glaciares, en este caso no fue de gran importancia ya que el glaciar Lonquimay no es de gran envergadura, pero si se desea ampliar el modelo a otras sub-cuencas donde existen glaciares de gran envergadura, esto adquiere mayor relevancia. Otro factor que puede estar afectando la depositación y derretimiento de nieve es el valor utilizado para la corrección de la temperatura por altura, ya que este tiene un valor fijo en el año y al analizar imágenes MODIS de temperatura, se vio que este factor es distinto en las distintas estaciones del año. Por lo anterior se propone realizar las siguientes incorporaciones al código del modelo SWAT:

- Incorporación de un modulo que calcule el derretimiento de los glaciares.
- Incorporar la posibilidad de definir Lapse rate de temperatura distintos para las diferentes estaciones del año.

#### **Generación de datos locales**

Durante el desarrollo del presente trabajo, especialmente durante el análisis de sensibilidad realizado a los distintos parámetros incluidos en el modelo, así como durante la calibración de éstos, se fueron encontrando ciertos factores tales como datos disponibles, calidad y cantidad de datos disponibles entre otros,

que influyen en los resultados obtenidos. Estos factores al ser mejorados permitirán obtener un modelo con menor rango de incerteza en sus salidas, es por ello, que se proponen los siguientes estudios:

- Estudio de características locales de las plantas (relacionado con el uso de suelo), tales como índice potencial máximo de área de la hoja (Maximum potential leaf area index), temperatura optima de crecimiento, curva número asociado al uso, etc.
- Clasificación suelos no clasificados dentro de la cuenca. Además se debe realizar un estudio para mejorar la descripción de las propiedades físicas de los suelos.
- Obtención de valores curva número para suelos/ usos a nivel local. Ya que actualmente estos valores se deben tomar de literatura internacional.
- Interpolación de las precipitaciones. Analizar el efecto de distintas técnicas de interpolación espacial de precipitaciones sobre los resultados del modelo (ej. Hattermann *et al*, 2005), eso sí, no olvidando la disponibilidad de datos locales y como estos afectarían el resultado de las distintas metodologías de interpolación.

#### **Extender la modelación realizada**

Como ya fue mencionado con anterioridad, éste es el primer paso dentro una aplicación mayor que pueda ser utilizada por la sociedad para la adecuada gestión de los recursos hídricos a mediano y largo plazo. Por ello se estima que los resultados de este trabajo servirán como base para lo siguiente:

- Modelación de una cuenca con irrigación.
- Modelación cuenca Biobío completa.
- Mezclar cambios uso de suelo con cambios en temperaturas.
- Agregar aspecto socio económico a la modelación.
- Modelar cuencas en distintas zonas climáticas.
- Utilizar otro modelo precipitación escurrimiento y comparar resultados.

Para seguir con la línea de investigación comenzada con el desarrollo de esta tesis, se espera presentar un FONDECYT de iniciación, donde se extienda el modelo a una cuenca con irrigación y se analice el efecto del cambio climático en la disponibilidad de agua para riego. Además de incorporar cambios en el código fuente de SWAT (derretimiento glaciares, lapso rate de temperatura variable a lo largo del año) que permitan una mejor representación de la hidrología de una cuenca de alta montaña.

## 5.4-REFERENCIAS

- Abu El-Nasr, A., Arnold, J.G., Feyen, J. & Berlamont, J. (2005) Modelling the hydrology of a catchment using a distributed and a semi-distributed model. *Hydrol. Processes* **19**: 573-587.
- Chaubey, I., Haan, C. T., Salisbury, J. M. & Grunwald, S. (1999) Quantifying model output uncertainty due to the spatial variability of rainfall. *JAWRA* **35**(5):1113-1123.
- CONAMA-DGF (2006). Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI, Comisión Nacional del Medio Ambiente. Departamento de Geofísica. Facultad de Ciencias. Físicas y Matemáticas. Universidad de Chile.
- Daly, C., Neilson, R.P. & Phillips, D.L. (1994) A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. *J. Appl. Meteor.* 33:140-158.
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H. & Arnold, J. G. (2007) The Soil And Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. *Trans. of the ASABE* 50(4): 1211-1250.
- Giorgi, F., Hewitson, B. C., Christensen, J. H., Hulme, M., vonStorch, H., Whetton, P. H., Jones, R. G., Mearns, L. O. & Fu, C. (2001) Regional Climate Information—Evaluation and Projections’, in Houghton, J. T., Ding, Y., Griggs, D. J., Noguer, M., van der Linden, P. J., and Xiaoxu, D. (eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Chapter 10, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 583–638.
- Goovaerts, P. (2000) Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *J. Hydrol.* 228:113-129.
- Hattermann, F., Krysanova, V., Wechsung, F. & Wattenbach, M. (2005) Runoff simulations on the macroscale with the ecohydrological model SWIM in the Elbe catchment - validation and uncertainty analysis. *Hydrol. Processes* 19: 693-714.
- Hevesi, J.A., Istok, J.D. and Flint, A.L. (1992). Precipitation estimation in mountainous terrain using multivariate statistics. Part I: Structural analysis. *J. Appl. Meteor.* 31:661-676.
- Hutchinson, M.F. (1998) Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines: II analysis of topographic dependence. *GIDA* 2(2): 168-185.
- Hutchinson, M.F. (2000) ANUSPLIN Version 4.1. User Guide. . Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia.
- IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Martínez-Cob, A. (1995). Multivariate geostatistical analysis of evapotranspiration and precipitation in mountainous terrain. *J. Hydrol.* 174:19-35.
- Mearns, L. O., Giorgi, F., Whetton, P., Pabon, D., Hulme, M. & Lal, M. (2003) Guidelines for use of climate scenarios developed from regional climate model experiments, DDC of IPCC TGCIA (final version), pp. 1-38.
- Refsgaard, J. C. (2007). *Hydrological Modelling and River Basin Management*; Doctoral Thesis. Faculty of Natural Science, University of Copenhagen.

- Ruosteenoja, K., Carter, T. R., Jylhä, K. & Tuomenvirta, H. (2003) Future climate in world regions: an intercomparison of model-based projections for the new IPCC emissions scenarios. Finnish Environment Institute. Helsinki, Finland.
- Van Liew, M.W., Arnold, J.G. & Bosch, D.D. (2005) Problems and potential of autocalibrating a hydrologic model. *Trans. Am. Soc. Agric.* 48(3): 1025-1040.
- Wang, X. & Melesse, A. M. (2005) Evaluation of the SWAT model's snowmelt hydrology in a Northwestern Minnesota Watershed. *Trans. Am. Soc. Agric.* 48(4): 1359-

