



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

INFORME TÉCNICO

**ANTECEDENTES PARA APLICACIÓN DE
METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE CAMBIO
CLIMÁTICO**

REALIZADO POR:
División de Estudios y Planificación
SDT N° 338

Santiago, diciembre de 2012

Contenido

1.	Introducción	3
2.	Objetivo General	3
3.	Antecedentes generales de los escenarios de cambio climático	4
3.1	Metodologías Para el análisis a nivel local	7
4.	El Cambio Climático y los Recursos Hídricos en Chile.....	9
5.	Metodologías Utilizadas para la Evaluación del Cambio Climático en los Recursos Hídricos.....	12
5.1	Análisis Caudales Medios.	12
5.2	Análisis para condiciones extremas: crecidas	22
6.	Conclusiones.....	29
7.	Bibliografía	30

1. Introducción

En los últimos 20 años el calentamiento global ha sido un tema de interés mundial creciente, desde la formación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático el año 1988 (IPCC de su sigla en inglés), se ha sistematizado la información en torno a él de forma que se ha llegado a conclusiones bastante robustas en cuanto a su desarrollo y a la influencia humana como detonante del mismo.

Tomando en cuenta los resultados del cuarto informe IPCC (2007) se estima que los países más vulnerables son aquellos en vías de desarrollo. En el caso de Chile se ha identificado un cambio en los patrones de precipitación, con una tendencia a la disminución de precipitaciones en la zona centro sur, que es donde se presenta la mayor densidad poblacional y donde se desarrolla parte importante de la actividad productiva.

Al alero de este informe el año 2008 el Gobierno de Chile publicó el Plan de Acción Nacional de Cambio Climático para el período 2008-2012, en el cual la Dirección General de Aguas aparece con importantes acciones en el eje de adaptación y fomento de capacidades. Dentro de estas acciones están: evaluar los efectos del cambio climático en distintas fases del ciclo hidrológico y pronosticar la tendencia hidrológica (caudales) a partir de las proyecciones de evolución del clima.

Para estimar los impactos de la variabilidad climática en los recursos hídricos y evaluar medidas de adaptación la ciencia ha desarrollado distintas técnicas que entregan una visión de los posibles efectos dados ciertos escenarios.

Estas metodologías entregan una visión del cambio climático en su componente más técnico, pero además hay que considerar tomar acciones de planificación pensando en la institución, en la gente que trabaja en ella y en las labores que realiza, así como se hace necesario considerar que la DGA está sujeta a una legalidad que guía su quehacer.

El presente informe pretende reunir antecedentes de metodologías para la evaluación del impacto del cambio climático en el tema de recursos hídricos.

2. Objetivo General

Reunir antecedentes de las metodologías existentes para la evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos, resaltando especialmente aquellos que se han utilizado en Chile.

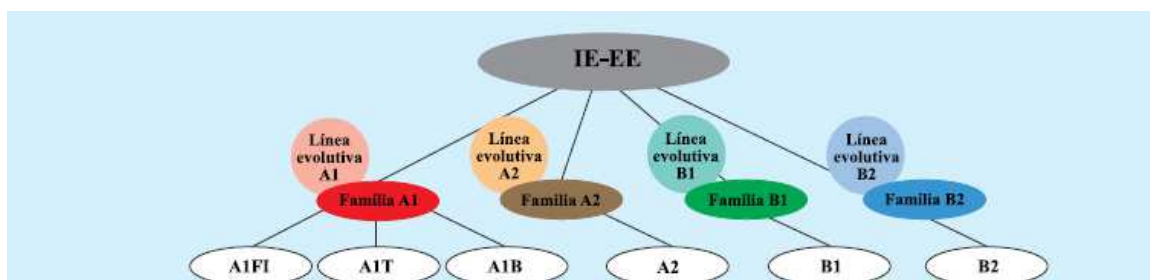
3. Antecedentes generales de los escenarios de cambio climático

El año 1998 se forma el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change) en forma conjunta entre la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas Por el Medioambiente (PNUMA), con el fin de reunir, sistematizar y analizar la información científica existente con respecto al tema de cambio climático para evaluar sus consecuencias medioambientales y socioeconómicas y formular estrategias de respuesta realistas. Ha sido el IPCC quien ha establecido las bases para identificar si los cambios se están produciendo y si efectivamente son debido a la influencia humana.

Es así como se han establecido que las fuentes primordiales con que el hombre contribuye al cambio climático están dados por la quema de combustibles fósiles y la deforestación, por una parte aumentando los gases de efecto invernadero (GEI) y por otra limitando la fuente de captura de dichos gases (IPCC, 2007).

Para poder hacer comparables las distintas investigaciones en el tema de cambio climático el IPCC ha generado ciertos estándares, como la generación de familias de escenarios de cambio climático. Los escenarios no son parte de la evolución actual, sino que son imágenes alternativas de lo que podría suceder en el futuro. Dichos escenarios suponen distintos tipos de evolución de la humanidad y por lo tanto distinto nivel de emisiones de GEI. No hay recomendaciones en cuanto a que escenario usar ya que ninguno tiene mayor o menor probabilidad de ocurrencia que otro. La finalidad de los escenarios es poder evaluar las consecuencias tanto climáticas como ambientales de la emisión futura de GEI y el impacto de distintas estrategias de mitigación y adaptación (IPCC, 2000).

Figura 1 Familias de escenarios



Fuente: IPCC, 2000

A grandes rasgos la idea de los escenarios es abarcar distintas posibilidades claramente diferenciadas que cubran la mayor parte de las incertidumbres propias de

una proyección a tan largo plazo (100 años) consideran factores como el desarrollo demográfico, económico o el cambio tecnológico.

El conjunto de escenarios se compone de seis grupos de escenarios tomados de las cuatro familias (IPCC, 2000):

- A1: describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B).
- A2: describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- B1: describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.
- B2: describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

En todo el mundo existen cerca de 20 centros que estudian el tema del cambio climático. La mayoría de estos centros han desarrollado modelos globales de circulación atmosférica (GCM: General Circulation Model) de forma de determinar para cada uno de escenarios o familias de escenarios posibles de desarrollo de la

humanidad, con su consecuente generación de GEI y por lo tanto de impactos en la atmósfera. Dichos centros no han generado sólo un modelo, sino que distintas generaciones de modelos que van mejorando en la medida que mejoran las capacidades de los ordenadores con los que trabajan, para incluir un mayor nivel de detalle en los cálculos (menor parametrización y que estas se incorporen a nivel más global y no desde los procesos a escala más pequeña), así como la posibilidad de modelar en forma acoplada lo que ocurre tanto a nivel atmosférico como oceánico.

Tabla 1 Centros de Estudio de Cambio Climático a Nivel Mundial

Centro de Investigación	Acrónimo
Canadian Center for Climate Modelling and Analysis (Canadá)	CCCma
Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australia)	CSIRO
Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (EEUU)	GFDL
Institute for Numerical Mathematics (Rusia)	INM
Institut Pierre Simon Laplace (Francia)	IPSL
Max-Planck-Institut for Meteorology (Alemania)	MPI-M
Meteorological Research Institute (Japón)	MRI
National Center for Atmospheric Research (EEUU)	NCAR
National Institute for Environmental Studies (Japón)	NIES
UK Meteorological Office (Reino Unido)	UKMO

Fuente: Ministerio de Energía, 2011.

A pesar de los avances en el tema de modelación del clima y la mayor comprensión que se tiene actualmente de este, existe una alta incertidumbre en los resultados entregados para estimar los efectos del cambio Climático. Hay incerteza en cuanto a los cambios que puedan experimentar ciertos procesos del sistema climático bajo un clima perturbado, como por ejemplo la formación de nubes. Así como el desconocimiento que existe en cuanto a la influencia de los aerosoles sobre el balance de radiación, los cambios que se podrían producir en la circulación oceánica (de alto impacto a nivel regional y mundial), cambio de flujos de carbono imprevistos que puedan producirse entre la atmósfera, la biósfera y los océanos.

Es así como, con el fin de disminuir la incertidumbre y generar una mayor coherencia en el análisis de los efectos del cambio climático se han generado proyectos (Model Intercomparison Projects, <http://www.clivar.org/science/mips>) que reúnen a los distintos centros y que analizan que los escenarios tengan coherencia a un mayor plazo (proyecciones al 2300 o al año 3000) donde se preocupan de que se conserve el equilibrio de la radiación atmosférica (IPCC, Physical Science Basis, 2007).

3.1 Metodologías Para el análisis a nivel local

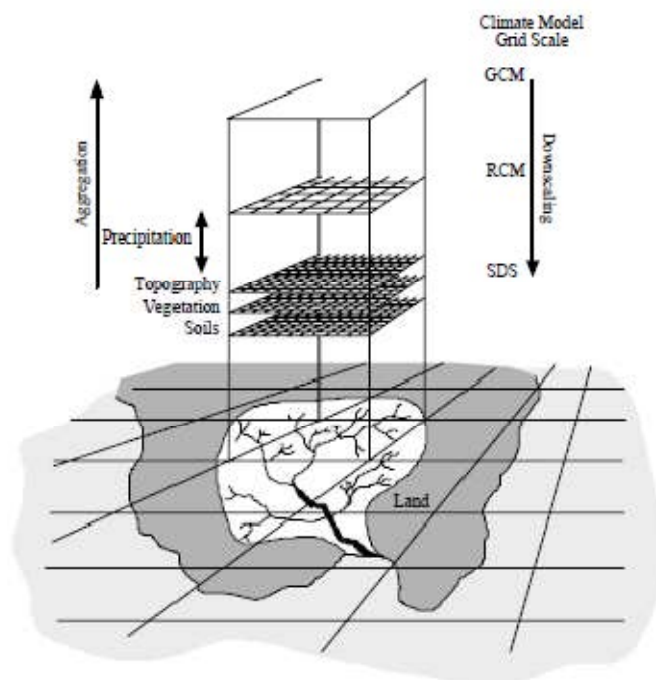
Para poder analizar los impactos a nivel local es necesario escalar las variables climáticas, ya que los modelos globales tienen una resolución espacial muy baja (cientos de kilómetros), los que muchas veces dejan fuera efectos locales como los que provoca, por ejemplo, la Cordillera de los Andes. Una alternativa ha sido el desarrollo de modelos regionales, los cuales permiten manteniendo la dinámica de los modelos globales generar valores con una mayor resolución (20 a 50 km) para las variables meteorológicas, la dificultad de estos modelos son su alta demanda de capacidad computacional y tienen alta sensibilidad a las condiciones de borde seleccionadas al comienzo de la modelación (Wilby et al, 2007).

También se pueden ocupar enfoques de tipificación meteorológica, agrupando datos meteorológicos locales, en relación con los patrones prevalecientes de la circulación atmosférica. Este tipo de escalamiento se basa en los vínculos entre el clima a gran escala y el clima a escala local. La técnica también es válida para una amplia variedad de variables ambientales, así como aplicaciones en múltiples sitios. Sin embargo, este enfoque de tipificación meteorológica puede ser demasiado local, una base pobre para el escalamiento de acontecimientos anormales. Potencialmente, la limitación más grave es que los cambios en las precipitaciones producidas por los cambios en la frecuencia de los patrones del clima rara vez son coherentes con los cambios producidos por el GCM anfitrión (a no ser que se usen predictores adicionales, tales como la humedad atmosférica) (Wilby et al, 2007).

Otra alternativa son los modelos meteorológicos de generación estocástica WGEN, LARS-WG o EARWIG. Los escenarios de cambio climático son generados estocásticamente con un grupo de parámetros escalados de acuerdo con los resultados del GCM considerado como generador del clima a escala global. La principal ventaja de la técnica es que puede reproducir exactamente muchas estadísticas climáticas observadas y se ha utilizado ampliamente, en particular para la evaluación del impacto agrícola. Además, los modelos meteorológicos de generación estocástica permiten la producción eficiente de grandes conjuntos de escenarios para el análisis de riesgos. Las desventajas principales se refieren a la poca habilidad de reproducir la variabilidad climática tanto interanual como decadal, ya los efectos imprevistos que los cambios en la precipitación pueden tener en las variables secundarias tales como la temperatura (Wilby et al, 2007).

Otra posibilidad es la de generar funciones de transferencia estadística basadas en relaciones empíricas entre los datos del modelo global o regional y la estación que se quiere usar para el análisis local. El tipo de relaciones que se han ocupado son regresiones lineales y no lineales, redes neuronales, correlación canónica y análisis de componentes principales. La gran ventaja de este enfoque es su fácil aplicación, su principal debilidad es que las relaciones encontradas explican solo parte de variación climática observada (especialmente en el caso de la precipitación). Al igual que en los modelos de tipificación del meteorológica asumen como válido para el futuro la relación actual entre las variables climáticas.

Figura 2 Esquema general de la agregación y escalamiento (downscaling) de variables climáticas para análisis de impactos dado cambio climático.



Fuente: Wilby et al., 2007

4. El Cambio Climático y los Recursos Hídricos en Chile

Las primeras estimaciones a nivel institucional de los efectos del cambio climático en Chile fueron realizadas dentro del marco del estudio "Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI" mandatado por la Comisión Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) al departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile el año 2006.

En este estudio se hace un análisis del Clima observado a finales del siglo XX y se realizan proyecciones para el siglo XXI. Las proyecciones para el siglo XXI se hacen en base a un modelo regional de Cambio Climático denominado PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies), el cual tiene como condiciones de borde un modelo de Global de Circulación atmosférica como es el HadCM3 generado por el Centro de investigación de Cambio Climático del Reino Unido: UK Meteorological Office. El modelo PRECIS se evaluó para dos escenarios el A2 y el B2, para los períodos 1960-1990 y 2071-2100. La caracterización del período intermedio 2011-2030 y 2046-2065 se caracterizaron por medio de salidas del AOGCM (atmosphere-ocean coupled general circulation model) usado para forzar las simulaciones regionales (HadCM3) para el escenario A2 que es aquel más extremo en cuanto a las emisiones de gases con efecto invernadero.

Los datos entregados por este estudio ha sido ampliamente usado para los fines de evaluar los impactos a nivel local, sus principales desventajas son:

- No entrega datos del modelo PRECIS para el período intermedio (2011-2069)
- Solo se analizan dos escenarios (A2 y B2)
- Entre en algunas zonas del país sobre los Andes PRECIS subestima la temperatura media anual escala espacial de las estaciones no alcanza a ser bien representada (angostura de los valles, etc.)
- En general la salida de PRECIS sobreestima la precipitación en el terreno elevado (angostura de valles, problemas de medición, etc). Sin embargo, los ciclos anuales son bien replicados por el modelo.

Otra estudio importante en evaluación de impactos del cambio climático en Chile es el estudio "Economía del Cambio Climático en Chile, Síntesis" (CEPAL, 2009), el cual El objetivo de este estudio es analizar el efecto económico que pueda tener el cambio climático en Chile en los próximos 100 años. En este marco, se evalúan económicamente los impactos potenciales del cambio climático sobre los sectores silvoagropecuario, hidroeléctrico y de agua potable, se estudian las opciones de adaptación, se analizan las proyecciones de emisiones de GEI y las opciones de mitigación a nivel local. Para la evaluación de los impactos se usan los resultados del modelo HadCM3 modelo de clima global de la Oficina Meteorológica de Inglaterra para los escenarios A2 y B2. Las proyecciones climáticas futuras se analizan considerando tres períodos distintos. Un período temprano que va de 2010 a 2040, uno intermedio de 2040 a 2070 y uno tardío de 2070 a 2100. Para mejorar el nivel de certeza, ya que el análisis incluye sólo un modelo GCM y sólo para dos escenarios, se lleva a cabo un

análisis de incertidumbre de las proyecciones. La intención de este análisis es poder distinguir cuáles de las proyecciones que se ofrecen corresponden a señales robustas, que comparten un gran número de modelos en comparación con aquellas proyecciones que tienen un mayor grado de incertidumbre, para ello se consideran los resultados de los modelos AOGCM corridos en el cuarto informe del IPCC (IPCC, 2007).

Figura 3 Resultados del análisis de incertidumbre

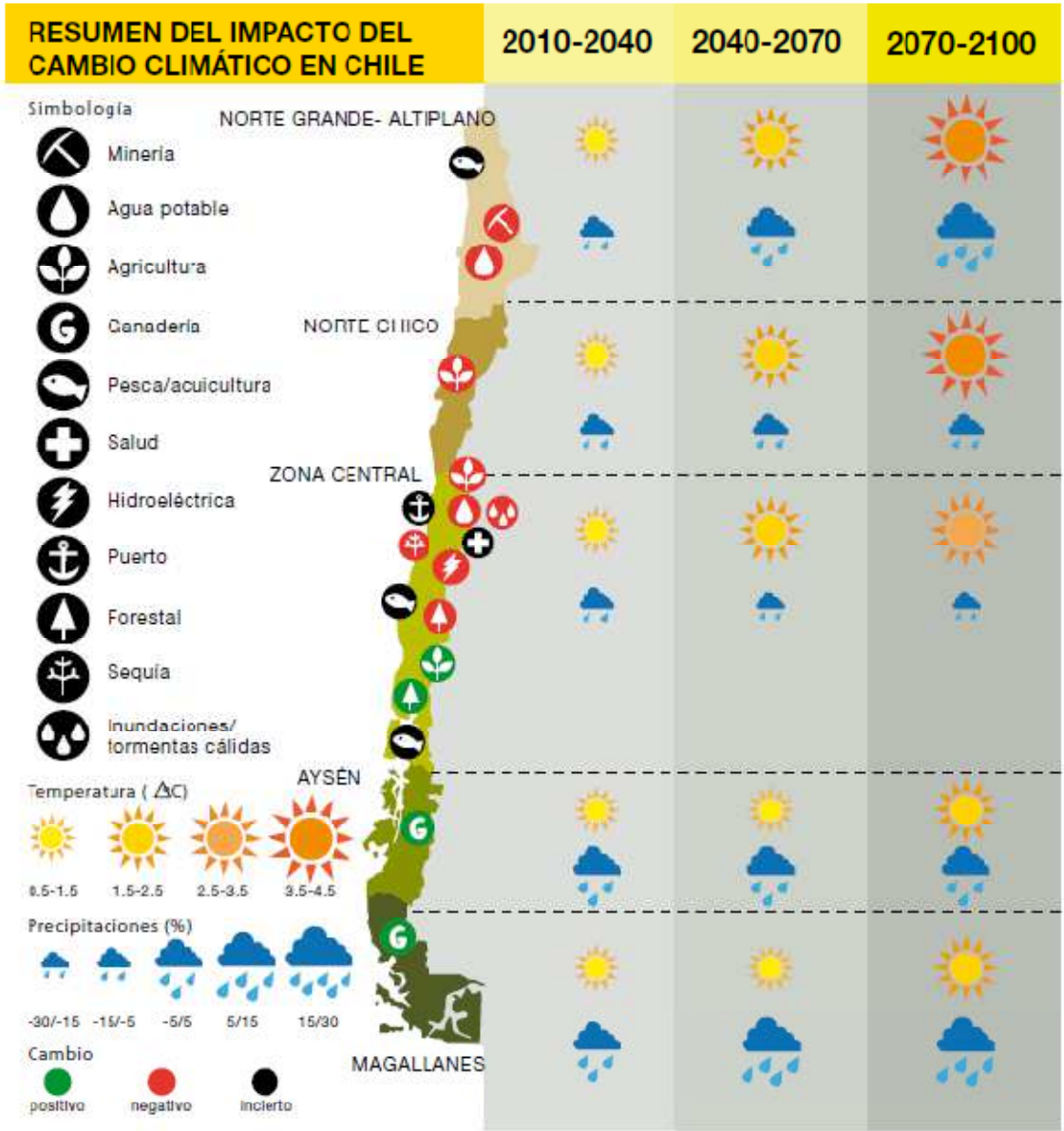
Región	Robustez de la señal		
	Temprano	Intermedio	Tardío
Reg 1: Altiplano (18-23S)	No existe una señal clara en cambio de precipitación		
	Disminución: 0/-10%		Aumento: +5/+10%
Reg 2: Norte Grande (23-27S)	No existe una señal clara en cambio de precipitación		
	Disminución: -5/-10%		
Reg 3: Norte Chico (28-32S)	Leve señal de disminución de precipitaciones		
	Disminución: -5%	Disminución: -10/-20%	
Reg 4: Chile Central (32-38S)	Señal robusta de disminución de precipitaciones		
	Disminución: -5/-10%	Disminución: -10/-20%	Disminución: -20/-30%
Reg 5: Zona Sur (38-42S)	Señal robusta de disminución de precipitaciones		
	Disminución: -5/-10%	Disminución: -10/-20%	Disminución: -20/-30%
Reg 6: Patagonia (44-49S)	No existe una señal clara en cambio de precipitación		
	Neutro: -5/5%		
Reg 7: Magallanes (50-55S)	Señal robusta de disminución de precipitaciones		
	Neutro: -5/5%	Aumento: +5/+10%	

* Se presenta el resultado del análisis de incertidumbre y proyección de acuerdo al modelo HadCM3.

Fuente: Cepal, 2009

Figura 4 Resumen Impactos en los distintos Sectores Productivos

CHILE: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS IMPACTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y SU RELACIÓN CON LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS FUTURAS ^a



^a Se indican impactos sectoriales y proyecciones climáticas (para el escenario A2). Con respecto a los impactos sectoriales se consideran tres alternativas: los colores rojo o verde implican un impacto negativo o positivo respectivamente; el color negro corresponde a sectores donde se requiere más conocimiento para poder desarrollar una evaluación de impactos.

Fuente: Cepal, 2009

5. Metodologías Utilizadas para la Evaluación del Cambio Climático en los Recursos Hídricos

Hacer una evaluación de los efectos del cambio climático en los recursos hídricos puede tener distintos objetivos, por ejemplo ver la disponibilidad de agua en una cuenca, ver como se afectará la generación de electricidad, evaluar los efectos en la agricultura, en el agua potable o ver como se afecta la infraestructura. Dependiendo de este objetivo se debe elegir el tipo de metodología a utilizar, ya que en cada caso son requeridos distintos niveles de resolución de las variables o de la escala temporal y espacial. Por ejemplo para infraestructura se requiere analizar en general una cuenca aportante pequeña y se requerirá revisar un caudal de crecida, en cambio para ver disponibilidad se requiere el análisis de una cuenca completa y a caudales medios mensuales. Otro aspecto a considerar es la calidad y cantidad de datos disponibles para realizar la evaluación.

En los subcapítulos a continuación se realiza una revisión de estudios que analizan la componente de cambio climático, en el subcapítulo 5.1 principalmente considerando caudales medios mensuales y en el 5.2 se considerará metodologías para caudales de crecidas.

5.1 Análisis Caudales Medios.

Para evaluar los impactos del cambio climático en los recursos hídricos para condiciones medias, usualmente se necesita tener o calibrar un modelo hidrológico que incluya las variables atmosféricas susceptibles de ser modificadas por el cambio climático, como son la temperatura del aire, la precipitación, humedad relativa del aire, presión atmosférica, etc. El modelo debe incluir al menos una de estas variables, las cuales deben ser elegidas dependiendo de las posibilidades de información existentes ya que el modelo debe ser calibrado primero bajo las condiciones climáticas actuales.

Luego existen básicamente dos posibilidades, hacer sensibilidad de las variables meteorológicas o de alguna forma escalamiento (downscaling) las variables meteorológicas de un GCM para que sean representativas como variable de entrada para el modelo hidrológico. También es posible complementar ambas alternativas.

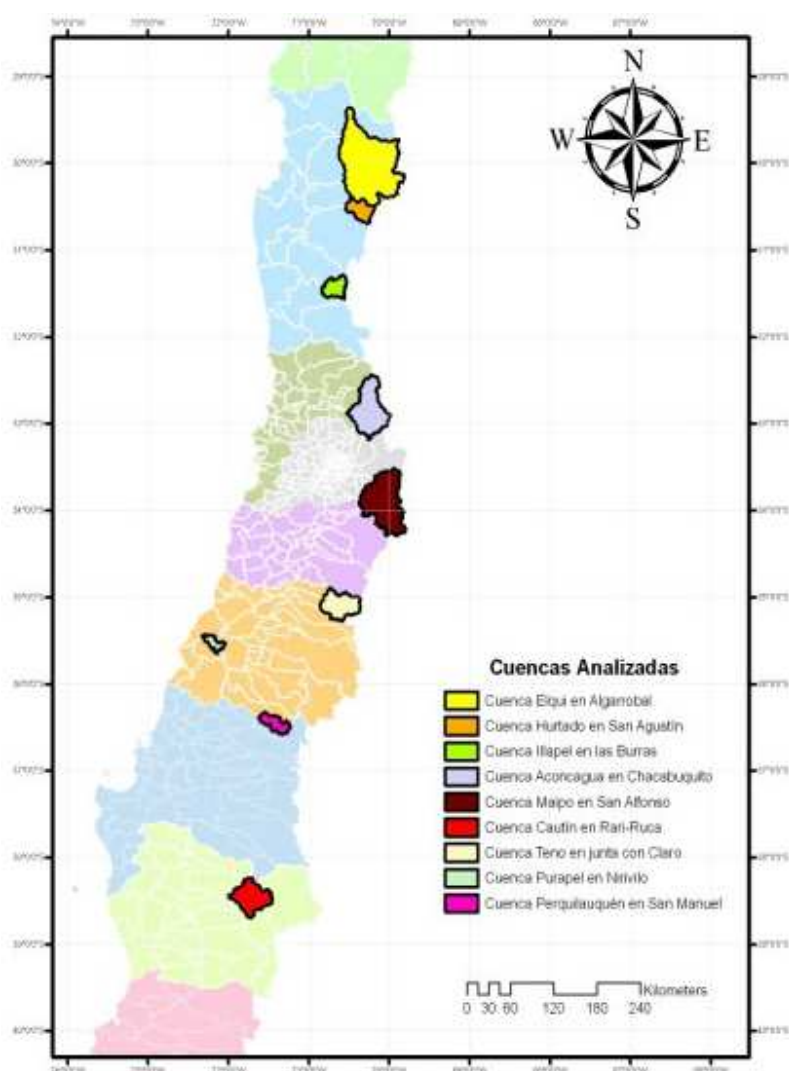
A continuación se presentan estudios donde se han analizado algunas de las posibilidades de análisis señaladas anteriormente.

5.1.1 Análisis de Vulnerabilidad del Sector Silvoagropecuario, Recursos Hídricos y Edáficos de Chile Frente a Escenarios de Cambio Climático, Capítulo Análisis de Vulnerabilidad de los Recursos Hídricos de Chile Frente a Escenarios de Cambio Climático, CONAMA-AGRIMED, Universidad de Chile, 2008.

El capítulo del estudio enfocado en recursos hídricos se cuantificó el impacto que en la escorrentía y disponibilidad del recurso frente a los posibles cambios de temperatura,

evaporación y precipitación correspondientes al escenario A2, para el período de análisis 2035 a 2065. La metodología utilizada incluye la calibración de modelos de simulación hidrológica (WEAP: Water Evaluation and Planning, GR4J: Modèles Hydrologiques du Génie Rural 4 paramètres Journalier) para nueve subcuencas de cuencas chilenas situadas entre la IV y la IX Región: Aconcagua, Cautin, Elqui, Illapel, Maipo, Perquillauquen, Hurtado, Illapel y Teno. Los criterios de selección de estas cuencas fueron el grado de intervención antrópica (preferiblemente baja) y la importancia que tienen en cuanto a la disponibilidad del recurso hídrico dentro de la región analizada (preferiblemente alta). Se eligieron por tanto cuencas principalmente de cabecera, con distintos regímenes hidrológicos (pluvial, nival o nivopluviales), que presentaban una mínima intervención y de alta importancia para las actividades desarrolladas en la zona.

Figura 5 Ubicación general de las cuencas analizadas



Fuente: CONAMA, 2008.

Los datos utilizados para la evaluación del cambio climático se obtuvieron del modelo PRECIS (CONAMA, 2006), excepto la evaporación que se obtiene de una relación (relación de Thornthwaite) con la temperatura obtenida del PRECIS. En general, se validan los datos del PRECIS para la situación actual a través de un análisis de frecuencia entre los datos de la estación y el punto de grilla del PRECIS más cercano a esta, generando una relación entre las variables simuladas y observadas. Debido a que el modelo PRECIS no generó datos para el período analizado (2035- 2065) sino que para el período actual (1960- 1990) y para fines de siglo (2071-2100), se generaron los datos para el período de análisis a partir de las tendencias medias mensuales y sus variaciones en los períodos conocidos. Para generar los datos en la estación requerida se aplicaron las relaciones calculadas en el período actual con el punto de grilla más cercano a la misma. Para generar los datos diarios necesarios para el modelo GR4J se consideró que la proporción entre el valor diario de la variable y el valor mensual de cada año simulado en el futuro (años 2071 a 2100) se mantenía en el período.

La vulnerabilidad se evaluó a partir de la capacidad del sistema para soportar stress hídrico (incluyó catastro de infraestructura, caracterización hidrológica a nivel mensual, diagnóstico a partir del estado de los derechos de agua). Para el análisis de sequía se generaron índices para poder analizar cambios en la frecuencia, intensidad o duración de las mismas.

5.1.2 Efectos del Cambio Climático en la Disponibilidad de Recursos Hídricos a Nivel de Cuenca – Implementación de un Modelo Integrado a Nivel Superficial y Subterráneo, Figueroa, R., 2008.

El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos que podría producir el cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos superficiales y subterráneos de una cuenca, considerando cómo afectaría en actividades tales como la agricultura, la minería, la generación hidroeléctrica y el consumo de agua potable. La cuenca analizada corresponde a la del Cachapoal, ubicada en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (VI).

Figura 6 Cuenca del Cachapoal



Fuente: CNR, 2005

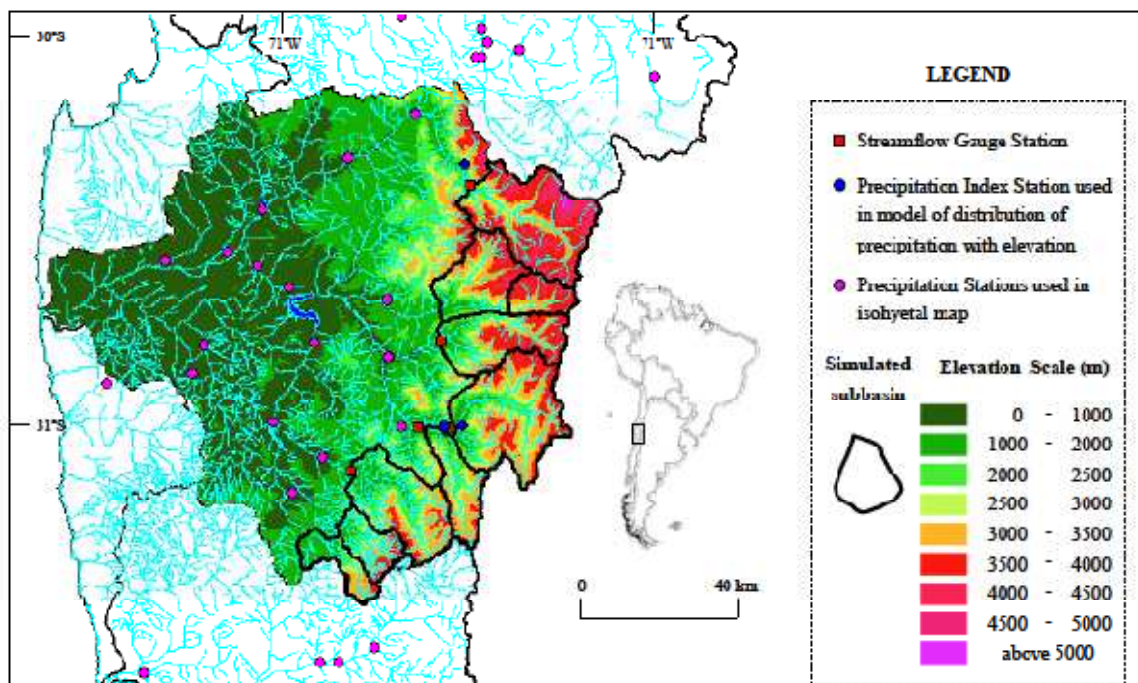
Para dicha cuenca se construyó y calibró un modelo entre los años 1999 y 2005, que permitió integrar la componente superficial y subterránea de los recursos hídricos. Para simular la escorrentía superficial (hidrología) se utilizó el Modelo Sacramento + SNOW-17, para el Modelo de Aguas Subterráneas se actualizó y mejoró un modelo previo de la DGA en Visual Modflow (DGA, 2006), y a base de los dos modelos anteriores más los distintos usos de la cuenca se elaboró un Modelo de Simulación Operacional de la misma.

Para la evaluación de los efectos del cambio climático, se consideraron dos escenarios incluidos en el tercer informe de IPCC (IPCC, 2001) SRES A2 y B2 para datos del GCM HadCM3. Para llevar a cabo el escalamiento de las variables meteorológicas, se utilizó el programa SDSM 4.2 (Wilby et al., 2007) que usa escalamiento estadístico con componentes aleatorias de las variables meteorológicas, mediante el cual se generaron 6 escenarios de cambio climático, con horizontes de 30 años (2005-2035) que fueron evaluados en el Modelo de Simulación Operacional de la cuenca.

5.1.3 Climate change impacts on the hydrology of a snowmelt driven basin in semiarid Chile, Vicuña, S. et al., 2010.

Este estudio presenta el impacto del Cambio Climático en la cuenca alta del río Limarí, ubicada dentro de un rango de elevación entre los 1000 a 5500 m.s.n.m. La Cuenca del río Limarí está ubicada en el centro-Norte de Chile (30°S, 70°W).

Figura Cuenca del Limarí



Fuente: Vicuña, S. et al., 2010

En este estudio el enfoque fue el de utilizar los datos escalados de las variables climáticas del modelo PRECIS para los escenarios A2 y B2 (CONAMA, 2006) ajustando las propiedades estadísticas de los datos a los datos observados de las estaciones en la cuenca. Luego se introdujeron estos datos como entrada en el modelo WEAP (Water Evaluation and Planning), que es un modelo que considera una hidrología dependiente de las variables climáticas y simula la operación de oferta y demanda de agua dentro de la cuenca. Previamente el modelo WEAP fue calibrado para las condiciones climáticas actuales.

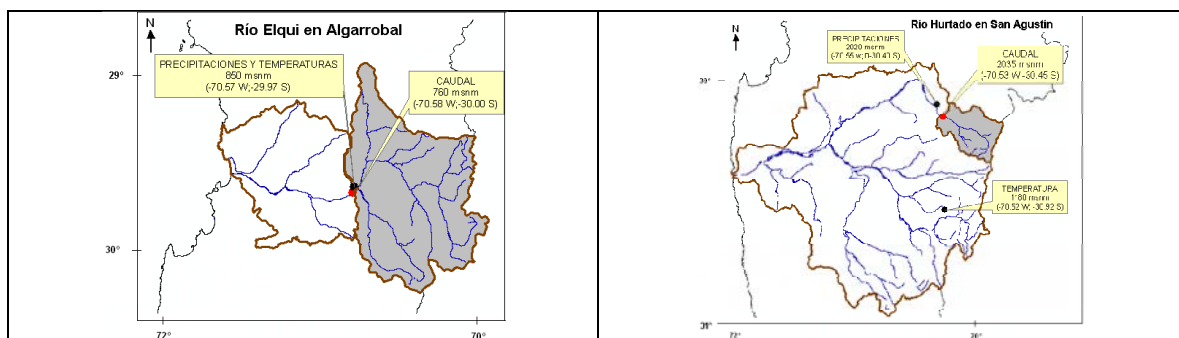
5.1.4 Estimación de la Variación de Caudales Medios Frente a Cambio Climático Entre la IV y VIII Región de Chile, Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería, Cruzat M., 2010

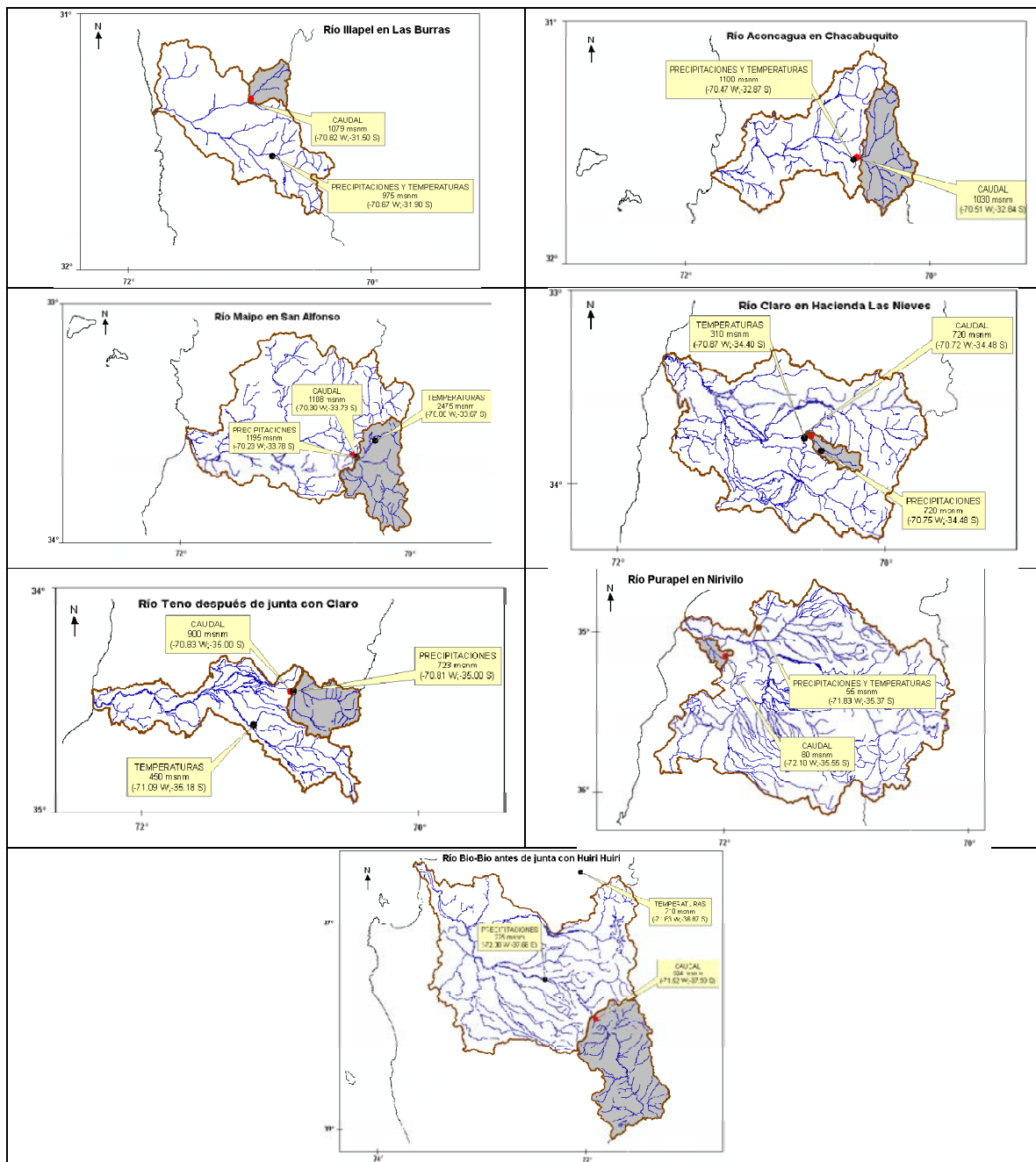
El estudio se trabaja a nivel mensual. Las estaciones del año se determinaron de acuerdo a la similitud en los promedios mensuales. También se hace análisis estacional (otoño: marzo, abril y mayo; invierno: junio, julio y agosto; primavera: septiembre, octubre y noviembre; y verano: diciembre, enero y febrero). Los caudales y precipitaciones de cada estación del año se expresan como el volumen total de los meses que forman la estación y las temperaturas se caracterizan a través del promedio de los meses correspondientes a cada estación.

En esta tesis se usaron los datos del modelo PRECIS (CONAMA, 2006) para un período actual (entre 1960 y 1990) y para un período futuro (entre 2070 y 2100) bajo los escenarios B2 y A2, estos datos se corrigieron de acuerdo a las observaciones en el período la estación de cada subcuenca. Se modelaron los caudales a través de una función de regresión lineal donde se usaron las variables de temperatura y precipitación como variables explicativas. Además se usó un factor P (proporción del caudal anual en relación a la acumulación de precipitaciones que aportaron a ese caudal), para mantener el balance hídrico anual. Los resultados de caudales se compararon en algunas cuencas con los resultados de otros estudios para el modelo WEAP.

Las subcuencas donde se aplicó la metodología pertenecen a las siguientes cuencas: Elqui, Limarí, Choapa, Aconcagua, Maipo, Rapel, Mataquito, Maule, Biobío. El criterio de selección, fue el de cuencas con baja intervención antrópica y con información suficiente para realizar el análisis.

Figura 7 Ubicación de las cuencas analizadas





Fuente: Cruzat, 2010.

5.1.5 Aplicabilidad de Funciones de Transferencia Para Proyección de Efectos de Cambio Climático Sobre Caudales en la Cuenca Alta del Río Loa. Silva, C., Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, 2010.

El objetivo del estudio es evaluar la aplicabilidad de los modelos de función de transferencia (modelos ARMAX) en la proyección de series de caudales futuros en la cuenca alta del río Loa considerando los efectos del cambio climático global. Para esto, se analiza tanto la serie de caudales proyectada en periodo futuro, como las etapas intermedias de cálculo realizadas para obtener este resultado.

Figura 8 Área de estudio cenca Alta del Río Loa.



Fuente: Silva, C., 2010.

Los efectos del cambio climático global quedan caracterizados mediante las proyecciones meteorológicas del modelo meteorológico regional PRECIS (CONAMA, 2006). Estas proyecciones se realizan para un periodo de línea de base (1960-1990) y otro futuro (2070-2100) considerando como variable de interés las precipitaciones medias mensuales, en periodo de línea de base y futuro A2.

Mediante el uso de modelos de función de transferencia se realizaron proyecciones de caudales futuros a nivel mensual, empleando como variables de entrada las series de precipitaciones PRECIS.

Previamente se requirió validar y corregir las series de precipitaciones PRECIS, calibrar el modelo de función de transferencia a partir de series históricas de precipitaciones y

caudales, y validarlo tanto para las series históricas como para las respectivas series PRECIS corregidas. Un punto importante en el desarrollo de la metodología, corresponde al cumplimiento de normalidad y estacionariedad requeridos para las series modeladas mediante función de transferencia, ninguno de los cuales se cumple para las series de caudales y precipitaciones observados, debiendo aplicarse previamente funciones de transformación sobre las series. Como etapa final del proceso de cálculo, se aplican las inversas de éstas últimas transformaciones en las series proyectadas a futuro por el modelo de función de transferencia.

5.1.6 Selección y Aplicación de un Modelo Hidrológico para Estimar los impactos del Cambio Climático en la Generación de Energía del Sistema Interconectado Central, Ministerio de Energía-Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, 2011

El objetivo de este estudio es el desarrollo de una herramienta metodológica para evaluar el impacto del cambio climático en la capacidad hídrica de las cuencas que alimentan el Sistema interconectado Central para el período de análisis 2011- 2050. Para la evaluación se consideraron ciertas cuencas de especial interés para la producción hidroeléctrica de acuerdo como se señala en la siguiente figura.

Figura 9 Selección de cuencas para la evaluación de los recursos hídricos

Cuenca seleccionada inicialmente	Cuenca modelada en el estudio
Elqui en Algarrobal	Elqui en Algarrobal
Rapel en Los Molles	Hurtado en San Agustín
Aconcagua en Chacabuenito	Aconcagua en Chacabuenito
Maipo en San Alfonso	Maipo en San Alfonso
Cachapoal aguas abajo junta Curiaueral	Cachapoal aguas abajo junta Curiaueral
Río Teno después de junta con río Claro	Río Teno después de junta con río Claro
Maule en Amerillo	Afluente Laguna Invernada
	Afluente Embalse Melado
	Afluente Laguna Maule
	Afl río Claro + estero Las Garzas
Afluente Laguna Laja	Afluente Laguna Laja
Bio Bio en Llanquén	Bio Bio en Llanquén
Liquiñe en Liquiñe	Liquiñe en Liquiñe
Rahue en desagué lago Rupanco	Rahue en desagué lago Rupanco
Petrohué en desagué lago Todos Los Santos	-
-	Cuenca intermedia río Blanco

Fuente: Ministerio de Energía, 2011

El desarrollo de la metodología incluyó el análisis de los datos de 12 modelos GCM usados para el análisis de emisiones futuras en el informe IPCC 2007. Los datos de los GCMs se compararon con los de las estaciones consideradas para evaluar cada subcuenca seleccionada, el período línea base considerado para la comparación fue 1950 – 1999, ajustándose a la longitud de datos existentes en cada subcuenca, las variables meteorológicas utilizadas para el análisis fueron precipitación y temperatura en su variabilidad media mensual. Se escalan los datos del GCM para hacerlos comparables a los datos de la estación en forma espacial y temporal. El escalamiento espacial de los datos considera la interpolación lineal de los valores asociados a la grilla del GCM, hacia el punto donde se encuentra la estación meteorológica analizada. El escalamiento temporal considera una comparación de las curvas de duración de los datos mensuales del GCM (ya escalados espacialmente) y de las estaciones meteorológicas. La comparación se realiza correlacionando ambas series de datos ordenados y utilizando la regresión obtenida de dicha correlación, para corregir los datos del GCM. De esta manera adecúan los datos tanto en magnitud como en estacionalidad.

La selección final de los modelos a utilizar quedó sujeta al criterio sobre las correlaciones, cuando el coeficiente de determinación fuera sobre 0,89 para al menos el 75% de las estaciones en estudio, y que el porcentaje restante no tenga un coeficiente de determinación de al menos 0,7.

Figura 10 Modelos Seleccionados

Número	Centro de Investigación	Acrónimo	Modelo
2	Australia's Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australia)	CSIRO	Mk3.0
3	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (EEUU)	GFDL	CM2.0
4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (EEUU)	GFDL	CM2.1
6	Institut Pierre Simon Laplace (Francia)	IPSL	CM4
12	UK Meteorological Office (Reino Unido)	UKMO	HadCM3

Fuente: Ministerio Energía, 2011.

Para la estimación de los datos futuros se hace un escalamiento de los GCM seleccionados para el escenario A2 considerando las correlaciones de las curvas de duración en la línea base.

Para la evaluación de los recursos hídricos se usó el módulo de hidrología del modelo WEAP (Water Evaluation and Planning), el cual se calibró en el período base de acuerdo a los datos de cada estación. Para la estimación de los caudales futuros, se introdujeron al modelo los datos meteorológicos escalados desde los GCMs seleccionados.

5.2 Análisis para condiciones extremas: crecidas

De acuerdo a varias publicaciones (Cepal, 2009; Garreaud et al., 2007) con el cambio climático habrá un aumento de tormentas cálidas, es decir que aumentará la cota de la línea de nieve durante las tormentas, lo que producirá una mayor área aportante al caudal durante la tormenta. Sin embargo existen recientes estudios (Kharin et al. 2007) que proyectan que los eventos de lluvia serán a su vez más intensos para algunas zonas del planeta.

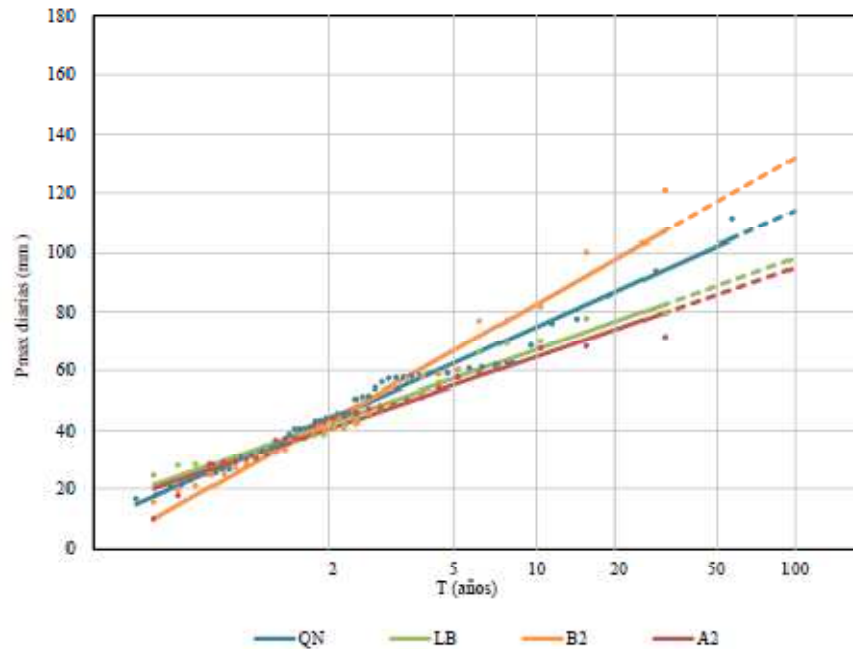
Algunos estudios donde se usan metodologías para evaluar caudales de crecidas se presentan a continuación

5.2.1 Riesgo de Inundación Producto del Cambio Climático, Caso de Estudio: Quebrada San Ramón, Perez, J., Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, 2011.

En este estudio se evaluó el riesgo de inundaciones en la quebrada San Ramón, en la comuna de La Reina, Santiago; zona que se ha observado especialmente susceptible ante este tipo de eventos hidrometeorológicos extremos. El objetivo general fue cuantificar el nivel de riesgo en la zona de estudio, calculado como una combinación entre niveles de peligro y vulnerabilidad. Como peligro, se consideró el nivel de inundación generado por las crecidas probables de ocurrir ante la situación climática actual y los escenarios climáticos A2 y B2 en el período 2070 a 2100; la vulnerabilidad se estimó en función del actual uso de suelo urbano.

Las inundaciones se han modelado a partir del cálculo del eje hidráulico en la quebrada y canal San Ramón asociado a crecidas, las cuales se estimaron mediante un hidrograma unitario sintético, en función de tormentas asociadas a distintos períodos de retorno. Dichas tormentas se obtuvieron a través del estudio de series de tiempo de variables meteorológicas de precipitación (máxima diaria) y temperatura (medias máximas en días de lluvia del período pluvial), modeladas para la situación climática actual y para escenarios futuros. Las variables meteorológicas para los escenarios futuros se obtuvieron del modelo PRECIS (CONAMA, 2006). El escalamiento de las variables meteorológicas se realizó a través de la correlación de las curvas de frecuencia entre la línea base y la estación con datos observados.

Figura 11 Análisis de Frecuencia de P24 max para Q. Normal, Línea Base, A2 y B2, Según Ajuste a Distribución Gumbel



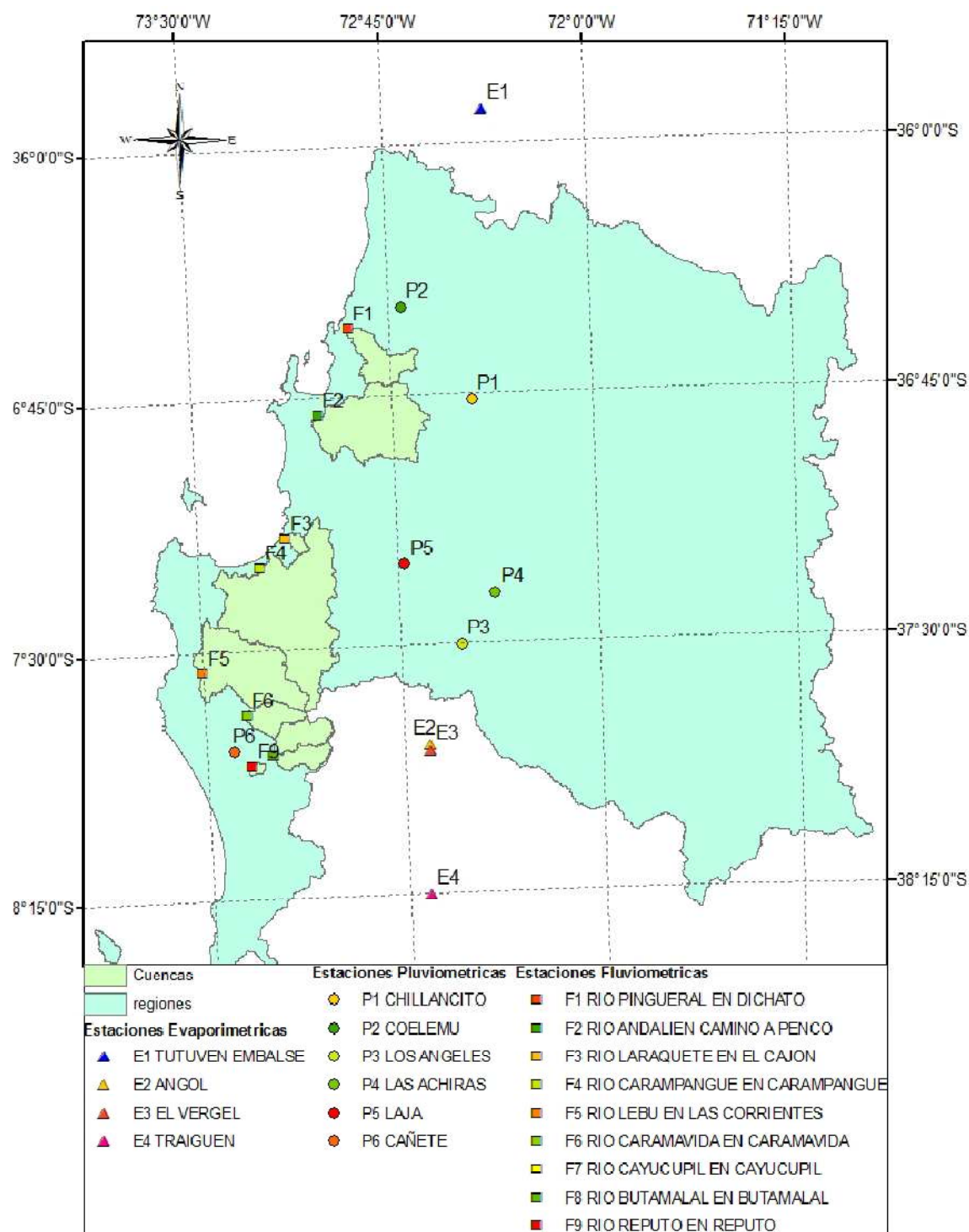
Fuente: Perez, J, 2011

El cálculo del eje hidráulico en la quebrada proporcionó caudales de desborde en puntos críticos, los cuales se ingresaron como entradas de flujo para el cálculo del eje hidráulico en las calles, determinando niveles de inundación. Por otra parte, se ha estudiado el uso de suelo en la zona expuesta a las inundaciones, de modo de calificar cuantitativamente niveles existentes de vulnerabilidad. De esta forma, niveles de inundación y vulnerabilidad se han superpuesto, para generar mapas de riesgo.

5.2.2 Efecto del Cambio Climático en la Seguridad Hidrológica de Obras Hidráulicas. Análisis en Cuencas Pluviales de la Zona Central de Chile Para el Escenario A2, Raddatz, D., Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, 2011.

Este estudio se desarrolla en cuencas pluviales de la zona costera de la Región del Biobío y su objetivo principal es estudiar los efectos del cambio climático en la seguridad hidrológica de obras hidráulicas para el escenario de emisiones A2 en el período 2070-2100. Para esto, se calibra y valida el modelo hidrológico GR4J en aquellas cuencas con información fluviométrica, utilizando como entradas al modelo las series de precipitación y evaporación media diaria observadas en estaciones representativas de las cuencas de estudio.

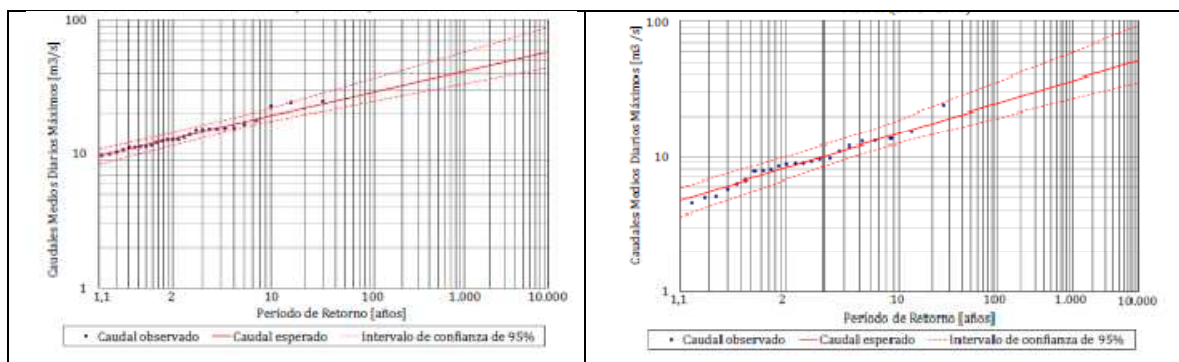
Figura 12 Estaciones consideradas



Fuente: Raddatz, D., 2011

Posteriormente los modelos calibrados son utilizados para determinar las series de caudales actuales y futuros, a partir de la información meteorológica proporcionada por el modelo PRECIS DGF, previamente corregida por las correlaciones mensuales en los períodos coincidentes de la línea base y la información pluviométrica y evaporimétrica, las que luego se aplican en la totalidad del período que comprende la línea base y el escenario A2. Finalmente se realiza un análisis de frecuencia con los caudales medios diarios máximos anuales donde se determinan los caudales máximos para distintos períodos de retorno para la línea base y el escenario A2.

Figura 13 Análisis de Frecuencia Caudales línea base y escenario A2, estación Pingual en Dichato



Fuente: Raddatz, D., 2011

Se realiza también un análisis en cuencas sin información fluviométrica, para lo cual se determinan los parámetros operacionales del modelo por medio de correlaciones entre estos e índices que dependen de la geomorfología de la cuenca. Estos parámetros permiten determinar la variación de los períodos de retorno y caudales actuales y futuros del mismo modo en el que se realizó para las cuencas con información fluviométrica.

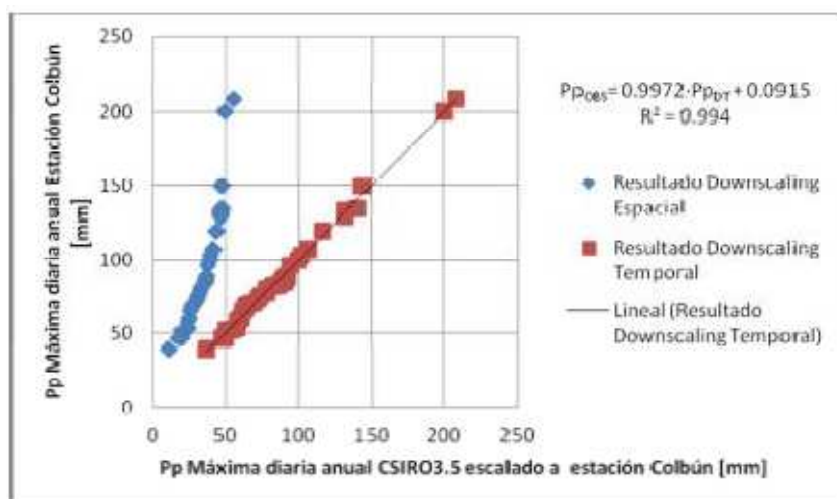
5.2.3 Variación de Eventos Extremos de Precipitación Diaria Proyectados a Medios del Siglo XXI, Resultados en Regiones de Coquimbo y Maule, Lagos, M. y Vargas, X., 2011.

En este estudio se presenta un análisis estadístico de eventos de precipitación diarios para escenarios de cambio climático A2 y B1 para el periodo 2045-2065, mostrando resultados de la variación de la Precipitación Máxima Probable (PMP) estadística en las Regiones de Coquimbo y el Maule para el modelo de circulación global ECHAM5. Del mismo modo se analiza esta misma PMP, junto a eventos de $T=1.000$ y 10.000 años, para las estaciones cercanas a los embalses Puclaro y Colbún considerando 10 GCM.

El escalamiento espacial desde los datos del GCM para cada escenario (línea Base, A2 y B2) a los datos de las estaciones se realizó a través de una ponderación del dato por el inverso de la distancia de cada uno de los 4 nodos de la grilla que involucra a la

estación meteorológica. Para el escalamiento temporal la serie anual de máximas precipitaciones diarias se ajusta a las observaciones locales mediante correlaciones estadísticas entre los valores máximos diarios observados y modelados asociados a igual probabilidad de excedencia en el periodo Línea base.

Figura 14 Resultado Dowscaling temporal para modelo GCM CSIRO



Fuente: Lagos, M., et al., 2011.

5.2.4 Impacto del Cambio Climático en el Cálculo de crecidas de Diseño para una cuenca Nivo-Pluvial de montaña, Zona Central de Chile, Robles, S. y Santander, A., 2011.

Se realiza un análisis de sensibilidad del cálculo de caudales máximos de crecida para distintos períodos de retorno obtenidos en la cuenca alta del río Coya de régimen nivo-pluvial, aportante a una quebrada de montaña en la Zona Central de Chile (VI Región), aplicando una metodología de downscaling de los resultados de las simulaciones del modelo global HadCM3 para los escenarios A1FI y B1A del Informe Especial de Emisiones (IPCC, 2000).

Las variables a escalar son las de temperatura y precipitación. Del modelo HadCM3 se considera el dato medio mensual de temperaturas el cual se relaciona a la temperatura máxima diaria mensual de la estación para el período de línea base (1963-2000). El escalamiento de la precipitación se hace bajo el supuesto que las precipitaciones máximas diarias anuales siguen la misma tendencia en el tiempo de las precipitaciones mensuales del mes en que se originan. Este supuesto limita un la validez del análisis, pero se sustenta en el análisis de los datos de la estación analizada (Sewell) entre los años 1941 y 2005. Para el escalamiento se toma un factor calculado a partir del promedio de las precipitaciones medias mensuales en el período base entre los datos observados de la estación y los datos del modelo HadCM3, y variaciones mensuales de temperatura máxima (DT) y de precipitación (DIFF) al año 2080 respecto el año 1980,

los que se aplican a cada episodio de precipitación máxima en función del mes de ocurrencia de éste.

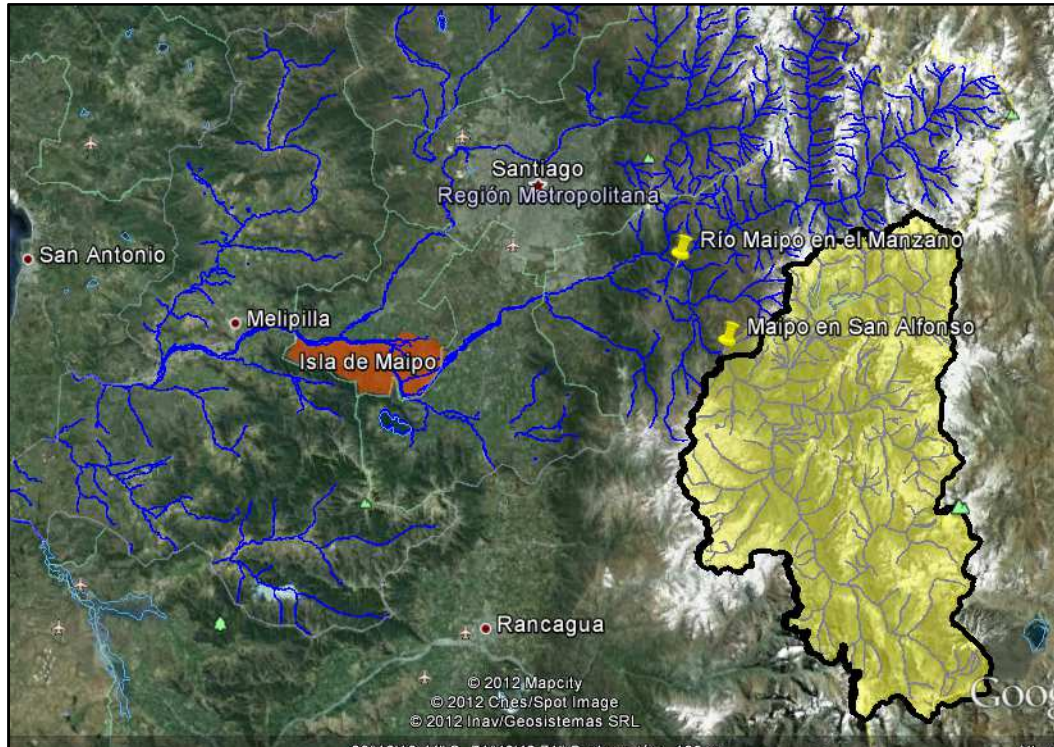
Para poder comparar los caudales máximos de crecidas el procedimiento propuesto por este estudio consiste realizar un análisis de frecuencia a partir de series de crecidas generadas tanto en la estación con los datos observados como con los datos proyectados por el GMC.

Para ello se ha estimado el caudal asociado al evento de precipitación máxima de cada año, a partir del método racional, como función del área aportante pluvial, tiempo de concentración e intensidad de diseño; parámetros que son función de la ubicación de la línea de nieves en el día de ocurrencia del evento.

5.2.5 Impacto del Calentamiento Global en Zonas de Inundación de la Isla de Maipo, Chile, Ahumada, F., Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, 2012.

Usando el programa WEAP, se modela hidrológicamente a nivel diario la cuenca Maipo en San Alfonso, ubicada en la cordillera de la Región Metropolitana de Chile, caudal que se usa para determinar los caudales en un punto de control aguas abajo de la cuenca, ubicado en la comuna de Isla de Maipo en la misma región.

Figura 15 Área de estudio



Fuente: Ahumada, F., 2012

Los caudales son proyectados en el mediano plazo (2040-2070) al escenario futuro A1B, de acuerdo a las variables meteorológicas obtenidas del modelo PRECIS (Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile "Proyecto Anillos SOC-28: Impactos Sociales y Ambientales del Cambio Climático Global en la Región del Bio-Bio"), con forzamiento en sus bordes laterales por el modelo global ECHAM5.

Se usaron correlaciones establecidas entre caudales a nivel diario y el caudal máximo instantáneo en las estaciones Maipo en San Alfonso y Maipo en el Manzano, se derivan estos últimos en el punto de control a la entrada de la comuna.

A base de resultados disponibles en estudios anteriores se comparan los caudales con períodos de retorno entre 2 y 200 años con los caudales generados para el escenario futuro. Estos caudales son los valores de entrada en la modelación hidráulica del cauce, que se realizó con el programa HEC-RAS. La superficie de inundación obtenida para cada crecida fue georeferenciada y con la cartografía de la zona se generan mapas de inundación. En este informe se presentan 8 mapas, correspondientes a los períodos de retorno 2 y 200 años, para régimen pluvial y nival, en línea base y escenario futuro.

6. Conclusiones

El presente informe entrega antecedentes preliminares sobre metodologías para la evaluación de los impactos del cambio climático en los recursos hídricos. La evaluación de los posibles efectos o impactos permite generar y evaluar posibles medidas de adaptación, sin embargo, esto debe ir en conjunto con una interiorización institucional de los posibles efectos o impactos y una coordinación interinstitucional entre las entidades (públicas y privadas) que tienen que ver con el uso y planificación del recurso hídrico y la infraestructura asociada a su uso.

Es importante señalar que las principales dificultades de evaluar los impactos del cambio climático radican en la alta incertidumbre de los escenarios analizados, las diferencias de los datos meteorológicos entregados por los distintos modelos GCM y luego en los supuestos que se toman al escoger un determinado modelo hidrológico para traducir el resultado de las variables meteorológicas a caudales.

Por estas razones se hace necesario evaluar y comparar los impactos bajo distintos modelos, escenarios y tipos de modelo hidrológicos. Aunque dado los estudios analizados, hay una tendencia en Chile en usar los datos PRECIS, dado a que son datos oficiales del gobierno de Chile. Así también se puede observar la tendencia a trabajar con el modelo WEAP, el cual es un modelo ampliamente usado tanto nacional como internacionalmente, ya que es una programa con interfaz grafica posible de acoplar con otros modelos (aguas subterráneas, calidad de aguas), con buen soporte y tiene licencia gratuita para instituciones públicas, organizaciones sin fines de lucro e instituciones académicas en países no desarrollados.

Otro punto importante es la diversidad, disponibilidad y confiabilidad de los datos observados para poder validar los resultados de los distintos modelos.

También se ve la necesidad de acercamiento de las instituciones públicas a las universidades o centros de investigación para actualizarse en cuanto a las nuevas metodologías y líneas de investigación que surgen en torno a la evaluación de impactos en los recursos hídricos dado el cambio climático.

7. Bibliografía

Ahumada, F., "Impacto del Calentamiento Global en Zonas de Inundación de la Isla de Maipo, Chile", Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, 2012 (disponible en <http://www.tesis.uchile.cl/>).

CEPAL, "Economía del Cambio Climático en Chile, Síntesis", 2009.

CNR, "Gestión Integrada de los Recursos Hídricos y algunas experiencias de organizaciones de usuarios del agua", 2005

CONAMA-Departamento Geofísica Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, "Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el siglo XXI", 2006.

CONAMA-AGRIMED, Universidad de Chile, "Análisis de Vulnerabilidad del Sector Silvoagropecuario, Recursos Hídricos y Edáficos de Chile Frente a Escenarios de Cambio Climático, Capítulo Análisis de Vulnerabilidad de los Recursos Hídricos de Chile Frente a Escenarios de Cambio Climático", 2008.

Cruzat M., "Estimación de la Variación de Caudales Medios Frente a Cambio Climático Entre la IV y VIII Región de Chile", Tesis para optar al grado de Magister en Ingeniería, 2010.

Dirección General de Aguas, Departamento de Administración de Recursos Hídricos, "Evaluación de la explotación máxima sustentable de los acuíferos de la VI región: modelación hidrogeológica de los Valles de Alhué, Cachapoal y Tinguiririca : informe técnico, 2006.

Figeroa, R. "Efectos del Cambio Climático en la Disponibilidad de Recursos Hídricos a Nivel de Cuenca – Implementación de un Modelo Integrado a Nivel Superficial y Subterráneo" Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, 2008 (disponible en <http://www.tesis.uchile.cl/>).

Garreaud, R. y Falvey, M, "Cambio Climático Global Bases Físicas e Impactos en Chile", Presentación para Aguas Andinas (http://www.dgf.uchile.cl/rene/PRES/cambio_AGUASANDINAS.pdf), 2007.

IPCC, "Introducción a los Modelos Climáticos Simples Utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC", 1997.

IPCC, "Informe Especial del IPCC, Escenario de Emisiones, Resumen para responsables de Políticas", 2000.

IPCC, "Tercer Informe de Evaluación del IPCC: Cambio Climático 2001", 2001

IPCC, "Cambio Climático 2007, Informe de Síntesis", 2007.

IPCC, "Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science Basis", 2007.

Kharin, V. V., FW. Zwiers, X. Zhang y GC. Hegerl, "Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations". J Climate, 20:1419-1444, 2007

Lagos, M. y Vargas, X., "Variación de Eventos Extremos de Precipitación Diaria Proyectados a Medios del Siglo XXI, Resultados en Regiones de Coquimbo y Maule", XX Congreso SOCHID, 2011.

Ministerio de Energía-Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, "Selección y Aplicación de un Modelo Hidrológico para Estimar los impactos del Cambio Climático en la Generación de Energía del Sistema Interconectado Central", 2011.

Perez, J., "Riesgo de Inundación Producto del Cambio Climático, Caso de Estudio: Quebrada San Ramón", Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, 2011 (disponible en <http://www.tesis.uchile.cl/>).

Raddatz, D., "Efecto del Cambio Climático en la Seguridad Hidrológica de Obras Hidráulicas. Análisis en Cuencas Pluviales de la Zona Central de Chile Para el Escenario A2", Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, 2011 (disponible en <http://www.tesis.uchile.cl/>).

Robles, S. y Santander, A., Impacto del Cambio Climático en el Cálculo de crecidas de Diseño para una cuenca Nivo-Pluvial de montaña, Zona Central de Chile, XX Congreso SOCHID, 2011

Silva, C., "Aplicabilidad de Funciones de Transferencia Para Proyección de Efectos de Cambio Climático Sobre Caudales en la Cuenca Alta del Río Loa", Tesis para optar al título de Ingeniero Civil, 2010 (disponible en <http://www.tesis.uchile.cl/>).

Vicuña S., Garreaud R y McPhee J. "Climate Change Impacts on the Hydrology of a Snowmelt Driven Basin in Semiarid Chile", 2010.

Wilby, R. y Dawson, C., "Statistical Downscaling Model (SDSM), User Manual", 2007.