

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XVII CONGRESO CHILENO DE HIDRÁULICA

**ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN EL PERÍODO 1980-2006
EN LA CUENCA DEL EMBALSE EL YESO.**

**ANDREA OSSES V.¹
XIMENA VARGAS M.²**

RESUMEN

En este artículo se aborda el análisis de los escenarios climáticos incluidos en el tercer informe del IPCC, uno moderado (SRES B2) y otro severo (SRES A2), que sirven de base para el análisis de la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca del embalse El Yeso, ubicado en la cordillera de los Andes en la región metropolitana de Chile, donde existe información registrada de las variables precipitación, temperatura y evaporación desde 1980 a la fecha. Los resultados del modelo global HadCM3, se llevan a la escala local a través de la técnica de downscaling usando el modelo estadístico SDSM 3.1 y se analizan los resultados obtenidos de las variables precipitación, evaporación y temperatura, en la zona de interés. El análisis se realiza sobre la base de 20 series generadas susceptibles de haber ocurrido y se analiza si dichas series tienen las mismas propiedades estadísticas de las correspondientes series registradas en el período, que permita asegurar que ambas provienen de la misma población.

¹ Ingeniero Civil, M.Sc. University of Applied Sciences Cologne, Dirección General de Aguas, MOP - email: andy.osses@gmail.com

² Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile – email: xvargas@ing.uchile.cl

1.- INTRODUCCIÓN

Para el análisis de la disponibilidad futura de agua en una cuenca, se hace necesario tener en cuenta la influencia de posibles cambios climáticos susceptibles de ocurrir en la región. Escenarios posibles de cambio climático pueden obtenerse de las simulaciones que se efectúan en centros especialmente dedicados al estudio de estos cambios, los que usan como base modelos numéricos de circulación general de la atmósfera y de los océanos. Los modelos disponibles están basados en formulaciones matemáticas de las leyes físicas y procesos fundamentales que gobiernan el comportamiento del sistema climático terrestre y han sido aplicados con el propósito de evaluar los cambios climáticos a nivel global y los resultados obtenidos se ponen a disposición de la comunidad internacional. Sin embargo, desde el punto de vista hidrológico no es posible utilizar directamente estos resultados ya que la resolución espacial de los modelos globales es muy baja. Es así como en Chile, donde el clima regional se ve afectado por la presencia de las Cordilleras de La Costa y de Los Andes, la resolución de estos modelos resulta insuficiente para derivar la información de entrada de los modelos hidrológicos. Se recurre entonces a dos posibles enfoques para llevar estos resultados a una escala local: el desarrollo de un modelo regional cuyas condiciones de borde quedan dadas por el modelo global o la utilización de un modelo estadístico.

Uno de los centros que se encarga del análisis de modelos globales es el Hadley Centre for Climate Prediction and Research del Reino Unido que plantea diversos escenarios posibles a través del modelo de circulación general de la atmósfera HadCM3. Para Chile se tienen disponibles los resultados para dos escenarios de emisiones incluidos en el último informe del IPCC, uno moderado (SRES B2) y otro severo (SRES A2) que son los que sirven de base para el análisis que se presenta en este artículo.

Para llevar los resultados del modelo global a la escala local se explora la técnica de downscaling usando el modelo estadístico SDSM 3.1 (Wilby et al., 2004) y se analizan los resultados obtenidos en el período en que se cuenta con información registrada de las variables de entrada (precipitación, evaporación y temperatura) en la zona de interés. El análisis se realiza sobre la base de 20 series generadas susceptibles de haber ocurrido y se analiza si dichas series tienen las mismas propiedades estadísticas de la serie correspondiente que permita asegurar que ambas provienen de la misma población. Con lo anterior, se pretende además validar si alguno de estos dos escenarios (SRES A2 y B2) es más factible de haber ocurrido.

El caso particular analizado en este estudio es la cuenca aportante al embalse “El Yeso”, ubicado en la cordillera de los Andes en la región metropolitana de Chile, donde existe información registrada de las variables precipitación, temperatura y evaporación desde 1961 a la fecha.

2.- METODOLOGÍA

Con el objetivo de tener una base para evaluar el impacto de cambios climáticos en el futuro es necesario tener una descripción cuantitativa de los cambios climáticos que se esperan. Aunque hay un aumento en la confiabilidad de los científicos acerca de que el aumento en las concentraciones de los gases de efecto invernadero ocasionará un aumento global de la temperatura, existe menos consenso sobre las estimaciones de estos cambios a nivel local, por lo

que se hace necesario analizar el comportamiento predicho para épocas ya pasadas con el fin de evaluar la incertidumbre de las entradas y las salidas del sistema en estudio.

El tipo de variables que se necesitan para cuantificar los impactos sobre los recursos hídricos son básicamente 6: temperatura máxima y mínima, precipitación, radiación solar incidente, humedad relativa y velocidad del viento. Estas variables deben ser determinadas para escenarios climáticos que sean representaciones plausibles del futuro y consistentes con las hipótesis sobre emisiones futuras de los gases de efecto invernadero y con nuestro conocimiento de los efectos en el clima global del aumento de las concentraciones atmosféricas de estos gases (Carter et al., 1999).

El downscaling estadístico está basado en el hecho que el clima regional puede pensarse como condicionado por dos factores: el clima de mesoescala y los fenómenos fisiográficos regionales/locales. En este sentido, la información regional o local se obtiene determinando un modelo estadístico que relaciona las variables climáticas de gran escala (o predictores) con las variables regionales o locales; luego, los predictores simulados con un modelo global alimentan este modelo estadístico para estimar el clima característico local y regional (Houghton et al., 2001). Una de las ventajas de esta técnica es que es computacionalmente barata y puede ser aplicada a las salidas de diferentes modelos globales. La mayor debilidad es que su hipótesis básica no es verificable y ésta se refiere a que la relación estadística desarrollada para el clima actual se considera válida para condiciones del clima futuro. Además, los datos requeridos para desarrollar estas relaciones pueden no estar disponibles en regiones remotas o con topografía compleja.

El Segundo Reporte de Escenarios de Emisión (SRES) fue pensado a base de un posible comportamiento del medio ambiente debido a diferentes niveles de emisión de los gases de efecto invernadero. Así cada escenario define un futuro demográfico, político-económico, social y tecnológico. En síntesis, los escenarios SRES pueden describirse (Carter et al., 1999; Watson et al., 2001) como:

- A1: Un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, crecimiento bajo de población (máximo en mitad del siglo y decaimiento) y una rápida introducción de tecnología nueva y más eficiente. Los principales temas serán convergencias culturales y económicas entre las regiones, interacción social y económica y una considerable reducción en las diferencias regionales de ingreso per cápita. La población perseguirá el bienestar personal más que la calidad ambiental.
- A2: Un mundo heterogéneo, la preservación de las identidades locales con énfasis en los valores familiares y tradiciones locales, una alta tasa de crecimiento poblacional y un desarrollo económico regional menor que en otras visiones.
- B1: Un mundo convergente con un cambio rápido en las estructuras económicas, “dematerialización” e introducción de tecnologías limpias. Una proyección de población similar al escenario A1. El énfasis es hacia soluciones globales sustentables ambiental y socialmente.
- B2: Supone un mundo heterogéneo con énfasis en búsqueda de soluciones locales relacionadas con la protección ambiental y equidad social. Considera un aumento continuo de la población (menor que en A2) y niveles intermedios de desarrollo económico.

Los principales supuestos para estos escenarios se describen en la Tabla 1.

Tabla 1: Resumen del Segundo Reporte de Escenarios de Emisiones (SRES)

Escenarios	1990	Escenarios SRES para 2100			
		A1	A2	B1	B2
Población (billones)	5.252	7.1	15.1	7.2	10.4
concentración CO ₂ (ppmv) ¹	354	680	834	547	601
Variación global de la temperatura media anual (°C) ²	-	2.52	3.09	2.04	2.16
Rango (°C) ³	-	1.70-3.66	2.12-4.41	1.37-2.99	1.45-3.14
Aumento global del nivel del mar (cm) ²	-	58	62	50	52
Rango (cm) ³	-	23-101	27-107	19-90	20-93

Los resultados que los escenarios A2 y B2 ocasionarían en el planeta, se obtienen con el modelo HadCM3. Éste es un modelo³ de circulación general acoplado atmósfera-océano (AOGCM) de tercera generación con respuesta transiente, desarrollado en el Hadley Centre for Climate Prediction and Research (UK). La componente atmosférica del modelo tiene 19 niveles con una resolución horizontal de 2,5° en latitud y 3,75° en longitud, lo que produce una malla global de 96x73 celdas que equivale a una resolución en superficie de 417 km x 278 km en el Ecuador, que se aumenta a 295 km x 278 km a los 45° de latitud. La componente oceánica tiene 20 niveles con una resolución horizontal de 1.25 x 1.25°, resolución a la cual es posible representar detalles importantes en las estructuras de corrientes oceánicas. El paso temporal del modelo es 30 minutos aunque los datos no se almacenan a dicha resolución.

Tal como se muestra en la figura 1, la baja resolución del modelo impide la representación de estructuras que afectan el clima local como son, en Chile, la Cordillera de los Andes y la Cordillera de la Costa. Para evaluar los resultados a nivel local, en este estudio se utilizó la opción de desagregación estadística (statistical downscaling) espacial utilizando el programa SDSM 3.1 como se muestra en la figura 2. Este programa es accesible a través de la página Web del Canadian Climate Impact Scenario (CCIS)⁴ o directamente de la página Web del SDSM⁵. El manual (Wilby et al., 2004) está también disponible en la misma página Web. El programa requiere de los datos meteorológicos de una estación en el área de estudio, y de los datos reanalizados por el National Center for Environmental Prediction (NCEP) obtenidos con el modelo global en la celda de la malla que corresponde al área en estudio.

³ <http://www.metoffice.gov.uk/research/hadleycentre/models>

⁴ CCIS web page: <http://www.cics.uvic.ca/scenarios/index.cgi?Scenarios>

⁵ SDSM web page: <https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/>

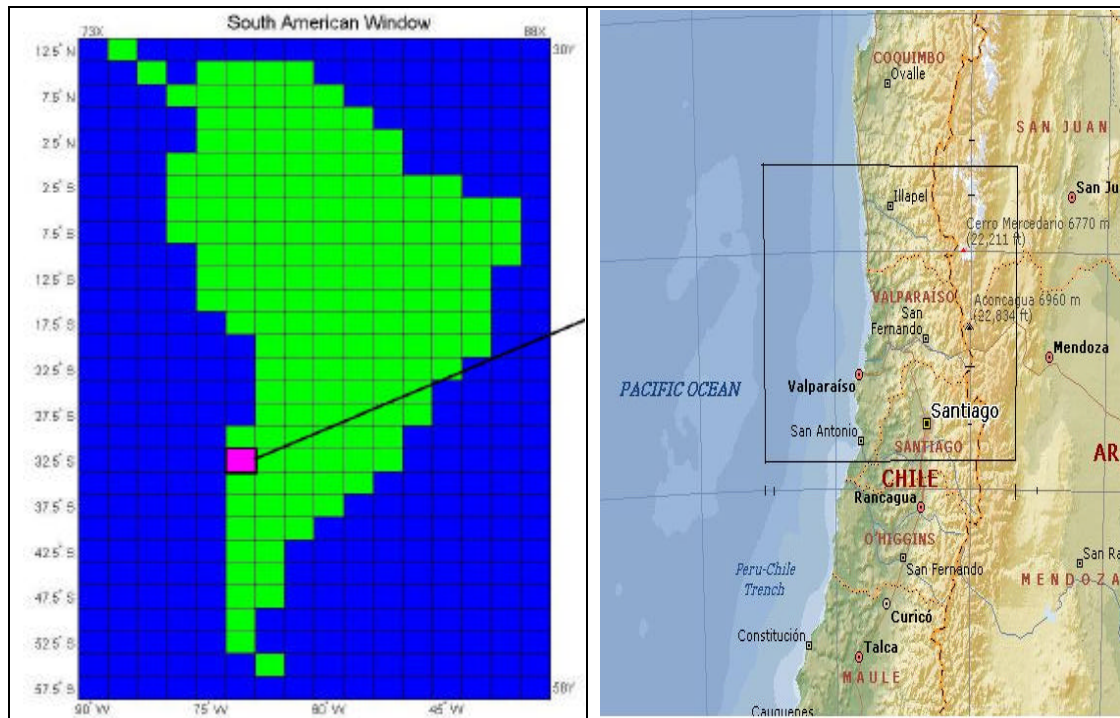


Figura 1: Esquema de la malla del modelo HadCM3 y celda seleccionada (33.5° latitud Sur, 71.25° longitud Oeste) para zona de estudio. Fuentes: CICS: <http://www.cics.uvic.ca/scenarios/sdsm/select.cgi> y Encarta Enciclopedia: <http://encarta.msn.com/encnet/features/MapCenter/map.aspx>

El reanálisis del NCEP y los datos del modelo global son accesibles a través de la página Web del CCIS donde están disponibles los datos del modelo global entre 1961 hasta 2001 y están normalizados respecto del valor promedio en el período 1961-1990. El programa SDSM usa una función de transformación para desagregar los datos del modelo global, la que se calibra con los datos de la estación local.

Con SDSM es posible revisar los datos disponibles y chequear incoherencias (valores muy altos o muy bajos). Igualmente, es posible transformar los datos de manera de alcanzar mejores correlaciones entre los predictores y las variables registradas en la estación meteorológica y también comparar con el valor de la variable del día anterior. Asimismo, se puede analizar la variación temporal y las correlaciones entre variables a distintos niveles temporales (anual, estacional, mensual)

El modelo construye los modelos de desagregación a base de ecuaciones de regresión lineal múltiple entre las variables climáticas diarias locales y las de la grilla correspondiente al GCM, que en este caso corresponden a las del reanálisis del NCEP. Tomando como base estas ecuaciones calibradas, se generan entre 1 a 100 conjuntos de climas posibles para el período que se desea, tomando como origen el año 1961.

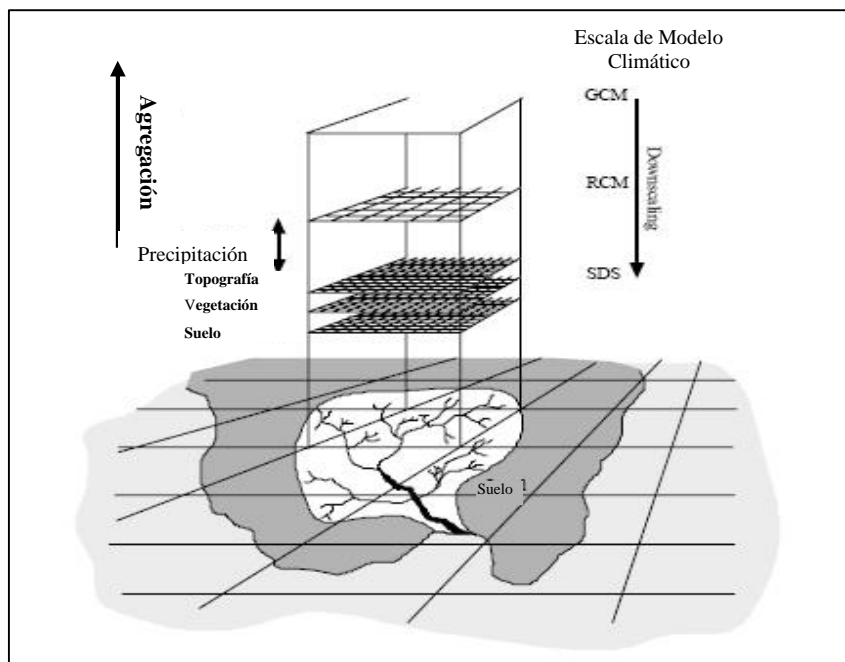


Figura 2: Representación esquemática de la desagregación (downscaling) Fuente: Wilby et al. (2004)

3.- REGIÓN EN ESTUDIO

El embalse El Yeso se encuentra en la Región Metropolitana, en el valle Piuquenes aproximadamente a 100Km de la ciudad de Santiago. La subcuenca del río Yeso pertenece a la cuenca del río Maipo. El embalse construido entre 1953 y 1967, para el abastecimiento de riego y agua potable, en la actualidad (ver figura 3) forma parte del sistema de abastecimiento de agua potable de Aguas Andinas S.A, junto a Lo Encañado y Laguna Negra.

La región posee un clima templado con veranos cálidos e inviernos fríos. La precipitación se concentra en los meses de invierno y generalmente sobre los 2000 m.s.n.m. ocurre en forma de nieve. Sobre los 3000 m.s.n.m. el clima pasa a ser un clima frío donde debido a las bajas temperaturas existe abundante nieve y se observa la presencia de glaciares. En las tablas 2 y 3 se resumen las principales características climáticas registradas en la estación meteorológica embalse El Yeso ubicada en el embalse a la cota 2450 m.s.n.m.

4.- RESULTADOS DE LA DESAGREGACIÓN

El período escogido para la calibración fue entre 1980 y 1993 dejando la información hasta el año 2001 para validar las relaciones encontradas. Para las 3 variables en estudio, precipitación, temperatura y evaporación, las relaciones se verificaron a nivel mensual, ingresándose los datos a nivel diario. Las variables predictoras más relevantes para la temperatura y la evaporación, fueron la altura geopotencial para la presión de 500hPa y la temperatura media, seguidas por la presión media a nivel del mar y la velocidad del viento o la humedad relativa a la altura de la presión de 500 hPa. Para la precipitación, las relaciones de desagregación presentaron bajos coeficientes de

correlación pudiendo considerarse como variables predictoras relevantes sólo la humedad relativa a la altura de los 500 hPa y la componente de velocidad zonal a la altura de los 800 hPa. En la tabla 4 se resumen los estadísticos principales de las correlaciones establecidas entre los valores observados y los datos del reanálisis del NCEP.



Figura 3: Vista general de la zona en estudio que incluye el embalse El Yeso. Fuente: Aguas Andinas S.A

Tabla 2: Características Climáticas Observadas. Período 1980-2005

Variable	Max			Min			Promedio anual
	diaria	mensual	anual	diaria	mensual	anual	
Temperatura (°C)	22	17.6	10.0	-8.9	-0.5	7.4	8.8
Precipitación (mm)	256.5	816.2	1528.4	0	0	167.8	668.0
Evaporación (mm)	9.87	187.4	1166.9	0	0	654.7	941.6

En las figuras 4 a 6 se comparan para el período de validación los valores medios mensuales de temperatura y precipitaciones y evaporaciones mensuales de las series promedio generadas con los correspondientes valores observados en el período 1994 - 2001, apreciándose ajustes que pueden clasificarse desde buenos a regulares. En particular, en el caso de las precipitaciones esto se explica por cuanto la serie promedio no presenta la misma variabilidad que las series individuales. En síntesis, se concluye que los resultados obtenidos usando el modelo de desagregación obtenido para cada variable de interés, es factible de ser usado para fines de simulación de los escenarios SRES A2 y B2. Lo anterior es principalmente válido para la temperatura y en menor grado para las otras dos variables en estudio. Sin embargo, los

coeficientes de correlación en el período de mayores evaporaciones es significativo e igualmente en el período de mayores precipitaciones (invierno) las relaciones pueden considerarse de regular a satisfactorias, con valores medios similares a los datos reales

Tabla3: Promedios mensuales. Período 1980-2005

Variable	En	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Temperatura (°C)	14.9	15.1	13.8	10.0	6.1	3.4	2.2	3.3	4.8	8.0	10.8	13.4
Precipitación (mm)	7.3	8.7	11.7	48.3	96.1	180.0	135.4	104.1	57.6	18.8	16.3	4.6
Evaporación (mm)	123.6	130.1	127.9	118.7	101.5	70.6	44.6	29.6	18.5	26.2	52.3	84.9

Tabla 4: Estadísticos de calibración de los modelos de desagregación

Variable	R ²		Error estándar	
	Incondicional	Condicional	Incondicional	Condicional
Temperatura	0.771		1.681	
Precipitación	0.192	0.228	0.266	0.409
Evaporación	0.362		1.520	

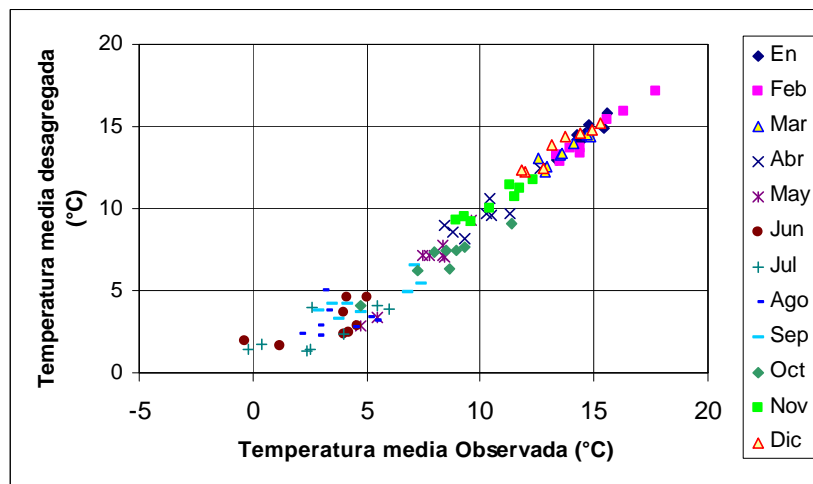


Figura 4: Validación de desagregación de temperaturas a nivel mensual. Período 1994-2001

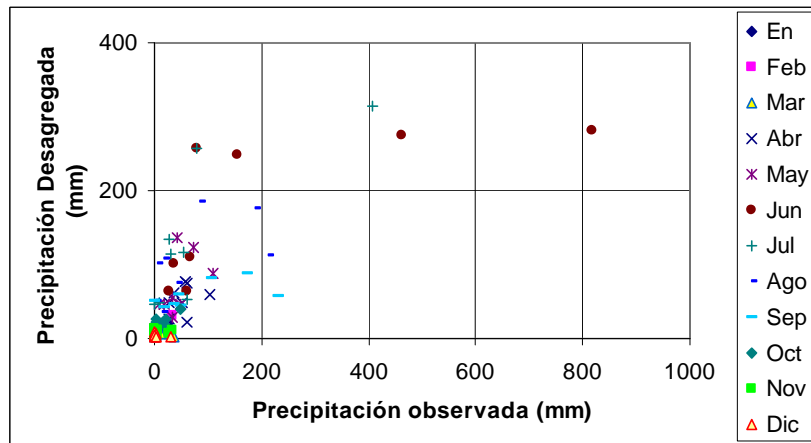


Figura 5: Validación de desagregación de precipitaciones a nivel mensual. Período 1994-2001

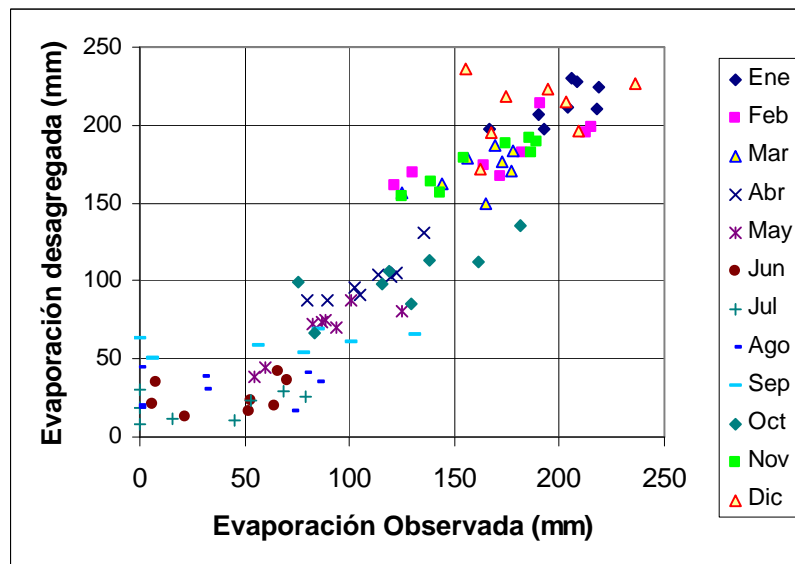


Figure 6: Validación de desagregación de evaporaciones a nivel mensual. Período 1994-2001

5.- APLICACIÓN A ESCENARIOS CLIMÁTICOS SRES A2 Y B2

Con las relaciones establecidas se procedió a desagregar los datos del modelo global para los escenarios A2 y B2 utilizando el programa SDSM, obteniéndose para cada variable 20 escenarios posibles de datos diarios desde 1961 hasta 2099. Los análisis que aquí se presentan se refieren al período 1980 – 2005 que corresponde al período de registro disponible.

En la figura 7 se comparan los valores observados en todo el período con los generados de las temperaturas medias anuales y los valores medios diarios máximos y mínimos de cada año para el escenario A2. Se aprecia que la serie observada de temperaturas medias anuales presenta una mayor variabilidad que la serie promedio de temperaturas, lo que se refleja en las diferencias en los valores máximos y mínimos medios diarios anuales simulados y observados. Resulta también interesante hacer notar que la serie promedio es representativa de todas las series alternativas

generadas, las que tienen una media anual promedio de 8°C, con una desviación estándar de 0,015 °C, siendo el promedio generado inferior en un 10% al valor observado. Esto también se pone de manifiesto en las curvas de duración de las temperaturas medias diarias que se muestran en la figura 8, donde se comparan las de las 20 series generadas para los escenarios A2y B2, con las series promedio para ambos escenarios y la observada.

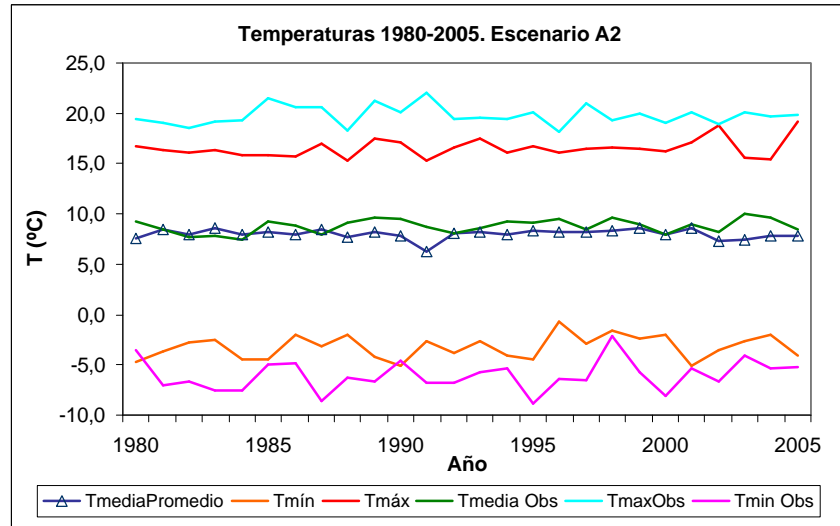


Figura 7: Series promedio simuladas y observadas de temperaturas medias anuales y máximas y mínimas medias diarias. Período 1980-2005

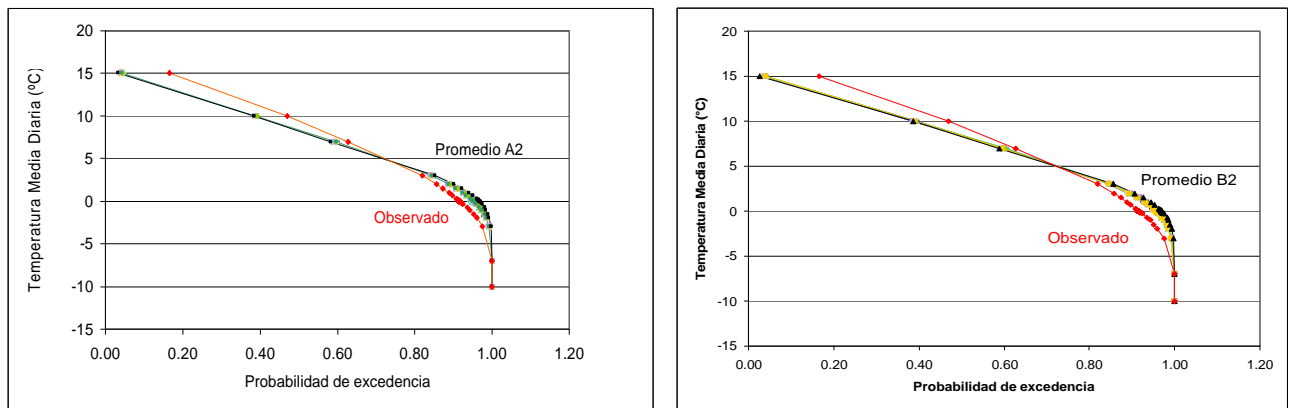


Figura 8: Curvas de duración de T medias diarias, período 1980-2005. Escenarios A2 y B2

Por otra parte, es interesante hacer notar que los valores medios diarios máximos y mínimos anuales que se generan en las distintas series presentan mayor variabilidad que en la serie promedio, como se muestra en la figura 9 para las temperaturas medias diarias mínimas anuales, pero siempre son inferiores y superiores, respectivamente, a los observados en el período.

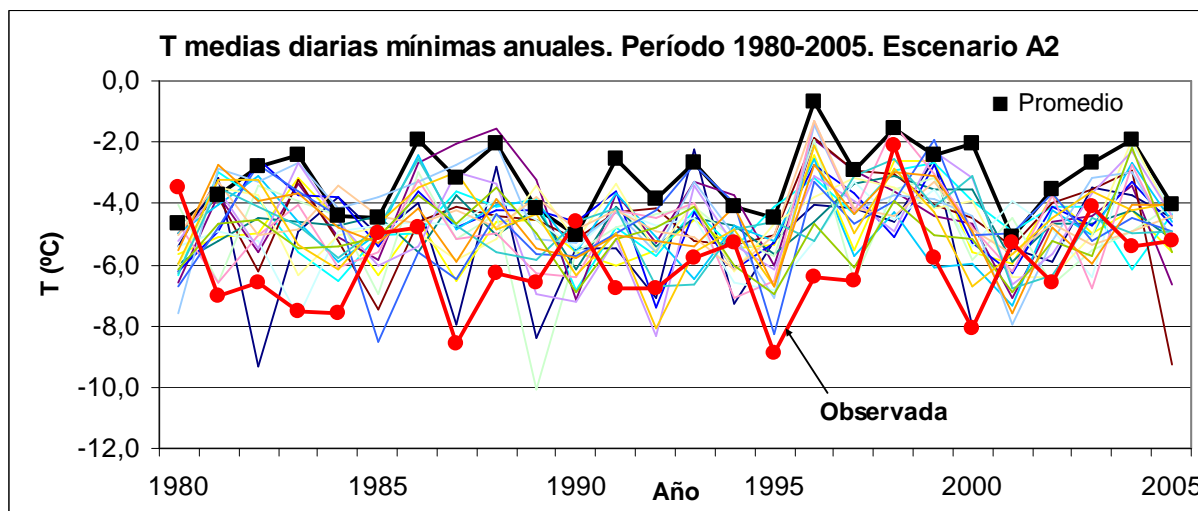


Figura 9: Temperaturas medias diarias mínimas anuales. Período 1980-2005. Escenario A2.

En la figura 10 se comparan los valores observados en el período 1980 - 2005 con los generados de las precipitaciones anuales para el escenario A2. Se aprecia que la serie observada de precipitaciones anuales presenta una mayor variabilidad que la serie promedio de precipitaciones, lo que se refleja en las diferencias en los valores diarios máximos anuales simulados y observados. Resulta también interesante hacer notar que la serie promedio no es representativa de las series alternativas generadas, las que tienen una suma anual promedio de 538 mm con una desviación estándar de 328 mm, para el escenario A2, inferior en un 20% al valor medio observado. Esto se pone de manifiesto en las curvas de duración de las precipitaciones diarias mayores que cero que se muestran en la figura 11, donde se comparan las de las 20 series generadas con la promedio, para los escenarios A2 y B2, y la observada.

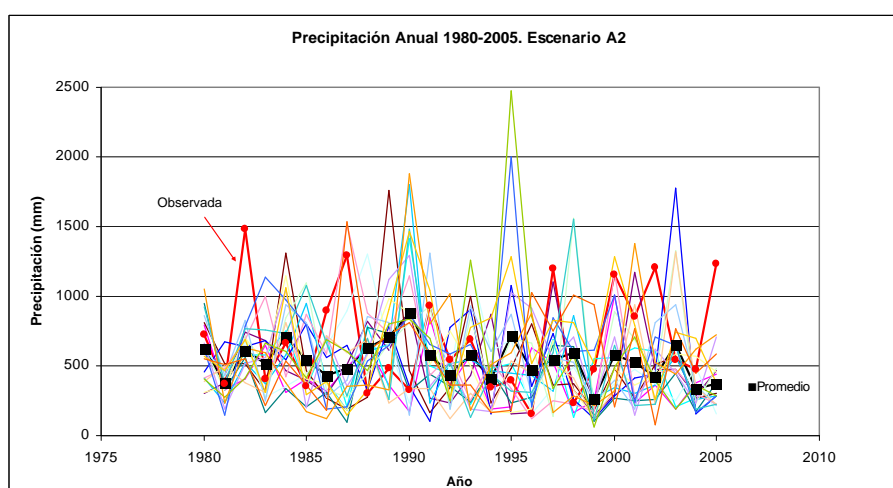


Figura 10: Series generadas y promedio simuladas y observadas de precipitaciones anuales. Período 1980-2005. Escenario A2.

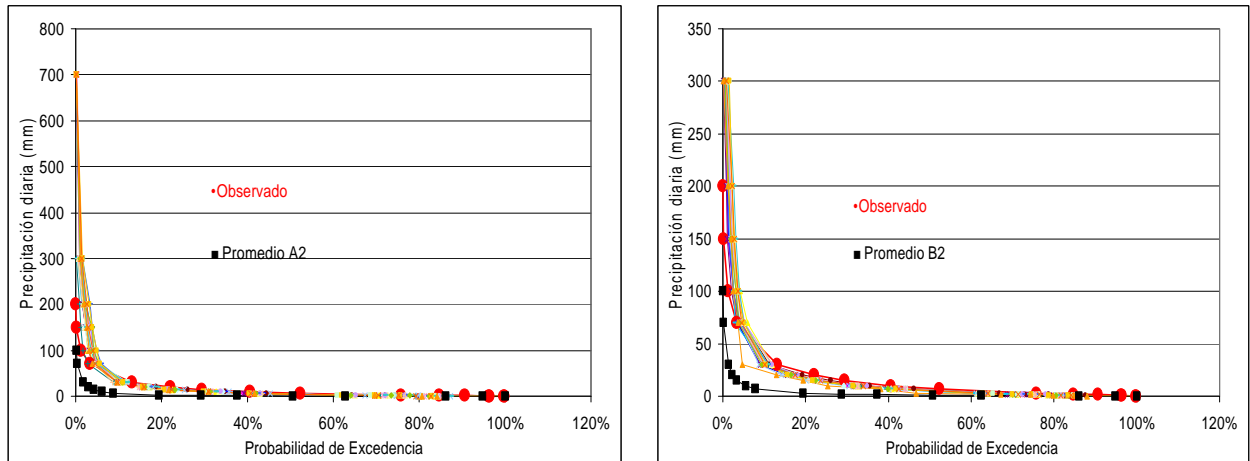


Figura 11: Curvas de duración de Pdiarias. Período 1980-2005. Escenarios A2 y B2.

Por otra parte, es interesante hacer notar que los valores de precipitaciones diarias máximos anuales que se generan en las distintas series presentan mayor variabilidad que las de la serie promedio y en general se generan valores máximos en el período superiores a los observados.

En la figura 12 se comparan los valores observados en todo el período con los generados de las evaporaciones anuales para el escenario B2. Resulta interesante hacer notar que las series promedio en ambos escenarios son representativas de las series alternativas generadas, las que para el caso B2 tienen una suma anual promedio de 1206 mm, con una desviación estándar de 110 mm, inferior en un 10% al valor observado. Esto también se pone de manifiesto en las curvas de duración de las evaporaciones diarias que se muestran en la figura 13, donde se comparan las de las 20 series generadas con la promedio, de cada escenario, y la observada.

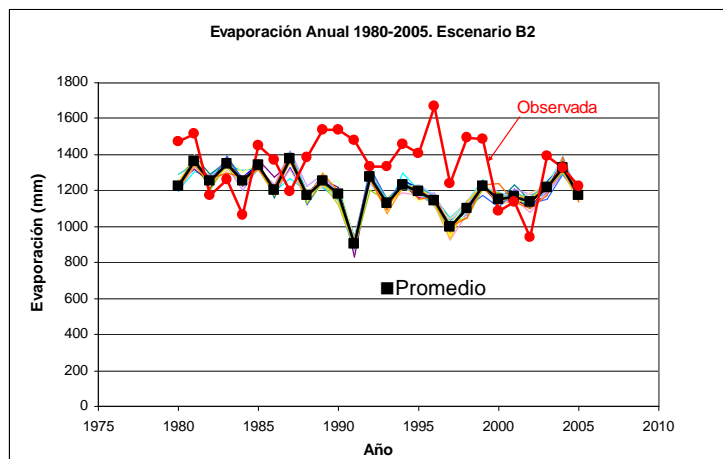


Figura 12: Series promedio simuladas y observadas de evaporaciones anuales. Período 1980-2005. Escenario B2.

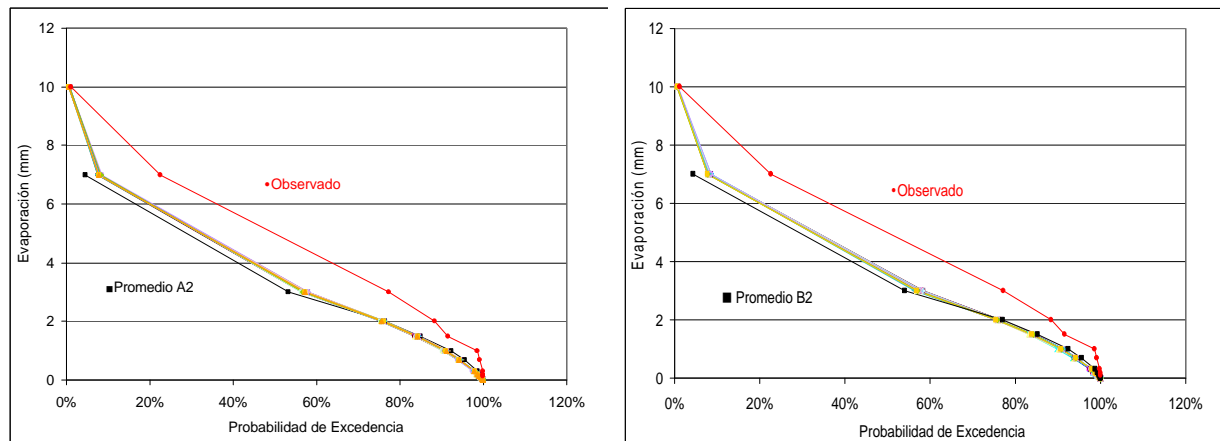


Figura 13: Curva de duración de evaporaciones diarias. Período 1980-2005. Escenarios A2 y B2

5.- CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten concluir que el procedimiento de desagregación estadístico utilizado permite generar series de temperaturas y evaporación susceptibles de haber ocurrido o de ocurrir en el futuro en el sitio de interés. Resulta sin embargo más incierta la generación de las precipitaciones con esta metodología.

Como procedimiento para generar los caudales, se sugiere emplear cualquiera de las series individuales de temperatura y evaporación, ya que las características estadísticas de éstas son similares entre sí y, a la vez, preservan mejor los estadísticos de los valores registrados que en la serie promedio. En cuanto a las series de precipitaciones diarias, debe usarse el mayor número posible de series generadas.

En relación con los escenarios climáticos analizados, puede concluirse que hasta ahora los datos disponibles estarían más acordes con el escenario SRES B2.

REFERENCIAS

Carter, T.R., M. Hulme and M. Lal, 1999. IPCC-TGCIA: *Guidelines on the Use of Scenario Data for Climate Impact and Adaptation Assessment.*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment, Version 1., 69 pp.

Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.), *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*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 881.

Osses A. 2006. Influence of Climate Change on Drinking Water Supply from a Reservoir in Santiago, Chile. Tesis para optar al grado de Magíster, University of Applied Sciences Cologne. Alemania.

Watson, R. T.,; D. L. Albritton, T. Barker, I. A. Bashmakov, O. Canziani, R. Christ, U. Cubasch, O. Davidson, H. Gitay, D. Griggs, K. Halsnaes, J. Houghton, J. House, Z. Kundzewicz, M. Lal, N. Leary, C. Magadza, J. J. McCarthy, J. F.B. Mitchell, J. R. Moreira, M. Munasinghe, I. Noble, R. Pachauri, B. Pittock, M.I Prather, R. G. Richels, J. B. Robinson, J. Sathaye, S. Schneider, R. Scholes, T. Stocker, N. Sundararaman, R. Swart, T. Taniguchi, D. Zhou, and many IPCC authors and reviewers, 2001, *Climate Change 2001:Synthesis Report, Summary for Policymakers*, Wembley, United Kingdom, pp34

Wilby, R. L. y C. W. Dawson. 2004. Using SDSM Version 3.1: A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, User manual. Disponible en <https://co-public.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/> .