



CAPÍTULO 3

LA PROYECCION DEL CLIMA EN ARGENTINA PARA EL SIGLO XXI

3.1	CONTEXTO	pág. 24
3.2	LOS MODELOS CLIMÁTICOS	pág. 24
3.2.1	Características	pág. 24
3.2.2	Limitaciones	pág. 24
3.3	EL USO DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS PARA LA PROYECCIÓN DEL CLIMA EN EL SIGLO XXI	pág. 26
3.3.1	Horizontes temporales	pág. 26
3.3.2	Escenarios de emisiones y/o de concentraciones de GEI	pág. 26
3.3.3	Disponibilidad de escenarios climáticos	pág. 26
3.3.4	Métricas para la validación de los modelos climáticos	pág. 27
3.3.5	Proceso de validación	pág. 28
3.3.5.1	<i>Climatología de referencia</i>	pág. 28
3.3.5.2	<i>Modelos climáticos globales evaluados</i>	pág. 28
3.3.5.3	<i>Validación de los MCGs</i>	pág. 29
	<i>Temperatura</i>	pág. 29
	<i>Precipitación</i>	pág. 37
3.3.5.4	<i>Modelos climáticos regionales evaluados</i>	pág. 44
3.3.5.5	<i>Validación de los MCRs</i>	pág. 45
	<i>Temperatura</i>	pág. 45
	<i>Precipitación</i>	pág. 49
3.3.5.6	<i>3.3.5.6 Validación del modelo MRI/JMA</i>	pág. 56
3.3.6	Selección de modelos para el desarrollo de escenarios	pág. 57
3.3.7	Corrección de los errores sistemáticos de los modelos	pág. 60
3.3.8	Validación del método de corrección de errores sistemáticos	pág. 61
3.4	ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)	pág. 62
3.5	EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS	pág. 65
	Referencias	pág. 66



LA PROYECCION DEL CLIMA EN ARGENTINA PARA EL SIGLO XXI

3.1 CONTEXTO

Los modelos climáticos constituyen la herramienta más confiable disponible en la actualidad para la generación de información acerca de las perspectivas climáticas futuras en la escala de decenios a un siglo en respuesta a acciones antrópicas o cambios naturales en los forzamientos externos del sistema climático.

3.2 LOS MODELOS CLIMÁTICOS

3.2.1 Características

Un modelo climático global (MCG) es un complejo sistema de programas informáticos que representan numéricamente los procesos físicos (y en menor medida químicos y biológicos) que se producen en la atmósfera, océanos, criósfera y la superficie terrestre y en forma muy simplificada de la biosfera. Es la herramienta más confiable actualmente disponible para simular el sistema climático y sus variaciones. Los MCGs se ejecutan en poderosas computadoras para realizar experimentos numéricos del sistema climático bajo distintas condiciones de concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, de aerosoles de origen natural y antrópico, de la radiación solar y de otros efectos antrópicos sobre el clima como el cambio de uso del suelo.

Actualmente, los MCGs simulan el clima considerando un retículo tridimensional sobre la Tierra con una resolución horizontal en general de entre 60 y 200 Km, y de hasta 60 niveles verticales en la atmósfera y similarmente en el océano. Se ha verificado que estos modelos son capaces de simular las características globales del clima y de sus cambios registrados en el pasado reciente. Son por lo tanto una herramienta aceptable para el desarrollo de escenarios climáticos globales futuros, resultantes de hipótesis sobre futuras concentraciones de GEI.

La comunidad científica que desarrolla estos modelos y realiza los experimentos que alimentan los informes del IPCC ha elaborado pautas comunes y métodos de distribución pública de sus experimentos. Recientemente, han hecho disponibles un conjunto de simulaciones y escenarios climáticos que es conocido como CMIP5 (Taylor y otros, 2012). Una generación anterior de estas simulaciones de escenarios es conocida como CMIP3 (Meehl y otros, 2007).

3.2.2 Limitaciones

Muchos procesos físicos como los propios de las nubes, ocurren en escalas espaciales menores a las resueltas por los modelos y por lo tanto no pueden ser representados en forma adecuada. Esta es una de las fuentes de incerteza en las simulaciones del clima futuro basadas en las salidas de los MCGs. Otros procesos que presentan dificultades para ser representados son los vinculados con los mecanismos de flujos del vapor de agua y calor ente



la superficie y la atmósfera, así como la interacción entre las nubes y los aerosoles. Por esta razón, los distintos MCGs pueden proveer respuestas diferentes a un mismo forzamiento climático debido a las distintas formas en que modelan estos procesos.

Una de las mayores limitaciones de los MCG es que no siempre hacen una representación adecuada del clima a nivel regional. En particular, si bien los modelos son capaces de reproducir los elementos climáticos fundamentales que describen cualitativamente el campo de precipitación en el clima regional del sur de América del Sur, sus errores en la cuantificación de la precipitación son importantes (ejemplo en Vera y otros, 2006). Los modelos del conjunto CMIP5 representan mejor la variabilidad climática de la región que los del conjunto anterior (CMIP3), pero sus errores son todavía muy importantes. A esos errores se los denomina de aquí en adelante sistemáticos, por cuanto se supone que se extenderían de igual modo a las simulaciones del clima futuro.

Otra limitación, que resulta en algunas regiones muy importante, es la baja resolución horizontal de los MCGs. Esto afecta particularmente en las regiones que presentan fuertes accidentes topográficos o contrastes térmicos. En nuestro caso esto es una fuente de errores en la simulación del clima en toda la zona andina y sus inmediaciones y en toda la región patagónica por la imposibilidad de representar adecuadamente a los Andes en los modelos con baja resolución espacial.

El problema de la baja resolución de los MCGs, se puede abordar con la utilización de modelos climáticos regionales (MCR) de más alta resolución que por su demanda computacional se los suele circunscribir a una determinada región. Como el clima regional está en permanente conexión con el del resto del planeta, este abordaje tiene sentido si la simulación del clima regional que el MCR realiza, incorpora información proveniente de un MCG. La estrategia que se utiliza es alimentar las condiciones de frontera del reticulado del MCR, cada determinados pasos de tiempo, con las salidas del MCG, proceso que se conoce como “anidado”. El CIMA tiene amplia experiencia en este tipo de técnicas como lo muestran algunas de sus publicaciones (por ej. Nuñez y otros 2009; Solman y Pessacg 2012).

La experiencia indica que, aunque en algunas zonas, en particular las montañosas, los MCR pueden mejorar las simulaciones climáticas de los MCGs, sus errores pueden ser todavía importantes. Por lo tanto las salidas de los MCRs también deben ser sujetas a validación y corrección de sus errores con las mismas técnicas que los MCGs. (Nuñez y otros 2005, Montroull y otros, 2012, Carril y otros 2012). En el caso de la Argentina, las posibles ventajas del uso de MCRs se ve limitada por el hecho de que sus salidas solo están disponibles para experimentos basados en el conjunto CMIP3. También puede utilizarse algún MCG que presente resoluciones tan altas como 20 Km, aunque ello no es la norma entre los MCGs disponibles.

3.3 EL USO DE LOS MODELOS CLIMÁTICOS PARA LA PROYECCIÓN DEL CLIMA EN EL SIGLO XXI

Se utilizan modelos climáticos para estimar los cambios climáticos en la Argentina continental. Sobre la Antártida, las islas del Océano Atlántico y el Mar Argentino, no hay suficientes datos para aplicar los métodos de corrección de los modelos. Para estas regiones se puede recurrir directamente a los modelos de la base datos.

3.3.1 Horizontes temporales

Los escenarios climáticos del siglo XXI fueron calculados sobre dos horizontes temporales: *clima futuro cercano* (2015-2039), de interés para las políticas de adaptación, y *clima futuro lejano* (2075-2099), de carácter informativo sobre el largo plazo. Los periodos exactos fueron elegidos en función de las salidas de los MCGs y MCRs disponibles para la región.

3.3.2 Escenarios de emisiones y/o de concentraciones de GEI

Los resultados de los MCRs disponibles están basados en uno de los escenarios de emisiones de GEI usado por los modelos del CMIP3 (el llamado A1B), que es un escenario de emisiones entre moderado y alto, mientras que los resultados de los MCGs del CMIP5 se basan en escenarios representativos de trayectorias de concentración (sigla en inglés, RCP). Estos escenarios de concentración se distinguen por el forzamiento radiativo en watts por metro cuadrado al que llegan en el año 2100...

Se elaboraron escenarios climáticos de dos escenarios RCP, 4.5 y 8.5. El primero corresponde a emisiones moderadas, pero no a un escenario de extrema mitigación del cambio climático como en el del RCP 2.6. En este último caso, los cambios serían semejantes al del escenario 4.5 en el horizonte temporal de futuro cercano y con escasos cambios adicionales hacia fin de siglo. Por esta razón, no se estudiaron los escenarios climáticos basados en el RCP 2.6 al considerar que no aportaría información adicional. Por otra parte, el escenario RCP 8.5 corresponde al caso extremo en que las emisiones continuarán creciendo con las tendencias actuales hasta fin de siglo. El escenario A1B es de emisiones en cierta forma intermedias entre las de los dos escenarios RCP pero no obstante se la considera en este Proyecto como un escenario de concentraciones diferente.

3.3.3 Disponibilidad de escenarios climáticos

En la base CMIP5 están accesibles simulaciones del siglo XX y proyecciones de escenarios climáticos del siglo XXI provenientes de unos 42 experimentos con MCGs. Previo a la validación de los modelos se realizó una selección tomando como criterio que estuvieran disponibles para los escenarios de concentración RCP 4.5 y RCP 8.5 y tuvieran salidas diarias de sus proyecciones. Dentro de los que cumplieron con estos requisitos, se seleccionaron 14 experimentos de casi otros tantos MCGs que presentaban una resolución horizontal de 2° o mayor.



En cuanto a los MCRs, están disponibles para la región, 11 experimentos de 7 MCRs anidados en MCGs del CMIP3 del proyecto europeo CLARIS, a los que se les aplicó el proceso de validación. Los experimentos disponibles anidados con MCGs para el siglo XX cubren en general el período 1961-1990. En relación a las proyecciones climáticas, las mismas abarcan en general dos períodos (2011-2040) y (2071-2100). Algunos MCRs del proyecto CLARIS tienen algunos experimentos continuos sobre todo el período (1961-2100).

3.3.4 Métricas para la validación de los modelos climáticos

Se elaboró una métrica para identificar cuáles de los modelos climáticos presentaban comportamientos muy erróneos y en qué regiones. Esta métrica se basa en una serie de indicadores que se describen a continuación.

Para cada modelo, se elaboraron mapas de los errores porcentuales para precipitación y temperatura media en la región sur de América del Sur, incluyendo toda la Argentina continental. Estos errores se calcularon con respecto a los datos observados de la base CRU (Ver sección 2.1.2) para el promedio anual y los trimestres de verano (DEF), invierno (JJA) y se promediaron en cada una de las cuatro regiones.

La métrica, en el caso de la temperatura media de cada MCG, incluye el error medio definido como:

$$\text{Error } T(^{\circ}\text{C}) = T_{\text{MC}} - T_{\text{CRU}} \quad (1)$$

donde T_{MC} y T_{CRU} representan los promedios de cada región de verano (DEF), invierno (JJA) y anual de la temperatura de cada modelo climático (MC) y la base de datos CRU. Asimismo, se calcularon los coeficientes de correlación lineal entre el ciclo anual de la temperatura media regional de CRU y aquel derivado de cada MC ($R_{\text{ciclo anual}}$). Para evaluar la variabilidad interanual de la temperatura representada por los MCGs, se calculó el cociente entre los desvíos estándar de la temperatura anual de cada modelo (σT_{MC}) y de referencia (σT_{CRU}).

Para la evaluación de la precipitación, se calculó el error porcentual según:

$$\text{Error } (\%) = ((pp_{\text{MC}} - pp_{\text{CRU}}) / pp_{\text{CRU}}) * 100 \quad (2)$$

donde pp_{MC} y pp_{CRU} son la precipitación de verano, invierno y anual estimada por cada MC y con la base de datos CRU, respectivamente.

Como algunas regiones pueden tener zonas con muy escasa precipitación anual y ello se extiende a muchas zonas en invierno, esto puede dar lugar a errores porcentuales muy importantes que sin embargo no reflejen un error sustancial. Por ello se complementó el análisis de los errores de la precipitación mediante los errores por diferencia obviando el análisis porcentual cuando el valor l es inferior a 100mm en el caso anual y a 50 mm en los casos estacionales según la expresión:

$$\text{Error } pp \text{ (mm)} = pp_{\text{MC}} - pp_{\text{CRU}} \quad (3)$$



Para cada variable de precipitación integrada en cada región y para cada modelo se correlacionó el ciclo anual medio del periodo de validación con el ciclo anual de los datos observados, ($R_{\text{ciclo anual}}$) de modo de tener una indicación de cómo el modelo representa el ciclo anual medio.

Para estimar si los modelos presentan una variabilidad interanual del orden de la observada, para cada región y modelo se calculó el desvío estándar de la media anual de la precipitación y se lo comparó con el respectivo valor de los datos observados mediante el coeficiente de variación (CV) definido como:

$$CV = (\sigma_{pp_{MC}} / pp_{MC}) / (\sigma_{pp_{CRU}} / pp_{CRU}) \quad (4)$$

donde $\sigma_{pp_{MC}}$ y $\sigma_{pp_{CRU}}$ son los desvíos de la precipitación anual de cada MC y de la base CRU. Finalmente, se elaboró un índice único que permite comparar los modelos, que se describe en el Anexo I.

Dado que en general la confiabilidad de los resultados de los modelos climáticos aumenta con la escala espacial y temporal, los escenarios climáticos son más confiables en los valores medios que en los extremos y por lo tanto el uso de estos últimos para seleccionar los modelos climáticos puede llevar a eliminar modelos que representan mejor los campos medios. Por ello la validación de índices extremos se hizo en forma cualitativa mediante la comparación de tres índices extremos de 14 MCGs con datos observados. Este material se tuvo en cuenta, cuando aportó alguna información relevante para el juzgamiento experto al momento de seleccionar los modelos para la elaboración de los escenarios climáticos. Este aspecto se presenta en detalle en el Anexo II.

3.3.5 Proceso de validación

La confianza en la utilización de los modelos climáticos para el desarrollo de escenarios climáticos futuros se debe basar en una cuidadosa evaluación de su desempeño para representar el clima presente. En esta sección se analiza la habilidad del conjunto de los MCGs y los MCRs preseleccionados según se explicó en la sección 3.3.3, para simular el clima de Argentina con el objeto de identificar aquellos que reproducen más adecuadamente las características climáticas principales de la temperatura y la precipitación.

3.3.5.1 Climatología de referencia

La evaluación de los MCGs y MCRs se realizó tomando como referencia del clima observado según datos de temperatura y precipitación mensual provistos en puntos de retícula con una resolución de 0.5° latitud x 0.5° longitud. Como se describió en las secciones 2.1 y 3.3.4, la base de datos considerada, es la conocida como CRU y el período de análisis para la evaluación fue el comprendido entre 1961 y 1990. En las Figuras 2.2.1 y 2.3.1 se muestran los campos medios de temperatura y precipitación anual derivados de los datos CRU, respecto de los cuales se realizaron las comparaciones para evaluar el desempeño de los modelos.

3.3.5.2 Modelos climáticos globales evaluados

Se evaluaron 14 MCGs de la base CMIP5 (Stouffer y otros, 2011; Taylor y otros, 2012). Estos modelos se encuentran disponibles a través del Programa para el Diagnóstico e



Intercomparación de Modelos (PCMDI, <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) y fueron utilizados en el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), Cuadro 3.3.1.

Modelo	Institución	Atmósfera – Resolución Horizontal (lat x lon)
CCSM4 (2010)	NCAR, ESTADOS UNIDOS	0.9° x 1.25°
CMCC-CM (2009)	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, ITALIA	0.75° x 0.75°
CNRM-CM5 (2010)	Centre National de Recherches Meteorologiques, FRANCIA	1.41° x 1.41°
CSIRO-Mk3.6.0 (2009)	CSIRO, AUSTRALIA	1.875°x 1.875°
GFDL-ESM2G (2011)	NOAA-GFDL, ESTADOS UNIDOS	2°x 2.5°
HadGEM2-ES (2009)	Met Office Hadley Centre, REINO UNIDO	1.25° x 1.875°
HadGEM2-CC (2010)	Met Office Hadley Centre, REINO UNIDO	1.25° x 1.875°
INM-CM4 (2009)	Russian Institute for Numerical Mathematics, RUSIA	1.5° x 2°
IPSL-CM5A-LR (2010)	Institut Pierre Simon Laplace, FRANCIA	1.9° x 3.75°
MIROC5 (2010)	Meteorological University of Tokyo, JAPON	1.40625° x 1.40625°
MPI-ESM-LR (2009)	Max Planck Institute for Meteorology, ALEMANIA	~1.8°
MPI-ESM-MR (2009)	Max Planck Institute for Meteorology, ALEMANIA	~1.8°
MRI-CGCM3 (2011)	Meteorological Research Institute, JAPON	1.1° x 1.2°
NorESM1-M (2011)	Norwegian Climate Centre, NORUEGA	~1.8° x 2.5°

Cuadro 3.3.1: *MCGs del CMIP5 usados con institución de origen y resolución horizontal*

3.3.5.3 Validación de los MCGs

Temperatura media

La Figura 3.3.1 muestra el ciclo anual de temperatura de las simulaciones de cada MCG y de la base de datos CRU para las cuatro regiones, mientras que las Tablas 3.3.1 a 3.3.4 resumen los resultados de la evaluación de la temperatura media según los estadísticos (descriptos en la sección 3.3.4) computados para cada MCG y región. En general existe una buena

representación del ciclo anual por parte de los modelos analizados (Figura 3.3.1). Esto se hace evidente en los valores de los coeficientes de correlación lineal computados entre los ciclos anuales de cada MCG y CRU presentados en las Tablas 3.3.1 a 3.3.4. En todos los casos estos coeficientes son significativos estadísticamente para un nivel de confianza del 99%. No obstante ello, el modelo INMCM4 subestima en forma marcada la temperatura en las regiones Andes, Centro y Húmeda con mayores errores durante los meses de invierno, Figura 3.3.1.

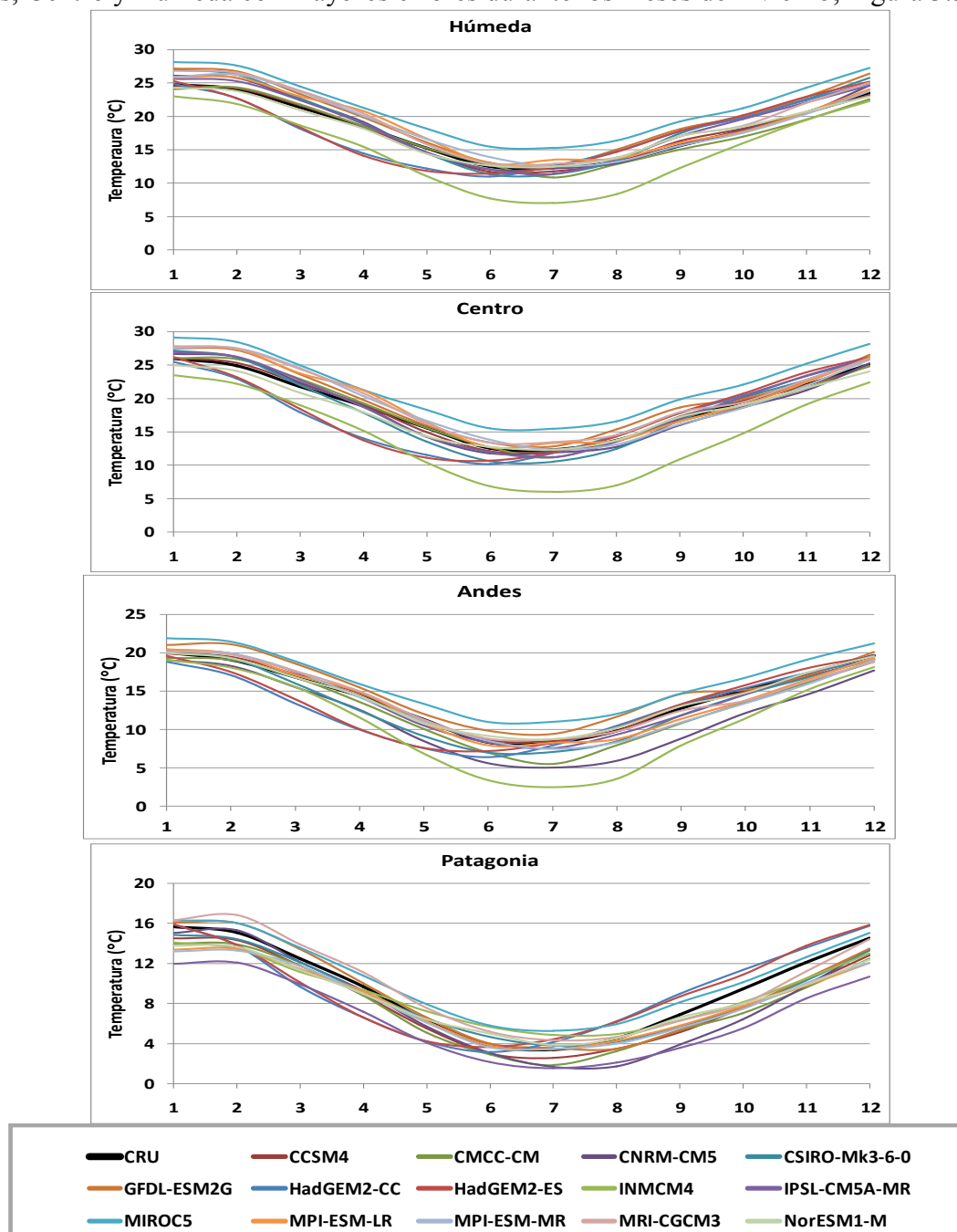


Figura 3.3.1: Ciclo anual de temperatura media (°C) para cada una de las cuatro regiones consideradas de acuerdo con la base de datos de referencia (CRU) y para el conjunto de MCGs analizados (período 1961-90)



Con respecto al error de la temperatura anual, se encuentra que la mayor parte de los modelos (10 de 14) subestiman los valores anuales en la Patagonia, ocho lo hacen en la región Andes, Tabla 3.3.3, mientras que en las regiones Centro y Húmeda, la mayor parte de los modelos sobrestiman esta variable, Tablas 3.3.2 y 3.3.1. En el caso del error estacional (verano e invierno) se encuentra que excepto en Patagonia, en las restantes regiones la mayor parte de los MCGs sobrestiman la temperatura de verano mientras que durante el invierno los modelos que subestiman la temperatura son mayoritarios en las regiones Andes y Centro.

Modelo	Error T_{anual} (°C)	Error T_{verano} (°C)	Error T_{invierno} (°C)	R ciclo anual	$\sigma T_{\text{MCG}} / \sigma T_{\text{CRU}}$
CCSM4	-0,1	-0,2	-0,5	1,00	1,00
CMCC-CM	-0,4	-0,5	-0,5	0,99	0,98
CNRM-CM5	0,4	1,3	-0,3	1,00	1,04
CSIRO-Mk3-6-0	1,0	2,2	-0,7	0,99	1,07
GFDL-ESM2G	1,8	2,6	0,9	0,99	1,14
HadGEM2-CC	-0,3	0,0	0,1	0,90	0,98
HadGEM2-ES	-0,2	0,2	0,2	0,89	0,99
INMCM4	-3,0	-1,8	-5,0	0,99	0,79
IPSL-CM5A-MR	0,6	1,0	-0,3	0,99	1,05
MIROC5	3,3	3,5	3,0	1,00	1,23
MPI-ESM-LR	0,9	1,1	0,7	0,99	1,08
MPI-ESM-MR	0,8	1,2	0,5	0,98	1,07
MRI-CGCM3	1,4	2,0	0,5	1,00	1,09
NorESM1-M	0,0	-0,5	0,3	0,99	1,00

Tabla 3.3.1: Métricas de evaluación de la temperatura media simulada por los MCGs para la región Húmeda

Modelo	Error T_{anual} (°C)	Error T_{verano} (°C)	Error T_{invierno} (°C)	R ciclo anual	$\sigma T_{\text{MCG}} / \sigma T_{\text{CRU}}$
CCSM4	0,0	0,1	-0,3	1,00	1,00
CMCC-CM	0,0	0,3	-0,3	0,99	1,02
CNRM-CM5	-0,3	0,7	-0,7	0,99	1,00
CSIRO-Mk3-6-0	-0,3	1,1	-1,6	1,00	0,99
GFDL-ESM2G	1,2	1,8	1,0	0,99	1,08
HadGEM2-CC	-1,1	-0,6	-0,7	0,92	0,93
HadGEM2-ES	-0,9	-0,1	-0,6	0,92	0,95
INMCM4	-4,3	-2,6	-6,3	1,00	0,74
IPSL-CM5A-MR	0,3	1,1	-0,6	1,00	1,02
MIROC5	3,0	3,3	3,0	1,00	1,19
MPI-ESM-LR	0,9	1,8	0,4	0,99	1,08
MPI-ESM-MR	0,8	1,6	0,2	0,98	1,06
MRI-CGCM3	1,2	1,7	0,9	0,99	1,08
NorESM1-M	-0,5	-1,0	0,1	1,00	0,97

Tabla 3.3.3: Ídem Tabla 3.3.1, pero para la región Centro



Con respecto a la variabilidad interanual, se observa que es subestimada por 11 sobre los 14 modelos analizados en la Patagonia mientras que es sobrestimada por la mayor parte de los MCGs en las regiones Centro y Húmeda, Tablas 3.3.1 a 3.3.4.

Modelo	Error T_{anual} (°C)	Error T_{verano} (°C)	Error $T_{\text{inv.}}$ (°C)	$R_{\text{ciclo anual}}$	$\sigma T_{\text{MCG}} / \sigma T_{\text{CRU}}$
CCSM4	0,1	-0,1	0,2	1,00	1,01
CMCC-CM	-1,2	-0,5	-2,0	0,99	0,93
CNRM-CM5	-2,4	-1,2	-3,3	0,99	0,83
CSIRO-Mk3-6-0	-0,9	0,0	-1,3	1,00	0,93
GFDL-ESM2G	1,1	1,1	1,5	0,99	1,09
HadGEM2-CC	-1,3	-1,3	-0,5	0,92	0,90
HadGEM2-ES	-1,0	-0,7	-0,2	0,93	0,93
INMCM4	-3,3	-1,2	-5,6	0,99	0,75
IPSL-CM5A-MR	-0,1	0,4	-0,4	1,00	1,00
MIROC5	2,1	1,9	2,6	1,00	1,17
MPI-ESM-LR	-0,3	0,3	-0,4	0,99	1,01
MPI-ESM-MR	-0,5	0,1	-0,7	0,98	0,97
MRI-CGCM3	0,0	0,0	0,3	0,99	1,01
NorESM1-M	0,1	0,0	0,6	1,00	1,01

Tabla 3.3.2: *Ídem 3.3.1, pero para la región Andes*

Modelo	Error T_{anual} (°C)	Error T_{verano} (°C)	Error T_{invierno} (°C)	$R_{\text{ciclo anual}}$	$\sigma T_{\text{MCG}} / \sigma T_{\text{CRU}}$
CCSM4	-1,2	-1,2	-0,9	0,99	0,87
CMCC-CM	-1,5	-1,6	-1,2	0,99	0,84
CNRM-CM5	-1,4	-0,5	-1,7	0,98	0,85
CSIRO-Mk3-6-0	-0,6	-0,9	0,3	0,98	0,91
GFDL-ESM2G	-0,3	0,1	-0,2	0,98	0,96
HadGEM2-CC	0,0	0,1	0,6	0,92	0,98
HadGEM2-ES	0,0	0,1	0,9	0,92	1,00
INMCM4	-0,4	-1,6	1,3	0,99	0,93
IPSL-CM5A-MR	-2,9	-3,5	-2,0	0,99	0,67
MIROC5	1,1	0,7	1,8	1,00	1,12
MPI-ESM-LR	-1,1	-2,1	-0,1	0,99	0,86
MPI-ESM-MR	-1,2	-2,2	-0,2	0,99	0,89
MRI-CGCM3	0,5	0,8	0,8	0,97	1,05
NorESM1-M	-0,8	-1,8	0,6	0,99	0,90

Tabla 3.3.4: *Ídem Tabla 3.3.2, pero para la región Patagonia*



La Figura 3.3.2 presenta los campos de error para la temperatura anual correspondientes a cada uno de los 14 MCGs analizados. Se encuentra que la mayor parte de los modelos subestima la temperatura en la región patagónica donde la temperatura simulada puede ser hasta 5°C inferior a la observada. En el centro-este del país por el contrario los MCGs sobrestiman la temperatura media en algunos casos superando en 5°C los valores de referencia aunque se destacan los modelos CCSM4 y CMCC-CC como los de mejor desempeño en esta región, con errores que prácticamente no superan 1°C. El modelo INMCM4 se caracteriza por simular temperaturas más bajas que las observadas en todo el país mientras que el MIROC5 presenta un comportamiento opuesto. De los resultados obtenidos, no se identifica un modelo climático individual que represente en forma adecuada la temperatura en todo el país lo que justifica el análisis regional presentado.

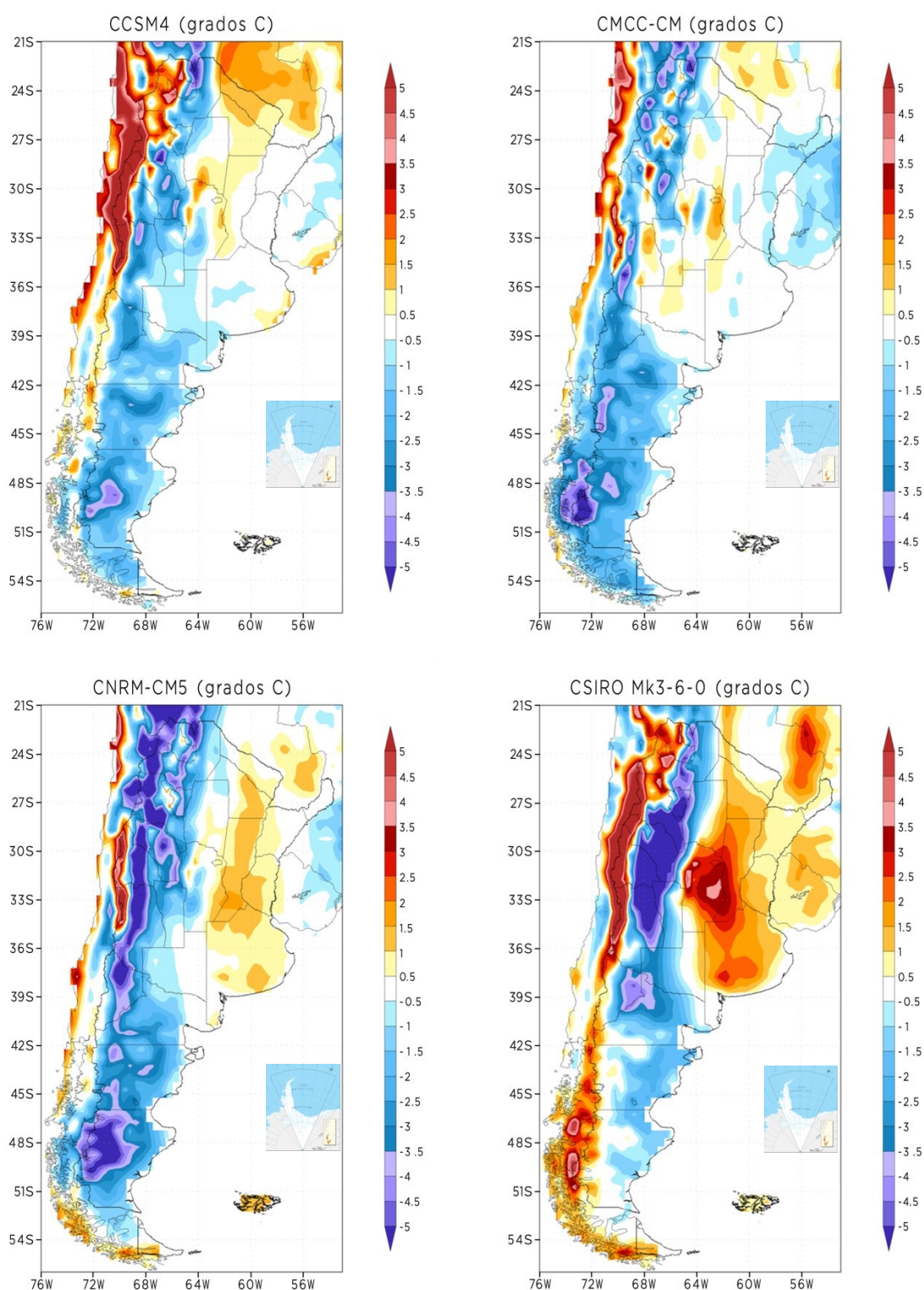


Figura 3.3.2: Error de temperatura anual (°C) para cada uno de los MCGs analizados

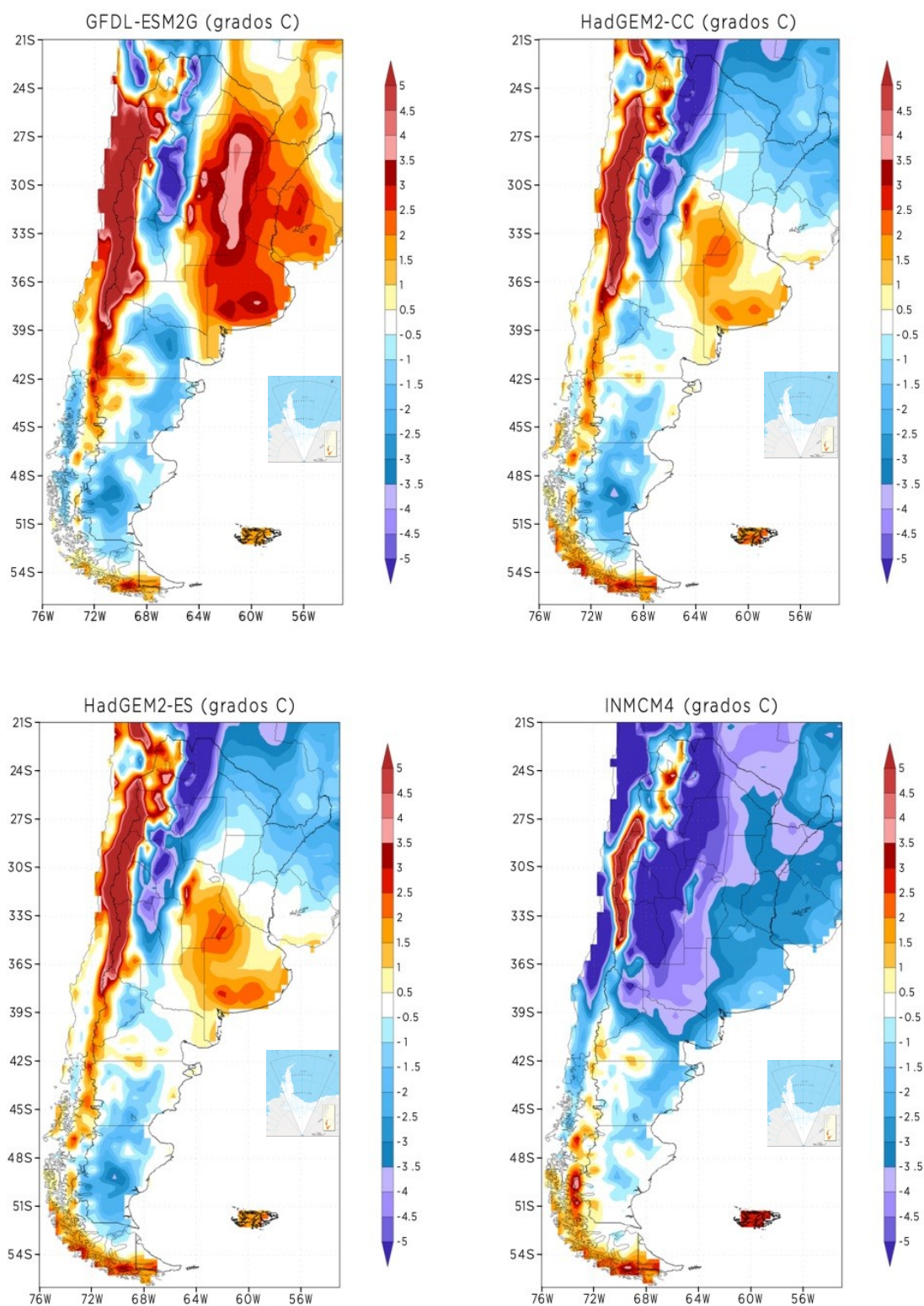


Figura 3.3.2: *Continuación*

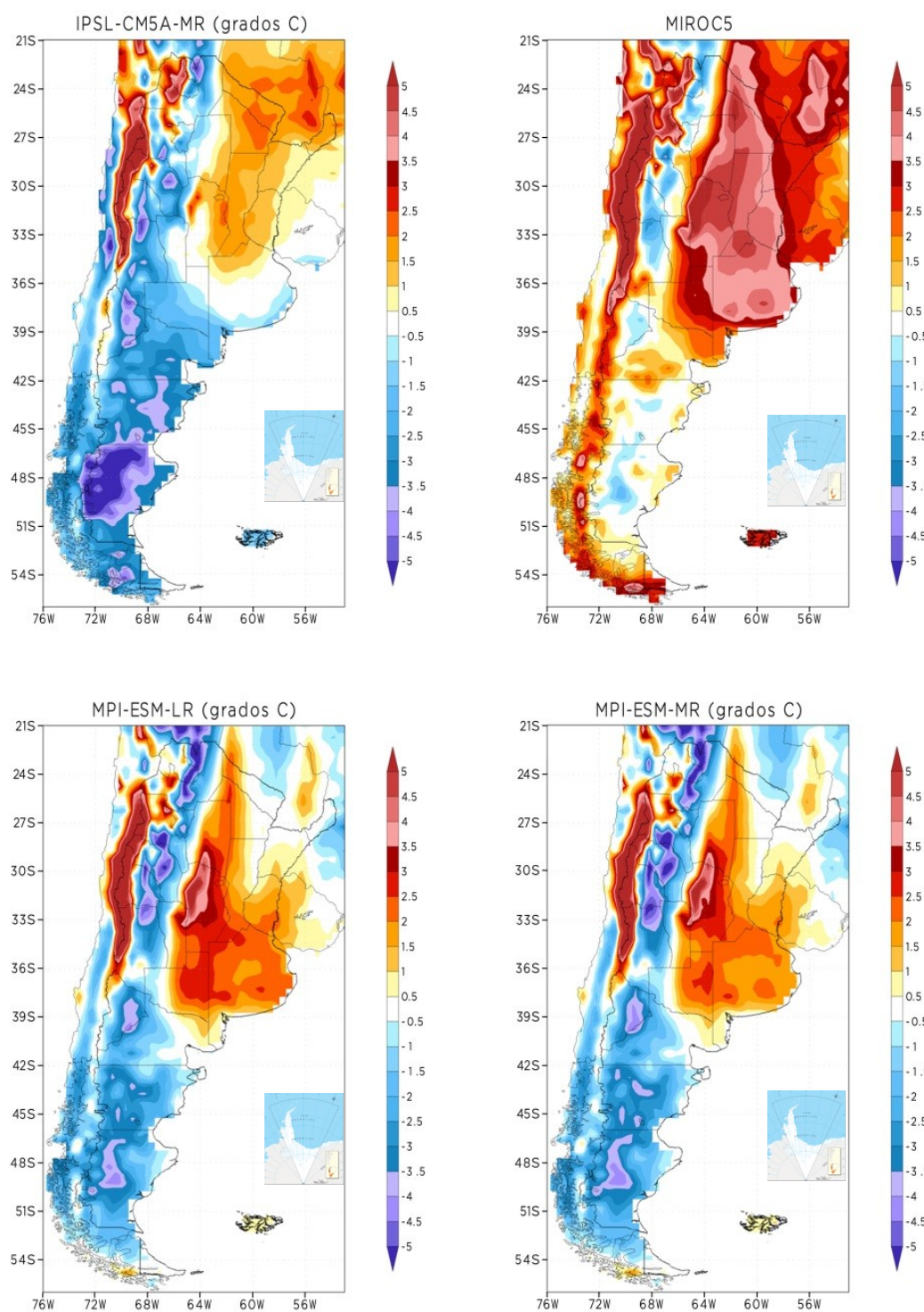


Figura 3.3.2: *Continuación*

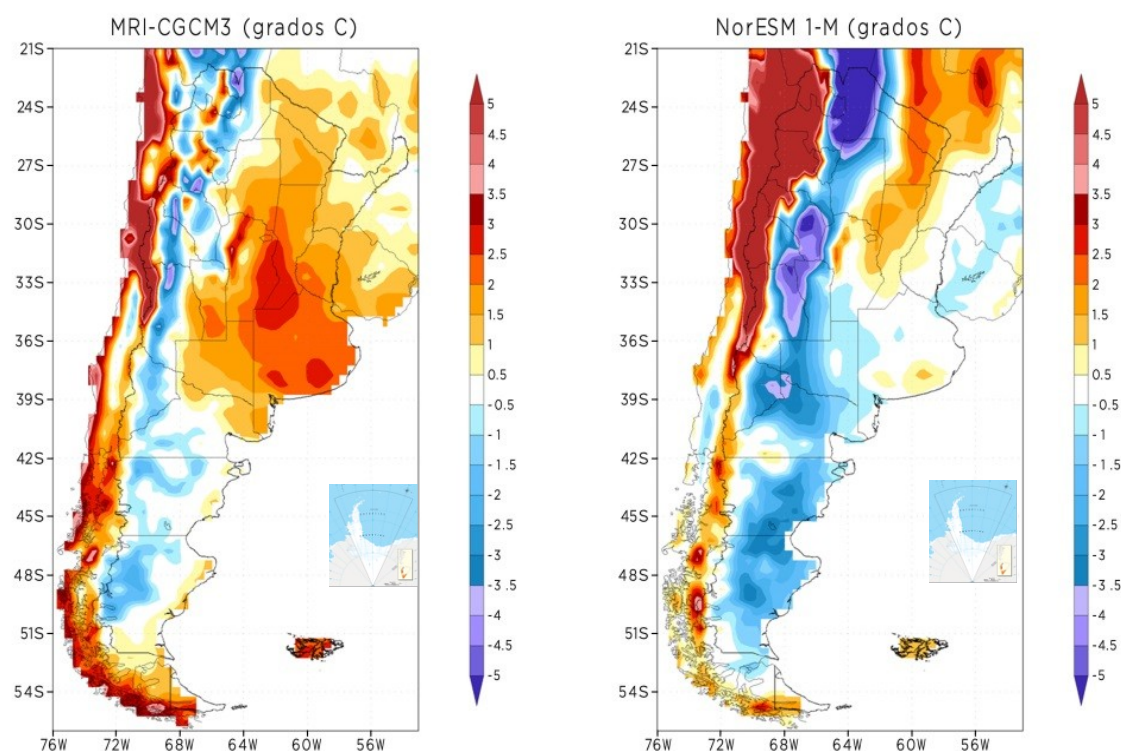


Figura 3.3.2: *Continuación*

Precipitación

La Figura 3.3.3 muestra el ciclo anual de precipitación derivado de las simulaciones de cada MCG y según la base de datos CRU para las cuatro regiones consideradas mientras que las Tablas 3.3.5 a 3.3.8 reseñan los estadísticos computados para esta variable para cada MCG y región. Del análisis de la representación del ciclo anual, se encuentra que todos los modelos presentan errores en la estimación de la precipitación en Patagonia que es sistemáticamente sobrestimada para todos los meses del año mientras que ocurre algo semejante en la región Andes. No obstante ello, los MCGs analizados muestran al igual que las observaciones, un mínimo en la precipitación durante el invierno. En la región Húmeda, por el contrario, se observa una tendencia a la subestimación de la precipitación por parte de la mayoría de los modelos evaluados. En prácticamente todos los casos, los coeficientes de correlación entre el ciclo anual observado y el simulado por cada MCG son estadísticamente significativos para un nivel de confianza del 99%, Tablas 3.3.5 a 3.3.8.

En la Figura 3.3.4 se presenta el error porcentual de la precipitación anual para cada uno de los MCGs, calculado sólo en aquellas regiones donde la precipitación anual de referencia supera los 100 mm (sección 3.3.4). En la Figura 3.3.5 se muestra el error absoluto de cada MCG. Se encuentra que la mayor parte de los modelos tiene un patrón de error semejante con sobrestimación de la precipitación a lo largo de la parte oeste del país y Patagonia y subestimación en el centro-este, principalmente en la provincia de Buenos Aires.

En las regiones Centro y en particular en la Húmeda, la mayor parte de los modelos subestiman la precipitación y sobrestiman la variabilidad interanual, Tablas 3.3.6 y 3.3.5. En

la región Andes, Tabla 3.3.7, la sobrestimación de la lluvia es notoria en prácticamente todos los modelos y a nivel anual y estacional aunque en este caso la variabilidad interanual es inferior a la de la base de datos de referencia.

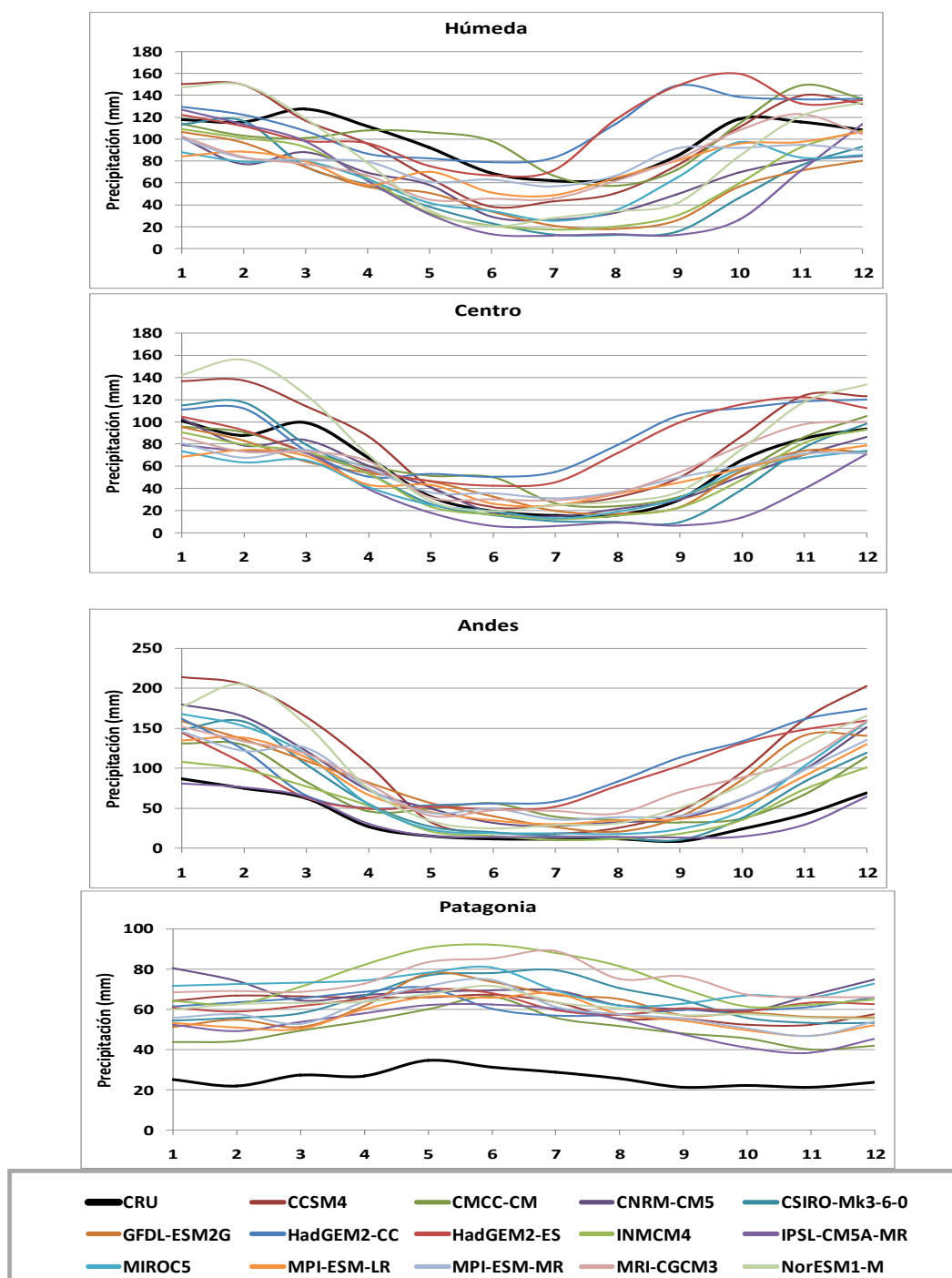


Figura 3.3.3: Ciclo anual de precipitación (mm) para cada una de las cuatro regiones consideradas de acuerdo con la base de datos de referencia (CRU) y para el conjunto de MCGs analizados (período 1961-90)



La Tabla 3.3.8 confirma la sobrestimación de la precipitación con valores de error absolutos positivos en Patagonia así como coeficientes de variación mayores a 1 que indican que los modelos muestran mayor variabilidad interanual que la observada.

Modelo	Error pp _{anual}		Error pp _{verano}		Error pp _{invierno}		R _{ciclo} anual	CV
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
CCSM4	-19,8	-1,7	90,7	27,0	-62,3	-32,2	0,89	0,71
CMCC-CM	40,4	3,4	13,0	3,9	28,2	14,6	0,72	0,73
CNRM-CM5	-420,1	-35,3	-77,1	-23,0	-106,8	-55,2	0,93	1,41
CSIRO-Mk3-6	-505,7	-42,5	-17,2	-5,1	-147,9	-76,5	0,79	1,76
GFDL-ESM2G	-494,4	-41,6	-55,1	-16,4	-123,5	-63,9	0,83	1,70
HadGEM2-CC	177,9	15,0	46,7	13,9	80,7	41,8	0,44*	0,92
HadGEM2-ES	149,7	12,6	30,1	9,0	61,0	31,6	0,44*	0,69
INMCM4	-439,1	-36,9	-21,2	-6,3	-137,9	-71,3	0,87	1,49
IPSL-CM5A-MR	-493,2	-41,5	14,4	4,3	-158,6	-82,0	0,75	1,67
MIROC5	-410,0	-34,5	-87,1	-25,9	-101,5	-52,5	0,91	1,59
MPI-ESM-LR	-261,6	-22,0	-60,0	-17,9	-31,4	-16,2	0,70	1,09
MPI-ESM-MR	-227,0	-19,1	-69,4	-20,7	-8,1	-4,2	0,73	1,03
MRI-CGCM3	-241,2	-20,3	-48,6	-14,5	-42,3	-21,9	0,71	1,14
NorESM1-M	-194,6	-16,4	88,8	26,4	-113,1	-58,5	0,85	0,80

Tabla 3.3.5: Métricas de evaluación de la precipitación simulada por los MCGs para región Húmeda ([#] indica que R_{ciclo anual} no es significativo)

Modelo	Error pp _{anual}		Error pp _{verano}		Error pp _{invierno}		R _{ciclo} anual	CV
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
CCSM4	267,7	37,5	112,8	40,4	31,0	63,9	0,98	0,61
CMCC-CM	38,6	5,4	8,3	3,0	50,2	103,5	0,91	1,10
CNRM-CM5	-54,7	-7,7	-16,1	-5,8	3,8	7,9	0,98	1,12
CSIRO-Mk3-6	-60,9	-8,5	46,1	16,5	-15,0	-30,9	0,93	1,14
GFDL-ESM2G	-75,0	-10,5	-31,8	-11,4	18,2	37,4	0,94	1,20
HadGEM2-CC	328,7	46,1	55,6	20,0	136,0	280,1	0,58	0,82
HadGEM2-ES	269,1	37,7	25,2	9,0	110,3	227,3	0,61	0,63
INMCM4	-104,2	-14,6	-18,4	-6,6	-6,8	-14,0	0,98	1,31
IPSL-CM5A-MR	-278,6	-39,0	-58,2	-20,9	-30,3	-62,3	0,91	2,14
MIROC5	-160,9	-22,5	-71,6	-25,7	0,4	0,9	0,97	1,57
MPI-ESM-LR	-74,9	-10,5	-60,9	-21,8	35,6	73,3	0,93	1,31
MPI-ESM-MR	-38,3	-5,4	-63,6	-22,8	53,0	109,1	0,98	1,22
MRI-CGCM3	42,2	5,9	-25,1	-9,0	44,9	92,4	0,90	0,91
NorESM1-M	245,8	34,4	146,6	52,6	22,2	45,7	0,96	0,66

Tabla 3.3.6: Ídem Tabla 3.3.5, pero para la región Centro



Modelo	Error pp _{anual}		Error pp _{verano}		Error pp _{invierno}		R _{ciclo} anual	CV
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
CCSM4	845,8	189,9	382,0	167,1	29,6	91,1	0,96	0,57
CMCC-CM	375,1	84,2	140,0	61,2	96,8	297,9	0,96	0,65
CNRM-CM5	582,1	130,7	257,0	112,4	58,5	180,1	0,99	0,49
CSIRO-Mk3-6	347,9	78,1	190,1	83,1	13,9	42,7	0,99	0,55
GFDL-ESM2G	591,3	132,8	199,8	87,4	52,7	162,2	0,92	0,55
HadGEM2-CC	789,8	177,3	219,5	96,0	165,4	508,7	0,59	0,53
HadGEM2-ES	691,3	155,2	172,4	75,4	146,5	450,7	0,56	0,50
INMCM4	178,1	40,0	76,6	33,5	2,8	8,7	0,98	0,65
IPSL-CM5A-MR	-15,7	-3,5	-11,1	-4,8	7,7	23,7	0,98	0,97
MIROC5	457,0	102,6	241,1	105,4	20,7	63,7	0,99	0,67
MPI-ESM-LR	462,2	103,8	167,8	73,4	66,1	203,5	0,99	0,56
MPI-ESM-MR	527,1	118,4	167,2	73,1	91,2	280,5	0,98	0,59
MRI-CGCM3	646,7	145,2	208,9	91,4	104,2	320,7	0,94	0,51
NorESM1-M	711,5	159,8	309,3	135,3	51,2	157,5	0,97	0,58

Tabla 3.3.7: Ídem Tabla 3.3.5, pero para la región Andes

Modelo	Error pp _{anual}		Error pp _{verano}		Error pp _{invierno}		R _{ciclo} anual	CV
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)		
CCSM4	423,3	136,1	117,1	166,4	101,9	119,0	0,66	1,80
CMCC-CM	291,1	93,6	58,8	-31,1	89,5	104,5	0,85	1,77
CNRM-CM5	506,3	162,8	156,4	75,6	117,0	136,6	0,12 [#]	1,89
CSIRO-Mk3-6	457,2	147,0	91,8	-28,5	144,5	168,8	0,77	1,74
GFDL-ESM2G	420,3	135,1	90,1	-1,1	121,9	142,3	0,77	1,79
HadGEM2-CC	440,8	141,7	117,8	17,3	90,2	105,3	0,34 [#]	1,84
HadGEM2-ES	437,5	140,6	109,7	-4,3	100,4	117,2	0,68	1,65
INMCM4	581,9	187,0	121,2	6,4	178,9	208,9	0,86	2,09
IPSL-CM5A-MR	315,6	101,4	75,5	-23,8	93,4	109,1	0,88	1,50
MIROC5	541,2	174,0	145,1	47,7	127,7	149,2	0,69	1,81
MPI-ESM-LR	365,2	117,4	85,0	-27,9	107,4	125,4	0,84	1,79
MPI-ESM-MR	391,8	125,9	95,5	6,8	109,1	127,4	0,86	1,65
MRI-CGCM3	578,2	185,9	131,9	21,9	165,8	193,7	0,71	1,97
NorESM1-M	428,8	137,8	105,9	-12,8	111,7	130,5	0,84	1,71

Tabla 3.3.8: Ídem Tabla 3.3.5, pero para la región Patagonia

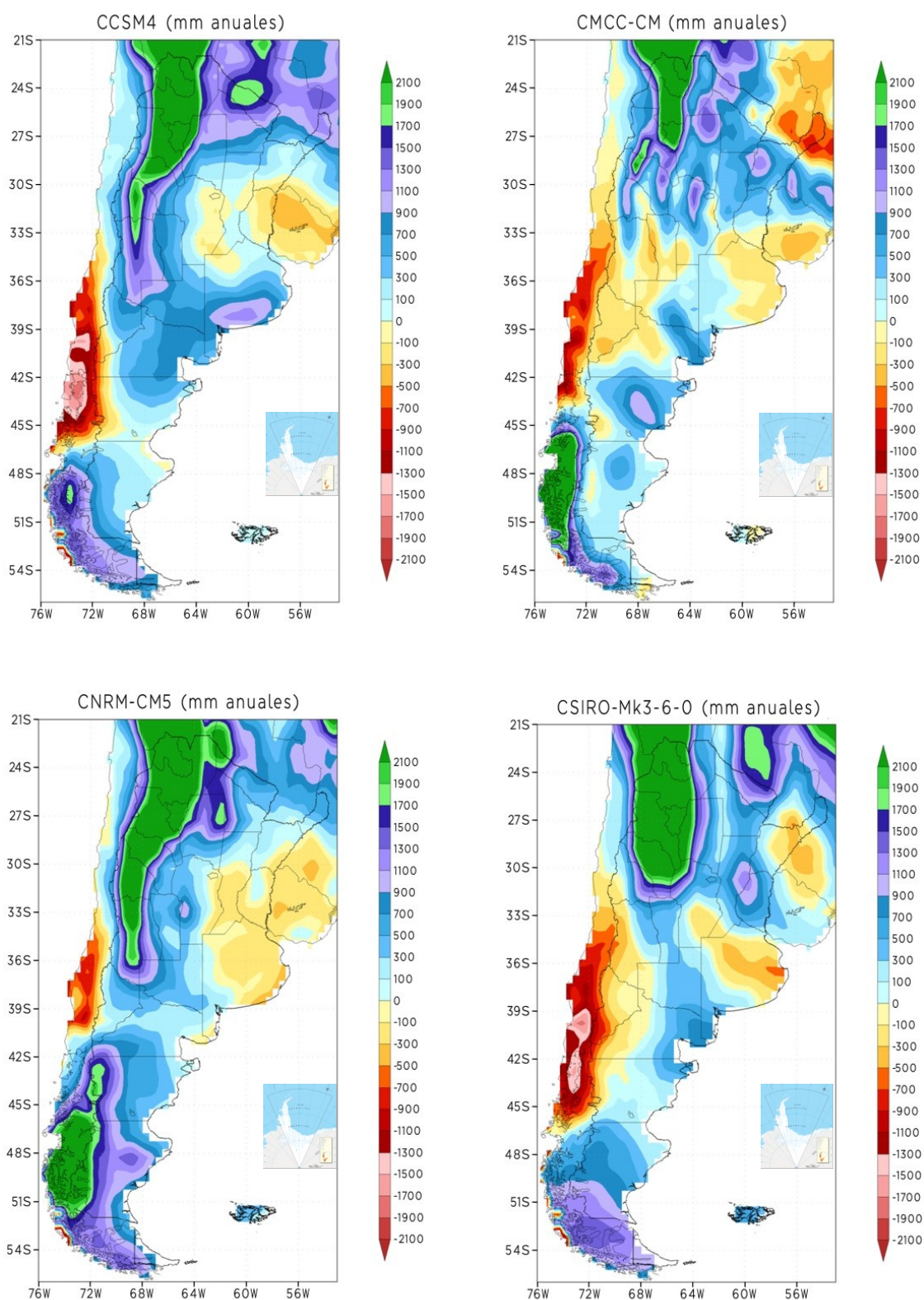


Figura 3.3.4: Error absoluto de la precipitación anual (mm) para cada uno de los MCGs analizados

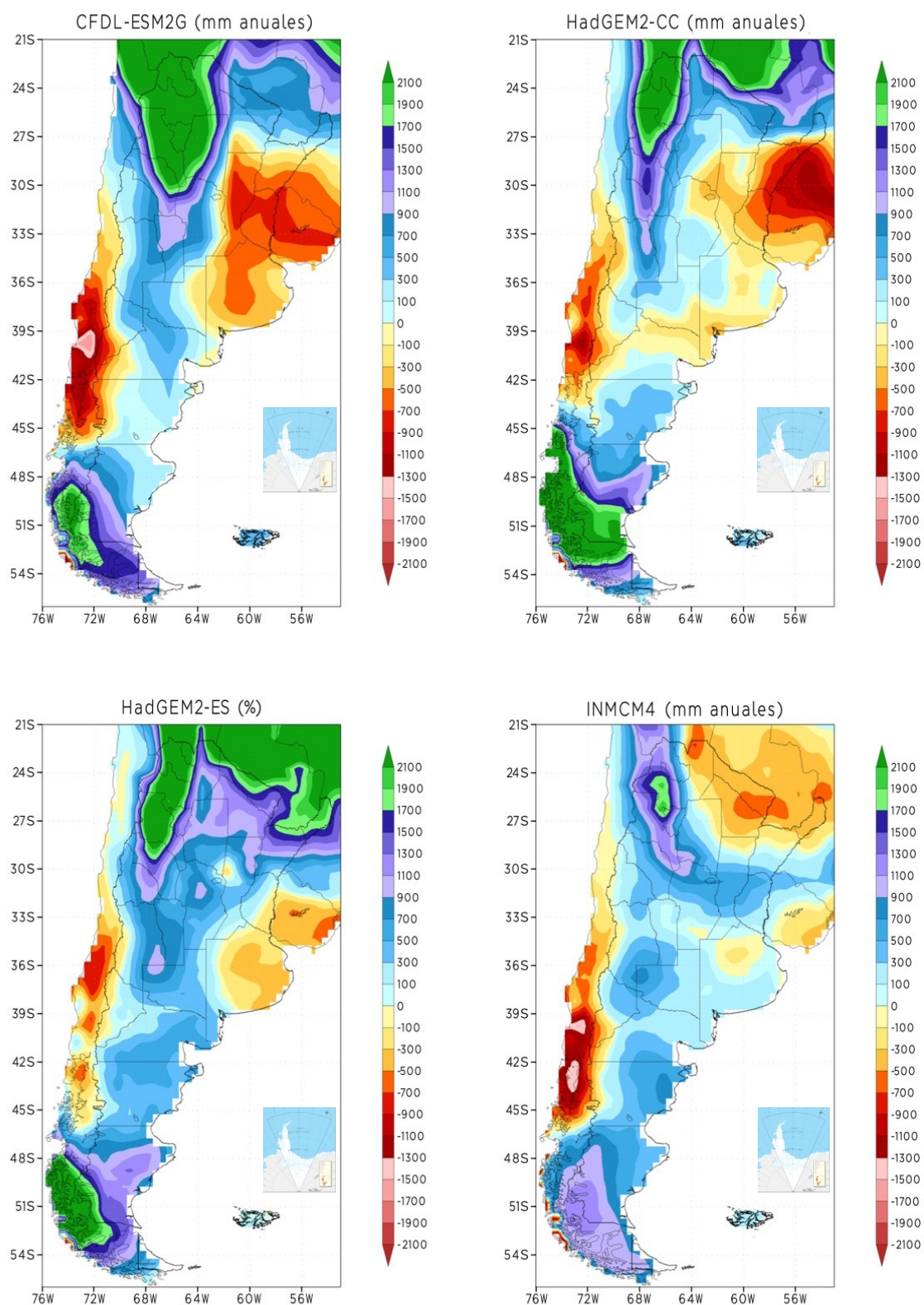


Figura 3.3.4: Continuación

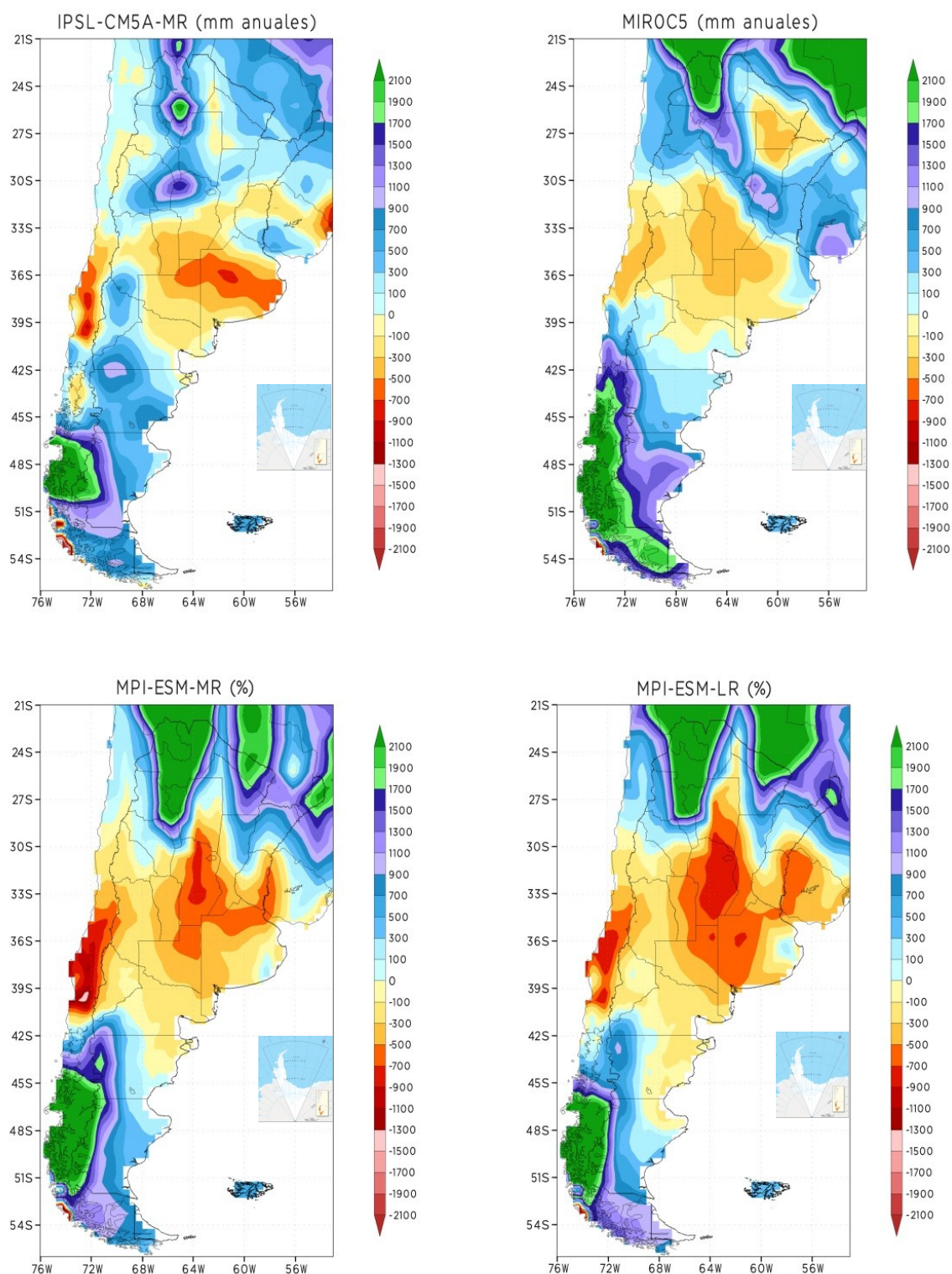


Figura 3.3.4: *Continuación*

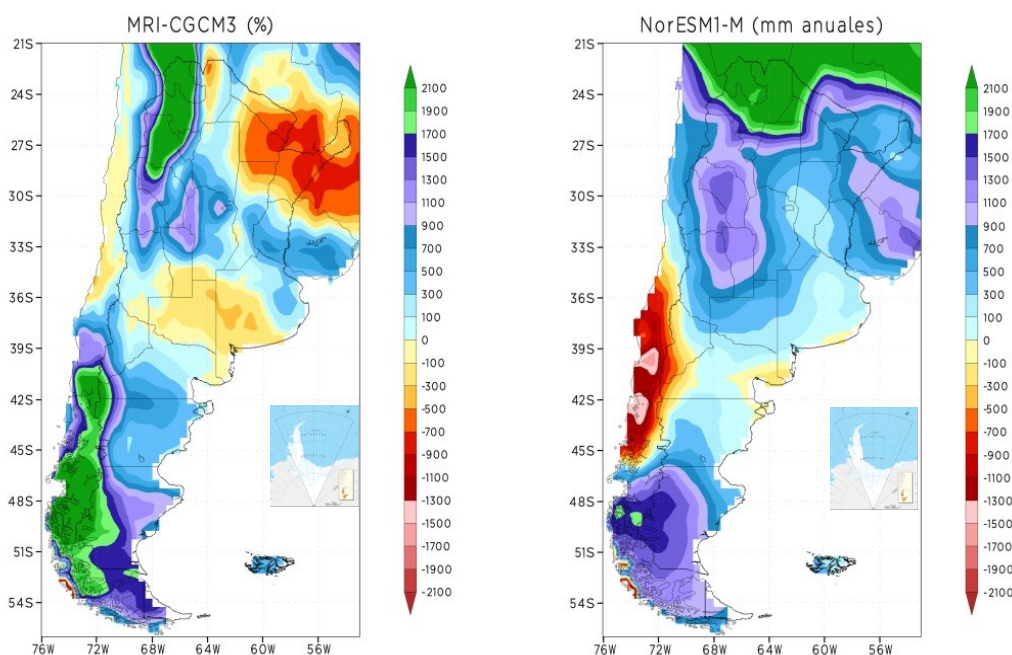


Figura 3.3.4: *Continuación*

3.3.5.4 Modelos climáticos regionales evaluados

Las simulaciones con los MCRs utilizadas provienen de los experimentos numéricos realizados en el marco del Proyecto CLARIS-LPB (según se detalla en Solman y otros, 2013). Presentan una resolución de 0,44° de latitud y longitud, equivalente, aproximadamente, a una resolución espacial de 50 km. El conjunto de simulaciones disponibles incluye 7 MCRs y 3 MCGs. La Tabla 3.3.9 presenta el listado de modelos evaluados, en la cual se indica tanto el MCR como el MCG. En las secciones siguientes se denotará cada MCR conjuntamente con el MCG en el que se anida.

MCR	MCG	INSTITUCIÓN
RegCM3	HADCM3-Q0	U. de Sao Paulo, Brasil
	ECHAM5-R1	
RCA	ECHAM5-R1	Rossby Centre SMHI, Suecia
	ECHAM5-R2	
	ECHAM5-R3	
MM5	HADCM3-Q0	CIMA, Argentina
REMO	ECHAM5-R3	Max-Planck-Institute for Meteorology, Alemania
PROMES	HADCM3-Q0	U. de Castilla-La Mancha, España
LMDZ	IPSL	Laboratoire de MétéorologieDynamique, Francia
	HADCM3-Q0	
ETA	HADCM3-Q0	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Tabla 3.3.9: *Listado de simulaciones con MCRs conducidas por MCG disponibles para el período 1961-1990*

En total se dispone de 11 simulaciones. El dominio del MCR ETA no abarca la totalidad del territorio Argentino ya que no se extiende más allá de los 50°S. Esta limitación afecta únicamente a la región Patagónica por lo que este modelo no será incluido para validar su desempeño en esa región.

3.3.5.5 Validación de los MCRs

Temperatura media

La Figura 3.3.6 muestra el ciclo anual medio de temperatura que resulta de la base CRU y de cada uno de los MCR, Tabla 3.3.9, para cada región. El modelo ETA/HADCM3 no está incluido en las figuras para Patagonia por no disponer de la información en la totalidad de la región.

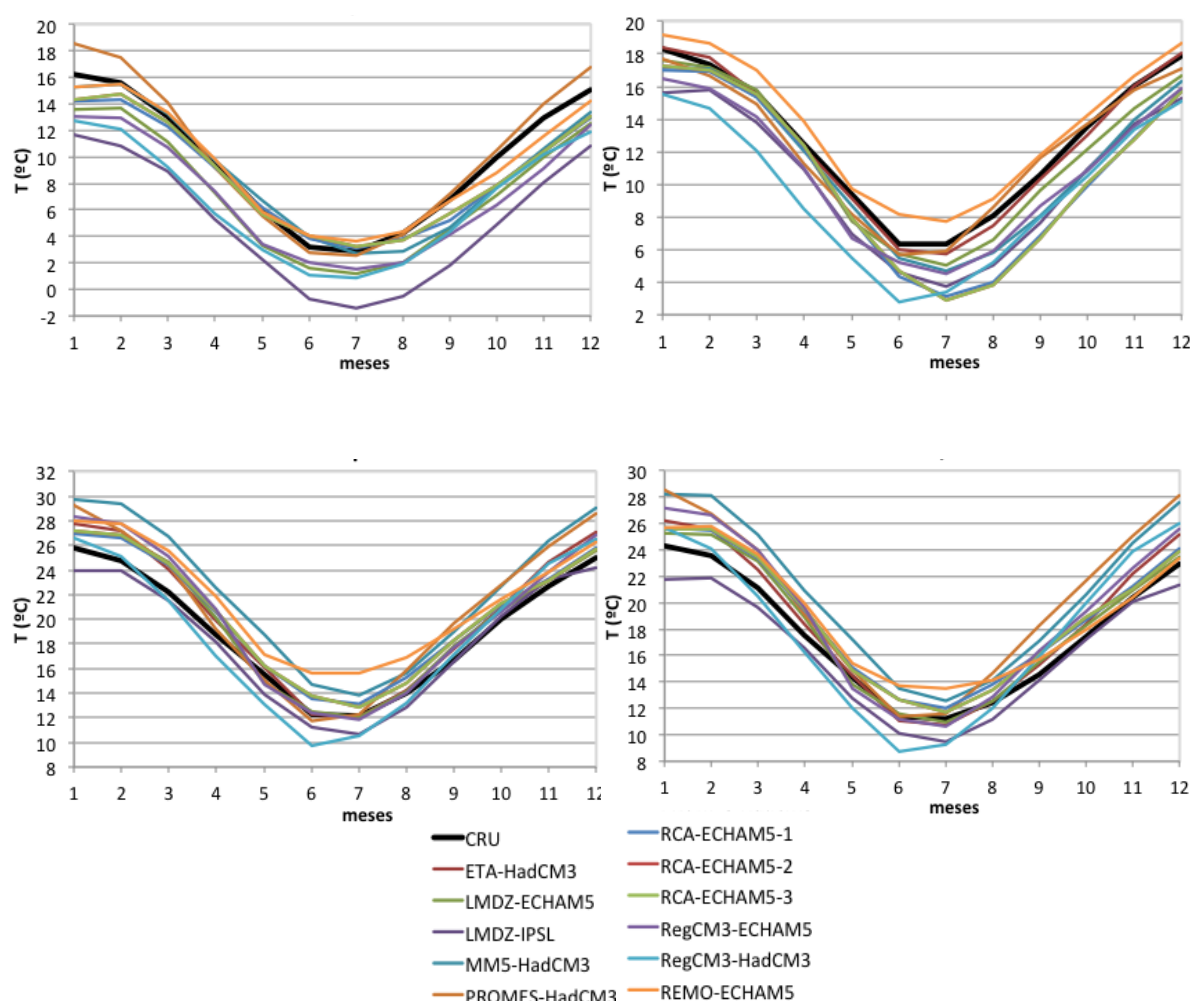


Figura 3.3.6: Ciclo anual de temperatura media (°C) para cada una de las cuatro regiones consideradas. Panel superior: derecha Húmeda e izquierda Centro; panel inferior: derecha Andes e izquierda Patagonia. De acuerdo con la base de datos de referencia (CRU) y los MCRs analizados (período 1961-90)



Todos los MCRs reproducen adecuadamente el ciclo anual de temperatura en Patagonia, aunque la mayoría subestima la temperatura a lo largo de todo el ciclo anual, con excepción de REMO/ECHAM5 y PROMES/HADCM3 que presentan una evolución anual más acorde con lo observado. LMDZ/IPSL presenta la mayor subestimación a lo largo de todo el ciclo anual (subestimando la temperatura por más de 4°C). Para el resto de los modelos, los errores están en el rango de -2°C a 1°C en los meses más fríos y de -2°C en los meses cálidos. En la región Andes, la evolución anual de la temperatura de los modelos concuerda razonablemente con la de CRU, aunque la mayoría simula el mínimo en Julio, mientras que en CRU, la temperatura de Julio es sólo levemente inferior a la de Junio. Excepto por REMO/ECHAM5 que sobreestima la temperatura a lo largo de todo el ciclo anual, todos los modelos la subestiman y en mayor medida en invierno y primavera. ETA/HADCM3, LMDZ/ECHAM5 y PROMES/HADCM3 son los que reproducen mejor el ciclo anual en la región Andes. Asimismo, en esta región algunos modelos presentan subestimaciones, principalmente en la porción norte de la región Andes y más cercana a la Cordillera y sobreestimaciones, principalmente en el centro y este de esa región, por lo cual en promedio dentro de la región los errores pueden compensarse. En las regiones Centro y Húmeda, todos los modelos reproducen el ciclo anual de la temperatura media. Sin embargo la temperatura es sobreestimada por la mayoría de los modelos durante la primavera y el verano (alrededor de 2°C) mientras que en otoño e invierno algunos modelos subestiman y otros sobreestiman la temperatura (en el rango entre -2°C y 2°C).

Las Tablas 3.3.10 a 3.3.13 presentan los indicadores estadísticos (descriptos en la sección 3.3.4) utilizados para evaluar la calidad de los MCRs en la representación de las características de la temperatura media en cada una de las regiones consideradas. En la Región Húmeda, Tabla 3.3.10, todos los modelos sobreestiman la temperatura en hasta 3,2°C, excepto LMDZ/IPSL que presenta un error inferior a 1°C. Para la mayoría de los modelos la sobreestimación de la temperatura es mayor en los meses cálidos. Además todos los modelos reproducen con gran precisión el ciclo anual aunque sobreestiman la variabilidad interanual. Sólo en 4 de ellos la variabilidad interanual modelada excede en un 30 a 40% a la observada, mientras que para el resto la sobreestimación es superior al 45%.

Modelos	Error (°C)			r ciclo anual	$\sigma_{RMC}/\sigma_{CRU}$
	Anual	DEF	JJA	Anual	Anual
ETA/HADCM3	0,9	2,0	-0,3	0,999	1,327
LMDZ/ECHAM5	0,7	1,0	0,0	0,994	1,503
LMDZ/IPSL	-1,3	-2,0	-1,5	0,991	1,392
MM5/HADCM3	3,2	4,3	1,7	0,998	1,396
PROMES/HADCM3	2,7	4,2	0,9	0,982	1,860
RCA/ECHAM5 1	1,3	1,4	1,1	0,996	1,455
RCA/ECHAM5 2	1,3	1,4	0,9	0,994	1,689
RCA/ECHAM5 3	1,3	1,4	0,9	0,994	1,689
RegCM3/ECHAM5	1,5	2,9	-0,2	0,995	1,603
RegCM3/HADCM3	0,2	1,6	-1,7	0,967	1,279
REMO/ECHAM5	1,5	1,3	2,1	0,983	1,858

Tabla 3.3.10: Métricas de evaluación de la temperatura media simulada por los MCRs para la región Húmeda



En la Región Centro, Tabla 3.3.11, la mayoría de los modelos evaluados reproducen con un error aceptable (menor a 2°C) las temperaturas medias, aunque en la mayoría de los modelos, la temperatura simulada es superior a la observada, excepto los modelos LMDZ/IPSL y RegCM3HADCM3 que exhiben un mayor desvío frío. El ciclo anual de la temperatura está muy bien representado por todos los modelos aunque la mayor deficiencia se encuentra en la sistemática sobreestimación de la variabilidad interanual.

En la región Andes, Tabla 3.3.12, se observa que la mayoría de los modelos subestima la temperatura media anual (entre -3,1°C y -0,2°C) con excepción de REMO/ECHAM5 que simula temperatura superiores a las observadas con un error de 1°C.

Modelos	Error (°C)			r ciclo anual	$\sigma_{RMC}/\sigma_{CRU}$
	Anual	DEF	JJA	Anual	Anual
ETA/HADCM3	1,2	2,2	0,1	0,999	1,314
LMDZ/ECHAM5	0,8	1,3	0,1	0,992	1,635
LMDZ/IPSL	-0,8	-1,2	-1,2	0,991	1,551
MM5/HADCM3	3,2	4,2	1,9	0,996	1,457
PROMES/HADCM3	1,9	3,2	0,5	0,988	2,207
RCA/ECHAM5 1	1,3	1,3	1,1	0,995	1,485
RCA/ECHAM5 2	1,3	1,4	1,0	0,994	1,687
RCA/ECHAM5 3	1,3	1,4	1,0	0,994	1,687
RegCM3/ECHAM5	1,2	2,5	0,0	0,993	1,572
RegCM3/HADCM3	-0,3	1,0	-1,7	0,988	1,426
REMO/ECHAM5	2,5	2,2	3,2	0,987	2,043

Tabla 3.3.11. *Ídem Tabla 3.3.10, pero para la región Centro*

Modelos	Error (°C)			r ciclo anual	$\sigma_{RMC}/\sigma_{CRU}$
	Anual	DEF	JJA	Anual	Anual
ETA/HADCM3	-0,2	0,2	-0,5	0,999	1,167
LMDZ/ECHAM5	-0,9	-0,7	-1,1	0,993	1,530
LMDZ/IPSL	-2,3	-2,3	-2,4	0,993	1,571
MM5/HADCM3	-1,4	-1,0	-1,6	0,983	1,156
PROMES/HADCM3	-0,4	-0,7	-0,2	0,989	1,726
RCA/ECHAM5 1	-2,1	-1,3	-3,1	0,969	1,854
RCA/ECHAM5 2	-2,1	-1,2	-3,1	0,964	2,138
RCA/ECHAM5 3	-2,1	-1,2	-3,1	0,964	2,138
RegCM3/ECHAM5	-1,9	-1,7	-1,7	0,994	1,524
RegCM3/HADCM3	-3,1	-2,7	-3,1	0,995	1,285
REMO/ECHAM5	1,1	1,0	1,4	0,996	1,440

Tabla 3.3.12: *Ídem Tabla 3.3.10, pero para la región Andes*



Modelos	Error (°C)			$r_{\text{ciclo anual}}$	$\sigma_{\text{RMC}}/\sigma_{\text{CRU}}$
	Anual	DEF	JJA	Anual	Anual
ETA/HADCM3					
LMDZ/ECHAM5	-2,3	-2,4	-1,8	0,996	1,169
LMDZ/IPSL	-4,5	-4,6	-4,4	0,996	1,112
MM5/HADCM3	-0.8	-0,9	-0,3	0,971	0,891
PROMES/HADCM3	0.6	1,9	-0,3	0,998	0,934
RCA/ECHAM5 1	-1.0	-1,8	0,1	0,986	0,758
RCA/ECHAM5 2	-0.9	-1,6	0,2	0,985	1,124
RCA/ECHAM5 3	-0.9	-1,6	0,2	0,985	1,124
RegCM3/ECHAM5	-2.5	-2,8	-1,6	0,991	1,397
RegCM3/HADCM3	-2.9	-3,4	-2,1	0,995	0,817
REMO/ECHAM5	-0.2	-0,6	0,6	0,992	1,088

Tabla 3.3.13: Ídem Tabla 3.3.11, pero para la región Patagonia

En Patagonia, Tabla 3.3.13, todos los modelos, excepto PROMES/HADCM3 subestiman la temperatura media anual en un rango entre $-4,5^{\circ}\text{C}$ y $-0,2^{\circ}\text{C}$. Las temperaturas medias estacionales también son subestimadas, siendo los errores mayores durante el verano que en invierno. A su vez, todos los modelos reproducen con buena precisión para esta región el ciclo anual, con coeficientes de correlación superiores a 0,97. La variabilidad interanual simulada por la mayoría de los modelos está capturada adecuadamente, en un rango que varía entre 80 y 130% de aquella observada

En verano e invierno los modelos también tienden a subestimar la temperatura media, siendo los errores en invierno en general mayores que los de verano. ETA/HADCM3 es el que simula la temperatura en la región con menor error. Asimismo, el ciclo anual está adecuadamente representado por todos los modelos. Sin embargo, sólo 3 de los 11 modelos reproducen adecuadamente el rango de variabilidad interanual. En particular se destaca ETA/HADCM3 que presenta el mejor desempeño para la temperatura en esta región. Esto puede deberse a que este modelo tiene una coordenada vertical que ha sido diseñada especialmente para regiones con topografía compleja.

La Figura 3.3.8 muestra la temperatura media anual computada con la base CRU (panel superior izquierdo) y los errores medios o error de cada modelo con respecto a la media observada. Los errores en general son superiores a 1°C e inferiores a 2°C en todo el territorio argentino, excepto esto último para algunas regiones y modelos específicos. La mayoría de los MCR sobreestiman la temperatura en el noreste y la subestiman en Patagonia, aunque la magnitud de los errores es variable dependiendo del modelo considerado. La mayoría de los MCR subestiman la temperatura en la franja cercana a la cordillera de los Andes, excepto PROMES. En la región Andes, ETA/HADCM3 y LMDZ/ECHAM5 simulan la temperatura media anual con menor error que el resto de los modelos. Resulta evidente que no hay ningún MCR que sea capaz de reproducir la temperatura media anual en toda la región con menor error, ya que algunos MCR son capaces de reproducir la temperatura media anual mejor en algunas regiones que en otras.

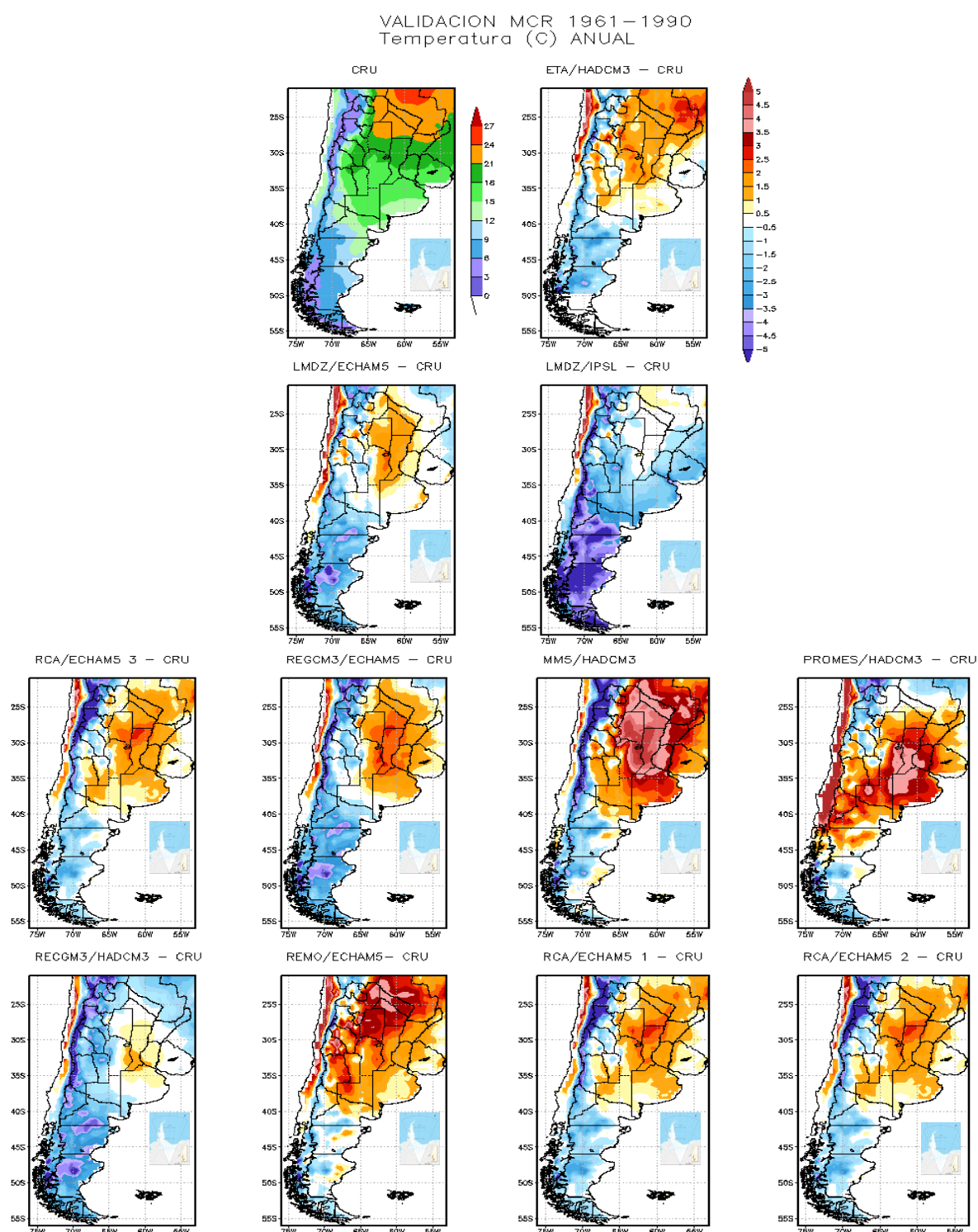


Figura 3.3.7: Error de temperatura anual (°C) para cada uno de los MCRs analizados

Precipitación

La Figura 3.3.8 presenta para cada región el ciclo anual de precipitación mensual obtenido a partir de la base CRU y de las simulaciones.

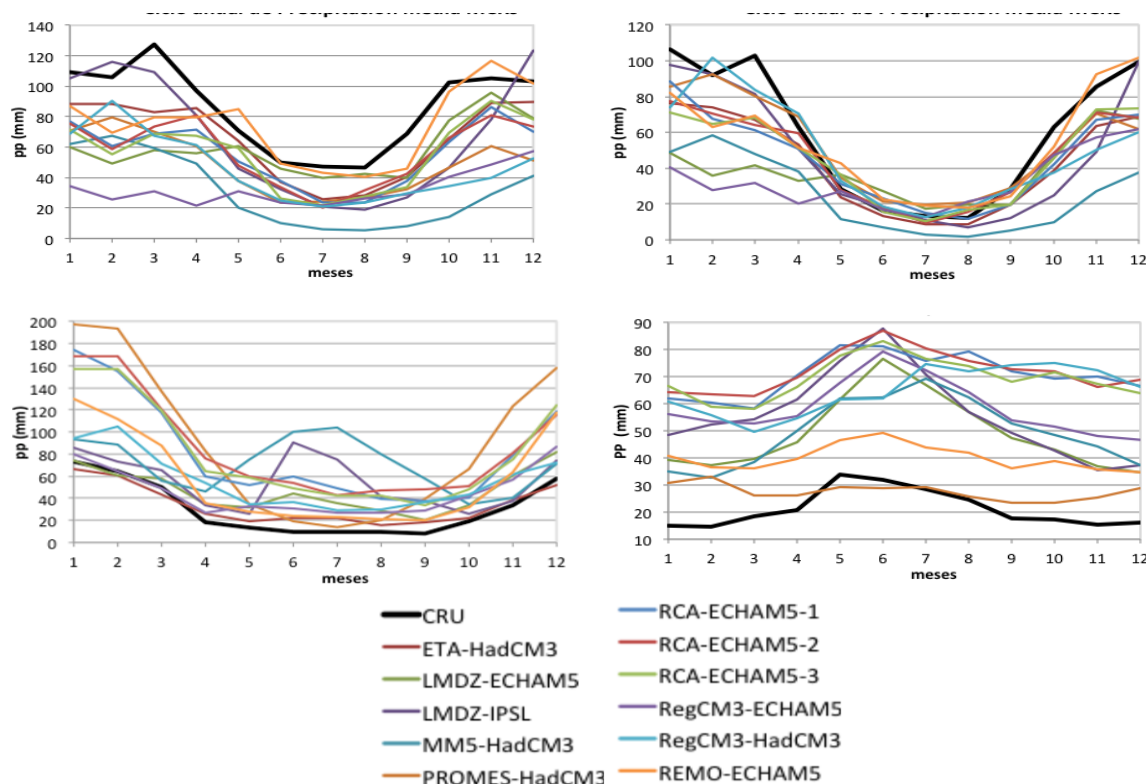


Figura 3.3.8: Ciclo anual de precipitación (mm) para cada una de las cuatro regiones. Panel superior: derecha Húmeda e izquierda Centro; panel inferior: derecha Andes e izquierda Patagonia. De acuerdo con la base CRU y para el conjunto de MCRs analizados (período 1961-90)

En general, la concordancia entre el ciclo anual de precipitación simulado por los MCR y el observado es mucho más pobre que lo obtenido para la temperatura, debido a las mayores limitaciones de los modelos en simular los procesos que producen la precipitación. No obstante, la mayoría de los modelos son capaces de describir una evolución de la precipitación a lo largo del año, a pesar de subestimar o sobreestimar, dependiendo de la región, la cantidad de precipitación mensual. En Patagonia, todos los modelos sobreestiman la lluvia a lo largo de todo el año, entre 50% y más del 100%. Sólo 5 de ellos reproducen la evolución anual, con mayor precipitación en invierno y condiciones más secas en primavera, verano y otoño, aunque estos modelos simulan el máximo un mes más tarde que las observaciones. PROMES/HADCM3, RegCM3/HADCM3, RCA/ECHAM5-2 y RCA/ECHAM5-3 no son capaces de reproducir el ciclo anual en esta región. En la Región Andes todos los modelos sobreestiman la precipitación a lo largo de todo el ciclo anual, entre 10% y más del 100%, con excepción de ETA/HADCM3 que reproduce tanto la cantidad de precipitación como el ciclo anual muy adecuadamente. En esta región, el ciclo anual de la precipitación presenta un período seco bien marcado entre mayo y septiembre y un período más lluvioso entre octubre y abril. Este comportamiento está bien representado por la mayoría



de los modelos, aunque simulan más precipitación durante la estación húmeda. MM5/HADCM3 y LMDZ/IPSL no reproducen el ciclo anual de precipitación. En la Región Centro el ciclo anual de precipitación está caracterizado por una estación seca durante el invierno y una estación lluviosa en verano. La mayoría de los modelos captura adecuadamente esta evolución anual aunque subestiman la precipitación durante la estación húmeda (aproximadamente en un 40%). En particular sólo 3 de los 11 modelos son capaces de reproducir el máximo de precipitación observado en marzo. En la Región Húmeda casi todos los modelos son capaces de reproducir el ciclo anual observado (de amplitud moderada y con máximos en las estaciones de transición), a pesar de que la mayoría de ellos subestiman la precipitación a lo largo de todo el año (entre un 10 y un 70 %) y presentan un ciclo anual de menor amplitud. Además, la mayoría de los modelos simula una estación seca con menor precipitación que la observada. Se destaca RegCM3/ECHAM5 que no reproduce la evolución anual de la lluvia en la región.

Las tablas 3.3.14 a 3.3.17 presentan los indicadores estadísticos (descriptos en la sección 3.3.4) utilizados para evaluar la calidad de los MCRs en la representación de las características de la precipitación en cada una de las regiones consideradas. En la región Húmeda, Tabla 3. 3.14, todos los modelos subestiman la precipitación a lo largo del año, siendo las mayores subestimaciones durante la transición del verano al otoño, cuando se registran las mayores precipitaciones. Asimismo, la mayor deficiencia de la mayoría de los modelos es la gran subestimación (en términos porcentuales) de la precipitación de invierno, tendiendo a simular un invierno mucho más seco que el observado.

Modelos	Error						r ciclo anual	$\sigma^*_{RMC}/\sigma^*_{CRU}$
(CRU)	Anual (1034,9 mm)		DJF (316,3mm)		JJA (144,1 mm)			
	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)		
ETA/HADCM3	-24,2	-250,1	-15,6	-49,4	-36,7	-52,8	0,918	1,299
LMDZ/ECHAM5	-32,0	-331,0	-41,0	-129,8	-11,1	-15,9	0,609	1,071
LMDZ/IPSL	-22,2	-230,1	8,7	27,6	-49,7	-71,6	0,863	0,794
MM5/HADCM3	-64,1	-663,4	-45,6	-144,3	-85,1	-122,6	0,818	1,731
PROMES/HADCM3	-43,5	-450,0	-35,8	-113,3	-48,4	-69,7	0,912	1,370
RCA/ECHAM5 1	-35,1	-363,8	-34,2	-108,2	-40,9	-59,0	0,903	1,494
RCA/ECHAM5 2	-33,7	-348,8	-34,7	-109,9	-40,4	-58,2	0,913	1,342
RCA/ECHAM5 3	-35,4	-366,5	-35,6	-112,7	-47,5	-68,4	0,870	1,222
RegCM3/ECHAM5	-62,4	-645,3	-63,4	-200,4	-50,6	-72,8	0,484	1,433
RegCM3/HADCM3	-46,8	-484,1	-33,0	-104,4	-51,9	-74,8	0,779	1,406
REMO/ECHAM5	-13,5	-139,9	-18,2	-57,7	-7,6	-11,0	0,763	1,250

Tabla 3.3.14: Métricas de evaluación de la temperatura media simulada por los MCRs para la región Húmeda

En la región Centro, Tabla 3.3.15, todos los modelos subestiman la precipitación anual ya que subestiman aquella de la época lluviosa (septiembre-abril), aunque reproducen adecuadamente las condiciones secas de invierno. LMDZ/IPSL es el que mejor reproduce la precipitación media en la región, con errores inferiores al 20%, así como también es el que mejor reproduce el ciclo anual medio y la variabilidad interanual de la lluvia.



Modelos	Error						r ciclo anual	$\sigma^*_{RMC}/\sigma^*_{CRU}$
(CRU)	Anual (710,7 mm)		DJF (297,0 mm)		JJA (42,0 mm)			
	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)		
ETA/HADCM3	-27,5	-195,2	-26,1	-77,6	-27,0	-11,3	0,984	1,440
LMDZ/ECHAM5	-34,2	-242,9	-49,5	-147,0	53,5	22,5	0,751	1,626
LMDZ/IPSL	-19,9	-141,2	-2,7	-7,9	-13,8	-5,8	0,930	0,880
MM5/HADCM3	-58,3	-414,1	-50,7	-150,5	-72,6	-30,5	0,899	1,909
PROMES/HADCM3	-11,1	-78,8	-19,1	-56,8	46,5	19,5	0,941	1,616
RCA/ECHAM5 1	-23,1	-164,0	-23,8	-70,6	17,6	7,4	0,965	1,588
RCA/ECHAM5 2	-21,5	-152,9	-27,1	-80,4	3,4	1,4	0,974	1,479
RCA/ECHAM5 3	-23,3	-165,8	-29,6	-87,9	0,2	0,1	0,971	1,583
RegCM3/ECHAM5	-45,0	-319,6	-57,0	-169,2	20,3	8,5	0,682	1,894
RegCM3/HADCM3	-17,0	-121,2	-20,2	-60,1	16,9	7,1	0,876	1,548
REMO/ECHAM5	-10,2	-72,2	-17,5	-52,0	41,7	17,5	0,919	1,442

Tabla 3.3.15: *Ídem Tabla 3.3.14, pero para la región Centro*

En la región Andes, Tabla 3.3.16, ETA/HADCM3 es el que reproduce con mejor confiabilidad la precipitación tanto para las medias, el ciclo anual como la variabilidad interanual. Exceptuando MM5/HADCM3 y LMDZ/IPSL que fallan en reproducir el ciclo anual, el resto de los modelos logra capturar con bastante fidelidad la evolución a lo largo del año, como se refleja en los coeficientes de correlación que son superiores a 0,89. No obstante es evidente que la mayoría de los modelos sobreestiman la precipitación a lo largo del año produciendo, además, un ciclo anual de mayor amplitud que el observado. Este comportamiento se observa en particular en PROMES/HADCM3, REMO/ECHAM5 y RCA/ECHAM5. RegCM3/ECHAM5, RegCM3/HADCM3 y LMDZ/ECHAM5 reproducen adecuadamente el ciclo anual medio, aunque subestiman la variabilidad interanual.

Por otro lado, RegCM3/ECHAM5, MM5/HADCM3 y LMDZ/ECHAM5 son los que presentan el desempeño más pobre, principalmente debido a que subestiman la precipitación durante el período de lluvias. El resto de los modelos reproducen razonablemente bien el ciclo anual medio aunque la mayoría falla en reproducir adecuadamente el mes en el cual se registra la máxima precipitación. La mayoría de los modelos presenta una variabilidad interanual de la precipitación 40% superior a la observada.

Modelos	Error						r ciclo anual	$\sigma^*_{RMC}/\sigma^*_{CRU}$
(CRU)	Anual (368,5 mm)		DJF (195,8 mm)		JJA (29,6 mm)		Anual	Anual
	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)		
ETA/HADCM3	10,2	37,6	-8,6	-16,9	103,0	30,5	0,986	0,970
LMDZ/ECHAM5	53,0	195,3	10,5	20,6	266,4	78,9	0,896	0,806
LMDZ/IPSL	80,4	296,2	18,7	36,6	598,2	177,5	0,501	1,062
MM5/HADCM3	130,0	479,0	30,7	60,2	857,1	254,0	0,104	1,086



PROMES/HADCM3	194,8	717,8	181,0	353,7	79,7	23,6	0,975	0,984
RCA/ECHAM5 1	166,1	612,2	129,4	253,4	398,5	118,1	0,975	1,005
RCA/ECHAM5 2	180,3	664,2	132,2	258,8	384,3	113,9	0,970	0,971
RCA/ECHAM5 3	163,9	604,0	124,7	244,2	350,4	103,9	0,983	0,939
RegCM3/ECHAM5	50,1	184,7	17,7	34,7	186,8	55,4	0,915	0,757
RegCM3/HADCM3	81,2	299,3	38,9	76,3	220,4	65,3	0,959	0,791
REMO-ECHAM5	88,6	326,6	83,3	163,1	131,0	38,8	0,994	0,776

Tabla 3.3.16: Ídem Tabla 3.3.14, pero para la región Andes

El desempeño de los modelos en la Región Patagónica, Tabla 3.3.17, es en general pobre comparado con aquel encontrado para la temperatura. Todos los modelos sobreestiman la precipitación anual, la media de verano y la media de invierno, con excepción del PROMES/HADCM3 que no reproduce adecuadamente la precipitación de invierno ni tampoco reproduce el ciclo anual de la precipitación. De los 10 modelos disponibles para validar en la región, sólo 5 reproducen adecuadamente el ciclo anual, con coeficientes de correlación superiores a 0,85. La mayoría de los modelos captura la variabilidad interanual en un rango alrededor del 15% de la observada.

Modelos (CRU)	Error						r ciclo anual	σ^* RMC/ σ^* CRU
	Anual (254,9 mm)		DJF (45,7 mm)		JJA (85,0 mm)		Anual	Anual
	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)		
ETA/HADCM3								
LMDZ/ECHAM5	130,2	332,0	143,5	65,6	136,2	115,7	0,925	0,984
LMDZ/IPSL	164,2	418,4	204,5	93,4	153,7	130,6	0,895	0,960
MM5/HADCM3	133,6	340,5	129,6	59,2	128,6	109,3	0,859	1,039
PROMES/HADCM3	29,9	76,3	104,6	47,8	-1,2	-1,0	0,083	1,432
RCA/ECHAM5 1	232,5	592,7	313,8	143,3	178,1	151,3	0,834	0,889
RCA/ECHAM5 2	239,0	609,3	330,2	150,8	186,5	158,5	0,888	0,750
RCA/ECHAM5 3	226,7	577,9	314,2	143,5	174,9	148,7	0,832	0,836
RegCM3/ECHAM5	175,5	447,5	242,1	110,6	154,5	131,3	0,896	0,873
RegCM3/HADCM3	205,7	524,2	300,8	137,4	145,6	123,8	0,052	0,788
REMO/ECHAM5	88,5	225,71	145,95	66,7	59,1	50,2	0,894	1,136

Tabla 3.3.17: Ídem Tabla 3.3.14, pero para la región Patagonia

La capacidad de los modelos en reproducir el ciclo anual de la precipitación en la región Húmeda es variable, con valores del coeficiente de correlación entre los ciclos anuales simulados y observado entre 0,5 y 0,9. Cabe mencionar que RegCM3/ECHAM5 Y LMDZ/ECHAM5 presentan graves deficiencias en reproducir adecuadamente el ciclo anual con coeficientes de correlación inferiores a 0,6. La mayoría de los modelos sobreestiman la variabilidad interanual, a excepción de LMDZ/IPSL, aunque en la mayoría de los casos el error no supera el 30%.

Las Figuras 3.3.9 y 3.3.10 muestran el error porcentual y el error absoluto, respectivamente, computados según lo descripto en la sección 3.3.4. En términos generales los errores porcentuales superan $\pm 10\%$ en todo el territorio argentino. La mayoría de los MCR muestran subestimación en el centro y noreste de Argentina (entre -20% y -70 %) y sobreestimación en



las regiones Patagónica y Andes (entre 40% y más del 100%). Asimismo se encuentra que los MCRs sobreestiman la precipitación en las regiones más secas y la subestiman en las regiones más lluviosas. Excepto MM5/HADCM3 y PROMES/HADCM3, el resto de los MCRs sobreestiman la precipitación anual en más del 100 % en la región Patagónica. Asimismo, la mayoría de los modelos sobreestima por más del 100% la precipitación en la región cercana a los Andes. Sólo ETA/HADCM3 y LMDZ/IPSL presentan errores menores. Este tipo de error sistemático es típico en regiones en las cuales la precipitación está fuertemente influenciada por una topografía compleja como la de los Andes. Por otra parte, MM5/HADCM3 y RegCM3/ECHAM5 son los que presentan mayores subestimaciones en el centro y este de Argentina, con valores que superan -70%, mientras que los errores porcentuales para el resto son en general inferiores a -40%.

VALIDACION MCR 1961-1990
Precipitación ANUAL (%)

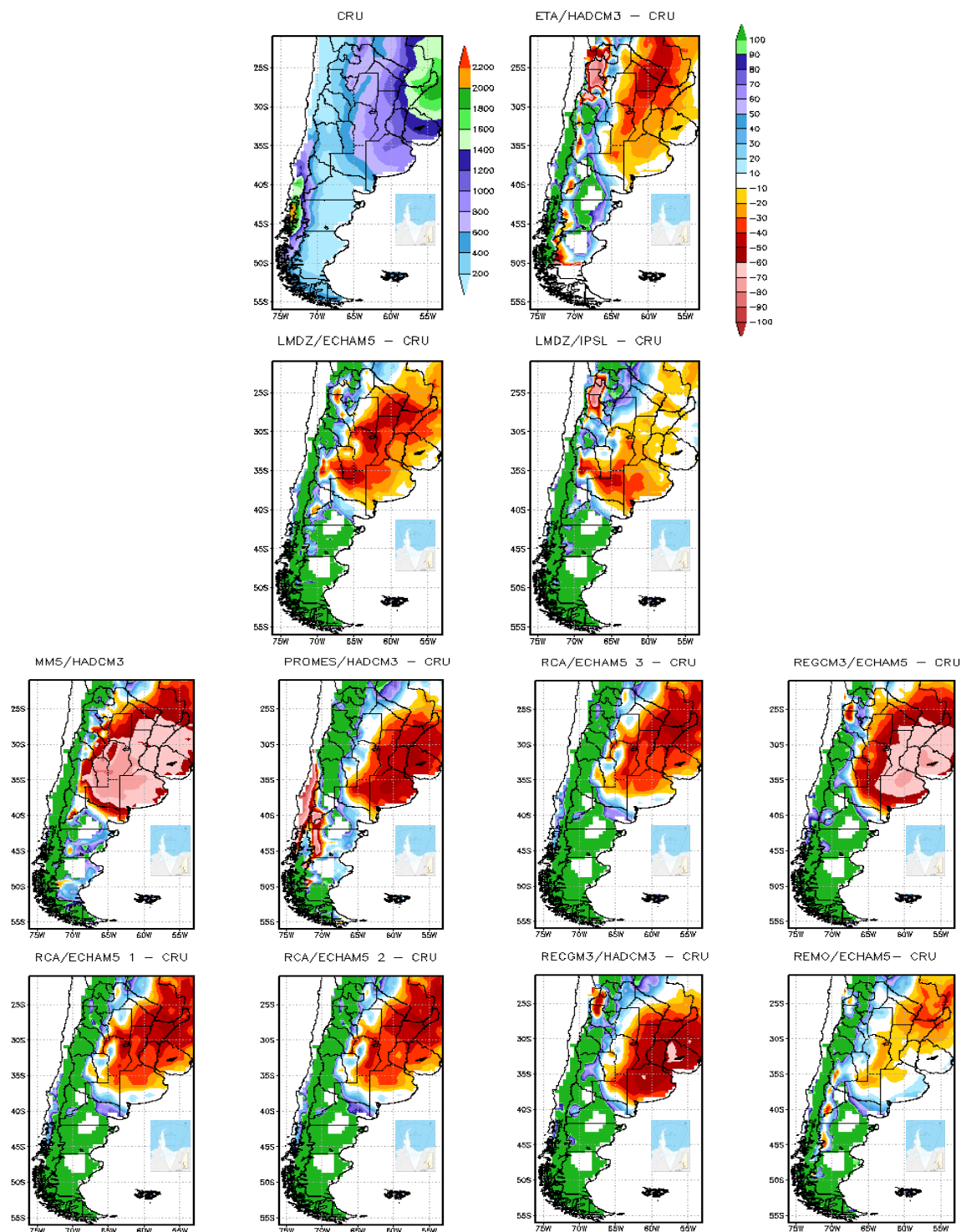


Figura 3.3.9: Error porcentual de la precipitación anual (%) para cada uno de los MCRs analizados. Este parámetro se calcula sólo donde la precipitación anual de referencia supera los 100mm

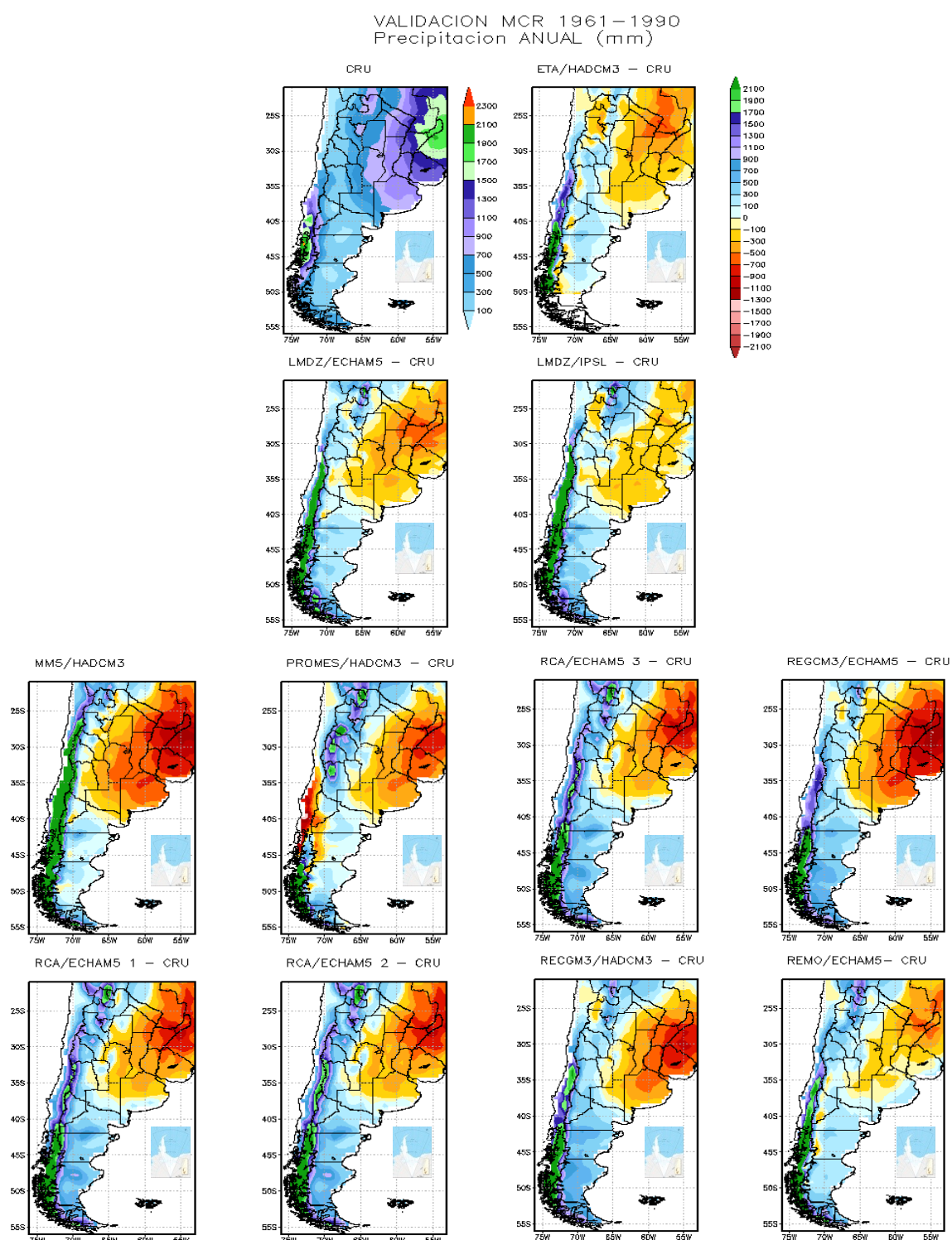


Figura 3.3.10: Error absoluto de la precipitación anual (mm) para cada uno de los MCRs analizados

En la Figura 3.3.10 se destaca que en la región Patagónica todos los modelos simulan mayor cantidad de precipitación. Asimismo, las mayores subestimaciones se encuentran en las regiones del país de mayor precipitación, tal como se había señalado previamente.

3.3.5.6 Validación del modelo MRI/JMA

El modelo del *Meteorological Research Institute* (MRI) y de la *Japan Meteorological Agency* (JMA) es un modelo global de muy alta resolución (20 Km) y se lo preseleccionó por ello, aunque es del conjunto CMIP3. La validación se realizó como en las secciones anteriores para la temperatura media y precipitación, considerando en este caso el período de validación 1979 – 2003, teniendo en cuenta los períodos de las simulaciones disponibles.

La Figura 3.3.11 muestra los errores medios en la temperatura media anual. El modelo en general subestima la temperatura en la mayor parte de Argentina, con errores entre 0 y -3°C , llegando los errores cerca de la cordillera -4.5°C . Las diferencias de temperatura entre el modelo y los datos CRU durante el verano (no se muestran), son positivas, pero en parte de las regiones Húmeda y Centro, los errores son despreciables. En el resto del país los errores varían entre 0 y 2.0°C . Asimismo, las diferencias de temperatura entre el modelo y los datos CRU durante el invierno (no se muestran) son negativos, de hasta $-3,5^{\circ}\text{C}$ en la Patagonia y parte de la región Andes.

En el norte de la región Andes se observan zonas con sobreestimación de la temperatura de hasta 2.5°C , coexistiendo con zonas de subestimación de hasta -5°C , en particular próximo y sobre la cordillera.

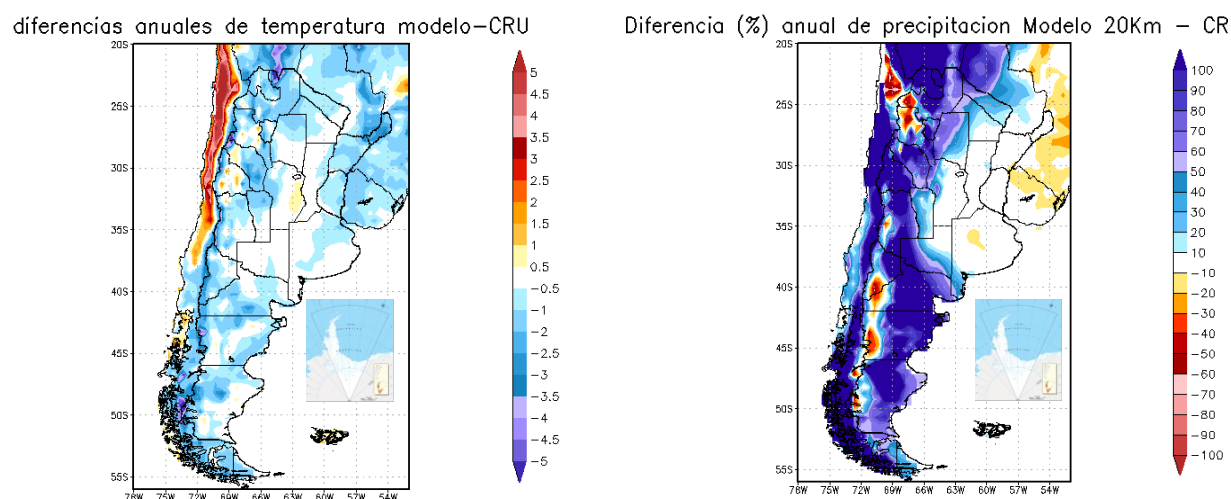


Figura 3.3.11: Izquierda, error de la temperatura media anual y derecha, error porcentual de la precipitación anual del modelo MRI/JMA con respecto a la base CRU

La Figura 3.3.11 muestra los errores medios en el promedio anual de la precipitación. El modelo en general sobreestima la precipitación en la mayor parte de Argentina (entre 60% y 90%), con excepción de la Patagonia y la zona Andes con deficiencias de hasta el 100%. La representación de la lluvia anual por el modelo para las regiones Centro y Húmeda es



prácticamente coincidente con los valores de CRU. Con respecto a las diferencias de precipitación entre el modelo y los datos CRU durante el verano (no se muestran) se encuentra que en las regiones Centro y Húmeda son menores (menor a 20%), mientras que las regiones de Patagonia y Andes muestran, en general, sobreestimación de las lluvias entre 70% y 90%, con algunos manchones de subestimación con valores en algunas zonas de -10% y en otras de hasta 50%. En particular durante el invierno (no se muestra), se observa una sobreestimación entre 50% y 90% en casi todo el país, con excepción de una parte de las regiones Centro y Húmeda donde la sobreestimación varía entre 0% y 30%. A lo largo de los Andes hay zonas con subestimación de las lluvias entre 20% y 70%.

Los resultados de las métricas o indicadores descriptos en la sección 2.2 aplicadas al modelo MRI/JMA se presentan en las Tablas 3.3.18 y 3.3.19. Para la temperatura media, la Tabla 3.3.18 muestra que los errores son inferiores a 1°C para el verano en las cuatro regiones, con los errores menores para las regiones Patagonia y Húmeda. Con excepción de la región Andes, donde el error es negativo, en las tres regiones restantes son positivos. Para el invierno se observa, que en las cuatro regiones los errores son negativos, siendo menores para las regiones Centro y Húmeda (inferiores a 1°C) y superiores a 1°C en Patagonia (-1,4°C) y Andes (-1,3°C). Los errores anuales, son negativos en las cuatro regiones, menores a 1°C, excepto en la región Andes con un error de -1,5°C. Asimismo, los coeficientes de correlación para el ciclo anual son prácticamente igual a 1, lo que indica una excelente correlación de los resultados del modelo con la base CRU.

Con respecto a las diferencias de precipitación entre el modelo y el conjunto de datos CRU, se observa en la Tabla 3.3.19 que en relación al ciclo anual los valores de correlación son altos para las regiones Andes y Centro, mientras que para las regiones Patagonia y Húmeda son algo menores. Las magnitudes de los errores de la precipitación media anual son altos en todas las regiones excepto en la región Húmeda.

Región	Error T_{anual} (°C)	Error T_{verano} (°C)	Error T_{invierno} (°C)	R_{ciclo} anual	σ_m/σ_0
Húmeda	-0,63	0,17	-0,66	0,99	1,02
Centro	-0,47	0,58	-0,42	0,99	1,10
Andes	-1,49	-0,60	-1,34	0,99	1,07
Patagonia	-0,93	0,19	-1,42	0,99	1,05

Tabla 3.3.18: Métricas de evaluación de la temperatura media a partir del modelo MRI/JMA

Región	Error pp_{anual} (%)	Error pp_{verano} (%)	Error pp_{invierno} (%)	R_{ciclo} anual	σ_m/σ_0
Húmeda	-1	3	33	0,89	0,20
Centro	23	21	135	0,96	0,28
Andes	90	80	142	0,97	0,21
Patagonia	53	121	33	0,65	0,30

Tabla 3.3.19: Métricas de evaluación de la precipitación a partir del modelo MRI/JMA



3.3.6 Selección de modelos para el desarrollo de escenarios

EL índice único de validación de modelos (IUVM), descrito en el anexo I permite sintetizar el desempeño de cada modelo climático y de sus 10 índices de error descriptos en la sección 3.3.4. Se lo utilizó para ranquear los modelos y hacer una selección objetiva de los modelos que luego fueron utilizados en el desarrollo de los escenarios climáticos del siglo XXI.

Como se menciona en el Anexo I, el IUVM varía entre 0 y 1, y los valores próximos a 0 son indicadores de un mal desempeño mientras que cuanto mayor es la habilidad del modelo para representar el clima observado, el índice se aproxima a 1. La Tabla 3.3.20 muestra para cada una de las cuatro regiones el conjunto de modelos validados listados por el valor decreciente de su IUVM. Por la forma que se construyó el IUVM, se considera que los modelos que exhiben un valor de IUVM de 0,5 o mayor represen aceptablemente el clima de la región.

En Patagonia 6 modelos presentan valores de IUVM por encima del umbral definido, siendo 3 MCGs y 3 MCRs. Se destaca que el mayor valor de IUVM alcanzado es de solo 0,66, lo que muestra las dificultades de los actuales modelos climáticos en reproducir el clima de esta región. Para la región Andes se identifican 7 modelos con buen IUVM, siendo sólo 2 de ellos MCRs. En particular se destacan el excelente desempeño del IPSL-CM5A-MR y del ETA-HadM3 con IUVM mayores o iguales a 0,9, mientras que el resto de los 5 modelos presenta valores muy cercanos a 0,5. En la región Centro, 10 modelos reproducen aceptablemente el clima siendo 9 de ellos MCGs. En la región Centro se destaca como excelente el modelo CNRM-CM5, aunque hay también otros 3 modelos con IUVM mayores o iguales a 0,7. En la región Húmeda hay 7 modelos con IUVM mayores a 0,5, siendo todos MCGs. Se destaca el modelo CCSM4 con un valor de 0,91, mientras que también el CMCC-CM hace una buena simulación en esta región con un valor de 0,75.

En general, los modelos globales tienen una mejor representación del clima observado que los modelos regionales, particularmente en las regiones Centro y Húmeda; ello puede atribuirse a que los modelos globales son de una generación de modelos más reciente y por ello tienen una mejor performance. La excepción es la región Patagonia, y en menor medida la región Andes, regiones donde como es de esperar la mayor resolución espacial de los modelos regionales puede permitir una mejor representación de los efectos de la cordillera de los Andes en el clima regional.

El análisis comparativo entre regiones, muestra que ningún modelo tuvo un muy buen desempeño simultáneamente en las cuatro regiones. Se destacan 5 MCGs que tuvieron buen desempeño en tres regiones, Andes, Centro y Húmeda: CCSM4, IPSL-CM5A-MR, MPI-ESM-MR, MPI-ESM-LR, NorESM1-M. Asimismo, MRI-CGCM3 tuvo buenos resultados en Patagonia, Andes y Centro y en la región Húmeda estuvo cerca del límite que se adoptó como criterio de calidad. Por ello este modelo se provee en la base de datos para todo el país.

Los resultados proporcionados por la Tabla 3.3.20 constituyen la base del proceso de selección de los modelos utilizados. La misma permite distinguir aquellos modelos que exhiben un muy mal desempeño en cada una de las regiones, así como aquellos en los que es muy bueno. En este sentido la aplicación del IUVM cumplió con este objetivo. A partir de la evaluación experta de una serie de elementos como la distribución de errores dentro de cada



región, los errores en los índices extremos (Anexo II) y el análisis particular de cada uno de los índices que conforman el IUVM se confirmó que para cada región los 4 primeros modelos del ranking de la Tabla 3.3.20 constituyen una buena elección para la simulación del clima futuro. Esto permite contar con un número mínimo de modelos en cada región para estimar el rango de incerteza originada en las desigualdades entre modelos. Ningún modelo estuvo entre los 4 seleccionados en las cuatro regiones, reflejando la diversidad de los forzamientos geográficos del clima, propios de un país muy extenso y las limitaciones de los modelos en reproducirlos.

Húmeda	IUVM	Centro	IUVM	Andes	IUVM	Patagonia	IUVM
CCSM4	0,91	CNRM-CM5	0,90	IPSL-CM5A-MR	0,93	REMO-ECHAM5	0,66
MRI/JMA	0,88	CMCC-CM	0,78	ETA-HadCM3	0,90	MM5-HadCM3	0,58
CMCC-CM	0,75	CSIRO-Mk3-6-0	0,71	MRI/JMA	0,54	CSIRO-Mk3-6-0	0,52
NorESM1-M	0,62	MRI-CGCM3	0,70	MPI-ESM-LR	0,52	GFDL-ESM2G	0,52
HadGEM2-CC	0,57	MPI-ESM-MR	0,67	CCSM4	0,51	PROMES-HadCM3	0,51
MPI-ESM-MR	0,57	LMDZ-IPSL	0,66	MPI-ESM-MR	0,51	MRI-CGCM3	0,51
MPI-ESM-LR	0,55	GFDL-ESM2G	0,63	MRI-CGCM3	0,51	RCA-ECHAM5-3	0,48
IPSL-CM5A-MR	0,53	MPI-ESM-LR	0,60	NorESM1-M	0,51	MRI/JMA	0,48
ETA-HadCM3	0,49	MRI/JMA	0,57	LMDZ-ECHAM5	0,50	RCA-ECHAM5-2	0,47
MRI-CGCM3	0,49	CCSM4	0,56	PROMES-HadCM3	0,47	NorESM1-M	0,45
RegCM3-HadCM3	0,48	NorESM1-M	0,56	HadGEM2-CC	0,47	HadGEM2-ES	0,44
CNRM-CM5	0,47	HadGEM2-ES	0,49	CSIRO-Mk3-6-0	0,46	HadGEM2-CC	0,43
LMDZ-ECHAM5	0,42	RegCM3-HadCM3	0,48	HadGEM2-ES	0,43	INMCM4	0,37
RCA-ECHAM5-3	0,40	IPSL-CM5A-MR	0,48	REMO-ECHAM5	0,40	CCSM4	0,36
RCA-ECHAM5-2	0,40	LMDZ-ECHAM5	0,42	RegCM3-ECHAM5	0,37	CNRM-CM5	0,35
CSIRO-Mk3-6-0	0,38	RCA-ECHAM5-2	0,40	CMCC-CM	0,37	MIROC5	0,35
RCA-ECHAM5-1	0,34	RCA-ECHAM5-3	0,40	INMCM4	0,37	CMCC-CM	0,34
LMDZ-IPSL	0,34	RCA-ECHAM5-1	0,36	MM5-HadCM3	0,31	MPI-ESM-LR	0,31
HadGEM2-ES	0,32	REMO-ECHAM5	0,36	GFDL-ESM2G	0,30	MPI-ESM-MR	0,31
GFDL-ESM2G	0,31	ETA-HadCM3	0,36	RegCM3-HadCM3	0,21	RCA-ECHAM5-1	0,30
REMO-	0,30	HadGEM2-	0,36	MIROC5	0,20	LMDZ-	0,28



ECHAM5		CC				ECHAM5	
RegCM3-ECHAM5	0,25	PROMES-HadCM3	0,34	LMDZ-IPSL	0,19	IPSL-CM5A-MR	0,22
PROMES-HadCM3	0,16	MIROC5	0,30	RCA-ECHAM5-2	0,17	RegCM3-ECHAM5	0,19
INMCM4	0,14	RegCM3-ECHAM5	0,26	RCA-ECHAM5-3	0,17	LMDZ-IPSL	0,15
MM5-HadCM3	0,12	INMCM4	0,23	CNRM-CM5	0,15	RegCM3-HadCM3	0,14
MIROC5	0,11	MM5-HadCM3	0,12	RCA-ECHAM5-1	0,14		

Tabla 3.3.20: Índice único de validación de modelos (IUVM) para cada MCG, MCR y región. Se indican en azul los MCGs, en negro los MCRs y en rojo el modelo MRI/JMA

Los modelos seleccionados fueron los siguientes:

Región Húmeda: CCSM4 (NCAR, Estados Unidos), MRI/JMA (MRI, Japón), CMCC-CM (Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, Italia) y NorESM1-M (Norwegian Climate Centre, Noruega), todos MCGs.

Región Centro: CNRM-CM5 (Centre National de Recherches Meteorologiques, Francia), CMCC-CM (Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici, Italia), CSIRO-Mk3-6-0 (CSIRO, Australia) y MRI/CGM3 (MRI, Japón), todos MCGs.

Región Andes: IPSL-CM5A-MR (Institut Pierre Simon Laplace, Francia), ETA-HadCM3 (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Brasil), MRI/JMA (MRI, Japón) y MPI-ESM-LR (Max Planck Institute for Meteorology, Alemania). Todos MCGs, excepto ETA-HadCM3 MCGs.

Región Patagonia: REMO-ECHAM5 (Max Planck Institute for Meteorology, Alemania), MM5-HadCM3 (CIMA, Argentina), CSIRO-Mk3-6-0 (CSIRO, Australia), GFDL-ESM2G (NOAA-GFDL, Estados Unidos). Los dos primeros regionales y los otros dos, MCGs.

3.3.7 Corrección de los errores sistemáticos de los modelos

En la sección 3.3.5 se vio que todos los modelos presentan errores al representar los campos medios de la temperatura en superficie y de la precipitación en el periodo de validación. Como estos errores sistemáticos son importantes, es necesario elaborar correcciones para modificar los resultados del modelo de modo que se aproximen lo más posible al clima observado. Esto implica el cálculo de factores de corrección basados en los errores sistemáticos, que luego se aplicarán a los escenarios climáticos futuros proyectados por el MCGs, tanto en sus valores medios como en los datos diarios necesarios para ciertos estudios de impactos, especialmente en la agricultura y los recursos hídricos.

Hay distintas técnicas de corrección de los modelos que van desde la más simple mediante el ajuste a los valores medios del clima observado, a otras más sofisticadas en las que las variables a corregir lo son de tal modo que presenten, luego de la corrección las mismas distribuciones estadísticas que en el clima observado. Este último es el esquema que se utilizó y es mucho más poderoso que el de la simple corrección de los valores medios ya que asegura



no solo que los valores medios se ajusten a los observados, sino también su distribución estadística, con lo cual parte de la variabilidad queda bien representada. Este esquema es robusto en términos estadísticos y fue previamente usado en diferentes trabajos (Wood y otros 2002, 2004; Vidal y Wade 2008, Saurral, 2012) en los que se mostró la utilidad del mismo para mejorar las simulaciones provistas por modelos climáticos antes de emplearlas como entradas a modelos hidrológicos.

El ajuste o calibración se realiza sobre un periodo con simulaciones climáticas y datos confiables observados, donde obviamente los valores de los modelos corregidos serán muy similares a los observados. Pero luego, este ajuste se verifica en un segundo periodo independiente de modo que si se observa una adecuada validación en este segundo periodo se puede tener una mayor confianza en las proyecciones futuras. Esto no implica la eliminación total del nivel de incerteza de las proyecciones futuras (sección 3.5).

De acuerdo a la disponibilidad de las simulaciones del clima pasado por parte de los modelos globales y regionales se tomó el intervalo (1961-75) para el cómputo de factores de corrección (calibración) y (1976-90) para la validación de las correcciones realizadas. Por la diferente disponibilidad de datos del modelo, en el caso del modelo global de alta resolución MRI, los periodos considerados fueron 1991-2003 para la calibración y 1979-1990 para la validación.

El método consiste en computar la distribución de percentiles de las series de temperatura media y de precipitación acumulada mensual tanto en los datos de la base CRU correspondientes a las observaciones como en los provistos por los modelos para el periodo de calibración. El vector de corrección se obtuvo en el caso de la temperatura, de forma que se sumó a cada dato la diferencia entre el valor del percentil p en las observaciones menos el del percentil p en el modelo climático, mientras que en el caso de la precipitación, se procedió a multiplicar cada valor mensual de los modelos climáticos por el cociente entre el valor del percentil p de precipitación en las observaciones sobre el valor del percentil p en el modelo climático.

Esto se realizó para cada variable, temperatura y precipitación, y para cada punto del reticulado correspondiente a la base CRU, por lo que los datos de los modelos debieron ser previamente interpolados al reticulado CRU. El esquema de corrección se aplicó a los campos de cada uno de los doce meses de precipitación y temperatura de superficie, para cada uno de los 4 modelos seleccionados en cada una de las 4 regiones. Como se aprecia se trata de un enorme volumen de factores de corrección.

3.3.8 Validación del método de corrección de errores sistemáticos

Para completar el trabajo de calibración se pasó a su validación sobre un segundo periodo. Dado que no es posible mostrar todos los resultados para los centenares de puntos evaluados, los mismos se sintetizan mediante mapas que muestran la comparación de los valores medios de los modelos corregidos en el periodo de validación con los respectivos datos observados, complementado con las distribuciones estadísticas en algunos puntos de cada región.

Estos mapas y gráficos se muestran en los capítulos 5 a 8, correspondientes a cada región donde también se hace su análisis. La conclusión es que con la selección de los modelos de



mejor performance y el método de corrección de sus errores sistemáticos aplicado, se logra representar los valores medios de la precipitación y la temperatura anual con error pequeño en la mayor parte del territorio continental argentino. Esto es con menos del 10% en la precipitación y menos de 0,5°C en la temperatura. Igualmente, también se logra representar las distribuciones estadísticas con poco error, excepto para algunos casos, particularmente en los extremos de las distribuciones de lluvia. Esto último es un limitante importante para la proyección del clima futuro en la Argentina.

3.4 ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)

Con los modelos seleccionados para cada región se construyeron los escenarios RCP4.5 y 8.5 y en algunas regiones el A1B para el futuro cercano (2015-2039) y el futuro lejano (2075-2099). Como los modelos elegidos son distintos para cada región esos resultados se muestran en los capítulos regionales (capítulos 5 a 8). En este capítulo se presenta una visión general de todo el país y para ello se muestran las diferencias de estos mismos escenarios y periodos con el periodo de referencia 1981-2005 del promedio de los 42 modelos de la base CMIP5. Esta es otra forma de usar los modelos climáticos para construir escenarios climáticos y es la que fue utilizada por el IPCC en sus últimos informes. En este caso, las coincidencias o divergencias de estos promedios sobre los 42 modelos con los escenarios climáticos regionales contruidos con los modelos elegidos para cada región es un elemento de juicio para evaluar la incerteza de los escenarios climáticos por la divergencia entre modelos. Para mayores detalles a nivel regional, los mapas de los capítulos regionales se consideran más confiables porque están basados en los modelos que para cada región representaron mejor el clima observado.

La temperatura media aumenta en todo el país en los dos escenarios, tanto para el futuro cercano como para el lejano y en ambos casos los aumentos de temperatura son mayores hacia fin de siglo, Figura 3.4.1. De acuerdo a lo esperado, en el futuro lejano el escenario RCP8.5 muestra mayor calentamiento que el RCP4.5. En el futuro cercano, se proyectan aumentos muy similares en los dos escenarios con valores entre 0,5 y 1°C en casi todo el país. Esto implicaría una aceleración del calentamiento observado entre 1986-2010, que en casi todo el país fue menor a 0,5°C, Tablas 5.2.1.1, 6.2.1.1, 7.2.1.1 y 8.2.1.1.

El patrón geográfico es de mayor aumento en el norte que en el sur, con un máximo en el noroeste que se prolonga hacia el sur en los escenarios de mayor calentamiento y que llega hasta el centro de la Patagonia con más de 3°C. La otra característica de esos escenarios es que en todos los casos los aumentos de temperatura son menos pronunciados en las zonas como la Patagonia y la provincia de Buenos Aires, que se encuentran más expuestos a la circulación de los vientos provenientes de los océanos.

Por el contrario, la región de máximo calentamiento sería la del noroeste que no solo está muy alejada del mar, sino que está encerrada entre las sierras pampeanas desde Salta hasta San Luis por el este, por los Andes al oeste y por la Puna al norte. Por esta orografía, el mayor ingreso de aire en capas bajas es desde el sur, fundamentalmente con el pasaje de frentes fríos, que con el calentamiento global, tendrían un ingreso cada vez más esporádico a esta región, agravando de esta forma el calentamiento provocado localmente por el aumento de los GEIs.

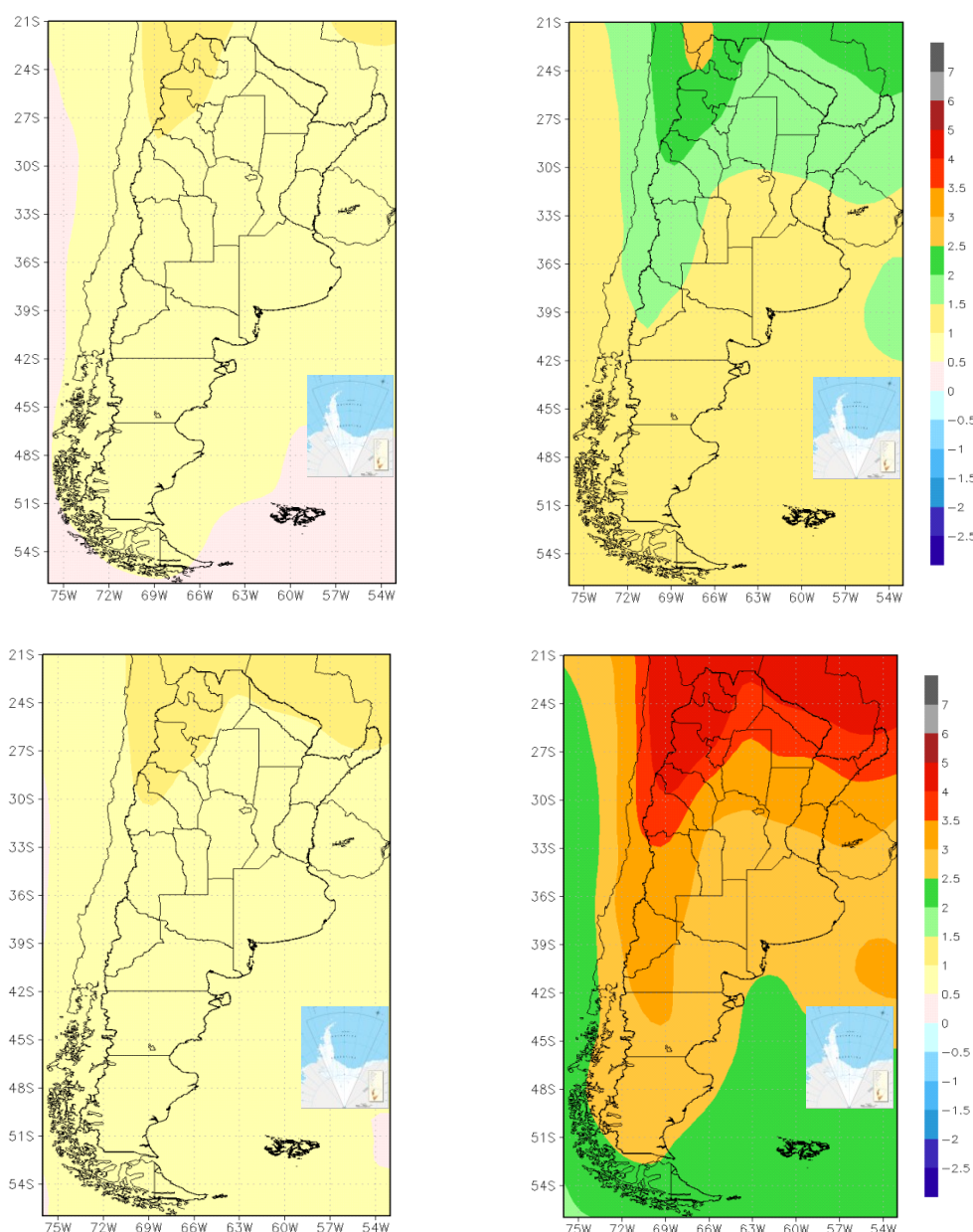


Figura 3.4.1: Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1981-2005. Promedios de 42 modelos de la base CMIP5. Panel superior, escenario RCP4.5 y panel inferior, RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

En el caso de la precipitación, los cambios proyectados por el promedio de los 42 modelos de la base CMIP5 no son importantes, Figura 3.4.2. Excepto para el escenario RCP8.5 en el futuro lejano, los cambios proyectados están entre menos diez y más diez por ciento. Si se considera que este podría ser el rango de las posibles fuentes de error, estas señales de cambio serían poco relevantes. Por ello, se podría asumir que no habría mayores cambios en la precipitación en todo el país en el futuro cercano, ni tampoco en el caso del escenario RCP4.5

en el futuro lejano. Esto se confirma con los escenarios regionales, calculados con solo los modelos elegidos como más representativos del clima observado (capítulos 5 a 8).

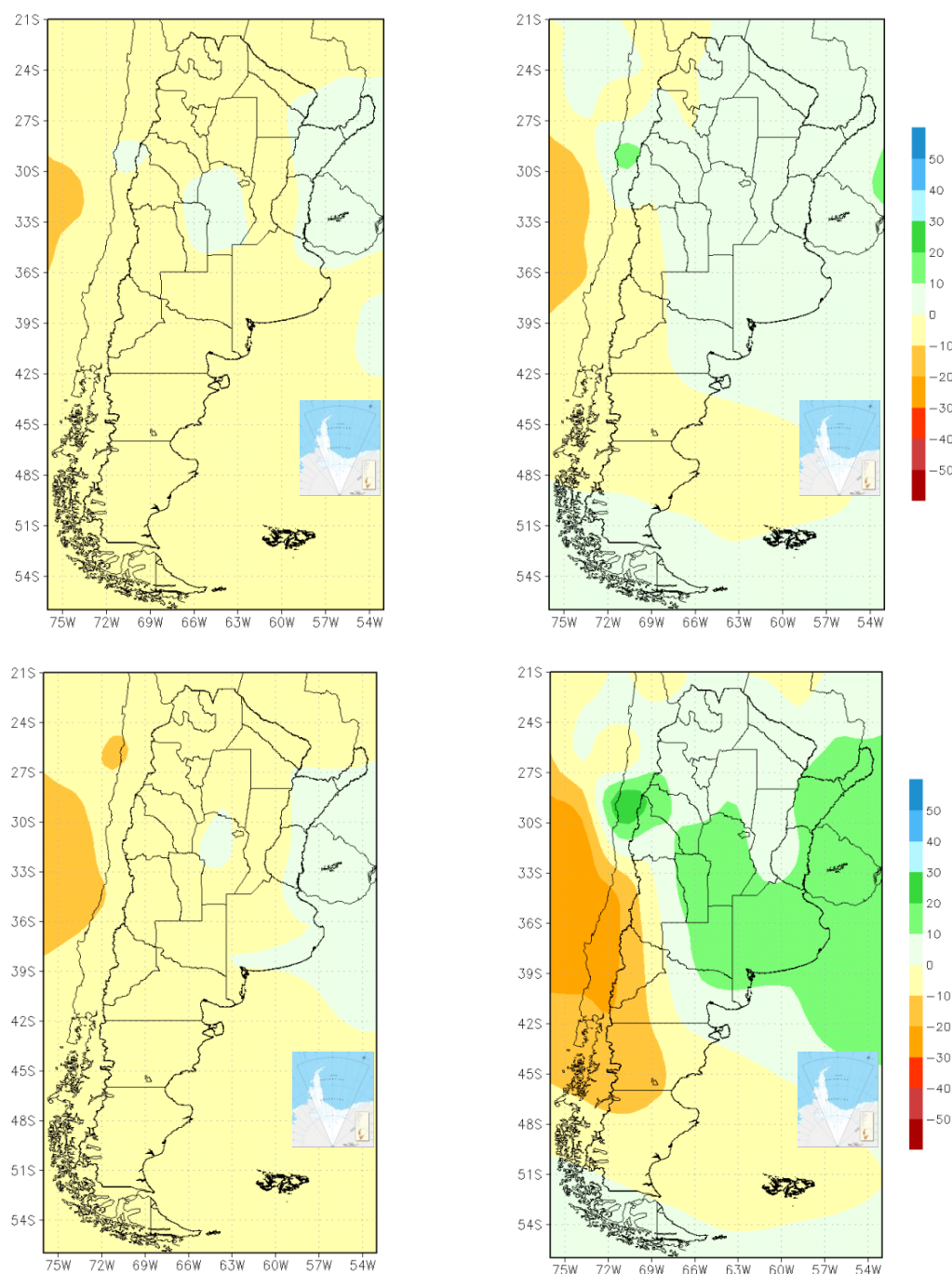


Figura 3.4.2: Cambio porcentual en la precipitación anual con respecto al periodo 1981-2005. Promedios de 42 modelos de la base CMIP5. Panel superior escenario, RCP4.5 y panel inferior, RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

En el caso del escenario RCP8.5, para el futuro lejano se proyecta un descenso de 10 a 20% sobre el oeste de la Patagonia norte y central y un aumento similar en el centro y la mayor parte del este del país. En los escenarios de las regiones Húmeda y Central, capítulos 5 y 6, este aumento solo coincide en el signo pero está acotado entre 0 a 10 %, por lo que se puede estimar que en esas regiones solo habría un aumento moderado de las precipitaciones medias.

3.5 EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS

Las fuentes de incerteza sobre los escenarios climáticos regionales del futuro provienen de la falta de habilidad de los modelos climáticos para representar con exactitud el clima regional, de los escenarios de emisiones y de la variabilidad interdecadal del clima que por el momento no es captada adecuadamente.

En el futuro lejano, como el cambio por el aumento de las concentraciones de GEIs es grande, se puede suponer que la variabilidad interdecadal será menor en relación a aquella y por consiguiente para este futuro, la incerteza queda circunscripta a los errores de los modelos y a los posibles escenarios de emisiones.

La Figura 3.5.1 presenta la cuantificación del peso relativo de las tres diferentes fuentes de incerteza en las proyecciones realizadas sobre Sudamérica por los MCG del CMIP3 a lo largo del siglo XXI.

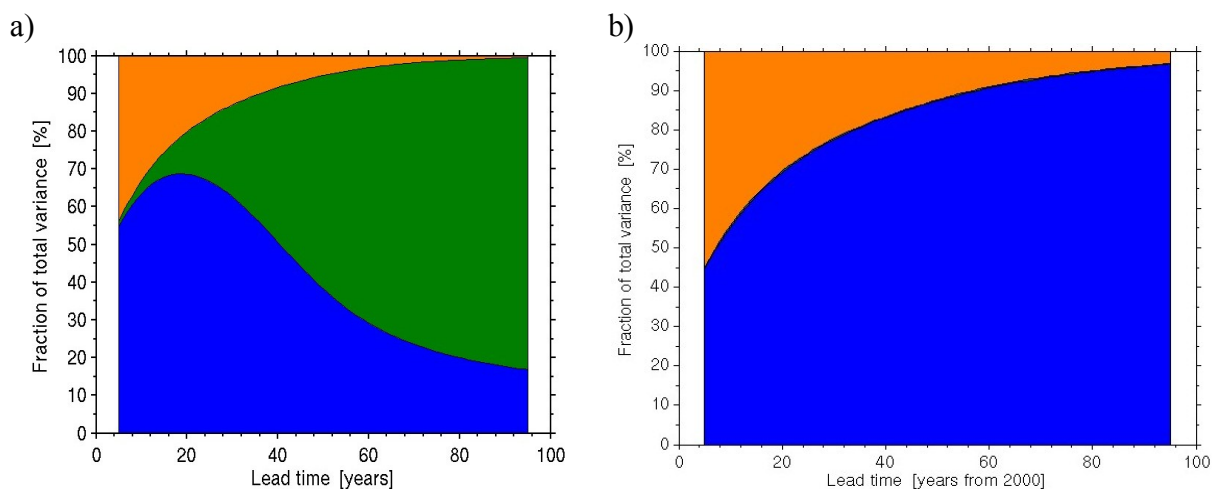


Figura 3.5.1: Porcentaje relativo explicado por cada fuente de incerteza de las proyecciones con los modelos del CMIP3 de los promedios decadales sobre Sudamérica de a) temperatura media anual y b) precipitación acumulada anual. Naranja: incerteza de la variabilidad natural del clima, verde: incerteza de los escenarios de GEI, azul: incerteza de los modelos. (Hawkins y Sutton (2009) y (2011), <http://climate.ncas.ac.uk/research/uncertainty/>)

Tanto para la lluvia como para la temperatura de superficie, el porcentaje de incerteza asociada a la variabilidad interdecadal del clima es importante en los primeros años pero luego disminuye. Asimismo, para las proyecciones de la temperatura de superficie el porcentaje de incerteza asociada a los errores de los modelos aumenta para mediados del siglo XXI y luego disminuye. Sin embargo, su contribución a la incerteza de las proyecciones de la lluvia continúa aumentando, siendo la más importante hacia el final del siglo XXI. Esta figura



también muestra que si bien el porcentaje de incerteza asociado a las emisiones de GEI es importante en las proyecciones de la temperatura de superficie en el continente, el mismo es despreciable en las proyecciones de la precipitación a lo largo de todo el período frente a la gran incerteza que producen los modelos.

En suma, en términos absolutos y no solo relativos, en un futuro cercano (es decir dentro de la primera mitad del siglo XXI), la incerteza ocasionada por diferentes escenarios de concentración de GEI posibles es entonces muy reducida, mientras que las contribuciones de las otras dos fuentes de incerteza son grandes. Con el paso del tiempo, aunque la contribución de la variabilidad natural del clima se puede mantener constante, su peso relativo disminuye frente a la incerteza en la señal de cambio climático por aumento de las concentraciones de GEI. Sobre la Argentina, esto es válido en general para la temperatura mientras que para la precipitación depende de la región, dado que la discordancia entre modelos puede crecer con el tiempo (ej. Blázquez y Nuñez, 2012).

En este estudio, se comparan tres escenarios, el RCP8.5 que es un escenario de extremo calentamiento al que se llegaría si no hubiera restricciones a las emisiones globales, el RCP4.5 de emisiones moderadas y el A1B de emisiones intermedias entre las de los dos anteriores. Los detalles y resultados se presentan en los capítulos regionales (5 al 8).

Referencias

Blázquez, J. y M. N. Nuñez, 2012: Analysis of uncertainties in future climate projections for South America: comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 models. *Climate Dynamics*, 10.1007/s00382-012-1489-7.

Carril, A. F., C. G. Menéndez, C. Remedio, F. Robledo, A. Sörensson, B. Tencer, J.P. Boulanger, M. de Castro, D. Jacob, H. Le Treut, L. Z. X. Li, O. Penalba, S. Pfeifer, M. Rusticucci, P. Salio, P. Samuelsson, E. Sanchez y P. Zaninelli, 2012: Assessment of a multi-RCM ensemble for South America. *Clim. Dyn.*, **39** (12), 2747–2768.

Harris, I., P. D. Jones, T. J. Osborn y D. H. Lister, 2013. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations. *Int. J. Climatol.*, **34**, 623–642.

Hawkins, E y Rowan Sutton, 2011; The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change *ClimDyn.* **37**, 407–418

Meehl, G., C. Covey, K. E. Taylor, T. Delworth, R. J. Stouffer, M. Latif, B. McAvaney y J. F. Mitchell, 2007: The WCRP CMIP3 multimodel dataset: a new era in climate change research. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **88**, 1383–1394.

Montroull, N., R. Saurral, I. Camilloni, C. Menendez, R. Ruscica y A. Sörensson, 2012: Escenarios hidrológicos futuros en la región de los esteros del Iberá en el contexto del cambio climático. *Meteorologica* (en prensa).

Nuñez, M. N., S. Solman, M. Cabré y A. Rolla, 2005: Estimación de escenarios regionales de cambio climático mediante el uso de modelos climáticos regionales. Informe *Final*



CIMA/CONICET, B-9 Modelos Climáticos Regionales- Segunda Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. GEF BIRF PF 51286 AR.

Saurral, R. I., 2012. La hidrología superficial de la cuenca del Plata y su representación a través de simulaciones climáticas: identificación de errores y mecanismos físicos asociados. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UBA.

Saurral, R. I., 2010: The hydrologic cycle of the La Plata Basin in the WCRP-CMIP3 multimodel dataset. *J. Hydrometeor.*, **11**, 1083–1102.

Solman, S. y N. Pessacg, 2012: Evaluating uncertainties in Regional Climate simulations over South America at the seasonal scale. *Clim. Dyn.*, **39**, 59–76.

Solman, S., E. Sanchez, P. Samuelsson, R. da Rocha, L. Li, J. Marengo, N. Pessacg, A.R. Remedio, S. C. Chou, H. Berbery, H. Le Treut, M. de Castro y D. Jacob, 2013. Evaluation of an ensemble of regional climate model simulations over South America driven by the ERA-Interim reanalysis: Model performance y uncertainties", *Clim. Dyn.*, **41**, 1139–1157.

Stouffer, R. J., K. E. Taylor y G. A. Meeh, 2011. CMIP5 Long-term experimental Design. *CLIVAR Exchanges*, **56**, 5–7.

Taylor, K. E., R. J. Stouffer y G. A. Meehl, 2012. An Overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society* **93**, 485–498.

Vera, C., G. Silvestri, B. Liebmann, y P. Gonzalez, 2006: Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L13707.

Vidal, J. P y S. Wade, 2007: A framework for developing high-resolution multi-model climate projections: 21st century scenarios for the UK. *Int. J. Climatol.*, **28**, 843–858.

Wood, A. W., E. P. Maurer, A. Kumar y D. P. Lettenmaier, 2002: Long-range experimental hydrologic forecasting for the eastern United States. *J. Geophys. Res.*, **107**, 4429.

Wood, A. W., R. Leung Lai, V. Sridhar y D. P. Lettenmaier, 2004: Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change*, **62**, 189–216.