



CAPITULO 5: CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN HÚMEDA

5.1	INTRODUCCIÓN	pág. 86
5.1.1	Dominio espacial	pág. 86
5.1.2	Datos	pág. 86
5.2	CAMBIOS Y TENDENCIAS	pág. 86
5.2.1	Temperatura	pág. 86
	<i>Temperaturas medias</i>	pág. 86
	<i>Extremos térmicos</i>	pág. 92
	<i>Incerteza sobre las tendencias de temperatura</i>	pág. 95
5.2.2	Precipitación	pág. 98
	<i>Precipitaciones medias anuales y estacionales</i>	pág. 98
	<i>Precipitaciones extremas</i>	pág. 104
	<i>Grado de Incerteza sobre el signo y la magnitud de los cambios observados</i>	pág. 108
5.2.3	Otras variables	pág. 109
5.3	VALIDACIÓN DE LA CORRECCIÓN DE ERRORES	pág. 110
5.3.1	Temperatura	pág. 110
5.3.2	Precipitación	pág. 114
5.4	ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)	pág. 118
5.4.1	Temperatura	pág. 118
	<i>Temperaturas medias</i>	pág. 118
	<i>Extremos térmicos</i>	pág. 124
5.4.2	Precipitación	pág. 131
	<i>Precipitación media</i>	pág. 131
	<i>Precipitaciones extremas</i>	pág. 133
5.5	EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE LOS ESCENARIOS CLIMÁTICOS	pág. 138
5.5.1	Temperatura	pág. 138
	<i>Temperaturas medias</i>	pág. 138
	<i>Extremos térmicos</i>	pág. 140
5.5.2	Precipitación	pág. 143
	<i>Precipitación media</i>	pág. 143
	<i>Precipitaciones extremas</i>	pág. 145
5.6	CONCLUSIONES	pág. 147
	Referencias	pág. 148



CAMBIOS CLIMÁTICOS EN LA REGIÓN HÚMEDA

5.1 INTRODUCCIÓN

5.1.1 Dominio espacial

La región a la que se refiere este capítulo comprende a las provincias de: Misiones, Corrientes, Santa Fe, Entre Ríos y Buenos Aires y se caracteriza por no presentar una estación seca y/o condiciones reiteradas de estrés hídrico.

5.1.2 Datos

Las bases de datos utilizadas y las razones de su selección están descritas en la sección 2.1 del capítulo 2. Se utilizó para la temperatura de superficie y la precipitación la base CRU TS3.1, producida en el Climate Research Unit (CRU) del Reino Unido (Harris y otros 2013) que tiene temperatura y precipitación mensual y se extiende en su versión 3.20 hasta el 2010 (<http://badc.nerc.ac.uk/view/badc.nerc.ac.uk>). Para la descripción de las tendencias de los índices de extremos se usó la base CLIMDEX (<http://www.climdex.org/>) donde están calculados siguiendo las definiciones del Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI).

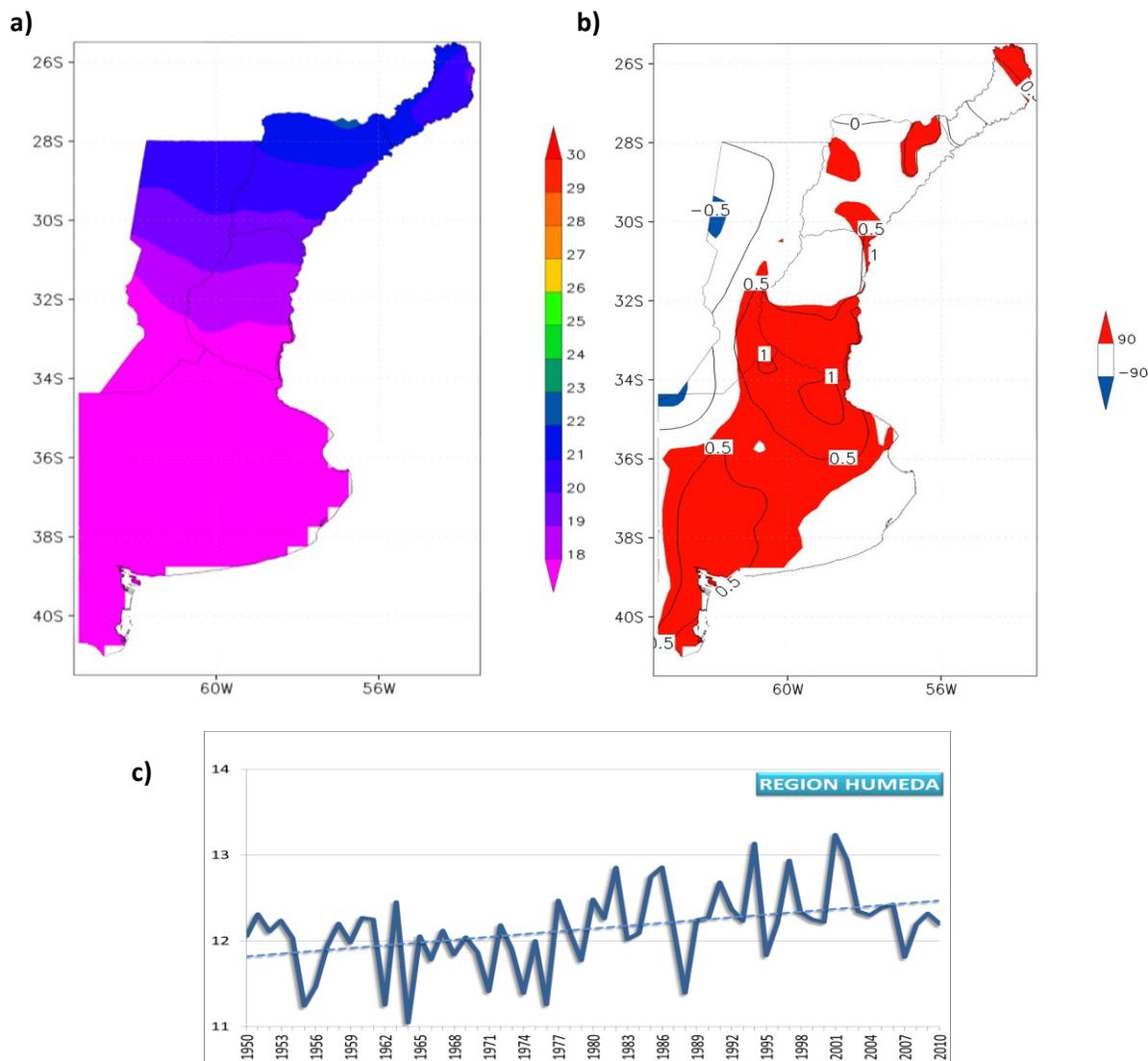
Complementariamente para evaluar la posible incerteza originada en la escasa información básica existente se hicieron comparaciones con datos del SMN en el caso de la temperatura y con la base GPCC (Schneider 2013) en la precipitación. Para esta última variable se usaron también datos de 4 estaciones de Servicio Meteorológico Nacional, una de cada provincia de la región para calcular los cambios en el índice extremo Rnnmm (*número de días en el año con precipitación por encima de los umbrales de 50, 100 y 150 mm*).

5.2 CAMBIOS Y TENDENCIAS

5.2.1 Temperatura

Temperaturas medias

En más de la mitad de la región Húmeda la temperatura media anual aumentó en más de 0,5°C entre 1960 y 2010 y en promedio en más de 0,3°C (*confianza media*), Figura 2.2.1.1b y c. La mayor parte de este aumento se registró por un salto a principios de la década de 1980, Figura 5.2.1.1c. Este aumento en el promedio regional ha sido significativo estadísticamente al 95%, Figura 5.2.1.1c, al igual que en la mayor parte de la provincia de Buenos Aires y sur de Entre Ríos. El aumento fue generalizado aunque no significativo en toda la región, como en las provincias de Santa Fe y Entre Ríos. El calentamiento regional promedio (0,4°C) entre 1950 y 2010 fue menos de la mitad del calentamiento global sobre los continentes para el mismo periodo (IPCC AR5, WGI capítulo 2, Tabla 2.4).



	Buenos Aires	Sta Fe– Entre Ríos	Corrientes-Misiones	Región Húmeda
Cambio 1950-2010	0,6**	0,4 **	0,1	0,4**

Figura 5.2.1.1: a) Campo medio de la temperatura media anual (°C) 1960-2010; b) Cambio de la temperatura media anual en °C para el mismo periodo con el nivel de significancia de la tendencia sombreado de acuerdo a lo indicado en la barra de la derecha; c) serie anual de la temperatura media integrada en las 5 provincias y cuadro de cambios (°C) por provincias.
 * significancia al 90% y ** significancia al 95%



Excepto por los mapas globales de las bases internacionales, la literatura sobre tendencias y/o cambios de la temperatura media en la región es muy escasa, pero hay más publicaciones sobre las temperaturas mínimas y máximas medias y extremos. Los pocos trabajos publicados no coinciden en los periodos sobre los que se calcularon las tendencias en este informe (Camilloni y Barros 1995) o han estado orientados hacia extremos de temperatura y analizan fundamentalmente las temperaturas mínimas y máximas medias en las estaciones extremas del año (Rusticucci y Barrucand 2004). En cuanto a los mapas globales de tendencias de los distintos conjuntos (HADCRUT4, MLOST, GISS), tal como fueron evaluados por el IPCC, coinciden en indicar una tendencia positiva de la temperatura media significativa en la región pero muestran ciertas diferencias debido a las distintas técnicas de extrapolación de datos utilizadas (IPCC AR5, WGI capítulo 2, Figura 2.2.1.1).

En todas las estaciones del año y en todas las subregiones la temperatura aumentó en el periodo 1950-2010 con la sola excepción del invierno en Corrientes-Misiones y los mayores aumentos ocurrieron en la primavera, Tabla 5.2.1.1.

		TEMPERATURA MEDIA 1950-2010				
		DEF	MAM	JJA	SON	ANUAL
BUENOS AIRES	Medio	21,0	11,9	9,9	17,9	15,2
	Cambio	0,5	0,4	0,5	1,0	0,6**
SANTA FE ENTRE RIOS	Medio	23,6	15,0	13,2	20,9	18,2
	Cambio	0,1	0,3	0,3	1,0	0,4**
CORRIENTES MISIONES	Medio	25,6	18,1	16,8	23,3	21,0
	Cambio	0,1	0,1	-0,3	0,3	0,1
REGIÓN HÚMEDA	Medio	22,7	14,1	12,3	19,9	17,2
	Cambio	0,3	0,3	0,3	0,9	0,4**

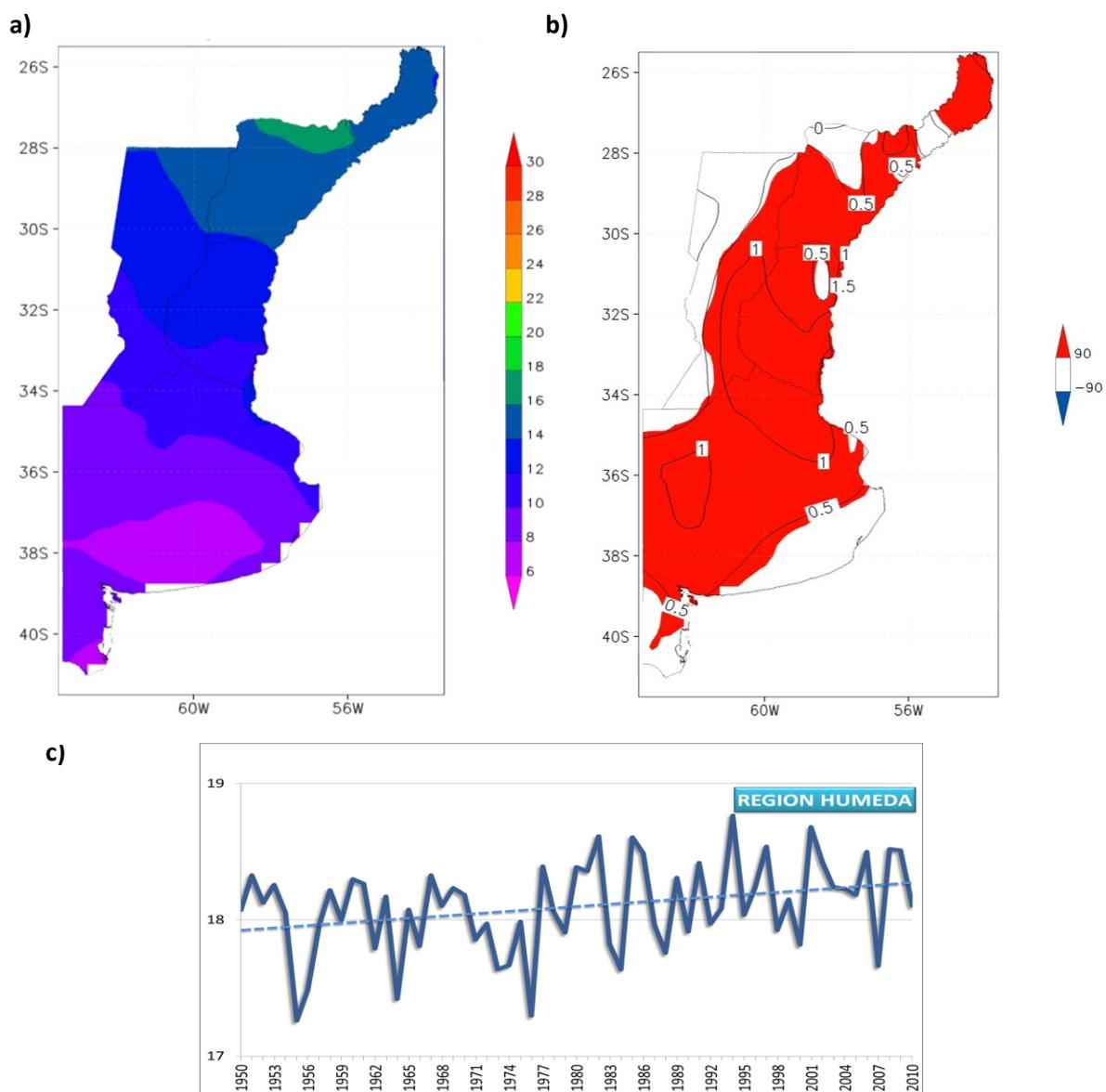
Tabla 5.2.1.1: Valores medios y cambios de la temperatura media para la región Húmeda y para 3 subregiones (°C). ** significancia al 95%

En la mayor parte de la región, la temperatura mínima media aumentó en más de 0,5°C entre 1960 y 2010 y en más de 1°C en por lo menos la mitad de la región (*confianza media*), Figura 5.2.1.2b. Aunque como en el caso de la temperatura media, se aprecia un salto a principios de la década del 80, hay una tendencia creciente más regular a lo largo de todo el periodo. Este aumento a nivel regional ha sido significativo estadísticamente al 95 %, Figura 5.2.1.2c, excepto en el oeste de Santa Fe y sudeste de Buenos Aires y zonas pequeñas de la Mesopotamia.

Rusticucci y Barrucand (2004) encontraron similares resultados para la temperatura mínima con una tendencia al aumento en toda la región, pero muy reducido en el verano en el sur de Buenos Aires y en general en invierno. Asimismo, al igual que en el caso de la temperatura media, en todas las estaciones del año y en todas las subregiones, la temperatura mínima aumentó en el periodo 1950-2010 con la sola excepción del invierno en Corrientes-Misiones. Aunque los mayores aumentos se dieron en la primavera fueron importantes también en las otras estaciones,



Tabla 5.2.1.2. Incluso en la primavera, los aumentos fueron significativos estadísticamente en todas las subregiones y en el verano también con la excepción de Corrientes y Misiones.



	Buenos Aires	Sta Fe– Entre Ríos	Corrientes-Misiones	Región Húmeda
Cambio 1950-2010	0,8 **	-0,8 **	0,4	0,7 **

Figura 5.2.1.2: Ídem Figura 5.2.1.1, pero para la temperatura mínima media anual (°C)



		TEMPERATURA MINIMA 1950-2010				
		DEF	MAM	JJA	SON	ANUAL
BUENOS AIRES	Medio	14,2	6,4	4,2	11,3	9,0
	Cambio	1,0**	0,5	0,6	1,1**	0,8**
SANTA FE ENTRE RIOS	Medio	17,3	9,4	7,2	14,5	12,1
	Cambio	0,8**	0,7	0,4	1,4**	0,8**
CORRIENTES MISIONES	Medio	19,9	12,9	11,1	17,4	15,3
	Cambio	0,4	0,5	-0,2	0,7**	0,4
REGIÓN HÚMEDA	Medio	16,3	8,6	6,5	13,5	11,2
	Cambio	0,8**	0,6	0,4	1,2**	0,7**

Tabla 5.2.1.2: Ídem Tabla 5.2.1.1, pero para la temperatura mínima media (°C)

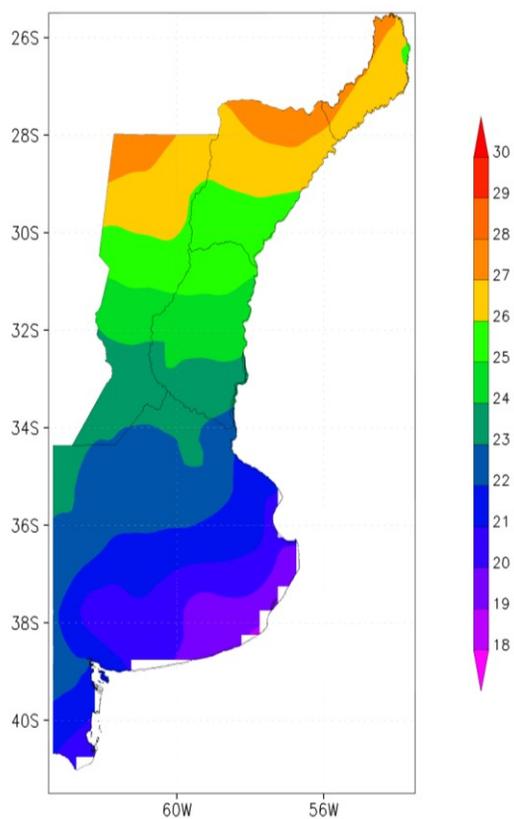
El promedio regional de la temperatura máxima media en la región Húmeda no aumentó más de 0,1°C entre 1960 y 2010 (*confianza alta*), Figura 5.2.1.3b. Incluso se redujo en forma estadísticamente significativa en las zonas de Santa Fe y del noroeste de Buenos Aires, Figura 5.2.1.3a, donde fue máximo el aumento de la precipitación, Figura 5.2.2.1. Esto último es indicativo de la consistencia de ambas bases de datos. El hecho que el aumento manifestado en las temperaturas mínimas, no se observa en las temperaturas máximas se debe a que las tendencias observadas a mayores precipitaciones, especialmente en la parte estival del año, están asociadas a nubosidad y evaporación, procesos que tienden a atenuar las altas temperaturas.

Las temperaturas máximas han disminuido en el verano y otoño (aunque no en Buenos Aires en esta última estación) y excepto en el norte de la región han aumentado en el invierno y primavera, Tabla 5.2.1.3. La disminución de las temperaturas máximas en el verano y el otoño, estaciones del mayor cambio en la precipitación, refuerza el concepto de que las temperaturas máximas han disminuido en parte por las mayores precipitaciones, Figuras 5.2.2.2 y 5.2.2.3.

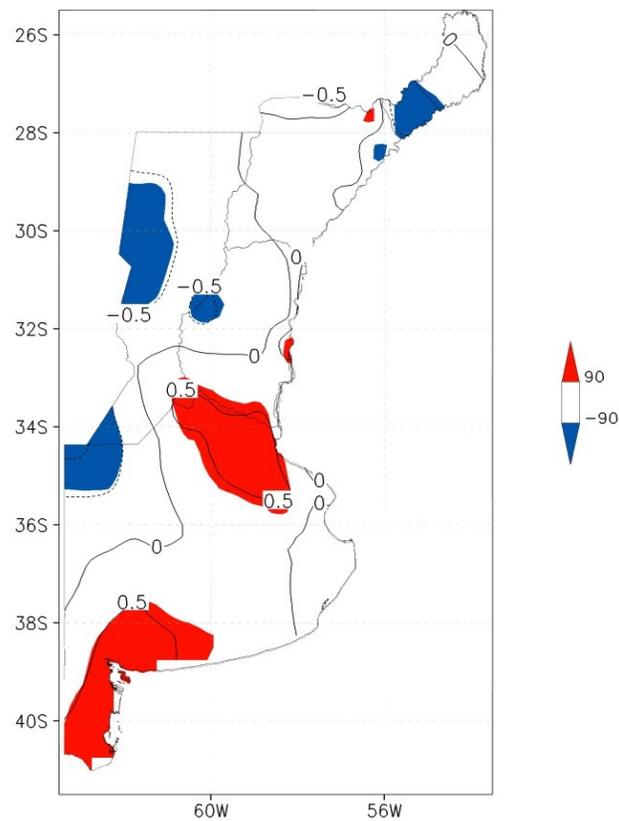
Rusticucci y Barrucand (2004) encontraron similares resultados para la temperatura máxima con tendencias negativas en el verano toda la región excepto en Corrientes y Misiones donde no coinciden con los resultados aquí presentados. De todos modos en ambos casos las tendencias son pequeñas y por lo tanto sensibles al periodo considerado que fue distinto en cada caso. En el invierno, como en este informe, las autoras encontraron tendencias también pequeñas, pero positivas excepto en Corrientes y Misiones.



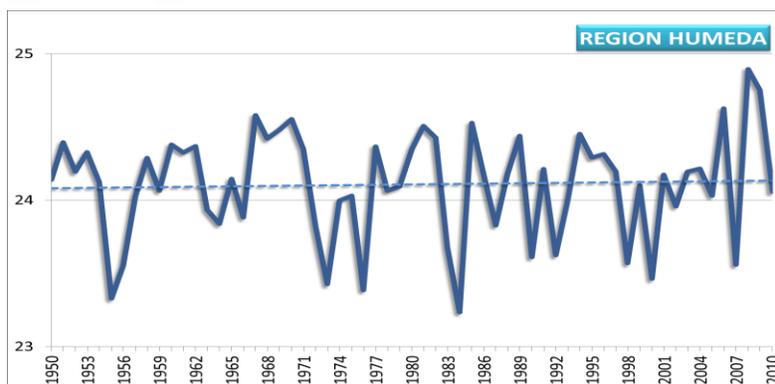
a)



b)



c)



	Buenos Aires	Sta Fe- Entre Ríos	Corrientes-Misiones	Región Húmeda
Cambio 1950-2010	0,4	0,0	0,3	0,1

Figura 5.2.1.3: a) Ídem Figura 5.2.1.1, pero para la temperatura máxima media anual (°C). * significancia al 90% y ** significancia al 95%



		TEMPERATURA MÁXIMA 1950-2010				
		DEF	MAM	JJA	SON	ANUAL
BUENOS AIRES	Medio	27,9	17,4	15,6	24,6	21,4
	Cambio	-0,1	0,3	0,4	0,8**	0,4*
SANTA FE ENTRE RIOS	Medio	30,0	20,6	19,3	27,4	24,3
	Cambio	-0,6	-0,1	0,3	0,6	0,0
CORRIENTES MISIONES	Medio	31,4	23,3	22,5	29,3	26,6
	Cambio	-0,2	-0,4	-0,3	-0,1	-0,3
REGIÓN HÚMEDA	Medio	27,9	17,9	18,6	25,7	23,9
	Cambio	-0,4	-0,2	0,1	0,4	0,0

Tabla 5.2.1.3: Ídem Tabla 5.2.1.1, pero para temperatura máxima media (°C)* significancia al 90% y ** significancia al 95%

Extremos térmicos

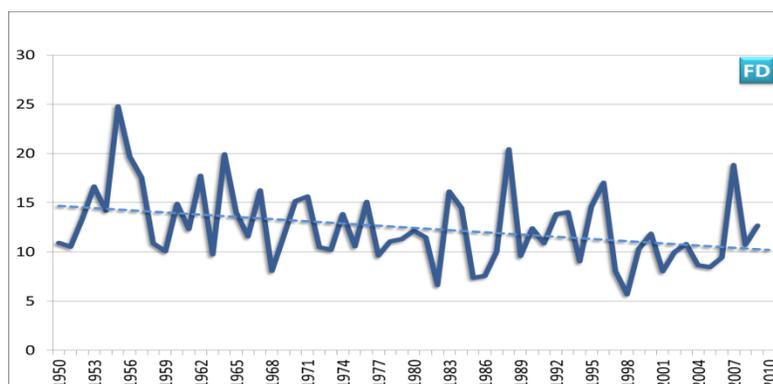
Los cambios en los índices de extremos de temperatura son consistentes con el calentamiento regional y con los cambios en las precipitaciones, especialmente en los últimos 20 años (confianza alta), Figuras 5.2.1.4 a 5.2.1.9. El cambio consistente con el calentamiento es significativo para el promedio regional del número de heladas, el promedio regional del número de noches tropicales y el promedio regional del valor mínimo anual de la temperatura diaria mínima. En el caso del promedio regional del porcentaje de días con temperatura máxima mayor al percentil 90 de toda la serie 1961-1990 y de las olas de calor, el aumento se manifiesta desde principios de la década de 1990 y no se distingue una tendencia para todo el periodo por los altos valores de la década de 1950, en la que probablemente las extremas condiciones secas favorecieron situaciones con muy altas temperaturas.

Por otra parte, es notable el descenso del promedio regional del valor máximo anual de la temperatura diaria máxima que alcanza 1,7°C, consistente con el aumento generalizado de la precipitación, Figura 5.2.2.1. Estos resultados son similares a los obtenidos con otra metodología por Rusticucci y Barrucand (2004) quienes encontraron pocos cambios en el número de días fríos, pero tendencias marcadamente negativas en el número de días cálidos en el verano.

El promedio anual del número de días con heladas se redujo en un 10% en el sur de la región, un 30% en el centro entre 1960 y 2010 y las heladas casi han desaparecido en las zonas bajas de Misiones, Figura 2.2.4 (Ver sección 2.2). Asimismo, el número de noches con temperaturas mínimas superiores a 20°C aumentó desde un 30 % en el norte a un 50 % en el sur, Figura 2.2.5. El número de días en el año con olas de calor se incrementó en un día en el sur y en 4 en Misiones y Corrientes, Figura 2.2.7, y prácticamente se duplicó en toda la región entre 1960 y 2010. El aumento se produjo entre 1990 hasta 2010, periodo en que los días con olas de calor se multiplicaron 4 veces, aunque ello no llegó a compensar la tendencia negativa iniciada en la

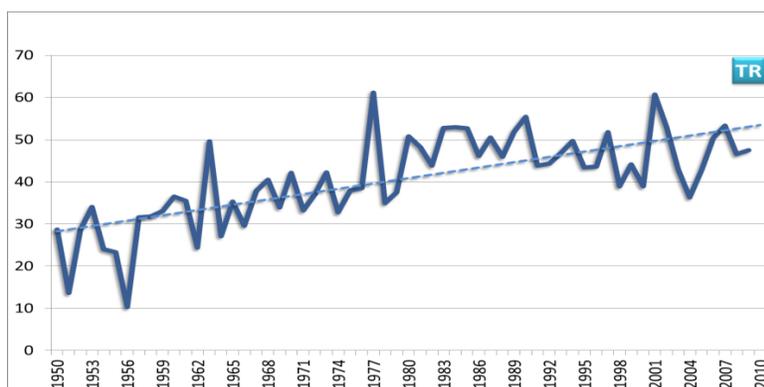


década de 1950, Figura 5.2.1.9. Sin embargo, los cambios a escala provincial no son significativos estadísticamente debido a su alta variabilidad interanual.



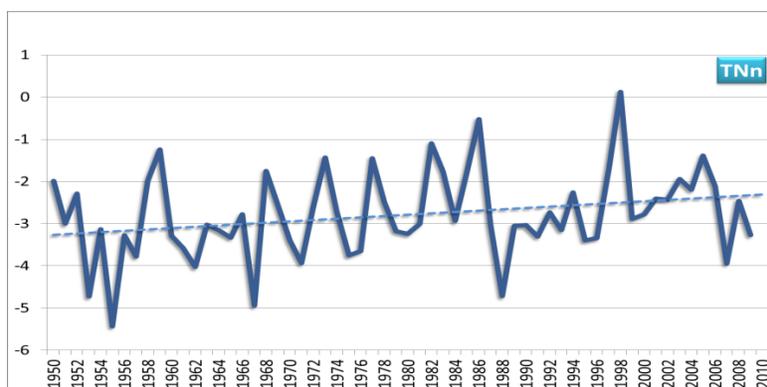
	Buenos Aires	Sta Fe– Entre Ríos	Corrientes-Misiones	Región Húmeda
Cambio 1950-2010	-7,3**	2,8	-3,5**	-4,5**

Figura 5.2.1.4: Promedio regional del número de días con heladas (FD) y cuadro de cambios por provincia (días). * significancia al 90% y ** significancia al 95%



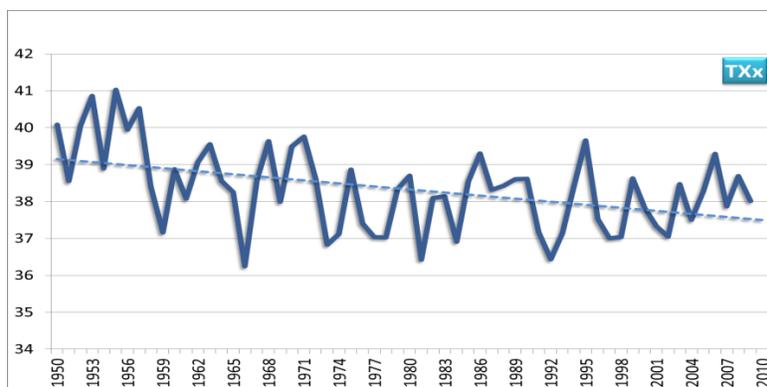
	Buenos Aires	Sta Fe– Entre Ríos	Corrientes -Misiones	Región Húmeda
Cambio 1950-2010	6,6**	21,8 **	50,3**	25,3**

Figura 5.2.1.5: Ídem Figura 5.2.1.4, pero para el número de noches tropicales (TR) (°C)



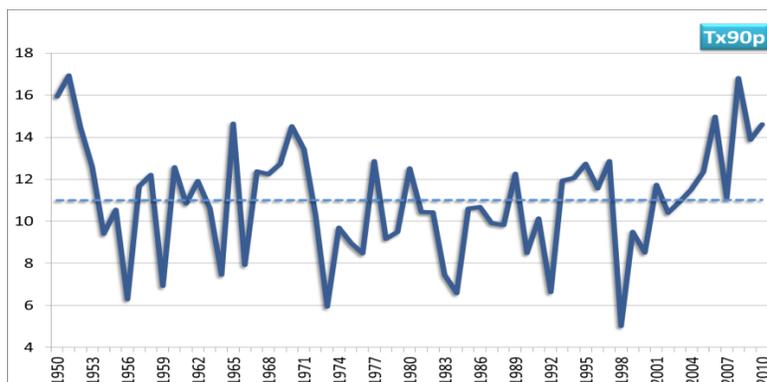
	Buenos Aires	Sta Fe – Entre Ríos	Corrientes -Misiones	Región Húmeda
Cambio 1950-2010	0,5	0,7	1,7**	1,0*

Figura 5.2.1.6: Ídem Figura 5.2.1.4, pero para el valor mínimo anual de la temperatura diaria mínima (TN) (°C)



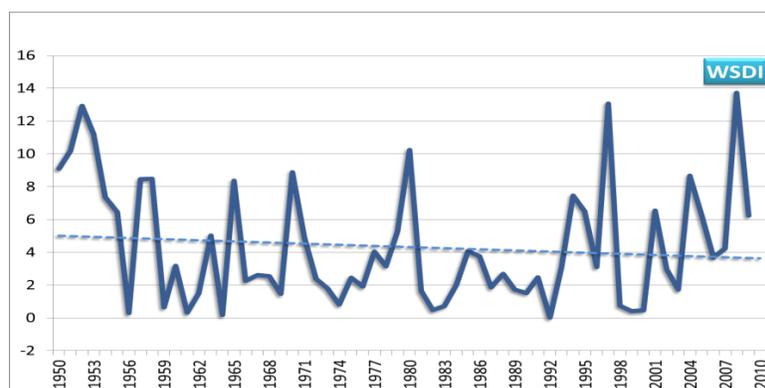
	Buenos Aires	Sta Fe – Entre Ríos	Corrientes -Misiones	Región Húmeda
Cambio 1950-2010	-2,2**	-1,0	-1,7**	-1,7**

Figura 5.2.1.7: Ídem Figura 5.2.1.4, pero para la temperatura diaria máxima (TX) (°C)



	Buenos Aires	Sta Fe – Entre Ríos	Corrientes -Misiones	Región Húmeda
Cambio 1950-2010	-1,6	-0,3	2,0	0,0

Figura 5.2.1.8: Ídem Figura 5.2.1.4, pero para el porcentaje de días con temperatura máxima mayor al percentil 90 de toda la serie 1961-1990 (TX90p)



	Buenos Aires	Sta Fe – Entre Ríos	Corrientes -Misiones	Región Húmeda
Cambio 1950-2010	-2,0	-0,4	-1,7	-1,4

Figura 5.2.1.9: Ídem Figura 5.2.1.4, pero para el índice de la duración de olas de calor (WSDI) (días). * significancia al 90% y ** significancia al 95%

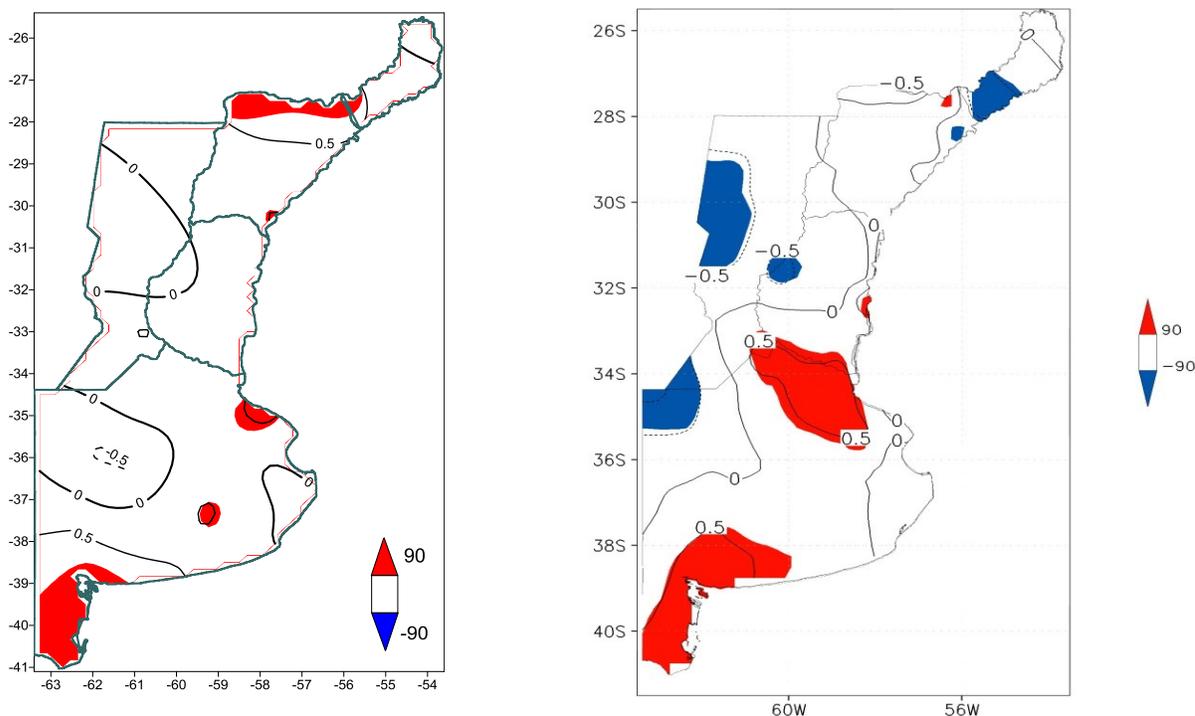
Incerteza sobre las tendencias de temperatura

En el caso de la temperatura un aspecto a considerar es que el crecimiento de las ciudades incorpora un cambio en las temperaturas que no se observa en estaciones meteorológicas rurales. Este efecto se llama “isla urbana de calor”. Como gran parte de las estaciones meteorológicas se encuentran en ambientes urbanos o muy cerca de éstos, los cambios de temperatura calculadas a



partir de estas estaciones pueden tener algún nivel de calentamiento adicional que introduciría un aumento ficticio en el cálculo de los cambios regionales. Una forma de explorar la magnitud de este efecto adicional consiste en recalcular los cambios de temperatura solo con estaciones de aeropuertos alejados de las ciudades, los que estarían menos contaminados que el resto de las estaciones.

La Figura 5.2.2.10 compara los campos de temperatura máxima, mínima y media anual de estaciones tomadas solamente en aeropuertos fuera de zonas urbanizadas con los obtenidos utilizando la base de datos CRU. En las temperaturas máximas, las diferencias son pequeñas, pero en las mínimas son muy importantes, en particular en la provincia de Buenos Aires donde los aeropuertos señalan disminuciones estadísticamente significativas mientras que la base CRU presenta calentamiento. Pero en toda la región las mínimas de los aeropuertos presentan en general calentamientos menores que los calculados con la base CRU. Esto es indicativo precisamente de que la base CRU no ha filtrado adecuadamente el efecto urbano de la isla de calor. Aunque ello puede implicar que los aumentos de la temperatura mínima estén algo exagerados en general, ello no invalida las conclusiones sobre el signo y aproximada magnitud del calentamiento regional, excepto en parte del sur de la Provincia de Buenos Aires.



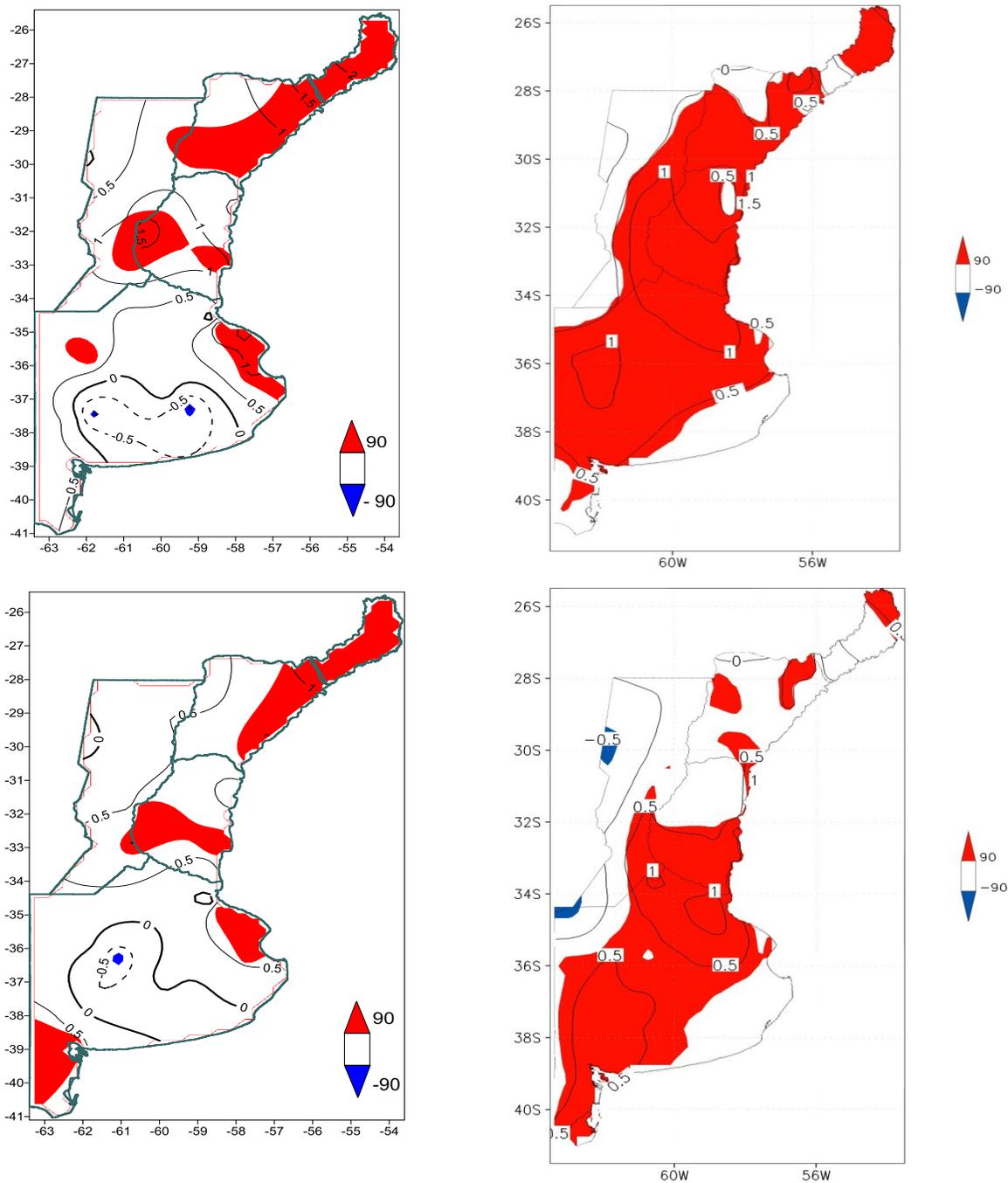


Figura 5.2.2.12: Cambios en las tendencias de la temperatura máxima (superior), mínima (medio) y media (panel inferior) calculados con datos de aeropuertos (datos del SMN) y calculados con la base de datos de CRU (paneles del izquierdo)



5.2.2 Precipitación

Precipitaciones medias anuales y estacionales

En casi toda la región Húmeda, la precipitación anual aumentó en la segunda mitad del siglo XX (*confianza alta*), (Castañeda y Barros 1994; Barros y otros 2000; Boulanger y otros 2005; Haylock y otros 2006; Barros y otros 2008; Doyle y otros 2012). En la mayor parte de la región entre 1960 y 2010 hubo aumentos de la precipitación de entre 100 y 200 mm, Figura 5.2.2.1b. Este aumento se registró principalmente entre 1960 y 1990, Figura 5.2.2.1c (*confianza alta*). El aumento ha sido significativo estadísticamente al 90 y 95 % en Entre Ríos y zonas del norte de Buenos Aires, Figura 5.2.2.1b, pero no lo ha sido en el promedio regional. La región es una de las zonas del planeta que presentó mayor aumento de la precipitación entre 1950 y 2005 (IPCC AR5, Fig. 2 del WGI SPM).

Entre 2004 y 2010 hubo una disminución de la precipitación respecto de las medias de las últimas dos décadas del siglo XX. Esto probablemente obedece a una fluctuación de la precipitación de escala inter-decadal que morigeró la tendencia positiva de largo plazo. Esto ocurrió también en décadas anteriores asociadas con otro período seco como fue la década de 1950. Pero la tendencia positiva también se manifiesta a pesar de estos periodos secos ya que el promedio de la década del 2000 estuvo muy por encima del de 1950.

La literatura sobre tendencias y/o cambios de las precipitaciones anuales en la región es más abundante que en el caso de la temperatura media anual. Sin embargo, debido a los diferentes periodos considerados, existen diferencias entre los artículos, no relacionadas con el signo de los cambios, sino ligeramente en la magnitud de los mismos y fundamentalmente en su significancia. Los trabajos concuerdan en que desde 1950 ha habido un aumento generalizado en la precipitación media regional. Consistentemente, aumentaron en un 33% los días con precipitaciones mayores a 1mm entre 1950 y 2000 (Penalba y Robledo 2010).

Castañeda y Barros (1994) encontraron un aumento significativo promedio de alrededor de 150 mm en toda la región en el periodo 1916-1991. Esto implica que el aumento que se produjo con más intensidad desde 1960 no fue simplemente una variación de pocas décadas sino que forma parte de una tendencia de más largo plazo. Los estudios que se extienden hasta 2002 o 2005 muestran que aunque las tendencias positivas se concentraron mayormente entre 1960 y 1990 no se revertieron (Boulanger y otros 2005); y además en muchas estaciones se hicieron más significativas (Doyle y otros 2012).

Entre 1950 y 1990, en la mayor parte de Buenos Aires y en el sur de Santa Fe y Entre Ríos el cambio se caracterizó por una tendencia con fuerte variabilidad interanual pero con tendencia sostenida. Por otra parte, en el noreste de la región, el aumento de la precipitación anual se produjo por un salto entre 1970 y 1980, asociado al cambio de la fase de la oscilación decadal del Pacífico que modula la ocurrencia e intensidad de eventos del Niño y la Niña (Barros y otros 2000; 2008).

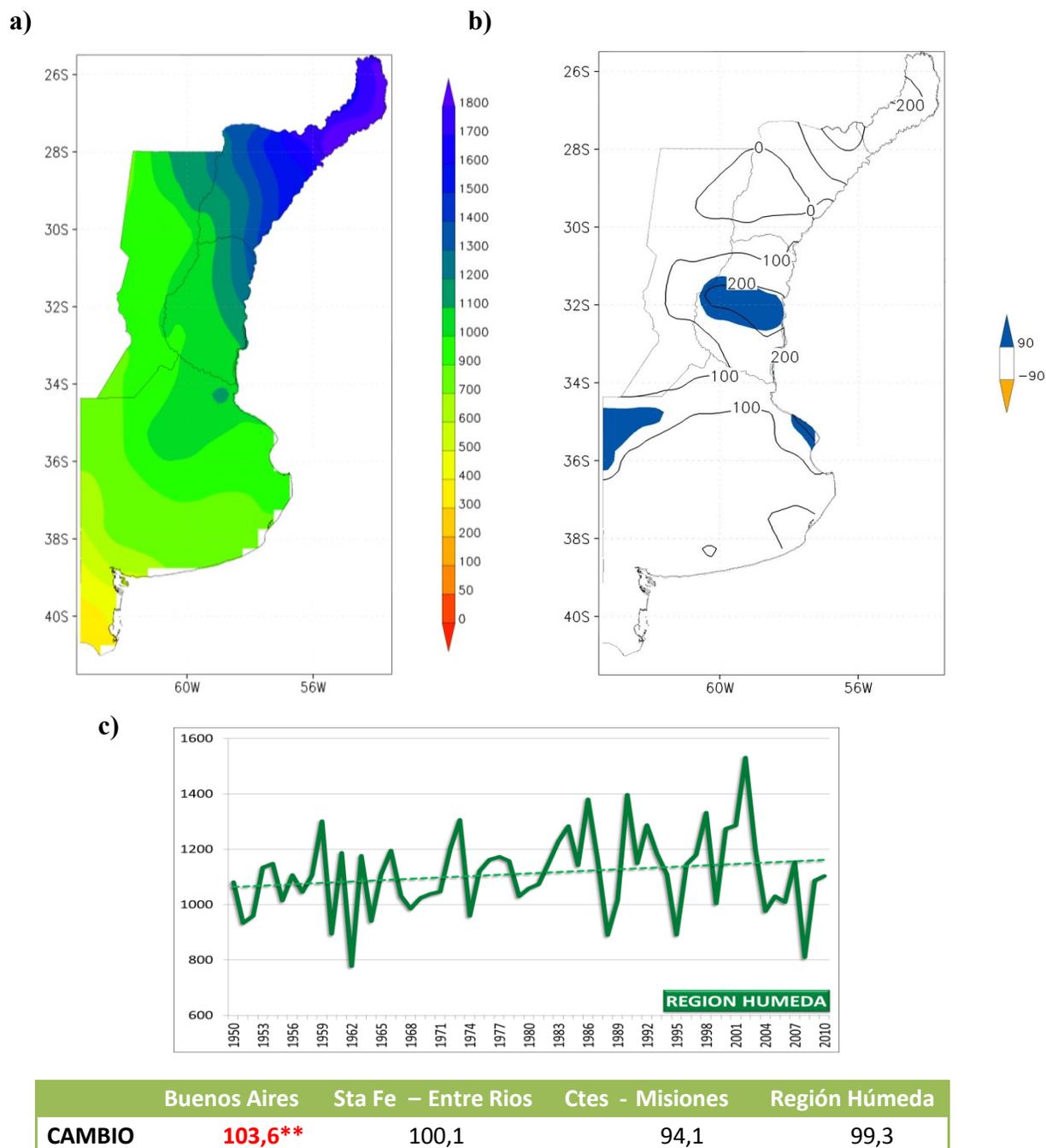


Figura 5.2.2.1: a) campo medio de la precipitación media anual, periodo 1960-2010, b) cambio en la precipitación anual entre 1960 y 2010, c) Serie del promedio regional de precipitación anual y cuadro de cambios (mm) por provincias con * significancia al 90% y ** significancia al 95%



El aumento de las precipitaciones fue importante en el periodo cálido del año, principalmente en verano y primavera, mientras que en invierno la tendencia fue negativa (confianza media), Figuras. 5.2.2.2 a 5.2.2.5.

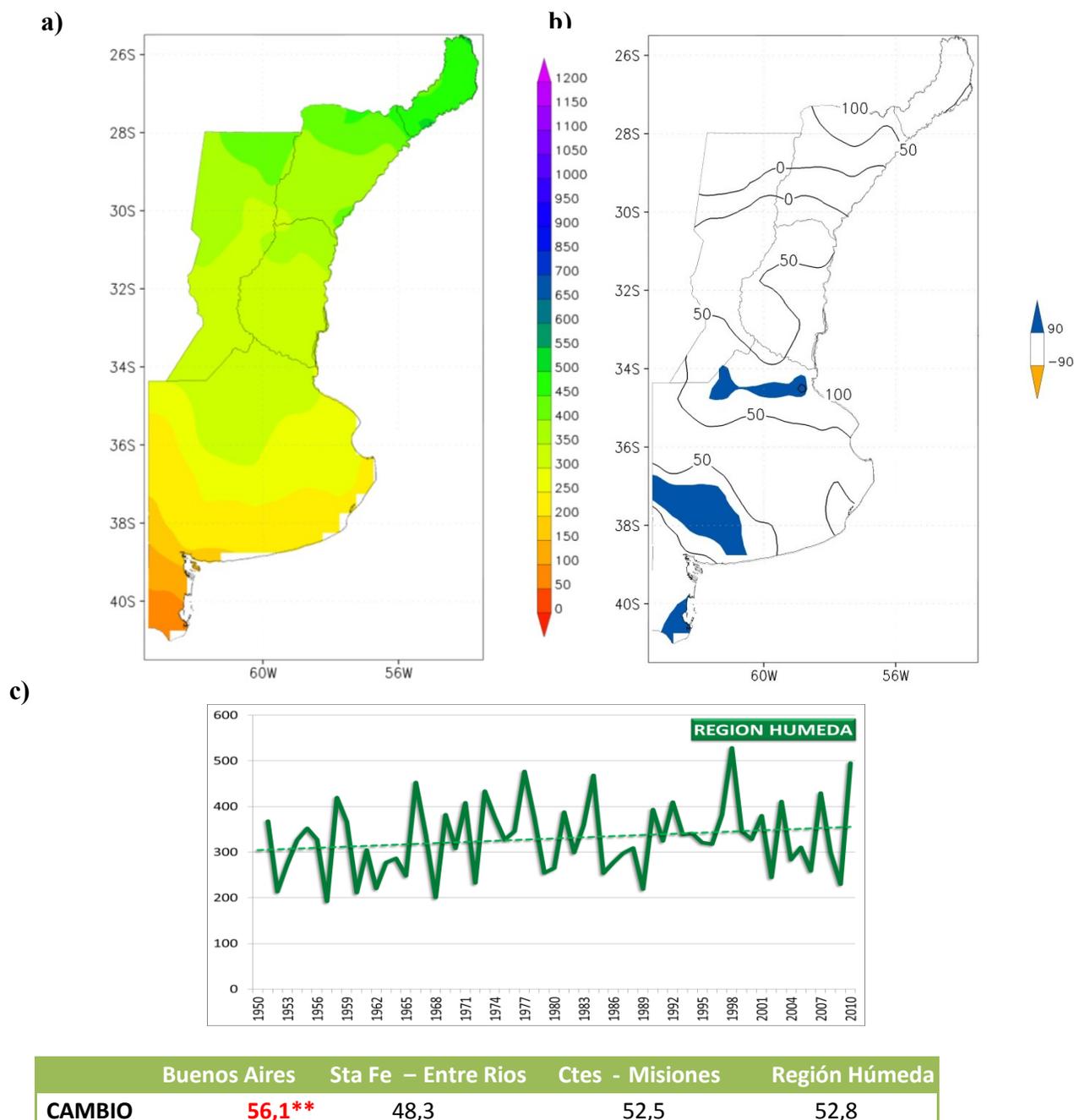


Figura 5.2.2.2: Ídem Figura 5.2.2.1, pero para el verano (mm)



En el invierno, la mayor reducción se ha dado en el centro de la región con incluso zonas con cambios negativos estadísticamente significativos, Figura 5.2.2.4. Los aumentos en invierno y otoño son más importantes en el centro y norte de la región que en Buenos Aires.

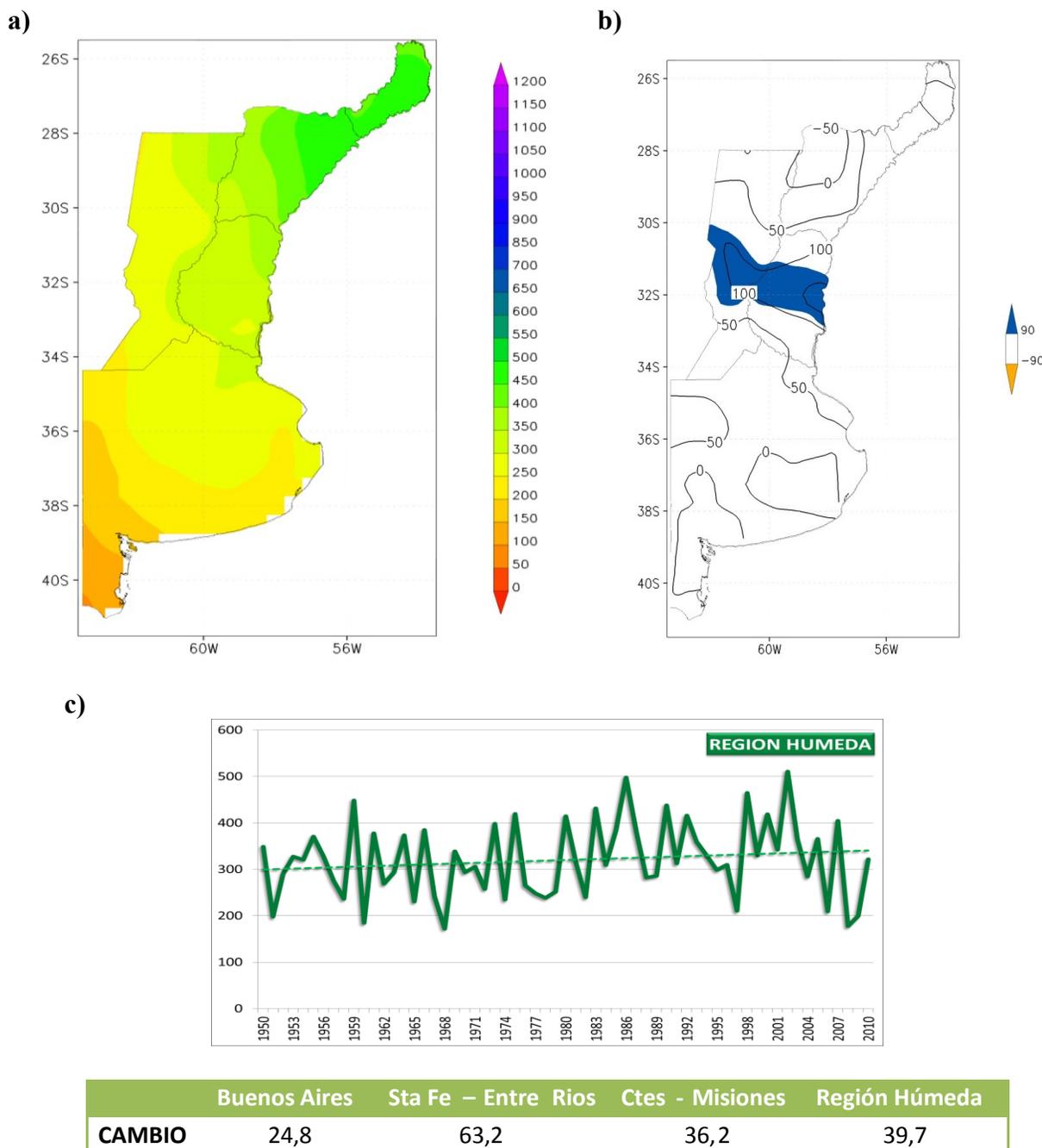


Figura 5.2.2.3: Ídem Figura 5.2.2.1, pero para el otoño (mm)

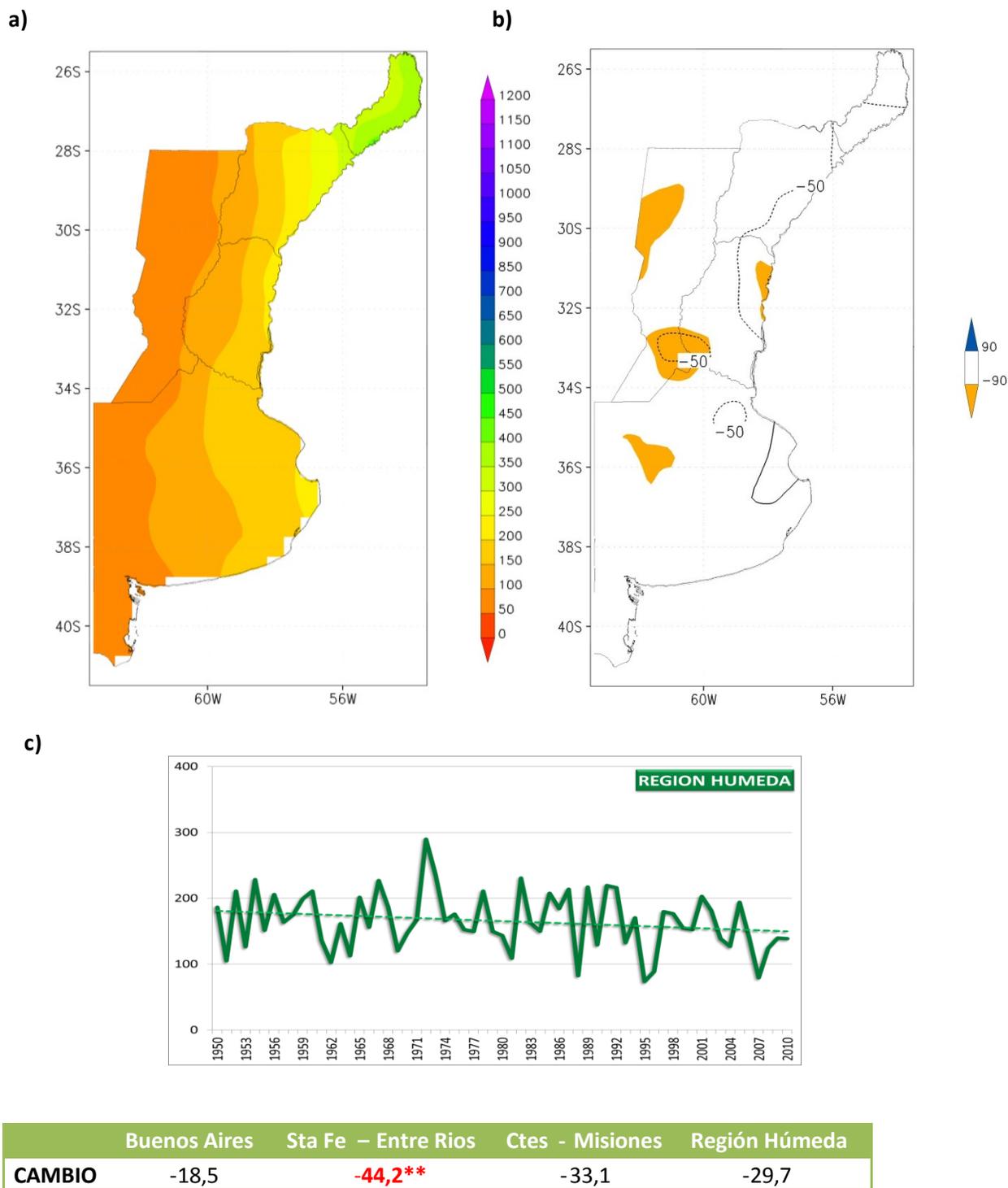
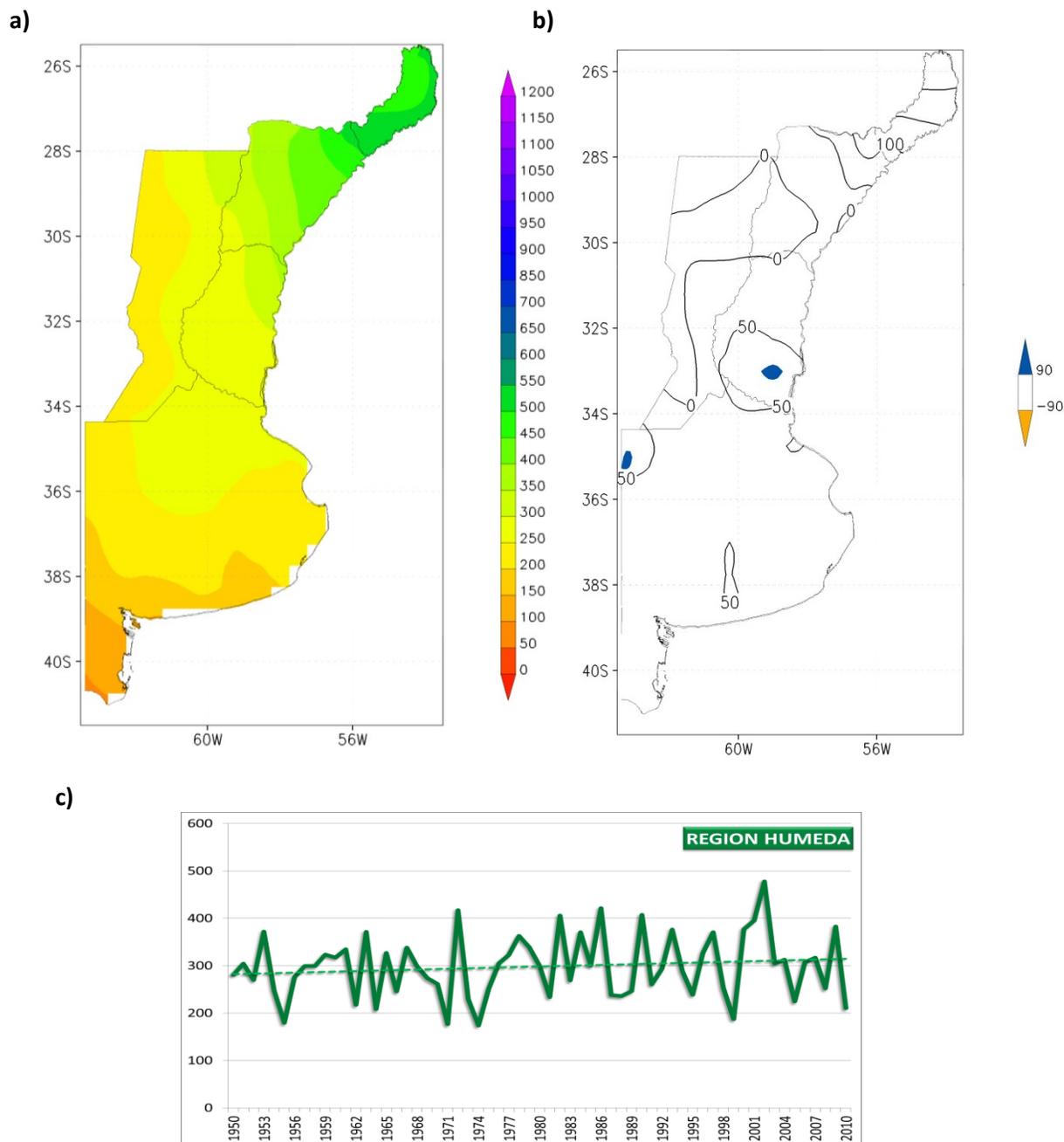


Figura 5.2.2.4: Ídem Figura 5.2.2.1, pero para el invierno (mm)



	Buenos Aires	Sta Fe – Entre Rios	Ctes - Misiones	Región Húmeda
CAMBIO	37,2	25,3	36,1	33,1

Figura 5.2.2.5: Ídem Figura 5.2.2.1, pero para la primavera (mm)



Precipitaciones extremas

Consistente con el aumento generalizado de la precipitación en la región, los indicadores de precipitaciones extremas muestran que estas han ido en aumento en intensidad (confianza media) y frecuencia (confianza alta). Igualmente la duración de los periodos secos se ha ido reduciendo (confianza media), Figuras 5.2.2.6 a 5.2.2.10 y Figuras 2.3.2 a 2.3.5.

El promedio regional de la precipitación diaria máxima del año tuvo una tendencia positiva hasta el 2000, que se debe en gran medida a los menores valores en la década seca de 1950 en contraposición con los mayores valores de finales del siglo 20. Otro periodo seco se dio en la segunda mitad de la década del 2000. Sin embargo si se obvian estas variaciones, se observa que se mantiene la misma tendencia, Fig. 5.2.2.6. La tendencia positiva de esta variable fue reportada por Re y Barros (2009) y Penalba y Robledo (2010) aunque como en este estudio sin significancia estadística. El mayor cambio se registró en la zona central de la región, Figura 2.3.2 (Ver sección 2.3).

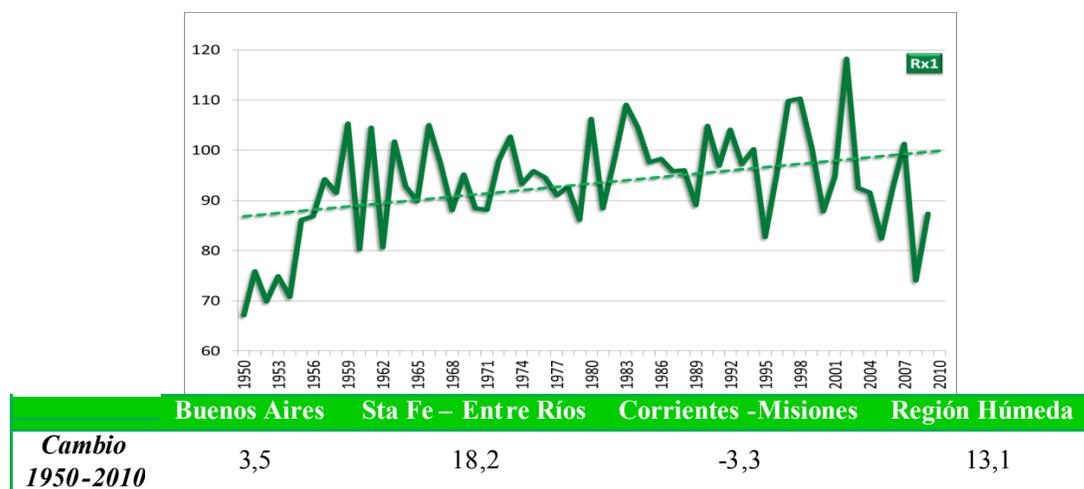
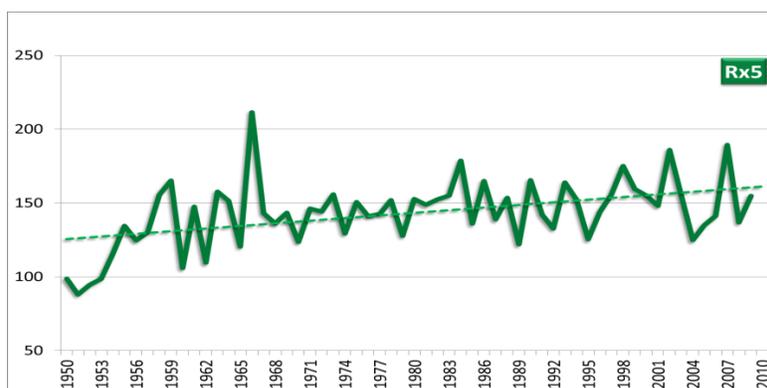


Figura 5.2.2.6: Promedio regional de la precipitación diaria máxima del año (Rx1) y cuadro de cambios por provincia (mm)

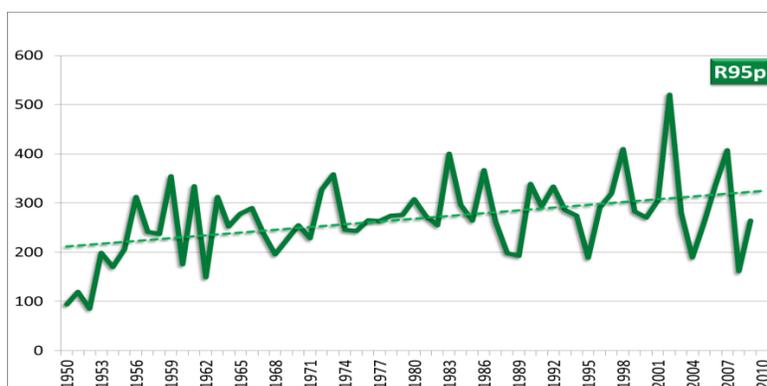
Cuando se consideran las precipitaciones acumuladas en 5 días, la tendencia hacia valores mayores es más regular, e incluso se hace estadísticamente significativa en el sur y centro de la región y en la región entera, Figura 5.2.2.7.

Igualmente, los casos de precipitación diaria por encima del percentil 95, tuvieron un aumento importante e incluso, cuando se agrupan en subregiones, estadísticamente significativo en el sur y centro de la región, Figura 5.2.2.8.



	Buenos Aires	Sta Fe – Entre Ríos	Corrientes-Misiones	Región Húmeda
Cambio 1950-2010	20,6**	33,0*	14,7	35,4**

Figura 2.2.2.7: Ídem Figura 5.2.2.6, pero para la precipitación máxima anual de 5 días consecutivos (Rx5) (mm)



	Buenos Aires	Sta Fe – Entre Ríos	Corrientes-Misiones	Región Húmeda
Cambio 1950-2010	76,3**	104,3**	57,4	112,9

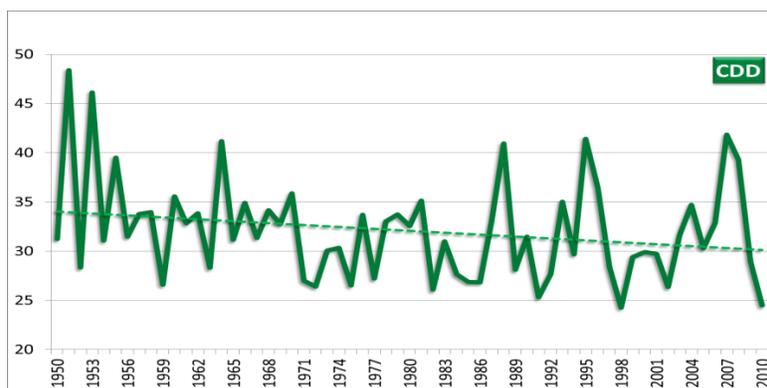
Figura 5.2.2.8: Ídem Figura 5.2.2.6, pero para la precipitación anual total de los casos en que la precipitación diaria es mayor al percentil 95 (R95pTOT) (mm)

El índice de la duración de los periodos secos muestra también la característica fundamental del cambio en la región, esto es su evolución a condiciones más húmedas, Figuras 5.2.2.9 y Figura 2.4.2.2.

La Figura 2.2.2.10 muestra las series del número de casos de precipitaciones diarias por encima de los umbrales de 50, 100 y 150mm en periodos de 10 años para 4 estaciones de diferentes provincias. Se incluye también una serie que muestra el número de casos total de estas cuatro

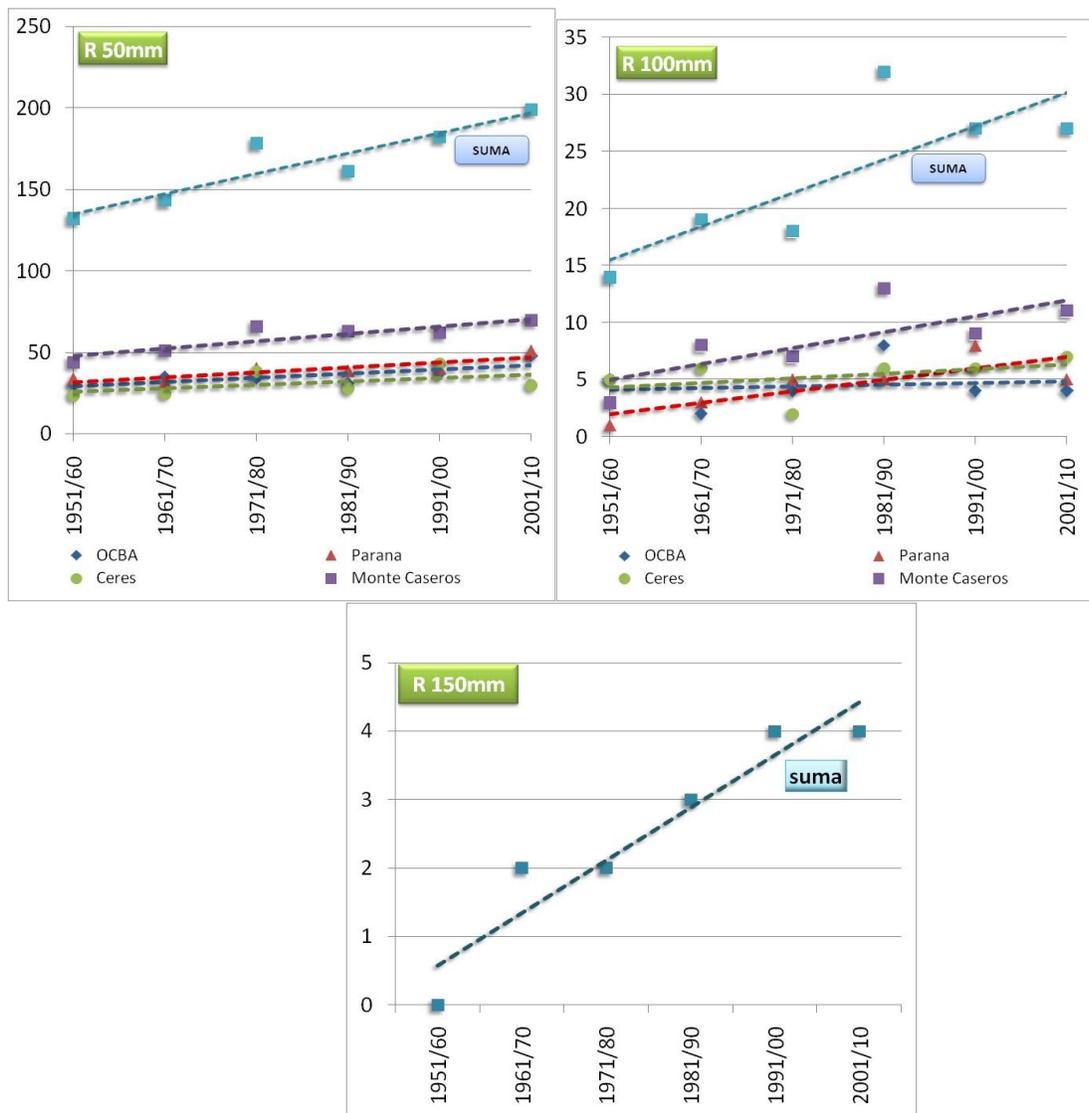


series que superan dichos umbrales. Como estas precipitaciones son muy azarosas, se ha recurrido a su suma en periodos de 10 años para detectar el comportamiento de largo plazo que para todos los umbrales y estaciones indican un aumento del número de casos muy regular, hasta el punto de que a pesar del escaso número de décadas la mayor parte de los aumentos son significativos, Figura 5.2.2.10.



	Buenos Aires	Sta Fe – Entre Ríos	Corrientes – Misiones	Región Húmeda
Cambio 1950-2010	-1,4	-1,2	-7,7 **	-4,0

Figura 5.2.2.9: Ídem Figura 5.2.2.6, pero para la máxima longitud de racha seca definida como el número máximo de días consecutivos con precipitación menor a 1mm en cada año (CDD) (días)



	R 50mm	R100 mm	R 150mm
OCBA	13,3*	0,7	
Paraná	15,5**	5,0*	
Ceres	10,6	2,0	
Monte Caseros	22,9**	7,0*	
SUMA	62**	14,7*	3,85**

Figura 5.2.2.10: Índice Rnmm, aumento del número de casos de precipitaciones diarias por encima del umbral de a) 50mm y b) 100mm en periodos de 10 años para 4 estaciones de diferentes provincias y la suma de casos de estas estaciones que superan ese umbral

Grado de Incerteza sobre el signo y la magnitud de los cambios observados

Las series de precipitación en la región que cubren el periodo 1960-2010 o al menos gran parte del mismo son escasas. Ello hace que las estimaciones regionales o subregionales puedan tener algún grado de error y más aun cuando se trata de una localidad en particular. Una forma de estimar el grado de error posible es comparando tendencias calculadas con dos bases distintas que tienen algunas diferencias en las estaciones que utilizan pues al usar criterios distintos en el tratamiento de las series no absolutamente completas pueden no incorporar en el análisis las mismas estaciones y por otra parte, utilizan métodos de interpolación espacial distintos. En la Figura 5.2.2.11 se observa que en comparación con la base de datos CRU, la base de datos GPCC sobreestima los cambios en la precipitación en la región Húmeda en particular en la provincia de Misiones. Este resultado se observa tanto a nivel anual como estacional (las figuras de las estaciones del año no se muestran).

De todos modos, las diferencias no invalidan las conclusiones sobre el signo de los cambios observados, excepto donde estos son muy pequeños y no significativos. También la magnitud de los cambios y sus patrones regionales son en general muy similares tanto a nivel anual como estacional. La excepción es el exagerado cambio de precipitación en la provincia de Misiones en la base GPCC.

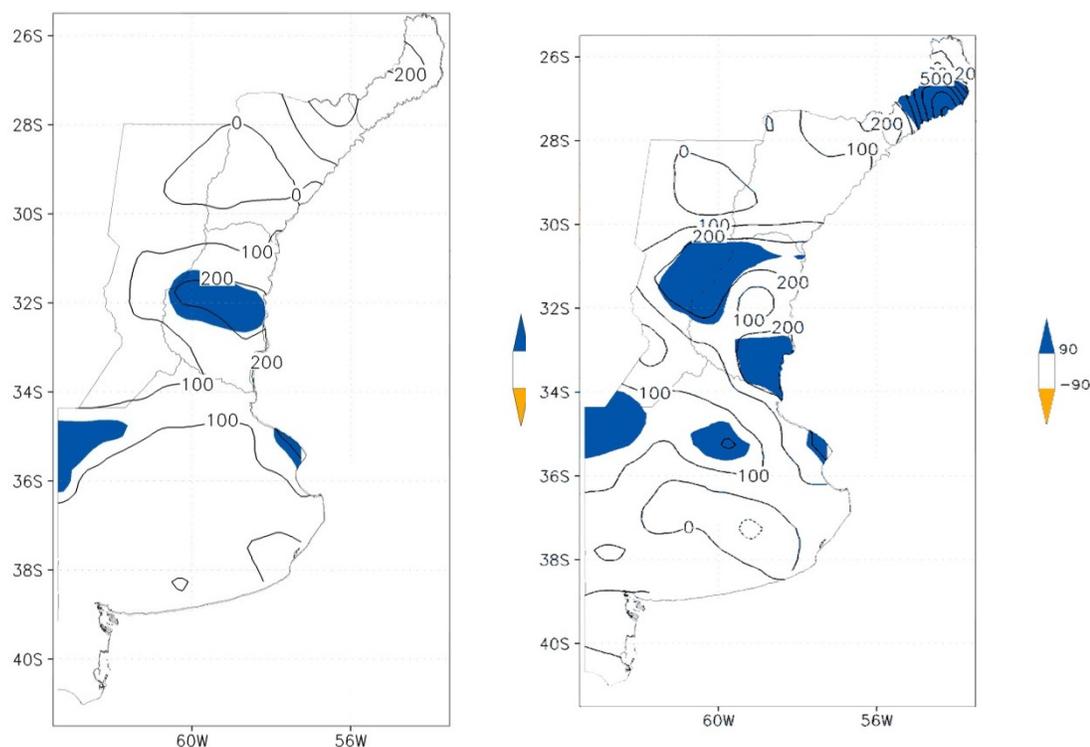


Figura 5.2.2.11: *Cambios en la precipitación total anual calculados con la base de datos de CRU (izquierda) y datos de GPCC (derecha)*



5.2.3 Otras variables

El desplazamiento del anticiclón del Atlántico Sur hacia el sur (Escobar y otros 2003) trajo aparejado un aumento de las frecuencias de vientos del sector este y sudeste sobre el Río de la Plata (Simionato y otros 2004) contribuyendo al aumento medio del nivel del estuario, aunque en forma menos importante que otros factores.

En el trabajo de Mezher y otros (2012) se analizaron las tendencias del número de eventos de granizo registrados en las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional en el periodo 1960-2008. En la región noreste, que incluye el este de las provincias de Chaco y Formosa pero donde la mayor frecuencia se observa en la provincia de Misiones, el número de eventos de granizo paso de alrededor de 7 a 11 entre 1960 y 2010 pero con una fuerte variabilidad interanual e interdecadal. La tendencia en la zona central de la región Húmeda incluyendo el norte de Buenos Aires ha sido muy pequeña y negativa.



5.3 VALIDACIÓN DE LA CORRECCIÓN DE ERRORES

Se presentan los resultados de la validación del método de corrección de los errores sistemáticos de los modelos seleccionados para las proyecciones climáticas en periodos futuros del siglo XXI, para la región Húmeda. La metodología empleada se describe en el capítulo 3, secciones 3.3.7 y 3.3.8.

5.3.1 Temperatura

El ajuste de los modelos a los datos observados es bueno en esta región, aun para los datos sin corregir y mejorando con la corrección, Figura 5.3.1.

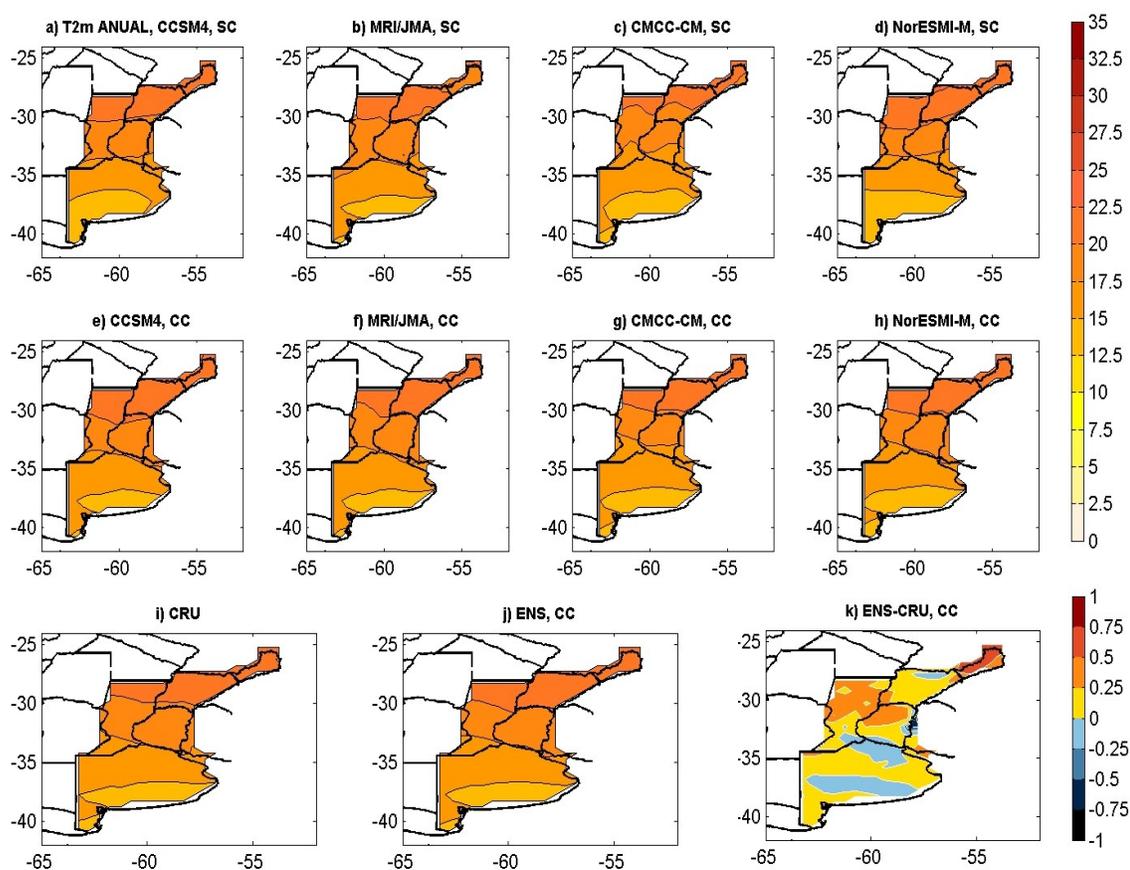


Figura 5.3.1: Validación de la temperatura media anual para la región Húmeda. 1976/1990 (Excepto para el modelo MRI en que es 1979/1990). Panel superior las temperaturas de los modelos indicados en cada figura sin corregir. Panel del centro ídem anterior pero para los valores después de aplicada la corrección. Panel inferior, valores observados según CRU, ensamble de los 4 modelos y diferencia entre el ensamble y CRU

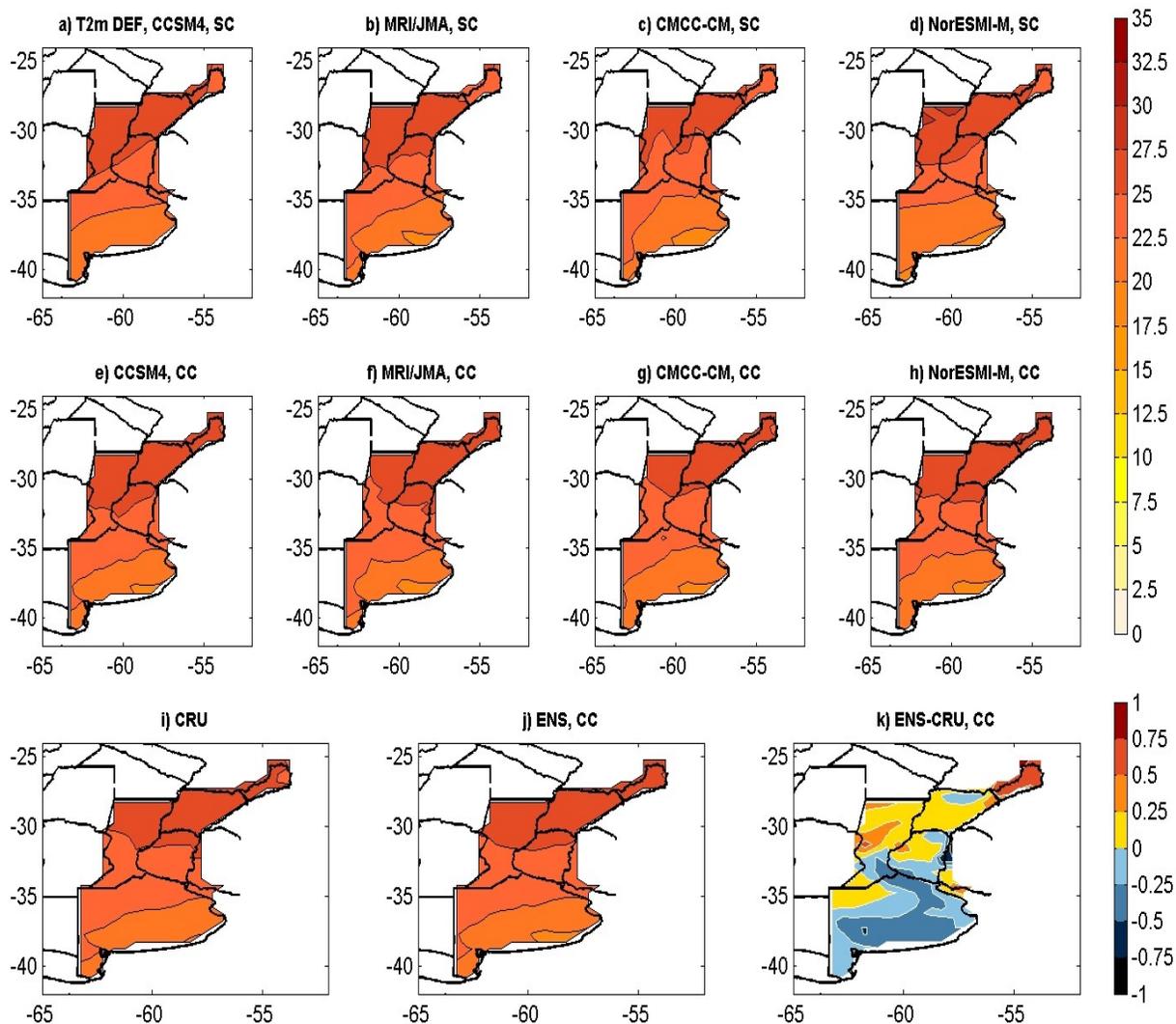


Figura 5.4.2: Ídem Figura 5.3.1, pero para el verano (diciembre, enero y febrero)

El ensamble (promedio en este caso) de los modelos corregidos tiene en la mayor parte de la región un error de menos de $0,25^{\circ}\text{C}$ y solo en Misiones supera el medio grado.

En la estación estival los errores son algo mayores que en el promedio anual, especialmente en la Provincia de Buenos Aires, pero siempre menores a medio grado, Figura 5.3.2. Al contrario del caso anual y del verano, en el invierno los modelos corregidos sobreestiman la temperatura media en toda la región, pero en general en menos de medio grado, Figura 5.3.3.

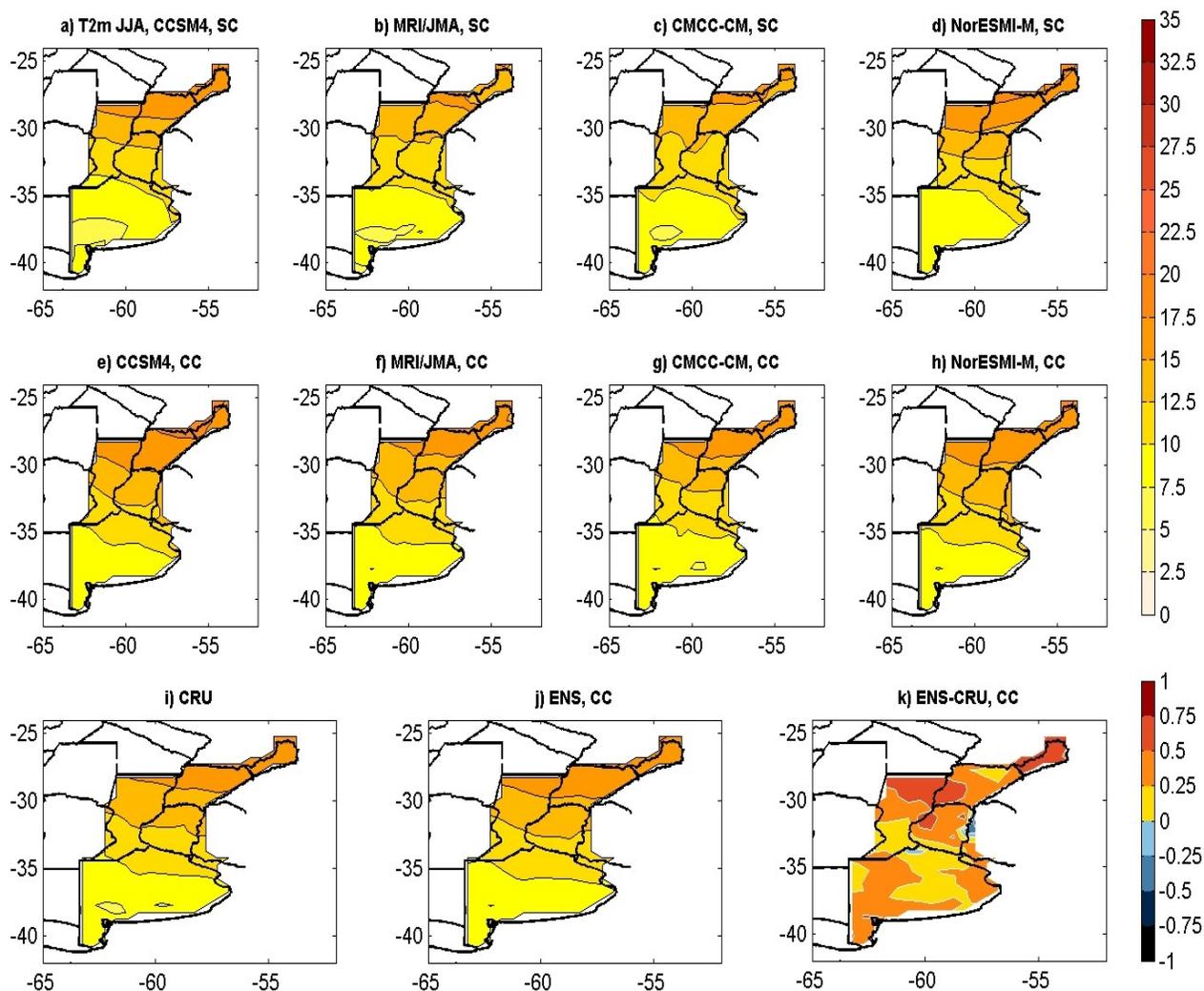


Figura 5.3.3: Ídem figura 5.3.1, pero para el invierno (junio, julio y agosto)

Ello es también válido para las temperaturas más extremas, excepto para el modelo NorESMI. Este ajuste en los extremos es muy valioso por la importancia de contar con proyecciones de extremos de altas temperatura prolongadas. La distribución es desde luego bimodal, reflejando las temperaturas mensuales a lo largo del año.

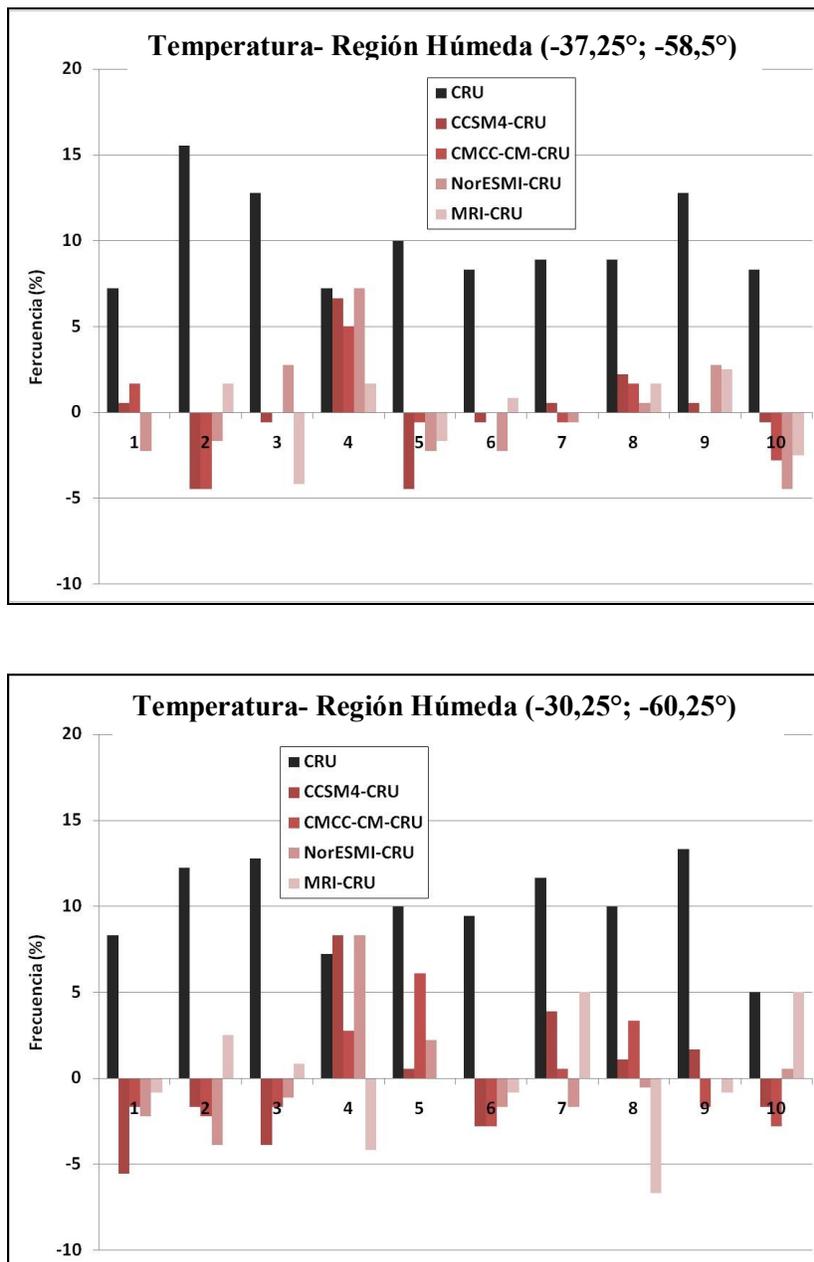


Figura 5.3.4: Frecuencias relativas de las temperaturas medias mensuales en dos puntos de la región Húmeda. En negro las frecuencias observadas y en colores, según indicado en los paneles, las diferencias de los modelos con estas frecuencias. En abscisa, el rango de los valores observados dividido en diez valores iguales



5.3.2 Precipitación

Los errores de los modelos sin corregir son importantes, como surge de comparar el panel superior de la Figura 2.5 con el mapa de CRU, Figura 5.3.5i, con errores de más de 200 mm en muchas zonas y modelos. La corrección mejora sustancialmente el ajuste al campo observado, y en el promedio de los modelos el error respecto del campo de CRU es menor al 10% en casi toda la región.

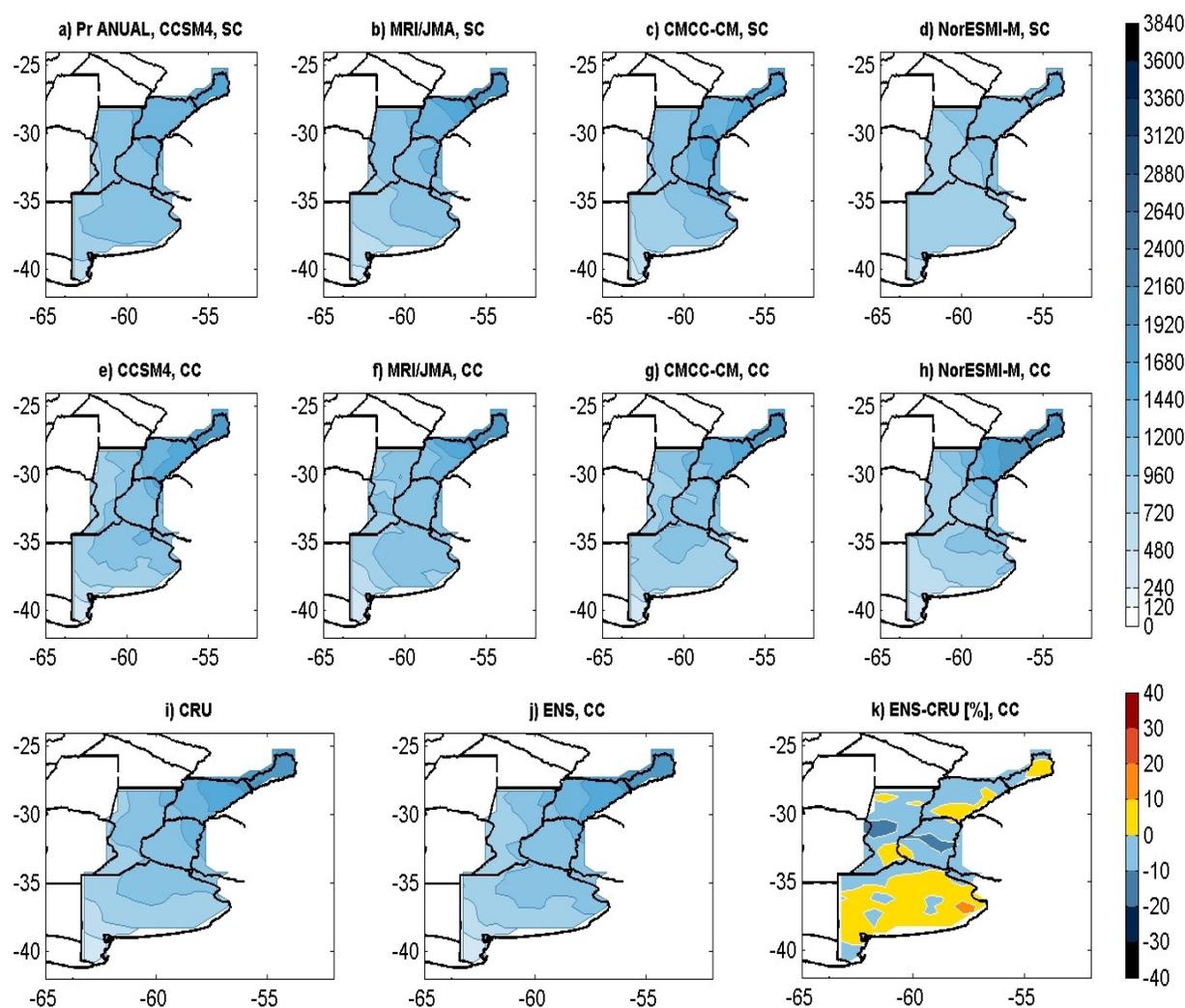


Figura 5.3.5: Ídem Figura 5.3.1, pero para la precipitación anual

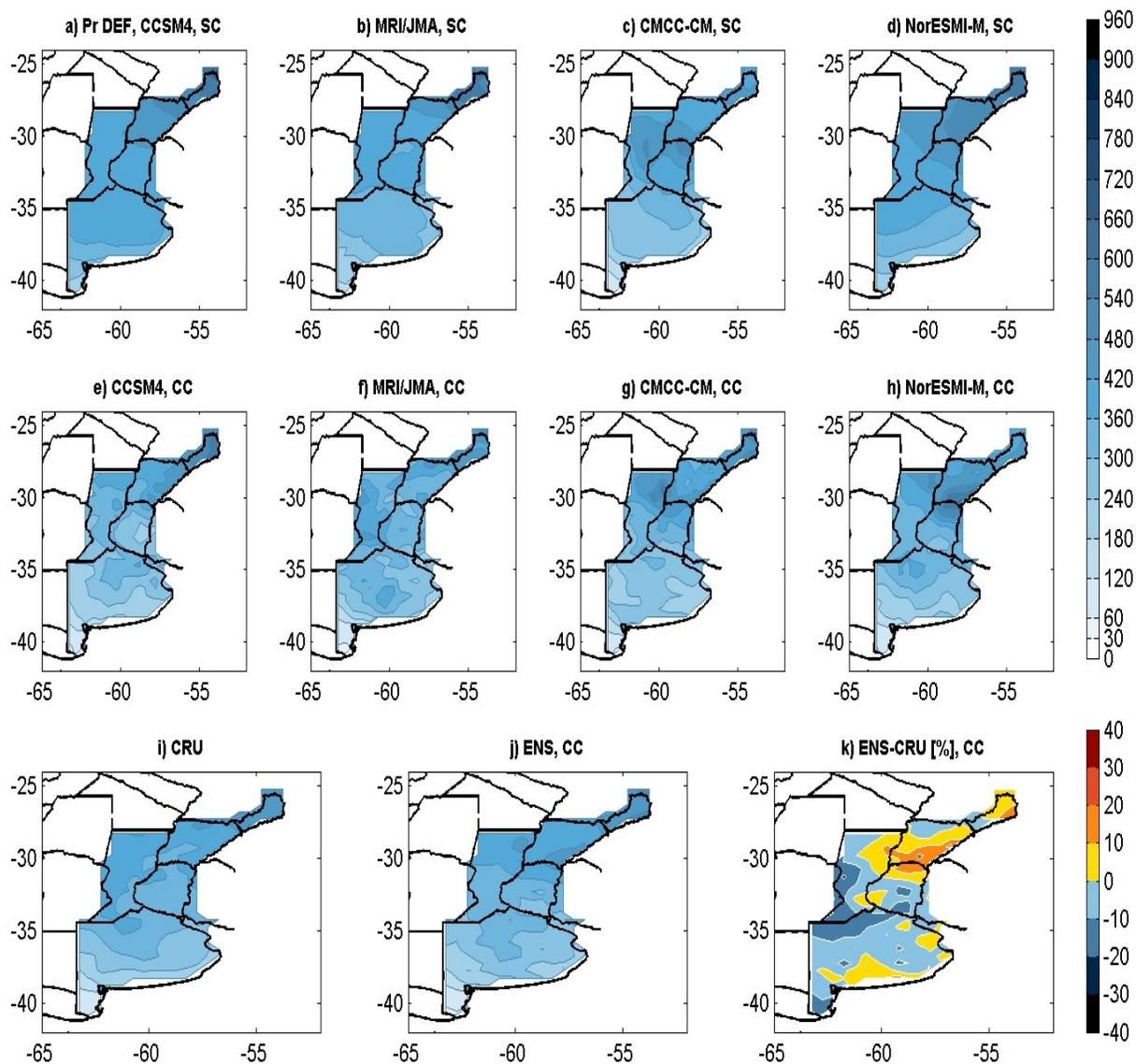


Figura 5.3.6: Ídem Figura 5.3.5, pero para el verano (diciembre, enero y febrero)

En el caso del verano, el ajuste es similar al del caso anual, Figura 5.3.6. En invierno los errores relativos son sustancialmente mayores de forma que el promedio de los modelos corregidos llega a estar entre y 30 y 40% por encima de los observados en una amplia zona, Figura 5.3.7. Sin embargo, esto no implica errores absolutos grandes porque en esta estación del año y en esa zona, la precipitación es escasa y no mayor a 180 mm y por tanto los errores relativos como el que aparece en el panel k de la Figura 5.3.7 no son mayores a 70 mm en total para los tres meses.

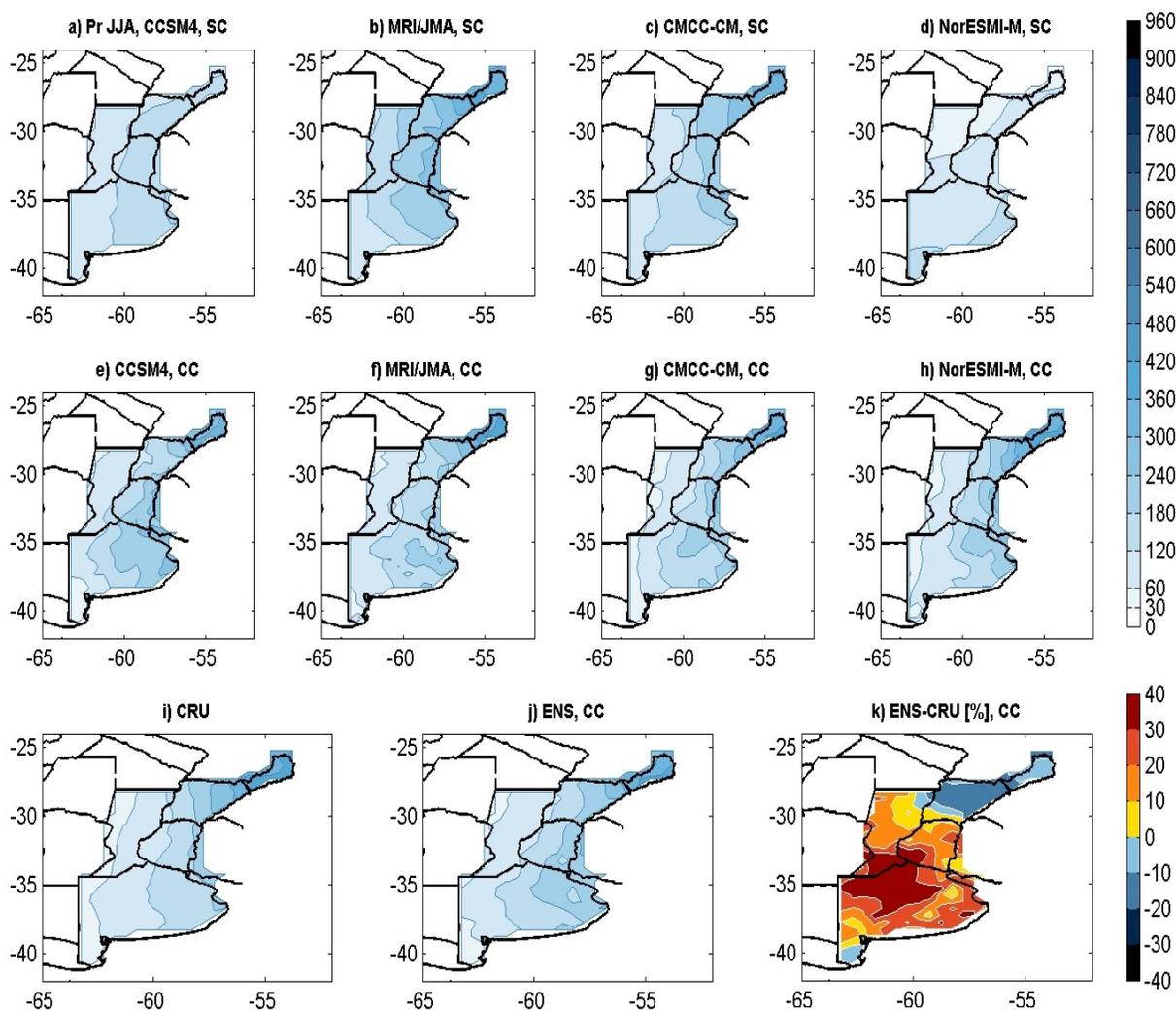


Figura 5.3.7: Ídem Figura 5.3.5, pero para el invierno (junio, julio y agosto)

La figura 5.3.8 muestra el error en las distribuciones de los valores mensuales de precipitación de los modelos con respecto a la distribución observada en dos puntos del retículo de la región. Como en el caso de la temperatura, la figura presenta asimismo la frecuencia observada, lo que permite visualizar que con alguna excepción en los valores extremos, el error en las frecuencias de la distribución de los modelos en cada decil de la distribución es mucho menor que la frecuencia observada. La distribución de la lluvia mensual tiene la forma de una distribución Gama, típica de la lluvia mensual, que se caracteriza por su asimetría y una cola de valores extremos prolongada. Los errores en los valores extremos de la precipitación son iguales o mayores que la frecuencia observada, indicativo de la dificultad para captar la correcta frecuencia de precipitaciones mensuales extremas en las proyecciones del clima futuro.

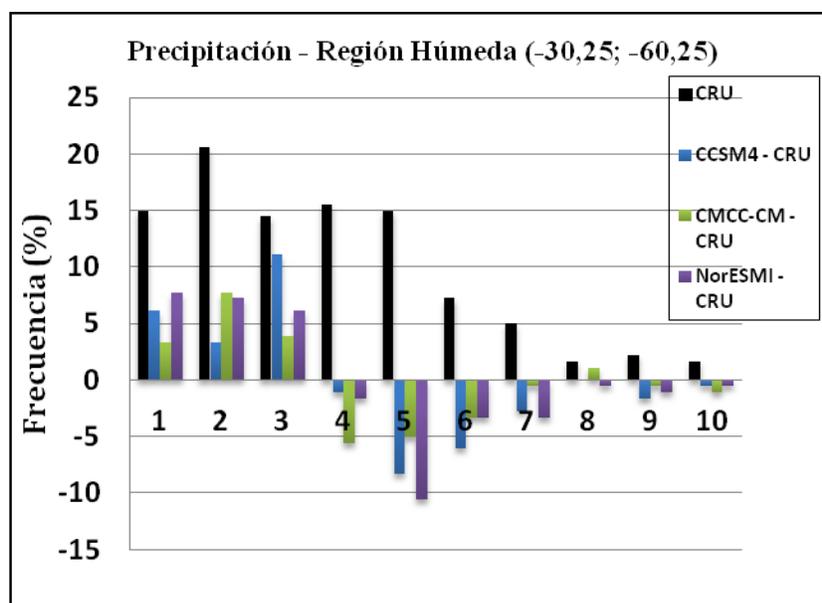
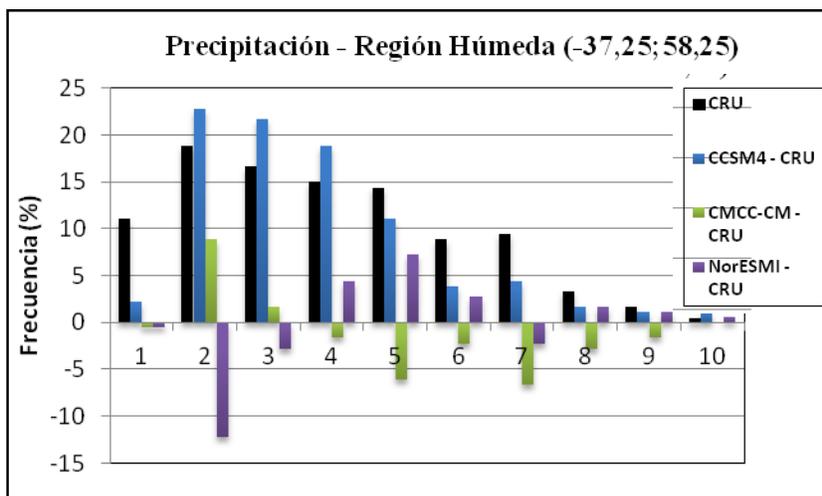


Figura 5.3.8: Ídem Figura 5.3.4, pero para la precipitación

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 errores pequeños en la región Húmeda. Igualmente, también se logra representar en líneas generales las distribuciones estadísticas en el caso de la temperatura. Para la precipitación el ajuste en la distribución no es tan bueno, particularmente en



el modelo CCSM4 y en los extremos de las distribuciones de lluvia, lo cual es un limitante importante para la proyección del clima futuro en la región.

5.4 ESCENARIOS DEL CLIMA FUTURO (SIGLO XXI)

5.4.1 Temperatura

Temperaturas medias

El elemento común a todos los modelos y escenarios es la proyección de un calentamiento con su magnitud aumentando desde el sudoeste hacia el noreste de la región, Figuras 5.4.1.1 y 5.4.1.2. En el futuro cercano, los escenarios RCP4.5 y 8.5 y A1B son muy similares entre sí y su calentamiento de 0.5 a 1°C en casi toda la región indicaría una aceleración del calentamiento regional con respecto a las tendencias observadas. Como se mostró previamente en la Tabla 5.2.1.1, estas tendencias solo dieron lugar a un calentamiento promedio regional de 0,4°C en 50 años (1960-2010).

Cabe destacar los valores excepcionales de más de 4°C de calentamiento en la temperatura media del escenario RCP8.5 hacia fin de siglo en el extremo norte de la región. Esa zona tuvo una temperatura media de alrededor de 21°C en 1960-2010, por lo que el calentamiento proyectado llevaría esa temperatura media anual de más de 25°C, con implicancias muy desfavorables. En el futuro lejano, los aumentos de temperatura proyectados en la temperatura media en el escenario A1B son intermedios entre los de los escenarios RCP4.5 y 8.5.

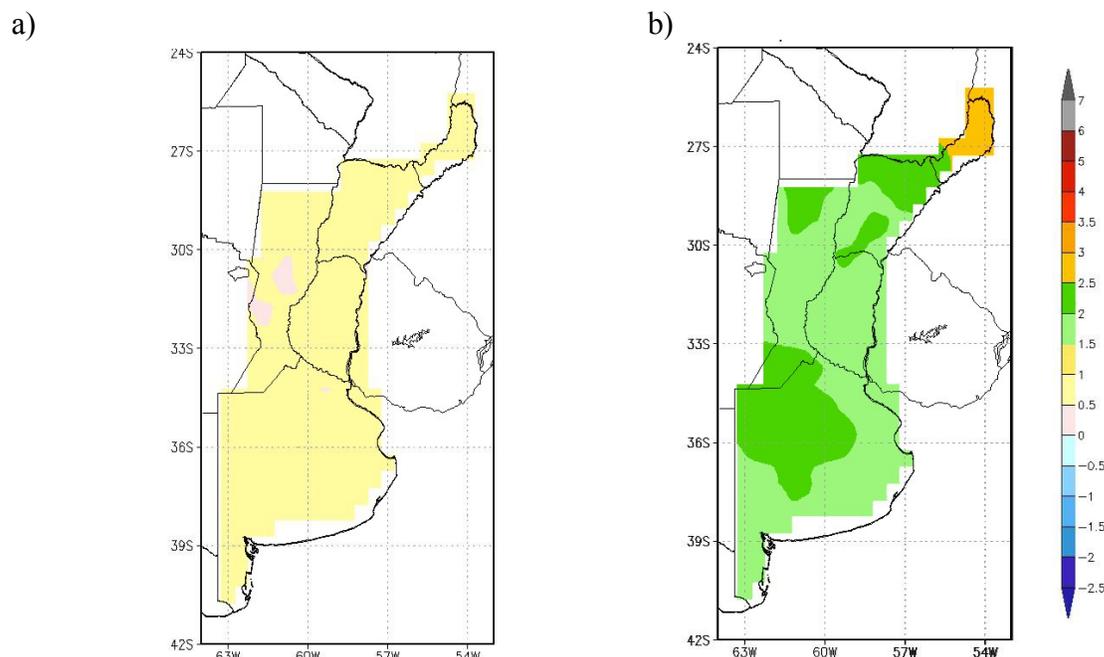


Figura 5.4.1.1: Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1979-2003 modelo MRI/JMA (Japón). Escenario A1B. a), futuro cercano (2015-2039); b) futuro lejano (2075-2099)

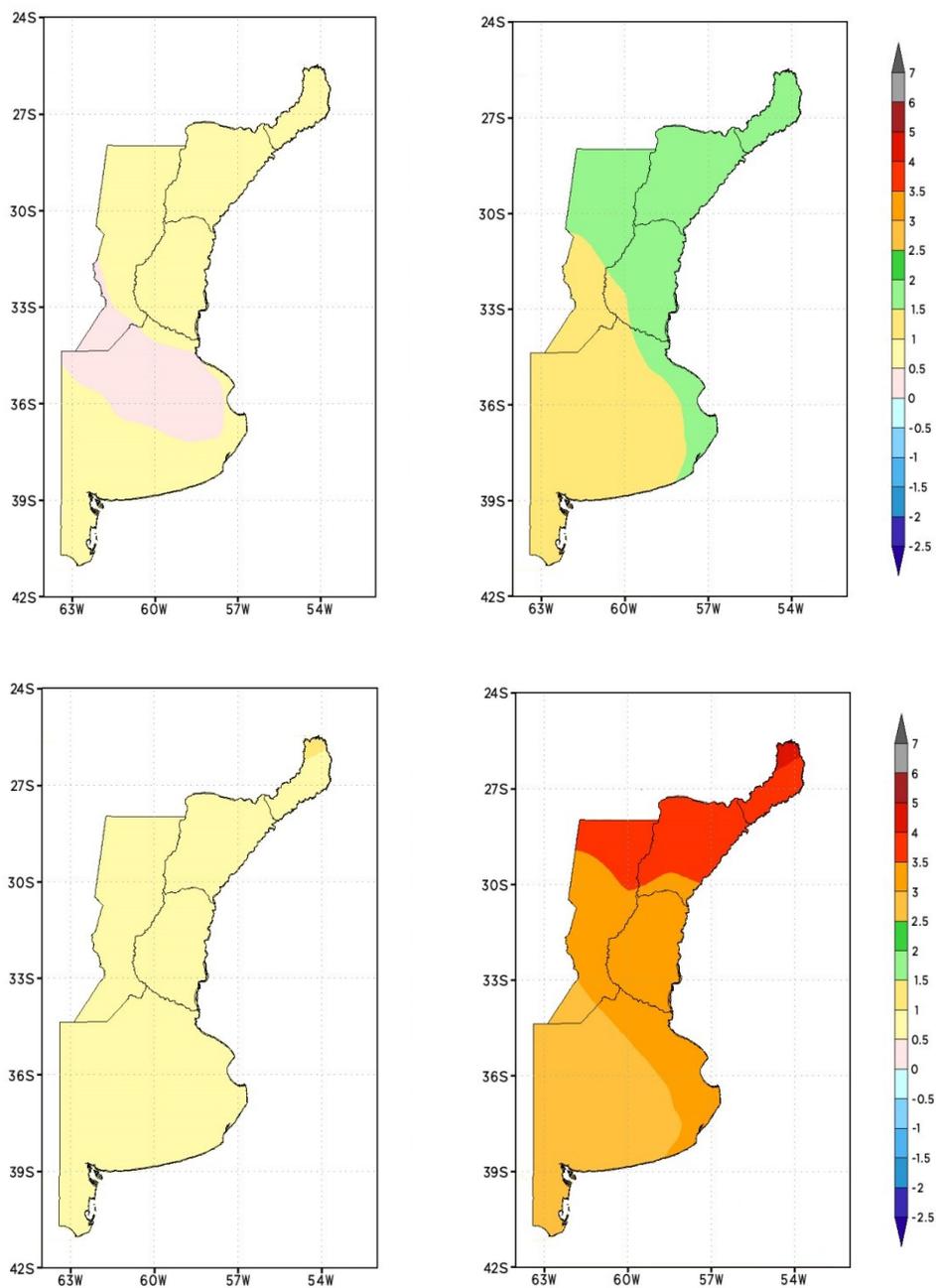


Figura 5.4.1.2: Cambio en la temperatura media anual con respecto al periodo 1981-2005. Promedio de los modelos CCSM4, CMCC-CM y NorESMI-M. Panel superior escenario RCP4.5 y panel inferior RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)

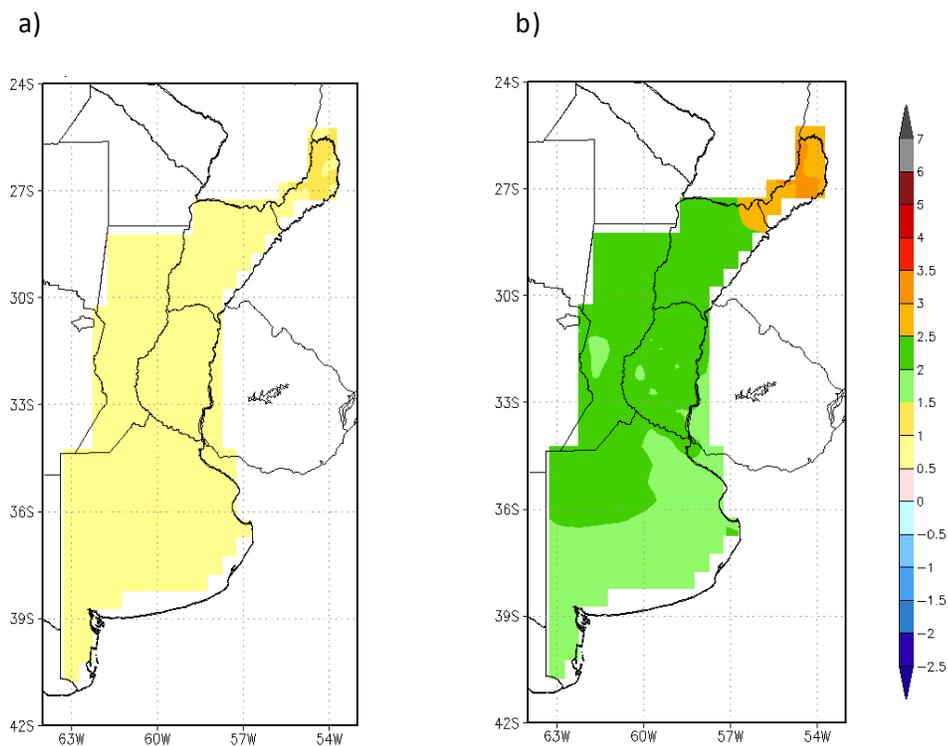


Figura 5.4.1.3: Ídem figura 5.4.1.1, pero para la temperatura mínima media anual

Los aumentos de temperatura proyectados en la temperatura mínima media y en la máxima media son muy similares en todos los escenarios y en los dos horizontes temporales; Figuras 5.4.1.3 a 5.4.1.6 y, también son muy similares a los de la temperatura media.

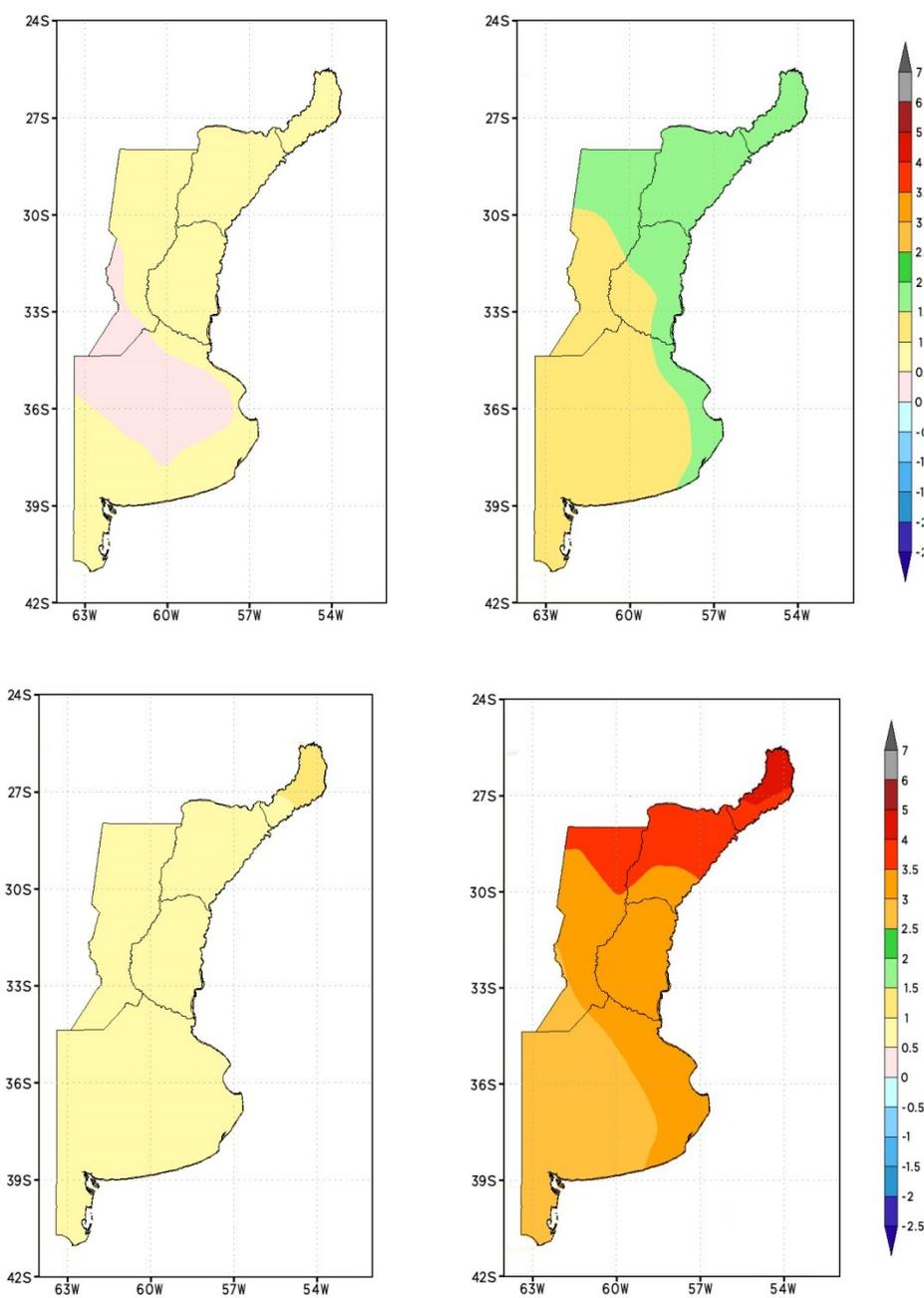


Figura 5.4.1.4: Ídem Figura 5.4.1.2, pero para la temperatura mínima media anual

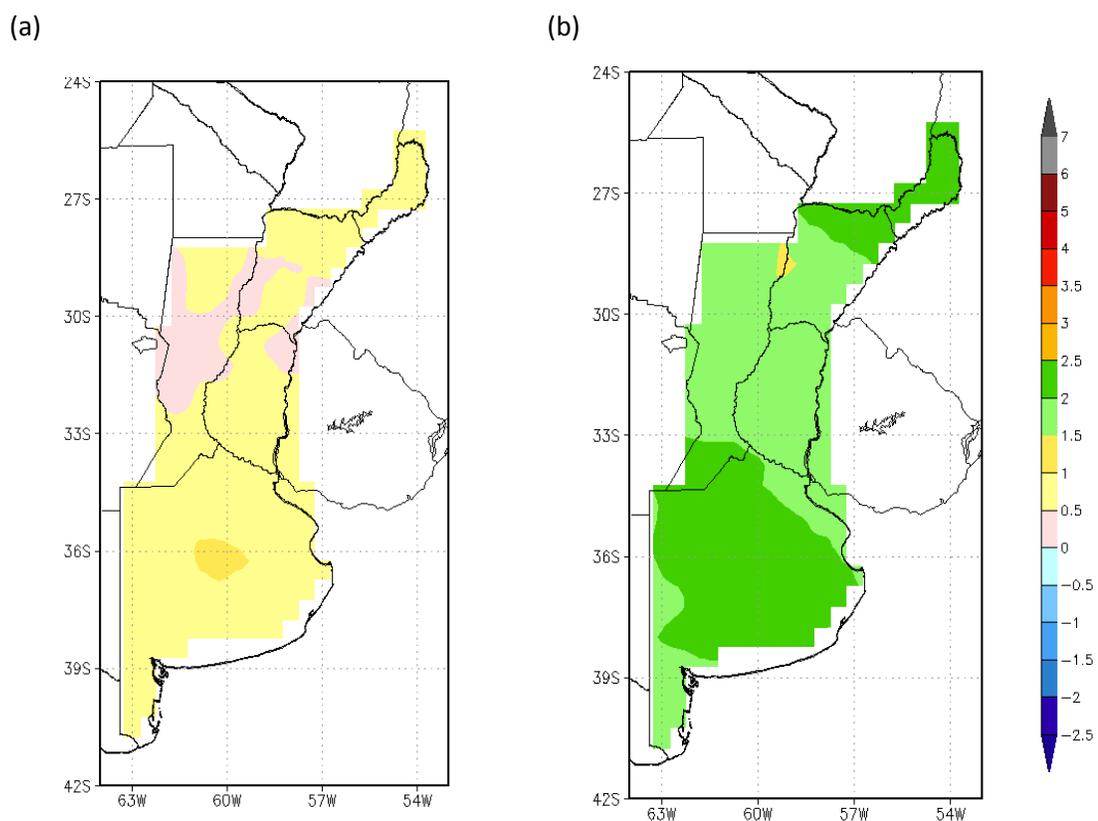


Figura 5.4.1.5: *Ídem Figura 5.4.1.1, pero para la temperatura máxima media anual*

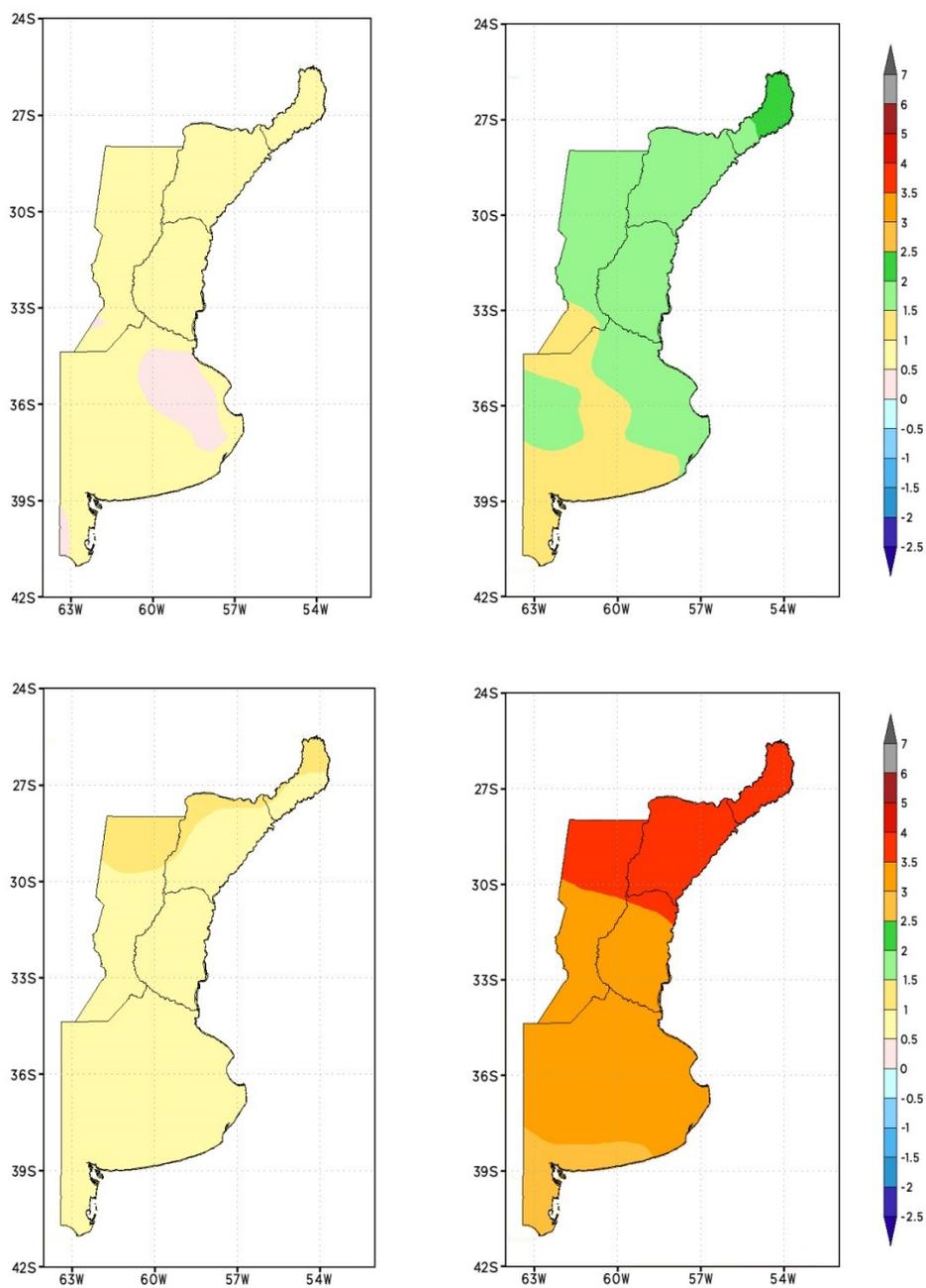


Figura 5.4.1.6: Ídem Figura 5.4.1.2, pero para la temperatura máxima media anual



Extremos térmicos

En toda la región, los 6 índices de extremos térmicos en los dos escenarios RCP y en los dos horizontes temporales futuros son compatibles con el calentamiento esperado, Figuras 5.4.1.7 a 5.4.1.12. En general los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 no tienen diferencias importantes entre sí en el futuro cercano, pero sus escenarios en el futuro lejano son muy distintos con mayores cambios en el RCP8.5 como es de esperar por el proceso de calentamiento global en que se basa. De todas maneras, en los dos escenarios los cambios son mucho más pronunciados en el futuro lejano que en el futuro cercano.

Las heladas se reducirían sustancialmente en el sur de la región y tenderían a desaparecer en el norte, Figuras 2.2.4 y 5.4.1.7. Las noches con temperaturas en exceso de 20°C (noches tropicales) aumentarían mucho más en el norte de la región que en el sur, Figura 5.4.1.8 y lo mismo harían las temperaturas máximas y mínimas del año, Figuras 5.4.1.9 y 5.4.1.10.

En general, los cambios proyectados tienen el mismo signo y el patrón espacial (marcado gradiente norte sur o viceversa) que los cambios observados entre 1960 y 2010. Es el caso del número de días con heladas, Figuras 2.2.4 y 5.4.1.7, el valor mínimo anual de la temperatura anual, Figuras 2.2.6 y 5.4.1.9, el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90, Figuras 2.2.8 y 5.4.1.11 y el número de días con olas de calor, Figuras 2.2.9 y 5.4.1.12. La excepción es el valor máximo de la temperatura anual que tuvo un enfriamiento uniforme en la región entre 1960 y 2010.

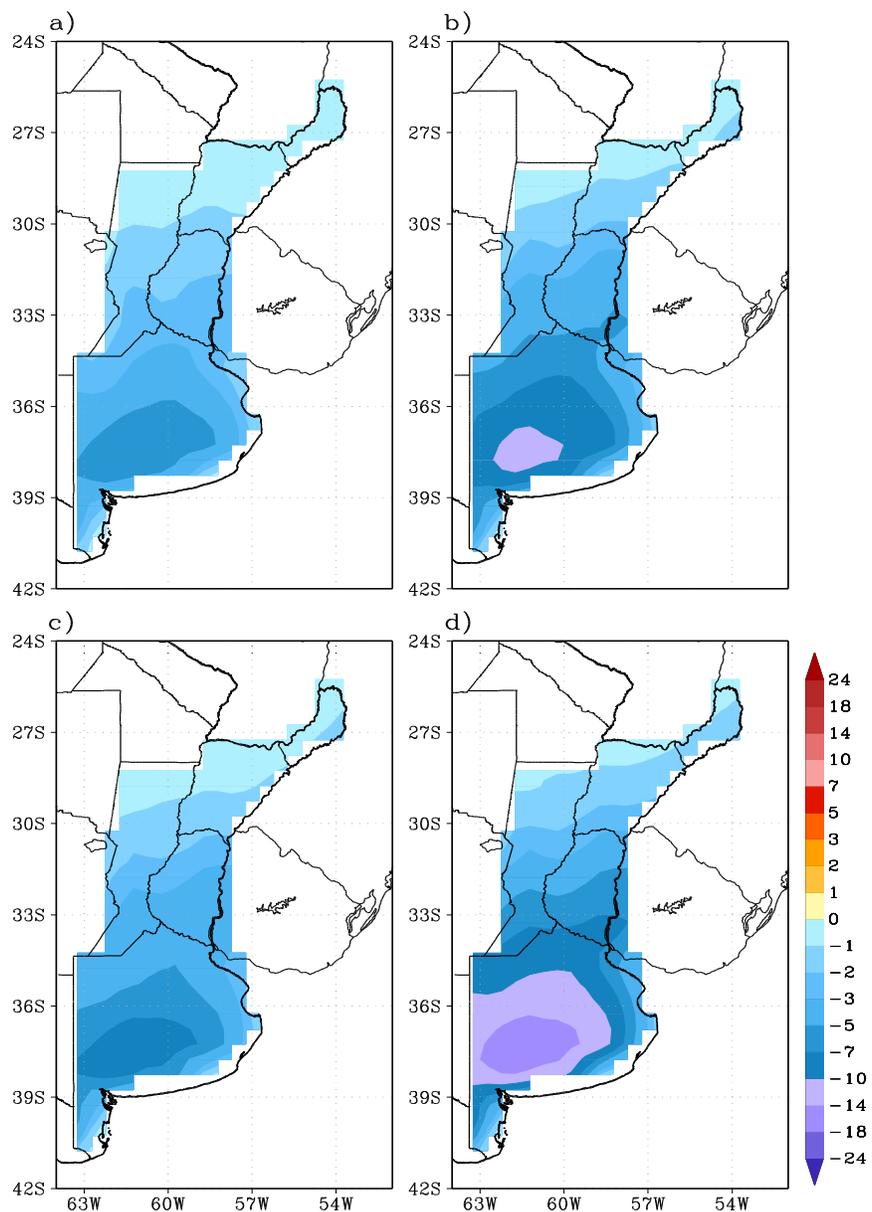


Figura 5.4.1.7: Cambios del número de días con heladas con respecto al periodo 1981-2005. Promedio de los modelos CCSM4, CMCC-CM y NorES SMI-M. a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099), c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario 8.5, futuro lejano

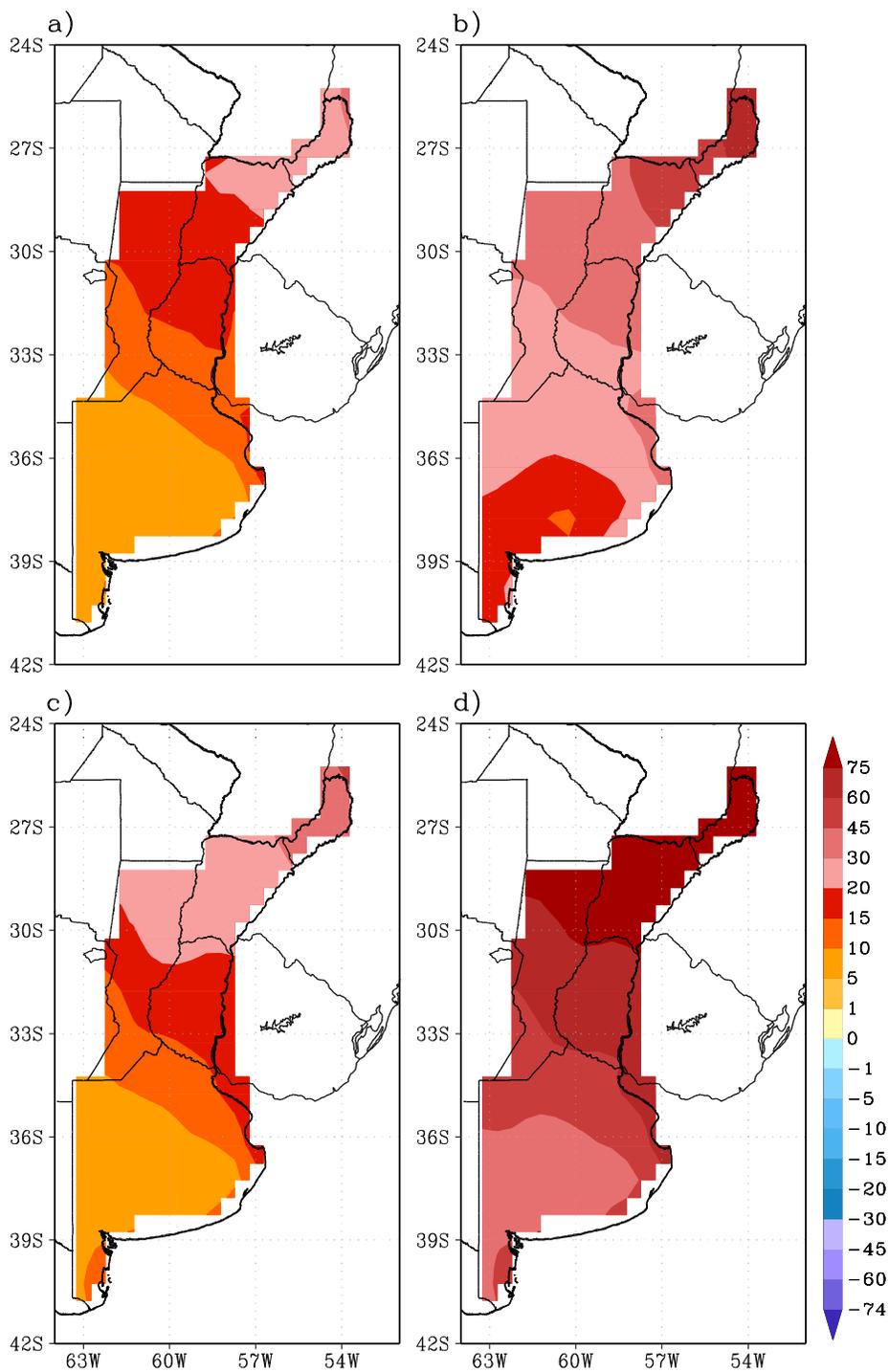


Figura 5.4.1.8: Ídem Figura 5.4.1.7, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año

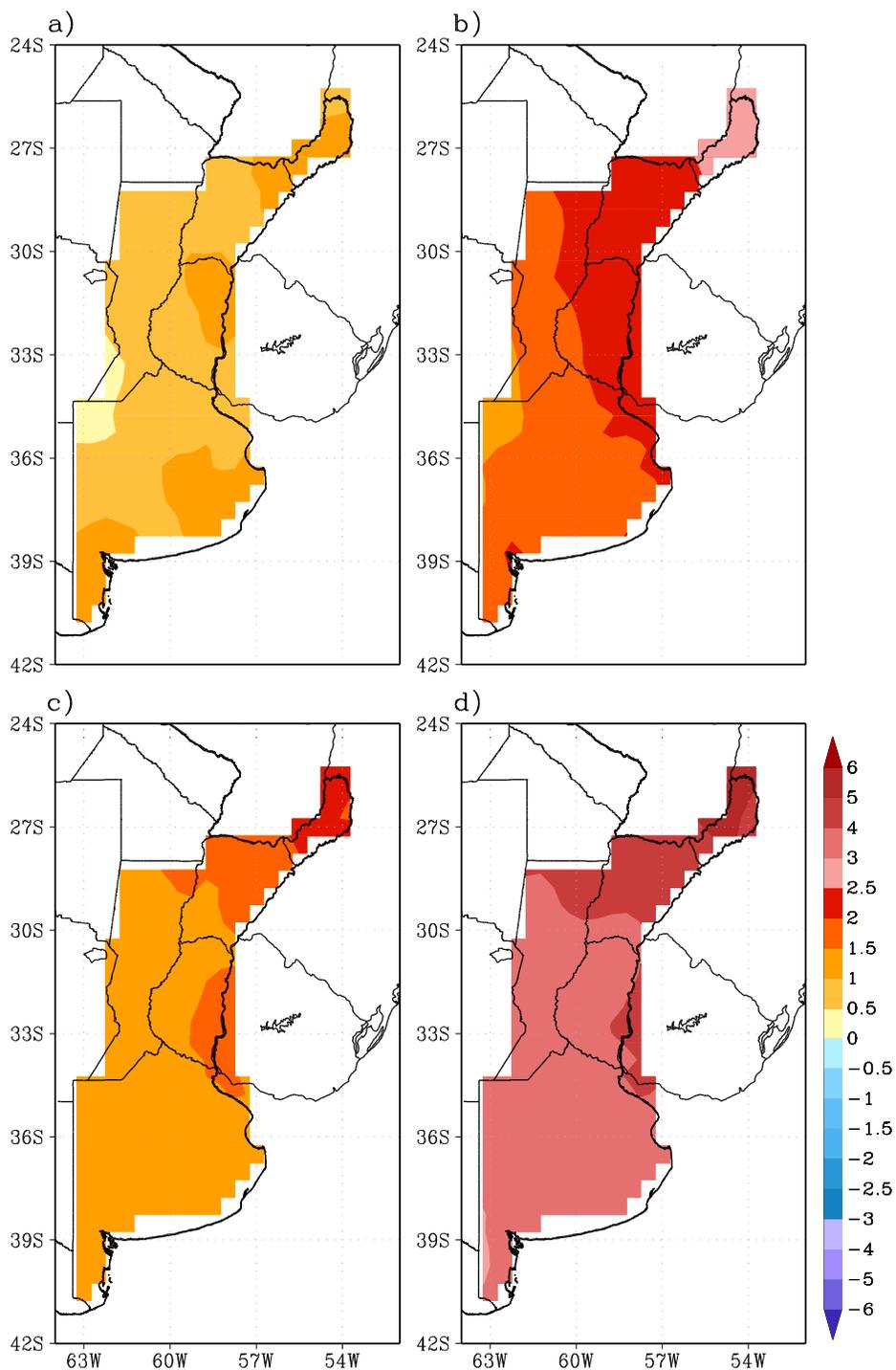


Figura 5.4.1.9: Ídem Figura 5.4.1.7, pero para el valor anual mínimo de la temperatura (°C)

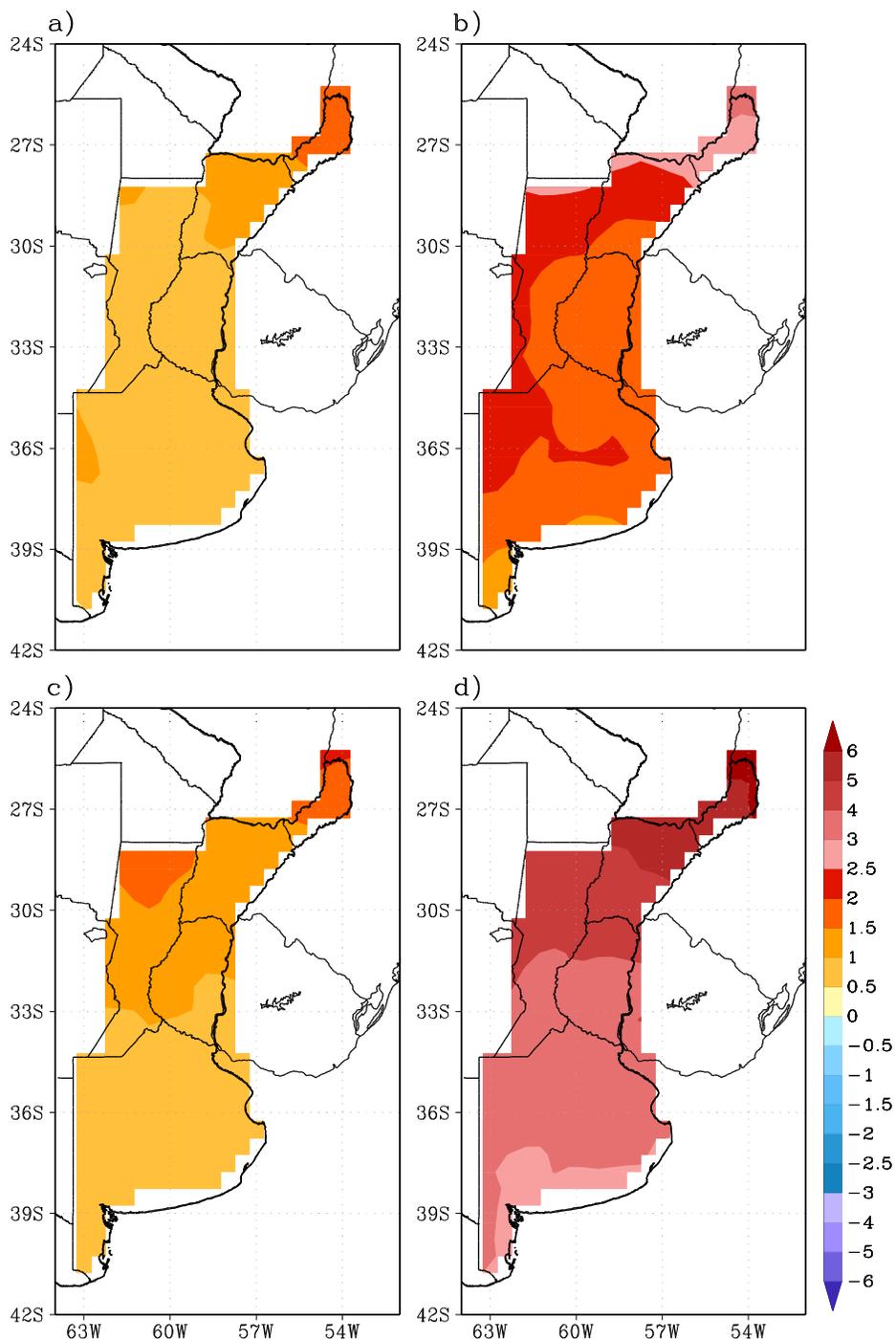


Figura 5.4.1.10: Ídem Figura 5.4.1.7, pero para el valor anual máximo de la temperatura (°C)

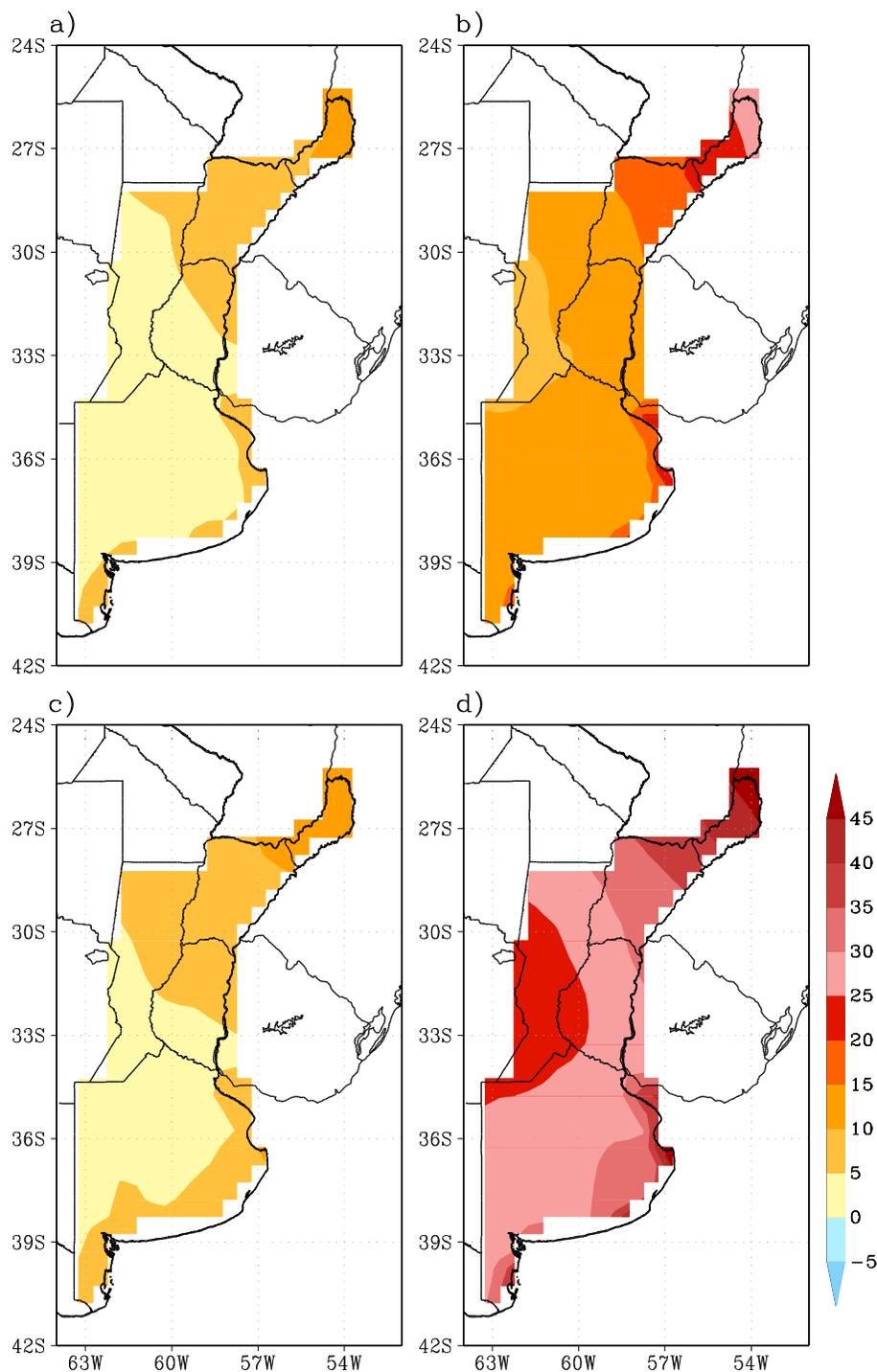


Figura 5.4.1.11: *Ídem Figura 5.4.1.7, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90*



De acuerdo con las proyecciones que muestra la Figura 5.4.1.12, es de esperar que el número de días con olas de calor aumente en toda la región, aunque mucho más en el norte. Cabe destacar que de acuerdo a la definición del índice utilizado, este es independiente de las temperaturas absolutas por lo que debido a esta caracterización regional, el gradiente en latitud que se observa en la figura 5.4.1.12 es consistente con el calentamiento diferente en latitud figuras 5.4.1.1 a 5.4.1.6. Aun en el escenario más benigno y en el futuro cercano, el aumento de días en el año con olas de calor sería de más de 2 a 15 días.

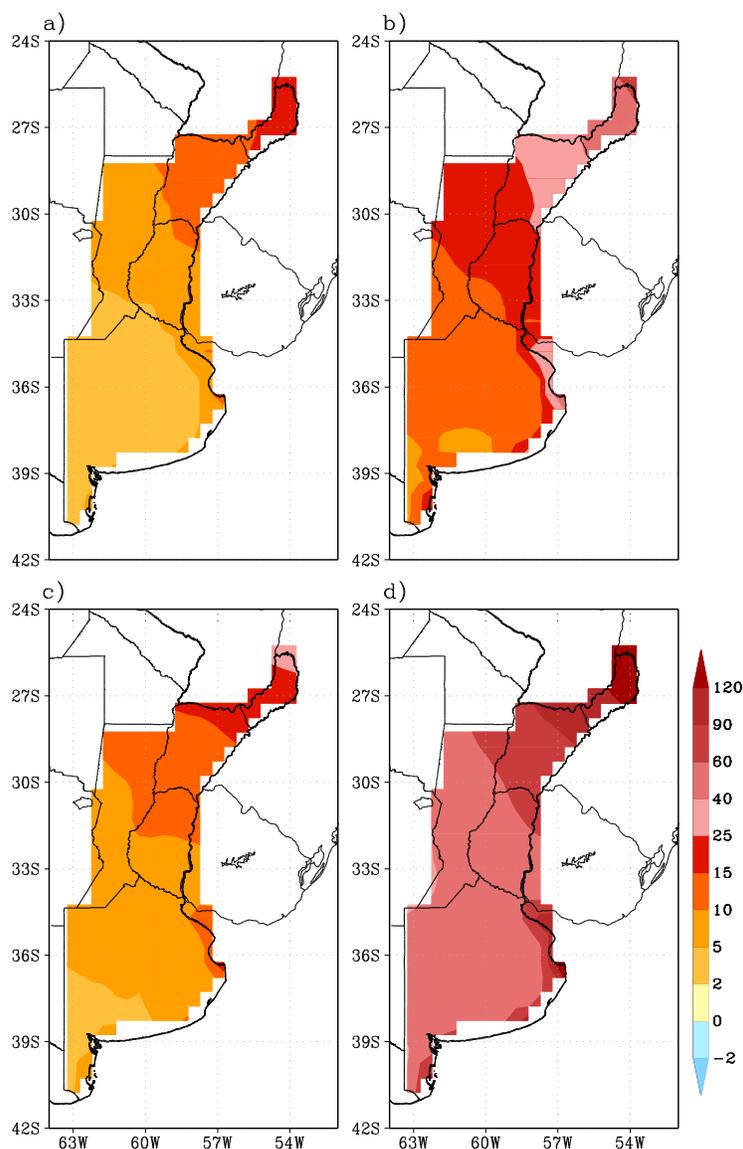


Figura 5.4.1.9: Ídem Figura 5.4.1.4, pero para los días en el año con ola de calor



5.4.2 Precipitación

Precipitación media

Las proyecciones en toda la región en los dos escenarios **RCP**, tanto en el futuro cercano como lejano son de aumentos poco relevantes en la precipitación, 0 a 10%, que estarían dentro del margen de error de esta evaluación, Figura 5.4.2.2. Incluso, en algún caso y en zonas aisladas se proyectan ligeras disminuciones por lo que en principio, se puede suponer que no habrá mayores cambios en la precipitación, aunque de acuerdo con lo obtenido del promedio de 42 modelos CMIP5, no se puede descartar un escenario de tendencias a aumentos moderados en Buenos Aires y el este de la Mesopotamia, Figura 3.4.2. También el escenario A1B en el modelo de alta resolución MRI/JMA proyecta aumentos mayores al 10% en la mayor parte de la región y muy extendidos de más del 40 % en futuro lejano, Figura 5.4.2.1. Con estos resultados diversos en cuanto a la magnitud del cambio, la conclusión es que excepto en el extremo sur de la provincia de Buenos Aires, es poco probable que haya una reducción en las precipitaciones anuales en este siglo.

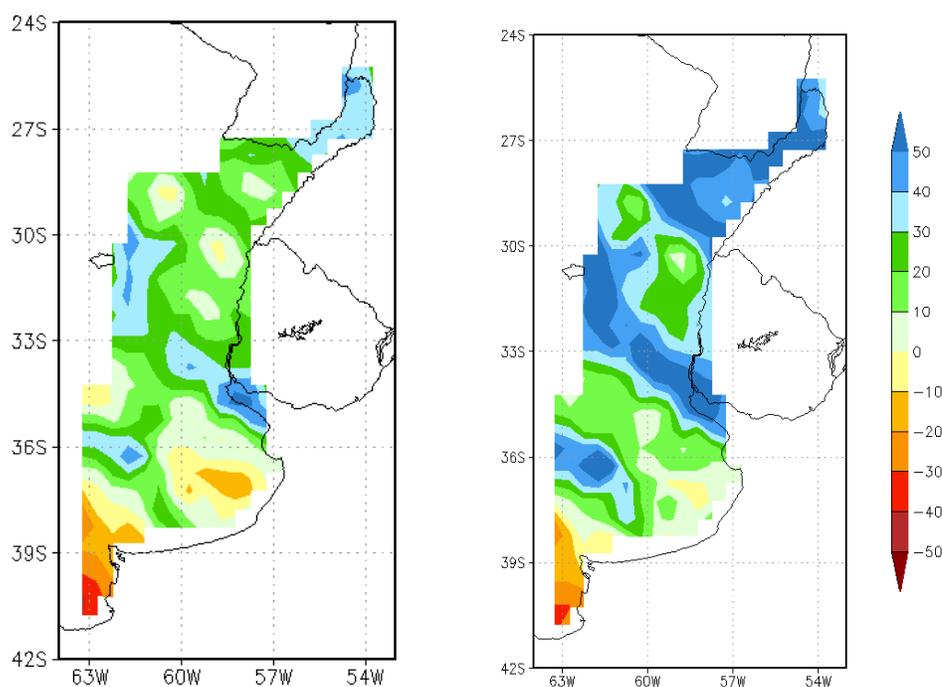


Figura 5.4.2.1: Cambio en precipitación anual con respecto al periodo 1979-2003 modelo MRI/JMA (Japón). Escenario A1B. a) futuro cercano (2015-2039) y b) futuro lejano (2075-2099)

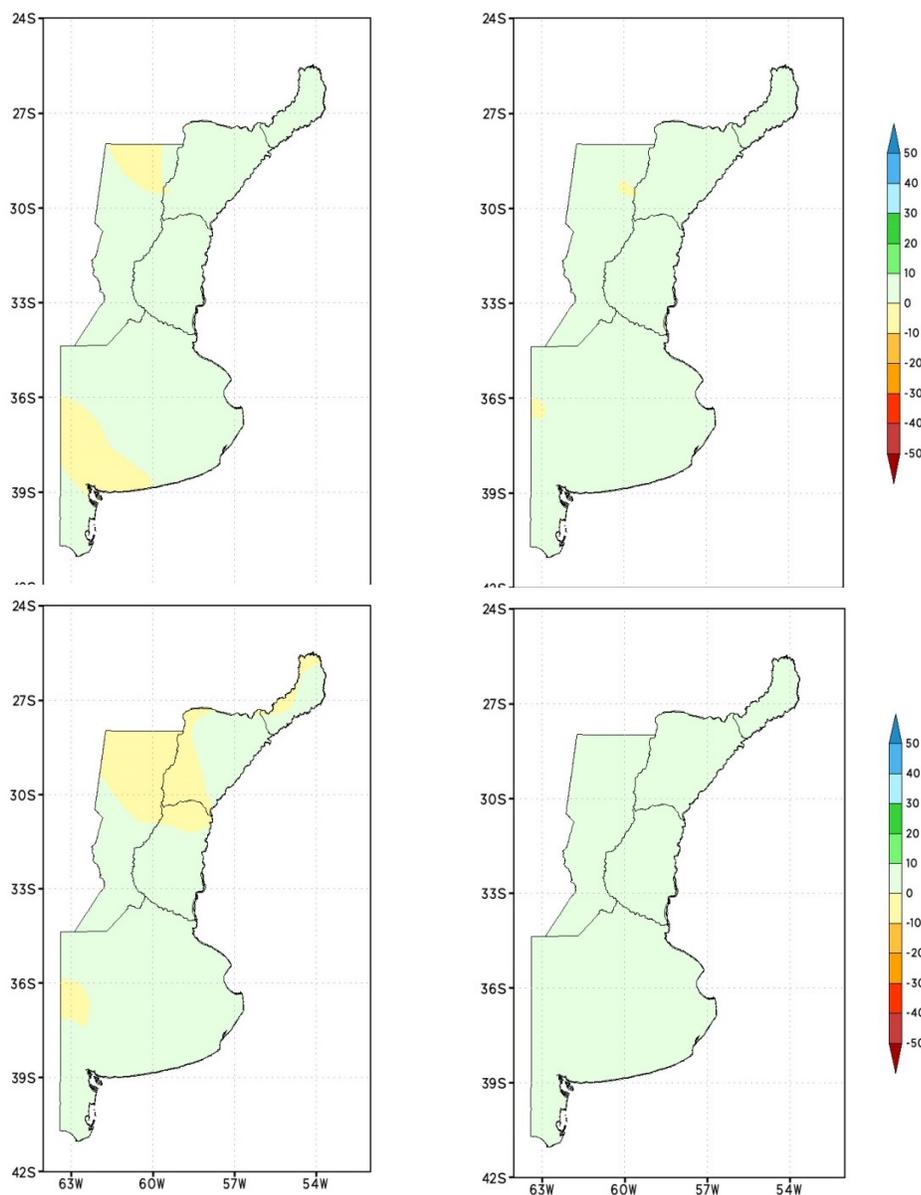


Figura 5.4.2.2: Cambio en la precipitación anual con respecto al periodo 1981-2005. Promedio de los modelos CCSM4, CMCC-CM y NorESMI-M. Panel superior, escenario RCP 4.5 y panel inferior, escenario RCP8.5. Izquierda, futuro cercano (2015-2039) y derecha, futuro lejano (2075-2099)



Precipitaciones extremas

En casi toda la región, las precipitaciones extremas en los dos escenarios y en los dos horizontes temporales futuros tienden a aumentar, aunque con la excepción de algunas zonas del sudoeste de Buenos Aires y en algunos casos en Misiones, Figuras 5.4.2.3 a 5.4.2.5.

Como con la temperatura, en general los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 no tienen diferencias importantes entre sí en el futuro cercano, pero los cambios para el futuro lejano son distintos con mayores cambios en el RCP8.5. En los dos escenarios los cambios son mucho más pronunciados en el futuro lejano que en el futuro cercano.

La Figura 5.4.2.5 indica que como resultado del cambio climático habría una tendencia en toda la región hacia mayores valores de la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa. Esto mismo fue encontrado para precipitaciones acumuladas mensuales por Barros y otros (2013) para dos grandes zonas de esta región.

Los cambios observados en los índices de precipitaciones extremas, Figuras 2.3.2 a 2.3.4 y los proyectados, Figuras 5.4.2.3 a 5.4.2.5, coinciden en un patrón regional de predominante aumento en la región que en el caso de las proyecciones varían con el horizonte temporal y con el escenario.

Los cambios en el número máximo anual de días consecutivos secos (máxima racha seca) presentan un cuadro geográfico heterogéneo y son en general pequeños. Excepto para el horizonte lejano en el escenario RCP4.5, habría una tendencia a una prolongación de estas rachas en el norte de la región.

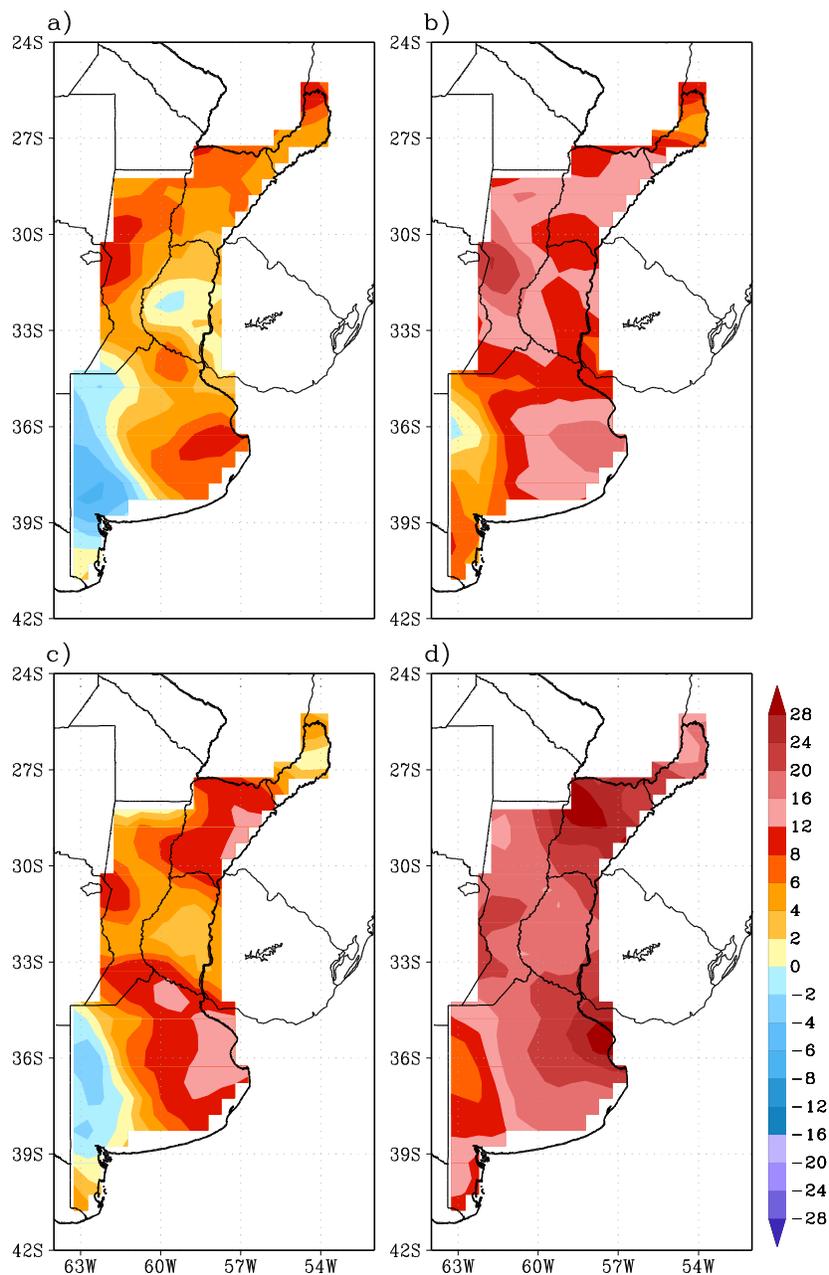


Figura 5.4.2.3: Cambios en la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1981-2005. Promedio de los modelos CCSM4, CMCC-CM y NorESM1-M. a) escenario RCP 4.5, futuro cercano (2015-2039), b) escenario RCP4.5, futuro lejano (2075-2099), c) escenario RCP8.5, futuro cercano y d) escenario RCP8.5, futuro lejano

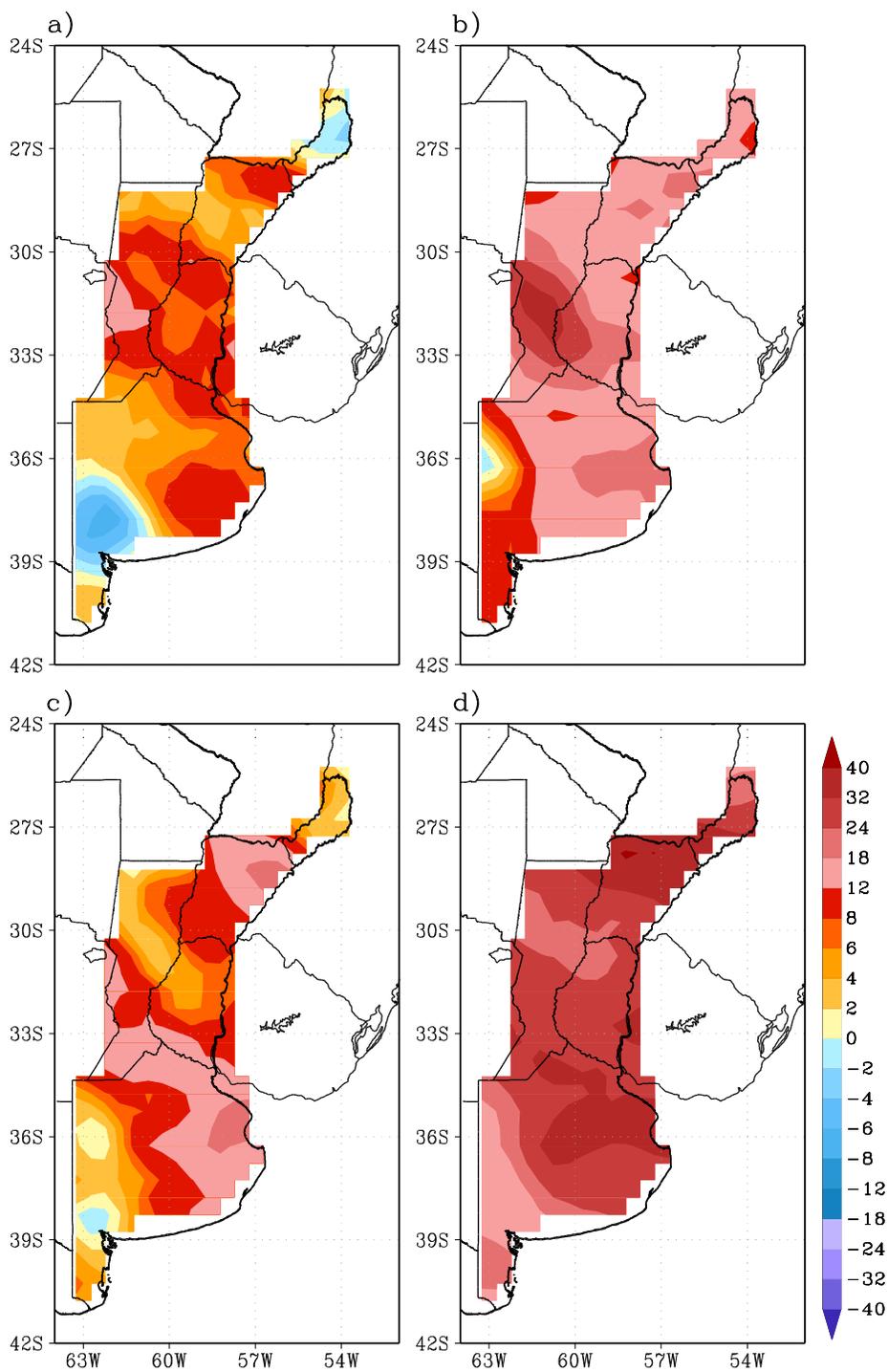


Figura 5.4.2.4: *Ídem Figura 5.4.2.3, pero para la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)*

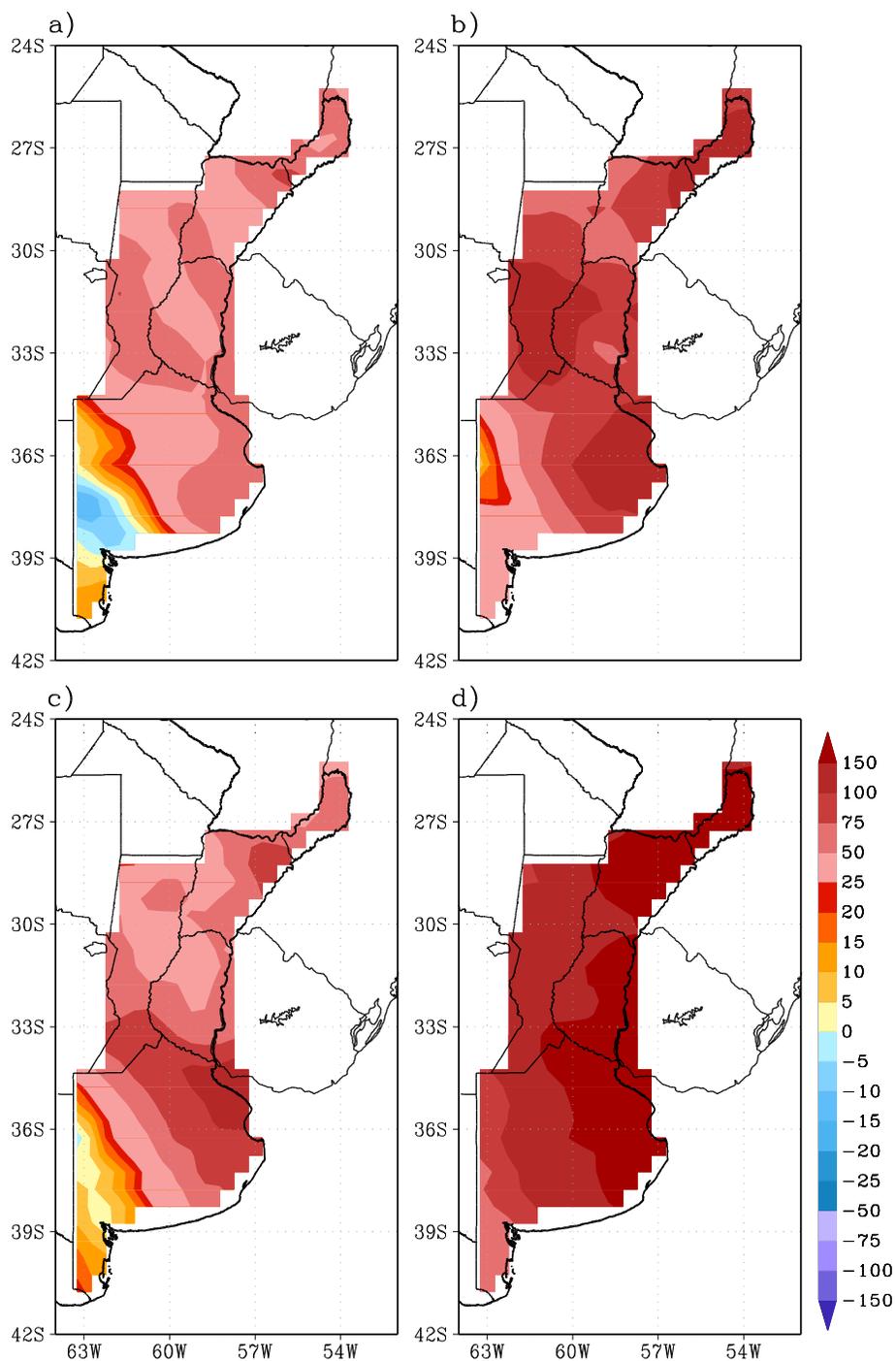


Figura 5.4.2.5: Ídem Figura 5.4.2.3, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)

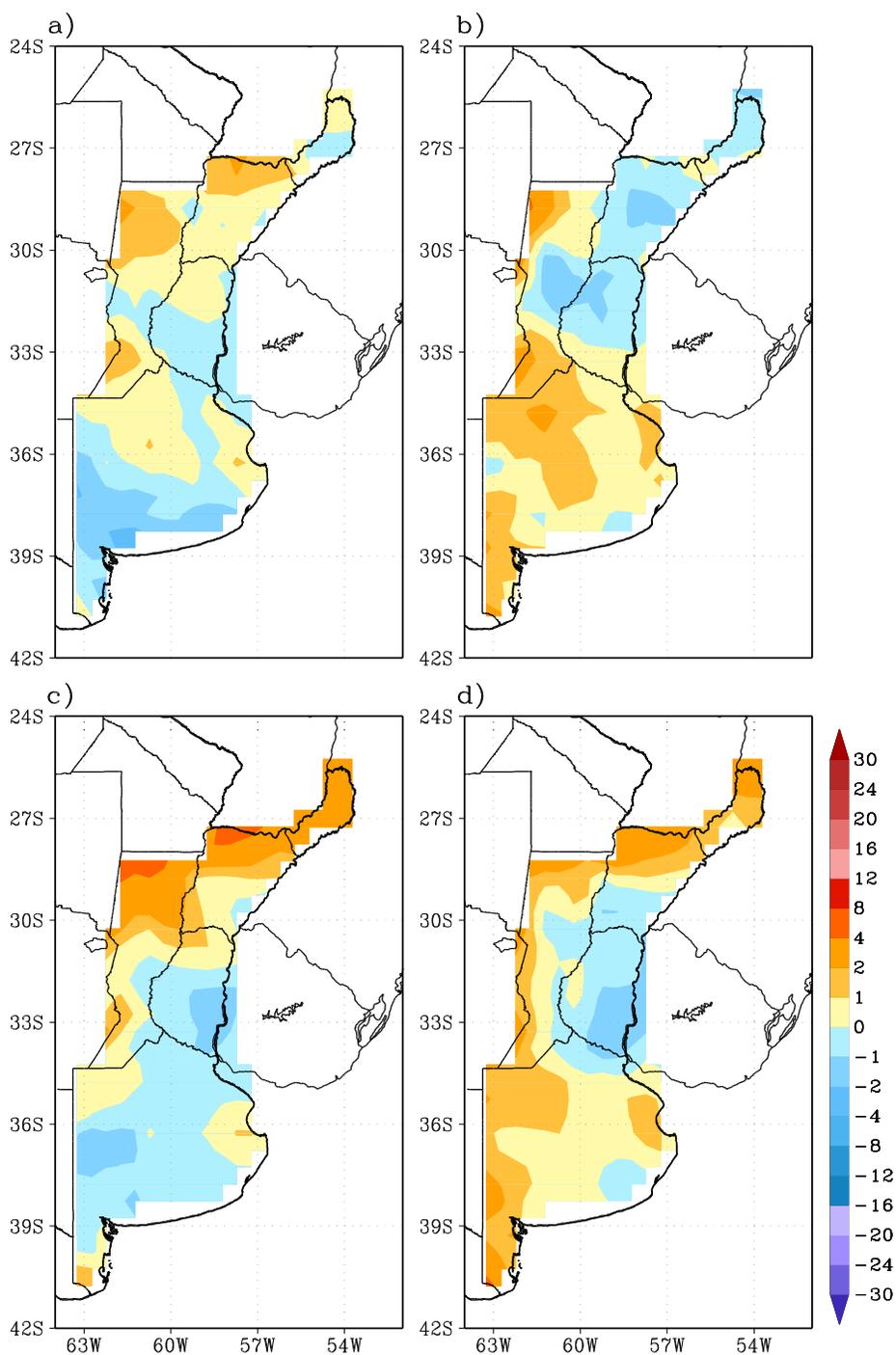


Figura 5.4.2.6: Ídem Figura 5.4.2.3, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos



5.5 EVALUACIÓN DE LA INCERTEZA DE 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 por los modelos climáticos.

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 relativamente menor que aquella y por consiguiente para este futuro, la incerteza queda circunscripta a los errores de los modelos y a los posibles escenarios de emisiones. En este estudio, se comparan dos escenarios, el RCP8.5 que es un escenario de extremo calentamiento al que se llegaría si no hubiera restricciones a las emisiones globales y el RCP4.5 de emisiones moderadas. En cuanto a los modelos, se utilizan los 3 MCGs de mejor performance en la región y se los compara también con los resultados del promedio de los 42 MCGs de la base CMIP5.

Lo mismo se hace para el futuro cercano, pero en ese caso hay que sumar cierto nivel de incerteza por la variabilidad interdecadal, sobre todo en el caso de la precipitación, la que surge de comparar los promedios regionales de las temperaturas y la precipitación de los 3 MCGs en los 2 escenarios.

5.5.1 Temperatura

Temperaturas medias

En todos los casos, la diferencia de calentamiento de los distintos modelos es muy pequeña frente al cambio, dado un determinado escenario y horizonte temporal.

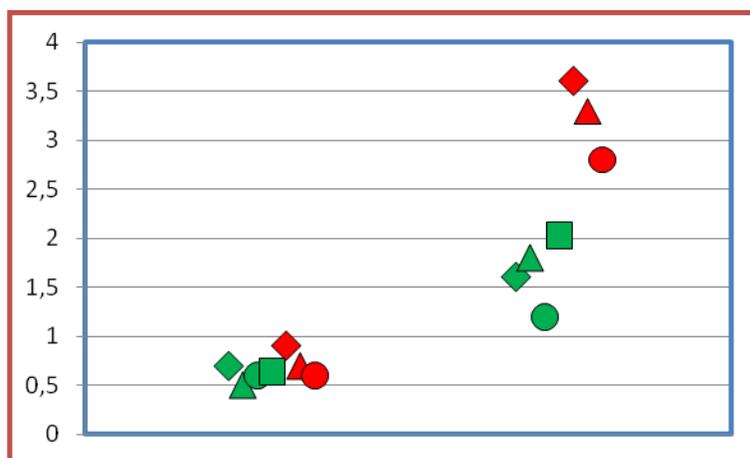


Figura 5.5.1.1: Diferencia proyectada de la temperatura media regional respecto de 1981-2010, A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde escenarios RCP4.5 y A1B, en rojo RCP8.5. Modelos: CCSM4 (círculos), CMCC-CM (rombos), NorESMI-M (triángulos) y MRI/JMA (cuadrados)



En el futuro cercano ya hay una marcada diferencia entre escenarios, pero se podría suponer que el calentamiento estará entre 0,5 y 2°C, Figura 5.5.5.1, aunque cabe tener en cuenta que el promedio de los 42 MCGs está más cerca del nivel inferior, Figura 3.4.1. Resumiendo, no se debería esperar más de 1° de calentamiento en el futuro cercano para el promedio regional. En relación al futuro lejano, en el escenario RCP4.5, el calentamiento no se hace mucho mayor con el tiempo y a fin de siglo estaría entre 0,5 y 1°, mientras que en RCP8.5 el aumento en el promedio regional estaría entre 2,5°C y algo más de 3,5°C, Figura 5.5.5.1.

El promedio de aumento de la temperatura mínima media regional rondaría en el futuro cercano entre 0,5 y 1°C sin mayor diferencia entre escenarios, Figura 5.5.1.2. En el futuro lejano habría más incerteza y dependiendo del escenario el aumento sería entre alrededor de 1,5°C para el RCP3.5 y en el escenario RCP8.5 podría llegar a 3,5°C, con valores intermedios para el escenario A1B. En el caso de la temperatura máxima media, la situación en el futuro cercano es similar a la de la temperatura mínima, pero en el futuro lejano la dispersión entre modelos es mucho mayor y el rango de posibles aumentos del promedio regional oscila entre 1 y 4°C, Figura 5.5.1.3.

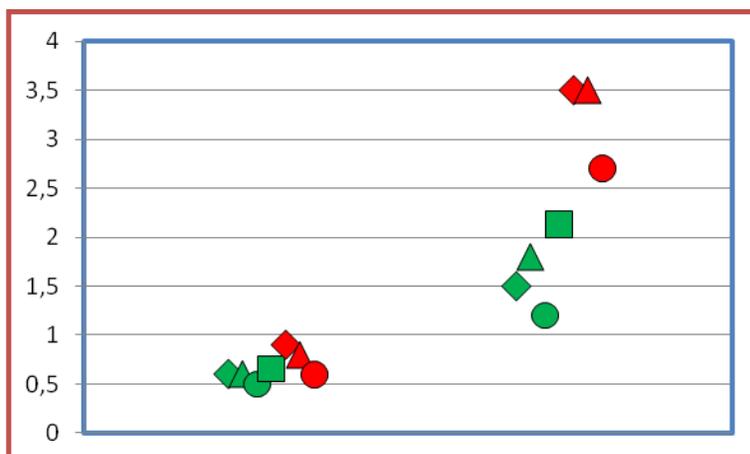


Figura 5.5.1.2: *Idem 5.5.1.1, pero para la temperatura mínima media regional*

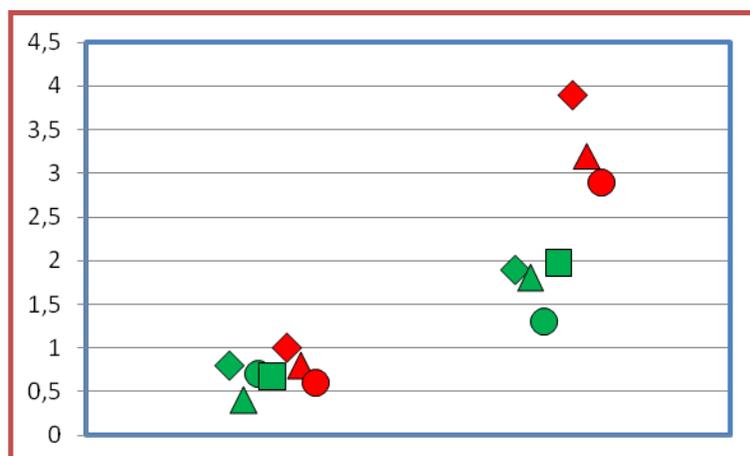


Figura 5.5.1.3: *Idem 5.5.1, pero para la temperatura máxima media regional*



Los cambios en la temperatura media del verano e invierno son casi iguales entre sí, y presentan características similares a las de los de la temperatura media anual en cuanto a las diferencias entre modelos y escenarios en los dos horizontes temporales; Figuras, 5.5.1.4, 5.5.1.5 y 5.5.1.1.

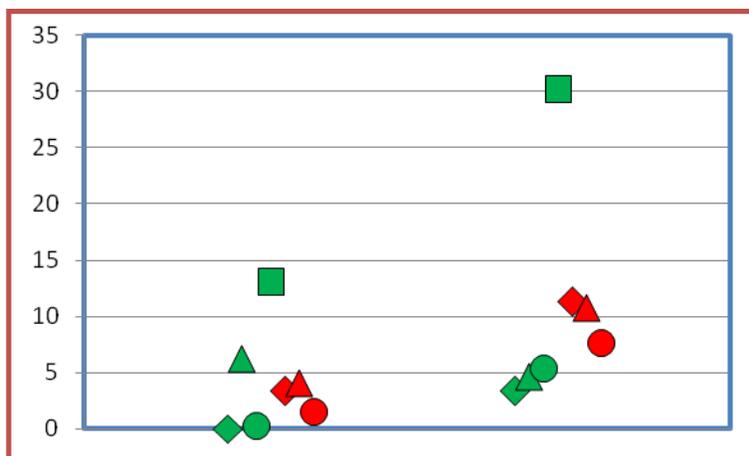


Figura 5.5.1.4: *Idem 5.5.1.1, pero para la temperatura media regional del verano (diciembre, enero y febrero)*

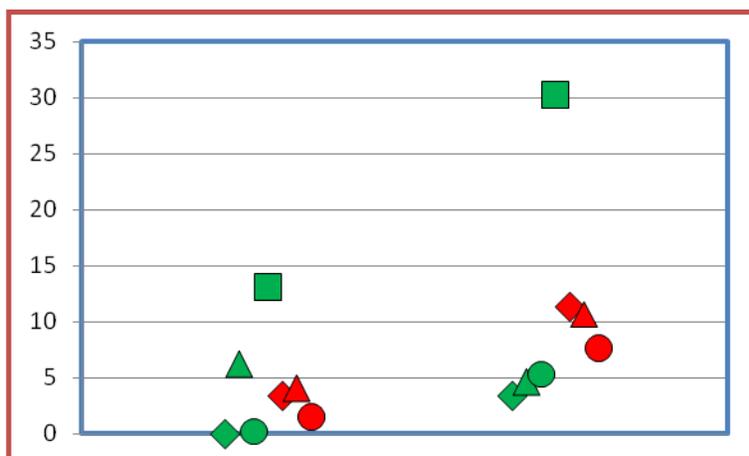


Figura 5.5.1.5: *Idem 5.5.1.1, pero para la temperatura mínima media regional del invierno (junio, julio y agosto)*

Extremos térmicos

Como fuera señalado en la sección 5.4.1, los 6 índices regionales de extremos térmicos son consistentes en todos los escenarios y modelos y en las figuras 5.5.1.6 a 5.5.1.11 se aprecia que ello vale también para los promedios regionales de los 4 modelos con los que se construyeron los escenarios climáticos de esta región.

Como era de esperar en el futuro cercano la diferencia entre escenarios no es muy grande y en algunos casos es menor que la que existe entre los modelos. En el caso del aumento de noches tropicales, del porcentaje de días con temperaturas extremas y de días con olas de calor, las



variaciones entre modelos y distintos escenarios no son muy grandes y se podría estimar que el rango probable estaría entre 10 y 20, 3 y 10 y 4 y 20 respectivamente. La disminución de las heladas presenta una importante variación entre modelos y dos de ellos tienen una reducción de solo menos de un día.

En el futuro lejano, las diferencias entre escenarios son marcadas y, excepto para el caso del cambio de días con heladas, son mucho mayores que las diferencias entre modelos. En conclusión, para esta región se puede estimar que la incerteza sobre los cambios en los extremos térmicos es muy pequeña o nula respecto del signo y magnitud de los cambios para el futuro cercano sin importar el escenario en cuestión. Para el futuro lejano, la mayor fuente de incerteza se asocia con el escenario de emisiones.

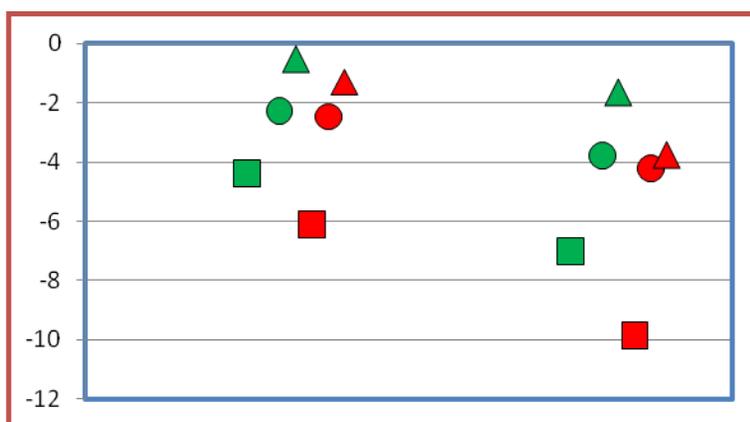


Figura 5.5.1.6: Cambios del número de días con heladas (promedio regional) con respecto al periodo 1981-2005. Modelos: CCSM4 (cuadrados), CMCC-CM (círculos) y NorES SMI-M (triángulos). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.5

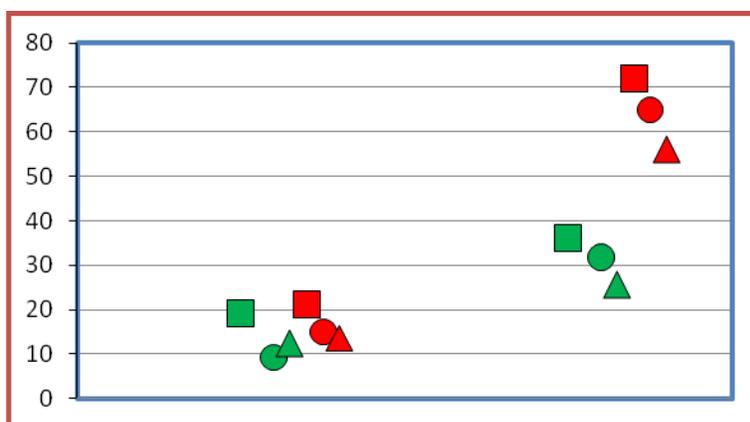


Figura 5.5.1.7: Ídem Figura 5.5.1.6, pero para cambios del número de de noches tropicales en el año

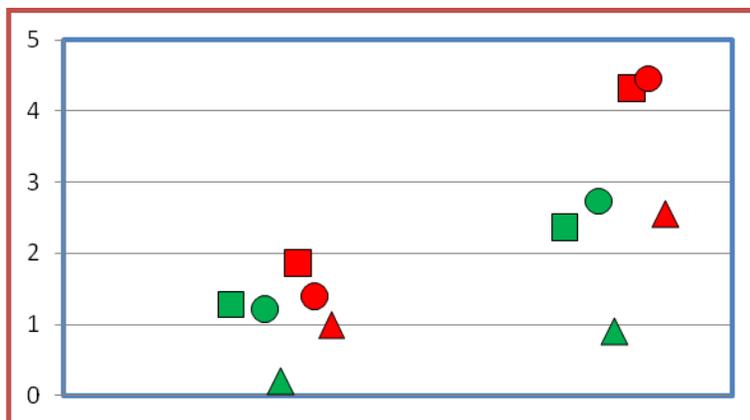


Figura 5.5.1.8: Ídem Figura 5.5.1.6, pero para el valor anual mínimo de la temperatura (°C)

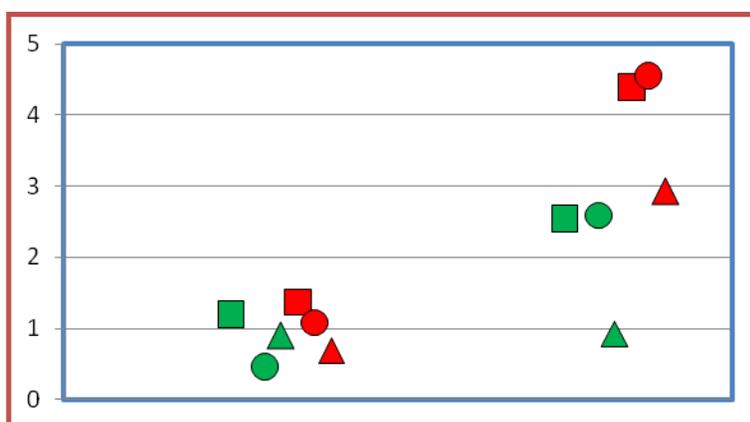


Figura 5.5.1.9: Ídem Figura 5.5.1.6, pero para el valor anual máximo de la temperatura (°C)

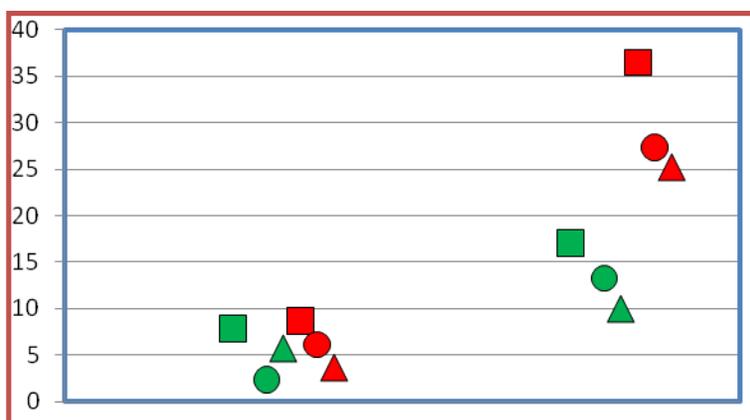


Figura 5.5.1.10: Ídem Figura 5.5.1.6, pero para el porcentaje de días con la temperatura máxima superior al percentil 90

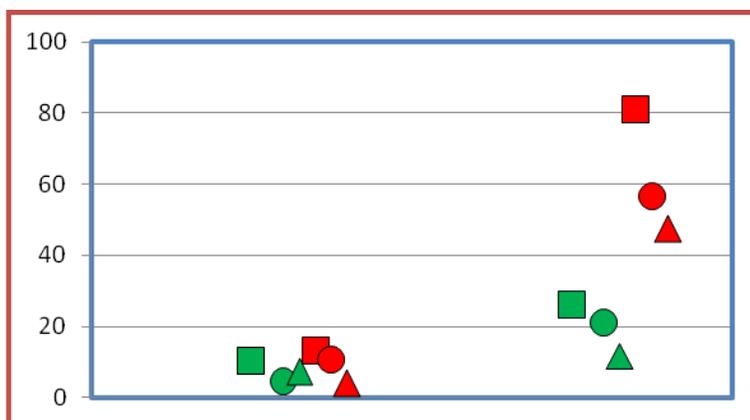


Figura 5.5.1.11: Ídem Figura 5.5.1.6, pero para los días en el año con ola de calor

5.5.2 Precipitación

Precipitación media

En el futuro cercano, el aumento en la precipitación es de apenas 0 a 6% entre los diferentes modelos y escenarios RCP y de 13% en el escenario A1B, Figura 5.5.2.1. Esto coincide con lo que se puede apreciar del promedio de los 42 MCGs del CMIP5 en la Figura 3.4.2. En consecuencia, no se debería esperar mayores cambios en la precipitación anual media regional para ese periodo, y los aumentos observados entre 1960 y 2010 no se revertirían. Para el futuro lejano en el escenario RCP8.5 se proyecta un aumento del orden del 10%, algo menor que el que resulta del promedio de los 42 MCGs del CMIP5, mientras que el modelo MRI/JMA en el escenario A1B proyecta un aumento considerable y muy distinto del resto por lo que debiera considerarse como poco probable. En consecuencia se estima que el cambio probable será positivo y algo mayor del 10%.

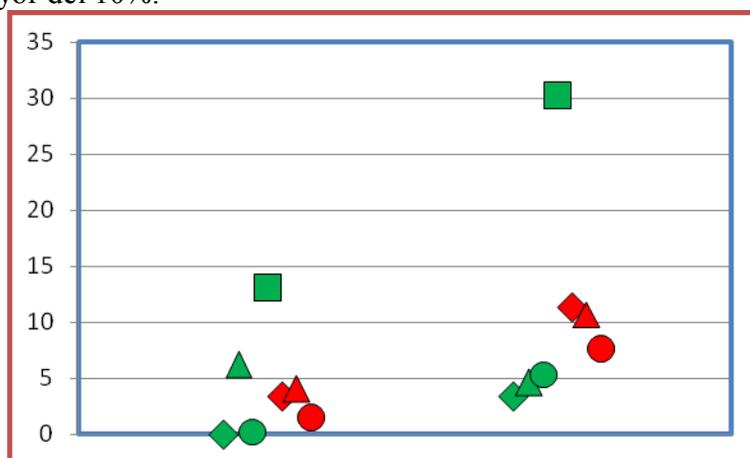


Figura 5.5.2.1: Porcentaje de cambio proyectado para la precipitación anual media regional respecto de 1981-2010. A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde escenarios RCP4.5 y A1B, en rojo RCP8.5. Modelos: CCSM4 (círculos), CMCC-CM (rombos), NorESM1-M (triángulos) y MRI/JMA (cuadrados)



Para el futuro lejano se observa en el escenario RCP8.5 cierta diferencia entre los modelos aunque es mayor la diferencia entre los cambios proyectados por los escenarios considerados. De todos modos, habría que esperar un aumento moderado de la precipitación media regional ya que en ambos escenarios y en todos los modelos se proyectan aumentos.

En el verano habría una tendencia hacia mayor precipitación con mayores cambios porcentuales en el escenario RCP8.5, y en el futuro lejano, Figura 5.5.2.2. Esto estaría indicando que la precipitación media regional del verano sería mayor en escenarios de mayor calentamiento, aunque con diferencias entre modelos apreciables. En el invierno, los cambios para el futuro cercano son pequeños y diferentes en signo tanto para el escenario RCP4.5 y como para el escenario RCP 8.5. Para el futuro lejano la dispersión entre escenarios y modelos es mayor y por lo tanto, el rango esperado de cambios estaría entre - 30 y 30%.

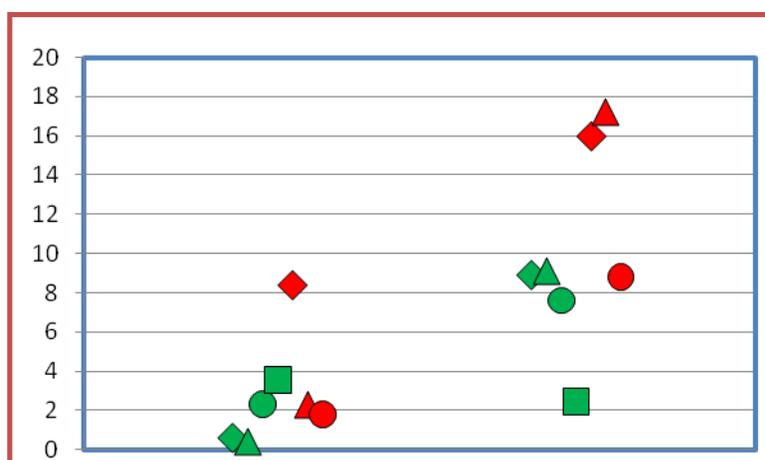


Figura 5.5.2.2: *Idem 5.5.2.1, pero para la precipitación media regional del verano (diciembre, enero y febrero)*

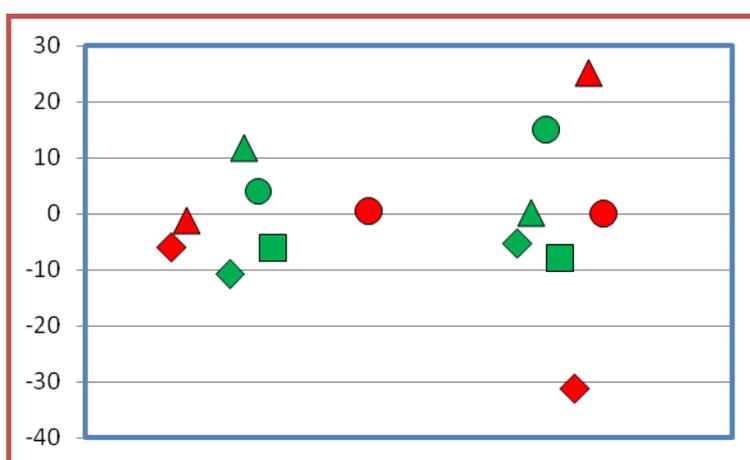


Figura 5.5.2.3: *Idem 5.5.2.1, pero para la precipitación media regional del invierno (junio, julio y agosto)*



Precipitaciones extremas

Los índices de precipitaciones extremas calculados indican que habrá una tendencia a que estas aumenten con el tiempo y en forma más pronunciada con el escenario RCP8.5, aunque con limitaciones en su cuantificación debido a la dispersión encontrada entre los resultados de los diferentes modelos. Para el futuro cercano, aunque en el promedio de todos los modelos y escenarios habría una tendencia hacia mayores extremos, algunos índices en el escenario RCP4.5 tienen diferencias nulas o incluso negativas, Figuras 5.5.2.4, 5.5.2.5 y 5.5.2.6. La longitud de los periodos secos máximos no tendrían mayores cambios en ninguno de los dos periodos futuros y en general serían de un día, Figura 5.5.2.7. Para los tres índices de precipitaciones extremas en el futuro lejano, las diferencias son siempre grandes y positivas pero con gran dispersión tanto en modelos como escenarios.

Para esta región se puede estimar que la incerteza sobre los cambios en los extremos de precipitación es pequeña con respecto del signo de los cambios. En cuanto a la magnitud de estos cambios, no es grande en el caso del futuro cercano sin importar el escenario en cuestión. Las precipitaciones máximas de un día aumentarían no mucho más de 10 mm y las acumuladas de 5 días en 20mm. Para el escenario lejano, la fuente de incerteza proviene tanto del escenario de emisiones como de los modelos.

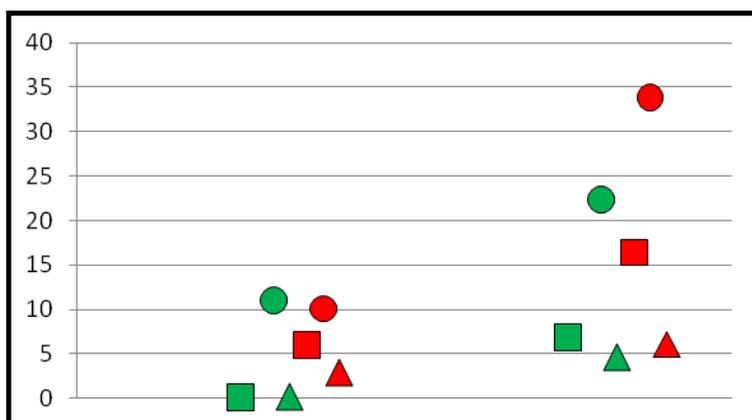


Figura 5.5.2.4: *Cambios de la precipitación diaria máxima del año (mm) con respecto al periodo 1981-2005. Modelos: CCSM4 (cuadrados), CMCC-CM (círculos) y NorES SMI-M (triángulos). A la izquierda para 2015-2039 y a la derecha para 2075-2099. En verde escenarios RCP4.5 y en rojo RCP8.5*

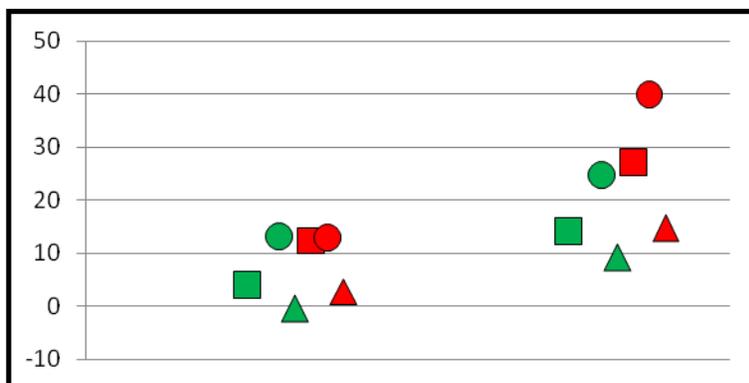


Figura 5.5.2.5: Ídem Figura 5.5.2.4, pero para cambios de la precipitación máxima anual acumulada en 5 días (mm)

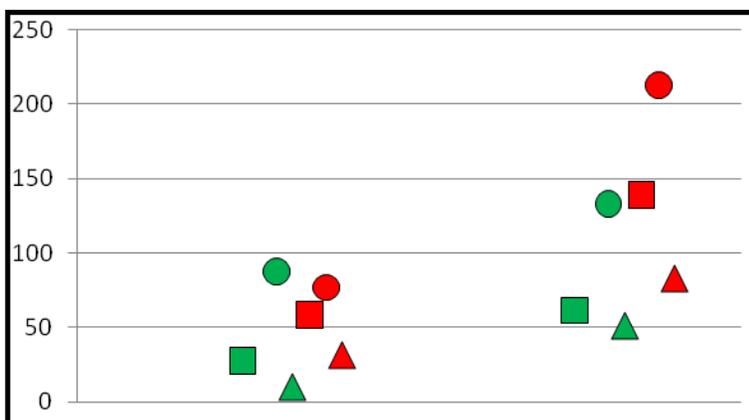


Figura 5.5.2.6: Ídem Figura 5.5.2.4, pero para la precipitación anual acumulada en eventos de precipitación intensa (mayores al percentil 95) (mm)

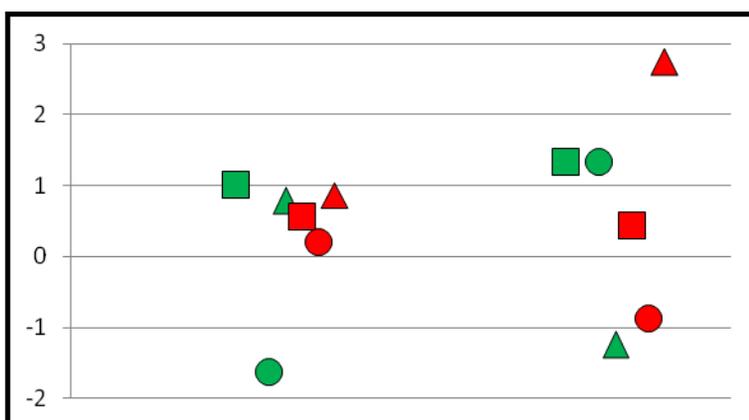


Figura 5.5.2.7: Ídem Figura 5.5.2.4, pero para el número máximo anual de días consecutivos secos



5.6 CONCLUSIONES

La temperatura y la precipitación media anual han aumentado en toda la región Húmeda desde el comienzo de la segunda mitad del siglo pasado. **(Confianza media)**

En el caso de la temperatura, este aumento se produjo en la temperatura mínima diaria, mientras que en la máxima los cambios fueron muy pequeños y heterogéneos dentro de la región, e incluso negativos en áreas con fuerte aumento de la precipitación. Esto es un indicador de que el calentamiento de esta región habría estado generado en buena medida por el aumento de los gases de efecto invernadero, aunque regionalmente modulado por otros procesos como los relacionados con la lluvia o con cambios en la circulación atmosférica. Igualmente los indicadores de extremos, como aquellos asociados con heladas u olas de calor han cambiado en forma consistente con la temperatura media, evidenciando también el calentamiento regional. **(Confianza alta)**

La precipitación media anual aumentó en casi toda la región y en muchas zonas en forma estadísticamente significativa. La significancia de este aumento crece con el agregado de los datos por subregiones, de modo que en las tres subregiones consideradas en este estudio los resultados son significativos al 95% **(confianza alta)**. El aumento se produjo en todas las estaciones del año, excepto en el invierno en el que prácticamente hubo una disminución de la precipitación, que en el promedio regional fue estadísticamente significativo. Los indicadores de extremos que se asocian con potenciales desastres por inundaciones cambiaron consistentemente con las mayores precipitaciones lo que se evidenció más claramente con los valores acumulados; esto es en 5 días en el caso aquí presentado y en un mes (Doyle y otros 2012). Otros indicadores de extremos mostraron aumentos en las lluvias extremas y una disminución de la duración de los períodos secos máximos anuales.

Para el siglo XXI, no se debería esperar más de 1°C de calentamiento en el futuro cercano para el promedio regional. Hacia fin de siglo el cambio proyectado es diferente según el escenario; en el escenario RCP4.5 estaría entre 0,5 y 1°C y en el RCP8.5 entre 2,5°C y algo más de 3,5°. **(Confianza media)**

En el futuro cercano, la precipitación media regional no tendría mayores cambios y con bastante certeza no se revertiría el aumento registrada entre 1960-2010 **(confianza alta)**. Para el futuro lejano y en el escenario RCP8.5 habría un aumento del orden del 10%, pero existe un grado de incerteza asociado con los modelos, por lo que no habría que descartar aumentos aún mayores. **(Confianza media)**

Los índices calculados indican que habrá una tendencia a que las precipitaciones extremas aumenten con el tiempo y en forma más pronunciada con el escenario RCP8.5. Para el futuro cercano, aunque también habría una tendencia general hacia mayores precipitaciones extremas en casi todos los modelos y escenarios, en algunos casos las diferencias con respecto al presente son casi nulas o incluso negativas.



Resumiendo, el calentamiento regional observado entre 1960 y 2010 se aceleraría en el siglo XXI y el aumento de la precipitación registrado en ese periodo no se revertiría y por el contrario habría una tendencia hacia mayores precipitaciones extremas, aunque todavía con cierta incerteza en cuanto a la magnitud del cambio. (*Confianza media*)

Referencias

Barros, V., M. E. Castañeda y M. Doyle, 2000. Recent precipitation trends in Southern South America to the East of the Andes: an indication of a mode of climatic variability, 2000, Capitulo del libro Southern Hemisphere Paleo and Neoclimates, Concepts, Methods, Problems, *Springer*.

Barros, V., M. E. Doyle e I. A. Camilloni, 2008: Precipitation trends in southeastern South America: relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theor. Appl. Climatol.*, **93**, 19–33.

Barros, V., C. Garavaglia and M. Doyle, 2013: Twenty First century Projections of Extreme Precipitations in the Plata basin. *International Journal of River Basin Management*, **11**. 373-381.

Boulanger, J. P., O. Penalba, M. Rusticucci, F. Lafon y W. Vargas, 2005: Observed precipitation in the Parana-Plata hydrological basin: long-term trends, extreme conditions and ENSO teleconnections, *Climate Dynamics*, **24**, 393–413.

Camilloni, I. y V. Barros, 1995: Influencia de la isla urbana de calor en la estimación de las tendencias seculares en Argentina Subtropical, *Geofísica Internacional*, **4**, 161–170.

Castañeda, E. y V. Barros, 1994: Las tendencias de la precipitación en el Cono sur de América al este de los Andes, *Meteorológica*, **19**, 23–32.

Doyle, M., R. Saurral y V. Barros, 2012: Trends in the distributions of aggregated monthly precipitation over the La Plata Basin. *Int. J. Climatol.*, **32**, 2149–2162.

Escobar, G., I. Camilloni y V. Barros, 2003: Desplazamiento del anticiclón subtropical del Atlántico Sur y su relación con el cambio de vientos sobre el estuario del Río de la Plata. *X Congreso latinoamericano e Ibérico de Meteorología*, La Habana, Cuba. (CD-ROM).

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

Haylock, M. R., T. Peterson, J. R. Abreu de Sousa, L. M. Alves, T. Ambrizzi, Y. M. Anunciação, J. Baez, J. I. Barbosa de Brito, V. R. Barros, M. A. Berlato, M. Bidegain, G. Coronel, V. Corradi, V. J. Garcia, A. M. Grimm, R. Jaildo dos Anjos, D. Karoly, J. A. Marengo, M. B. Marino, P. R. Meira, G. C. Miranda, L. Molion, D. F. Moncunill, D. Nechet, G. Ontaneda, J. Quintana, E. Ramirez, E. Rebello, M. Rusticucci, J. I. Santos, L. Trebejo y L. Vincent, 2006: Trends in Total



and Extreme South American Rainfall in 1960–2000 and Links with Sea Surface Temperature, *J. Climate*, **19**, 1490–1512.

IPCC Chapter 2. Hartmann, D. L., A. M. Klein Tank, M. Rusticucci, L. V. Alexander, S. Brönnimann, Y. Charabi, F. J. Dentener, E. J. Dlugokencky, D. R. Easterling, A. Kaplan, B. J. Soden, P. W. Thorne, M. Wild y P. M. Zhai, 2013: Observations: Atmosphere and Surface. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC 2013: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T. F., D. Qin, G.K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Mezher, R., M. Doyle y V. Barros, 2012: Climatology of hail in Argentina, *Atmospheric Research*, **114–115**, 70–82.

Penalba, O.C. y F. Robledo 2010: Spatial and temporal variability of the frequency of extreme daily rainfall regime in the La Plata Basin during the 20th century. *Climatic Change*, **98**, 531–550.

Re, M. y V. Barros, 2009: Extreme rainfalls in SE South America, *Climatic Change*, **96**, 119–136.

Rusticucci, M. y M. Barrucand, 2004: Observed trends and changes in temperature extremes over Argentina. *J. Climate*, 4099–4107.

Schneider, U., 2013: GPCP's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle. *Theoretical and Applied Climatology*, **115**, 15–40.

Simionato, C., C. Vera y F. Siegesmund, 2004: Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Rio de La Plata. *Continental Shelf Research*, **17(7)**, 770.783..