

EVALUACIÓN Y APLICACIÓN DE UN
PROCEDIMIENTO ESTADÍSTICO PARA LA
GENERACIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS
DE TEMPERATURA A ESCALA DIARIA Y
LOCAL

María Escorihuela Sahún

Máster en Modelización Matemática, Estadística y Computación

Septiembre 2012

Dirigido por: Dr. Jesús Abaurrea León
Dra. Ana Carmen Cebrián Guajardo

FACULTAD DE CIENCIAS

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA



Universidad
Zaragoza

Evaluación y aplicación de un procedimiento estadístico para la generación de escenarios futuros de temperatura a escala diaria y local

Resumen

El objetivo de este trabajo es aplicar un procedimiento de downscaling estadístico a las series de temperatura máxima y mínima diarias de 10 observatorios de la Península Ibérica en tres escenarios de cambio climático, así como analizar los cambios previstos respecto al clima presente.

El primer paso del procedimiento de downscaling es seleccionar las trayectorias válidas de la temperatura diaria proporcionadas por los modelos de circulación general. Esta selección se realiza en base a la calidad con que dichas trayectorias reproducen la climatología observada de los observatorios en el periodo 1971-2000, tanto respecto a la distribución global como respecto a la parte central y las colas de la distribución.

Con las trayectorias seleccionadas se obtienen las proyecciones de los valores medios mensuales de las series de temperatura para 2031-60 en los escenarios A1B, A2 y B1. Finalmente, para obtener una única proyección mensual que resuma de forma robusta el cambio previsto para cada observatorio y escenario, se calcula una media ponderada del haz de proyecciones correspondiente a las trayectorias obtenidas en cada caso.

Los resultados muestran un aumento del valor medio de las temperaturas para el periodo 2031-2060, en todos las regiones y en todos los escenarios.

Abstract

The objective of this work is to apply a statistical downscaling procedure

to daily maximum and minimum temperature series in 10 observatories of the Iberian Peninsula under three climate change scenarios. We also analyze the corresponding expected changes with regard to the current climate

The first step of the procedure is to select the temperature trajectories provided by general circulation models. This selection is based on the capacity of the trajectories for reproducing the observed climatology in the period 1971-2000. The global distribution, as well as the tails and the central part of the distribution are analysed in the selection process.

Using the selected trajectories, projections of the mean monthly temperature for the period 2031-60 are obtained under scenarios A1B, A2 and B1. Finally, to obtain a single projection which summarizes the predicted change for each observatory and scenario, a weighted mean of the projections obtained in each case is calculated.

The results show an increase in the average value of the temperatures for the period 2031-2060, in all regions and in all settings.

Índice general

1. Introducción	8
2. Presentación de los datos	10
3. Metodología	13
3.1. Metodología	13
3.1.1. Selección de trayectorias	13
3.1.2. Proyección de los valores medios mensuales de Tmax y Tmin para 2031-60	14
3.1.3. Cálculo de la media ponderada de las proyecciones	14
4. Resultados	16
4.1. Selección de trayectorias	16
4.1.1. Análisis del grado de reproducción de la distribución en los GCM	16
4.1.2. Análisis de la reproducción de la climatología local que logran las trayectorias GCM-20c3M una vez reescaladas	17
4.1.3. Análisis de la reproducción de los datos extremos para Tmax y Tmin	20
4.2. Proyección de los valores medios mensuales de Tmax y Tmin en 2031-60 en tres escenarios de cambio climático	21
4.2.1. Obtención de las proyecciones para el valor medio en Zaragoza . .	22
4.2.2. Obtención de las proyecciones para el valor medio en todos los observatorios	25
5. Conclusiones	26
Bibliografía	28

Índice de figuras

2.1. Observatorios en estudio en la Península Ibérica	10
4.1. Sup. Sesgo en la mediana y en el IQR en cada mes y suavizados del valor medio diario de la serie de Tmax observada en Zaragoza y de la generada por CGCM3.1 en su nodo más próximo. Inf. izda. Diagrama de caja, por meses, de los datos de Tmax observados y de los generados por el GCM.	17
4.2. Sup. Diagramas de caja, por meses, de Tmax diaria en Zaragoza, izda., y de la trayectoria CGCM3.1 reescalada, dcha. Inf. Comparación de los percentiles 5, 50 y 95 mensuales en las dos distribuciones y diagrama de los sesgos cometidos, por meses.	18
4.3. Perfil anual de los valores medios mensuales de Tmax en Zaragoza, 1971-2000 (línea continua) y valores medios proyectados 2031-60 en el escenario A1B por las distintas trayectorias GCM.La línea de puntos indica el perfil anual de los valores medios ponderados 2031-60, sin incluir la proyección de MIROC.	23

Índice de tablas

2.1. Percentiles 25 (Q1) y 75 (Q3) y valor medio de las series diarias de temperatura máxima de los observatorios estudiados. Para la submuestra de veranos (JJA) e invierno (DEF) se muestran los valores máximo, medio y mínimo	11
2.2. Análisis descriptivo de las series diarias de temperatura mínima observada de los observatorios estudiados	12
4.1. Estadísticos de los datos de Tmax en Zaragoza y en la trayectoria CGCM3.1 en su nodo más próximo. p-valores del test KS de comparación de distribuciones en las series observada y simulada, en las series de anomalías y en las de anomalías estandarizadas.	18
4.2. Estadísticos de los datos de Tmax en Zaragoza, y de los de la trayectoria CGCM3.1 reescalada y sesgos correspondientes	19
4.3. Resultados de la comparación, para Tmax en Zaragoza, de las distribuciones de las colas definidas por los percentiles p_5 , p_{10} , p_{90} y p_{95} , en las muestras procedentes de las trayectorias 20c3M reescaladas y de la serie observada, partiendo de las anomalías y de las anomalías tipificadas. Para las trayectorias seleccionadas se muestra el número de meses de cada estación que presentan un p-valor en el test KS no inferior a 0.10, 0.05 y 0.01.	20
4.4. Número de combinaciones observatorio–variable–estación–trayectoria con un p-valor no inferior a 0.01 en los tests KS de comparación de las distribuciones más allá de los percentiles p_{10} y p_5 , simultáneamente y para cada mes de la estación (número a la izquierda del símbolo "/"). A la derecha lo mismo para los tests KS aplicados a las colas definidas por p_{90} y p_{95} . .	21
4.5. Número de trayectorias (de 7) que superan los filtros de la fase de selección y sirven para proyectar los valores medios mensuales de Tmax y Tmin. .	22

4.6. Valores medios mensuales observados en Zaragoza en el periodo 1971–2000, valores proyectados 2031–2060 y cambio asociado en el escenario A1B, según los GCM útiles para ese observatorio y variable y valor medio ponderado.	23
4.7. Cambio proyectado en Zaragoza, en el escenario A1B, para la media recortada al 25 %, los cuartiles Q1 y Q3, y el rango intercuartílico de las variables Tmax y Tmin	24
4.8. Cambio proyectado, por estaciones, en el valor medio de Tmax para los 10 observatorios.	24
4.9. Cambio proyectado, por estaciones, en el valor medio de Tmin para los 10 observatorios.	24

Capítulo 1

Introducción

El objetivo de este trabajo es aplicar el procedimiento de downscaling estadístico propuesto por Abaurrea et al. (2012) en varias localidades de la Península Ibérica. Este procedimiento permite obtener proyecciones verosímiles de la temperatura máxima y mínima diaria en el periodo 2031–2060 para hacer una evaluación del cambio esperado de temperatura.

Los Modelos de Circulación General (GCM) son modelos físico -matemáticos basados en la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales que describen la dinámica de los procesos e interacciones que tienen lugar en los subsistemas del sistema climático, la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, lo que permite simular la evolución del clima, IPCC(2007). Los GCM permiten también obtener proyecciones a medio y largo plazo de la evolución de variables como la temperatura o la precipitación, en una rejilla de puntos que cubre el globo terráqueo. Estas proyecciones se ven afectadas por el comportamiento humano, en particular por las emisiones de gases de efecto invernadero(GEI), que son el resultado de fuerzas tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socio-económico o el cambio tecnológico. Por este motivo los GCM proporcionan proyecciones sobre la evolución del clima, suponiendo diferentes modos de evolución de los GEI, son los llamados escenarios de cambio climático.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC) ha desarrollado varios escenarios de emisiones a largo plazo. Estos escenarios son hipótesis alternativas sobre lo que puede acontecer con las emisiones futuras de GEI. En este trabajo se proyectan los datos en los escenarios:

1. A1B, que describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico y una rápida introducción de las nuevas tecnologías así como una convergencia entre las

diferentes regiones y una población mundial que alcanza su valor máximo a mitad de siglo XXI.

2. A2, que describe un mundo muy heterogéneo en cuanto al desarrollo, con una población mundial en continuo crecimiento.
3. B1, que describe un mundo con un desarrollo convergente, con una evolución de la población mundial como en el escenario A1B y con rápidos cambios en las estructuras económicas orientados a una introducción de las tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos.

Los GCM son una herramienta muy importante para realizar proyecciones climáticas, pero tienen algunas limitaciones, entre otras, su escasa resolución espacial. Sus proyecciones proporcionan valores medios que suponen una buena aproximación para áreas bastante extensas pero que resultan inadecuados para ser utilizados a escala regional o local, áreas de interés para el estudio de los impactos del cambio climático, Errasti et al. (2011).

Existen varios procedimientos para mejorar la resolución espacial de los GCM, adaptando las proyecciones a las características regionales. Uno de los procedimientos que proporcionan mejores resultados son los modelos estadísticos de downscaling o reducción de escala, Brands et al. (2011), Fowler et al. (2007), Haerter et al. (2011), Themeßl et al. (2012) .

En este trabajo se aplica un procedimiento estadístico de downscaling para las variables temperatura máxima y mínima diaria (Tmax y Tmin) a escala local. El método se basa en corregir, con respecto a los valores de temperatura observados en el punto de interés, los sesgos en el nivel medio y en la variabilidad de la trayectoria generada, en las condiciones siglo XX (20c3M) por un modelo de circulación global en el nodo más próximo de su rejilla.

La memoria está estructurada en los siguientes 4 capítulos. El capítulo 2 presenta los datos observados y procedentes de GCM. El capítulo 3 se dedica a establecer la metodología de selección y validación de las trayectorias útiles y el procedimiento para obtener proyecciones de escenarios. Los resultados en 10 observatorios peninsulares se presentan en el capítulo 4. Por último el capítulo 5 recoge las principales conclusiones.

Capítulo 2

Presentación de los datos

Se han considerado 9 localidades españolas y una portuguesa. Las series de temperatura de las localidades españolas se han tomado de la base de datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Las series de Braganza, Portugal, se han descargado desde la página de ECA (European Climate Assessment And Dataset).

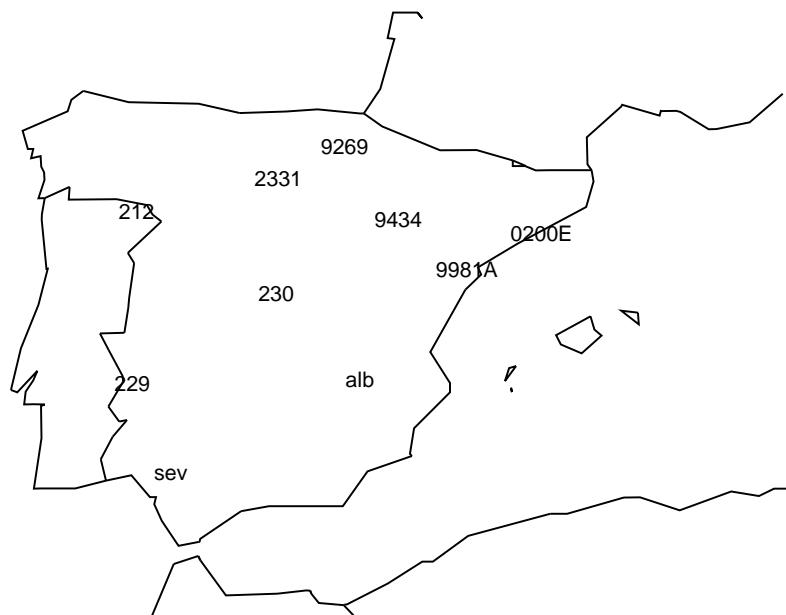


Figura 2.1: Observatorios en estudio en la Península Ibérica

En la figura 2.1 pueden verse, sobre la Península Ibérica, las posiciones de los 10 observatorios tomadas como referencia, que representan los distintos climas peninsulares: atlántico, mediterráneo y continental.

Tmax					JJA			DEF		
IND	Nombre	Q1	Media	Q3	Min	Media	Max	Min	Media	Max
alb	Albacete	12.6	20.1	27.6	15	30.7	42.6	-4.8	11	23.6
9269	Alsasua	10.0	16.1	22.0	8	23.8	40	-5	8.8	22
229	Badajoz	16.6	23.4	30.2	15.4	32.9	44.4	1.4	14.7	25.6
bcn	Barcelona	13.2	18.0	24	12.8	26.9	39.8	-1.8	11.6	21.2
2331	Burgos	9.4	15.9	22.2	9	25.1	38	-5	7.6	21.2
230	Madrid	12.4	19.5	26.5	13	29.6	40	1.1	10.5	21
sev	Sevilla	18.5	24.9	31.2	17.4	33.8	46.6	4.2	16.7	27.6
9981A	Tortosa	17.2	22.6	28.4	15.5	30.4	43	2.6	15.3	25.6
9434	Zaragoza	13.8	20.2	27.1	14	30.1	42.6	-1.4	11.4	22.5
212	Braganza	11.4	17.9	24.3	10.6	27.2	38.8	-2.8	9.6	20.4

Tabla 2.1: Percentiles 25 (Q1) y 75 (Q3) y valor medio de las series diarias de temperatura máxima de los observatorios estudiados. Para la submuestra de veranos (JJA) e invierno (DEF) se muestran los valores máximo, medio y mínimo

En la tabla 2.1 se muestran los resultados de un análisis descriptivo de temperatura máxima diaria. Para el conjunto del año, en media, la temperatura más baja corresponde a Burgos, mientras que la más alta la encontramos en Sevilla. En los meses de verano (JJA) la temperatura media más elevada se observa en Badajoz y Sevilla, y en los meses de invierno (DEF) las temperaturas más bajas se alcanzan en Alsasua y Burgos.

En la tabla 2.2 se muestran los resultados de los datos de la temperatura mínima. En media, la temperatura más baja corresponde a Burgos, mientras que la temperatura más alta la encontramos en Sevilla, al igual que ocurre en la temperatura máxima. En los meses de verano la temperatura más alta se observa en Barcelona y Sevilla, y en los de invierno las temperaturas más bajas se alcanzan en Albacete y Burgos.

Los modelos de circulación general (GCM) utilizados de soporte han sido: ECHAM5 del que utilizamos sus trayectorias r1, r3 y r4, su resolución es de 1.875° , CGCM3.1 2.8° , MIROC3.2 hires 1.125° , HADGEM longitud 1.875° y latitud 1.25° , CNRM3 2.8° .

Tmin					JJA			DEF		
IND	Nombre	Q1	Media	Q3	Min	Media	Max	Min	Media	Max
alb	Albacete	2	7.2	13	4	14.9	22.3	-24	0.5	12.6
9269	Alsasua	2	6.6	11	0.0	12.2	25	-16.5	1.7	15
229	Badajoz	5.8	9.9	14.6	6.8	16.1	26	-6.6	4.2	15.4
bcn	Barcelona	6.8	10.6	15.8	1.6	17.8	27.2	-7.2	5.8	15
2331	Burgos	0.2	4.4	8.8	0.0	10.2	20.8	-22.0	-0.5	10.2
230	Madrid	4.8	9.7	15	4.4	17.3	25.4	-7.4	3.4	12
sev	Sevilla	8	12.2	17	8.4	18.5	27	-4.8	6.2	17
9981A	Tortosa	7.5	12.1	17	9.2	18.9	17	-3.3	6.1	20.6
9434	Zaragoza	4.8	9.5	14.8	5.2	16.8	24.3	-10.4	3.1	17.2
212	Braganza	2.3	6.7	11.2	3.4	13.1	23.9	-11.6	1.1	12.2

Tabla 2.2: Análisis descriptivo de las series diarias de temperatura mínima observada de los observatorios estudiados

Capítulo 3

Metodología

3.1. Metodología

El método de downscaling aplicado en este trabajo, véase Abaurrea et al. (2012) consta de tres fases. Primero se seleccionan las trayectorias 20c3M de los GCM que reproducen adecuadamente la climatología observada en cada estación y en cada mes. En segundo lugar, con las trayectorias de los GCM seleccionadas, se calculan las proyecciones de la temperatura máxima (T_{max}) y la temperatura mínima (T_{min}) para el periodo 2030-60 y se estiman los cambios proyectados en las señales de temperatura. En tercer lugar, y con el fin de obtener estimaciones más fiables de estos cambios, se calcula una media ponderada de las diferentes proyecciones obtenidas para cada estación y señal de temperatura.

3.1.1. Selección de trayectorias

Para evaluar la capacidad de las trayectorias GCM para reproducir la climatología de T_{max} y T_{min} en cada observatorio, se compara, para cada mes, los datos observados y los generados en el nodo más cercano al observatorio, en el periodo 1971-2000. Se comparan tres señales, las variables originales, sus anomalías (desviaciones a la media) y sus anomalías estandarizadas, al objeto de comprobar si, una vez descontados los posibles sesgos del GCM al reproducir el valor medio y la variabilidad, la distribución de sus datos es similar a la observada.

Para que una trayectoria de un GCM para un mes y una señal dadas sea considerada verosímil y por lo tanto seleccionada debe verificar tres controles.

1.- Un análisis global de igualdad de distribuciones basado en un test Kolmogorov-Smirnov (KS) con un nivel de significación $\alpha = 0,01$.

2.- Un análisis de igualdad de distribuciones en las colas definidas por los percentiles 5,10,

90 y 95 también basado en un test KS con un nivel de significación $\alpha = 0,01$.

Las trayectorias que se rechazan en el paso 2 no son válidas para hacer proyecciones verosímiles de los valores diarios pero si se pueden utilizar para obtener proyecciones de valores medios de temperatura si verifican el tercer control.

3.- Un análisis más estricto de la igualdad de la distribución global basado en un test KS aplicado por estaciones. Además se realiza un análisis específico de la reproducción de la parte central de la distribución. Una trayectoria se considera válida si el valor absoluto del sesgo no excede $0.4^{\circ}C$ en la media y $0.8^{\circ}C$ en los percentiles 25 (Q1) y 75 (Q3).

Si para una localidad, variable y estación del año, más de una señal entre la variable original, la anomalía y la anomalía estandarizada verifica los criterios anteriores, se utiliza aquélla que minimiza la distancia:

$$\text{Distancia} = |\text{bias.p25}-\text{bias.mean}| + 2|\text{bias.mean}| + |\text{bias.p75}-\text{bias.mean}| \quad (1)$$

donde bias.mean, bias.p25 y bias.p75 son los sesgos observados en la media y el percentil 25 y 75 respectivamente.

3.1.2. Proyección de los valores medios mensuales de Tmax y Tmin para 2031-60

Si una trayectoria GCM es considerada válida (es decir si ha pasado los controles anteriores correspondientes), el primer paso es estandarizar la correspondiente serie 2031-60 con la transformación que le corresponda (anomalía o anomalía estandarizada) utilizando el valor medio y la desviación típica diaria del periodo 1971-2000 en la trayectoria 20c3M del GCM. A continuación, dicha serie de anomalías se reescala usando los valores medios y las desviaciones típicas diarias del periodo 1971-2000 en la serie observada. De esta forma, se obtiene la trayectoria siglo XXI escalada al observatorio de interés. Finalmente, los valores medios mensuales proyectados para el periodo 2031-60 se calculan como la media recortada al 25 % de la serie anterior.

3.1.3. Cálculo de la media ponderada de las proyecciones

Con el procedimiento anterior se obtienen los cambios proyectados en los valores medios de Tmax y Tmin para cada observatorio, mes y escenario. Es decir, en cada caso se obtiene un haz de proyecciones formado por tantos valores como trayectorias GCM se hayan considerado válidas en el control anterior. Para calcular un único valor que resuma de forma robusta el cambio previsto, se define un valor medio ponderado, aplicando una estructura de pesos basada en la distancia (1). Estos pesos representan la capacidad de

cada GCM para reproducir la climatología de esa señal en el siglo XX.

La obtención de una única proyección mensual para cada observatorio bajo un escenario dado facilita la comparación de los resultados esperados bajo los distintos escenarios y el análisis de las diferencias entre los distintos climas (observatorios).

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo se muestran como ejemplo, con algún detalle, los resultados relativos a Zaragoza. De manera más agregada y resumida se indican algunos resultados obtenidos en el resto de observatorios.

4.1. Selección de trayectorias

4.1.1. Análisis del grado de reproducción de la distribución en los GCM

Tal y como se ha descrito al explicar metodología, el análisis comparativo entre la trayectoria GCM y la serie observada se apoya y puede visualizarse en gráficos como el del perfil del valor medio a lo largo del año, el de los sesgos cometidos al reproducir la mediana y el rango intercuartilico (IQR) y en el análisis de diagramas de cajas o qqplots.

La figura 4.1 muestra algunos de estos gráficos para la comparación del registro 1971-2000 de Tmax en la estación 9434, Zaragoza Aeropuerto, con la serie correspondiente del modelo CGCM3.1-20c3M en su punto de malla más próximo, 1.9W-42N. Resulta evidente la existencia de sesgos en el valor medio (del orden de 3 °C) y en la variabilidad (del orden del 20 % en el sesgo del IQR en varios meses)

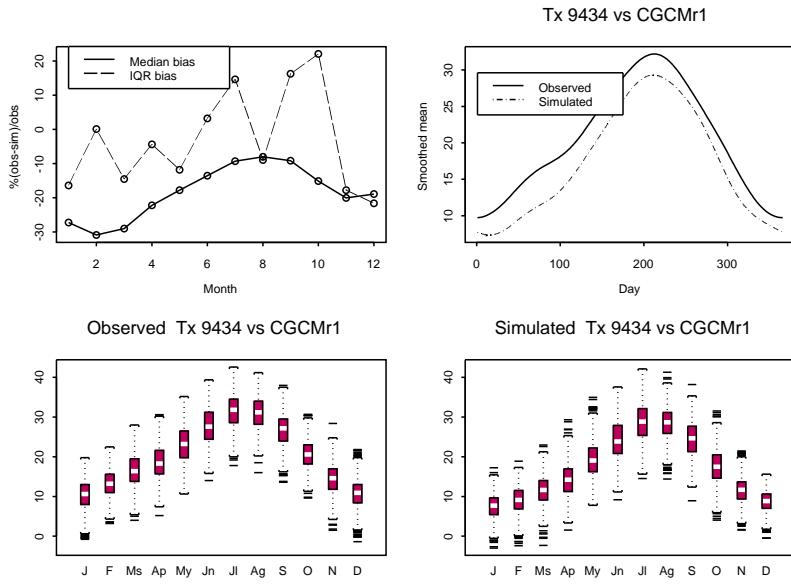


Figura 4.1: Sup. Sesgo en la mediana y en el IQR en cada mes y suavizados del valor medio diario de la serie de Tmax observada en Zaragoza y de la generada por CGCM3.1 en su nodo más próximo. Inf. izda. Diagrama de caja, por meses, de los datos de Tmax observados y de los generados por el GCM.

4.1.2. Análisis de la reproducción de la climatología local que logran las trayectorias GCM-20c3M una vez reescaladas

En la figura 4.2 se muestran los diagramas de caja mensuales de los datos de Tmax en Zaragoza y los correspondientes a la serie reescalada (desde la anomalía estandarizada) de la trayectoria CGCM3.1-20c3M. Al compararlos con los de la figura 4.1 se aprecia la mejora que produce el proceso de reescalado. En la parte inferior de 4.2 se comparan los percentiles 5, 50 y 95, mensuales (izda.) y el tamaño del sesgo cometido en su reproducción (dcha.), apreciándose valores inferiores a 1°C en los percentiles 5 y 95 en todos los meses.

En la tabla 4.1 se muestran un conjunto de estadísticos para los datos observados en las columnas pares y para los valores simulados en las columnas impares. En las columnas impares de las tres filas finales, aparecen los p-valores del test KS para la comparación de la distribución global, en los datos observados y simulados, en sus anomalías y, por último, en sus anomalías estandarizadas.

En el análisis comparativo de la serie de Tmax en Zaragoza y de la trayectoria CGCM3.1 reescalada, vemos que en los meses de Enero Febrero y Marzo los p-valores del test KS son mayores que 0.05, primera línea de la Tabla 4.2. La misma Tabla compara los valores de ocho estadísticos (media, stdev, p05, p10, p25, p75, p90 y p95) en la distribución

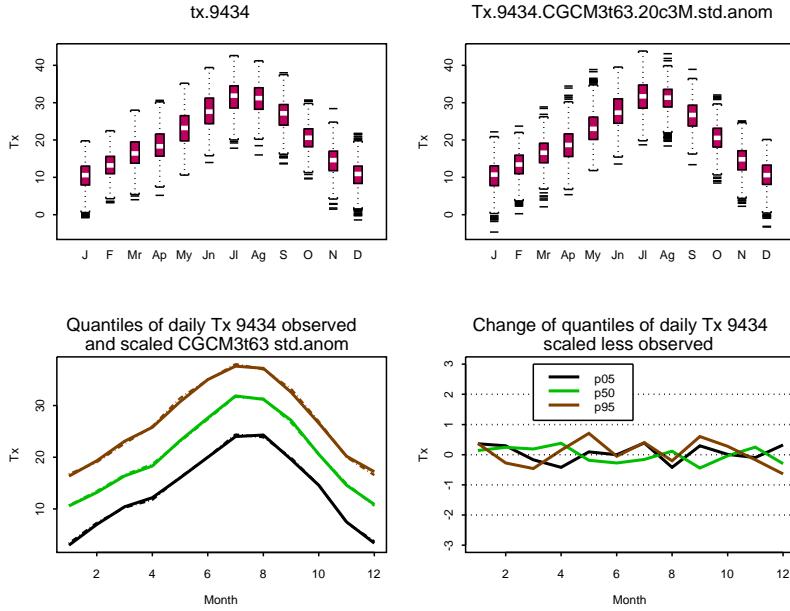


Figura 4.2: Sup. Diagramas de caja, por meses, de Tmax diaria en Zaragoza, izda., y de la trayectoria CGCM3.1 reescalada, dcha. Inf. Comparación de los percentiles 5, 50 y 95 mensuales en las dos distribuciones y diagrama de los sesgos cometidos, por meses.

	Enero		Febrero		Marzo	
	Obs.	GCM escalada	Obs.	GCM escalada	Obs.	GCM escalada
Mean	10.295	7.507	13.262	9.011	16.56	11.571
Min	-0.8	-3.01	3.2	-2.419	4	-2.315
p05	3	2.16	7	3.269	10.44	5.706
p50	10.6	7.708	13.2	9.117	16.4	11.64
p75	13	9.642	15.6	11.497	19.5	14.019
p95	16.355	12.426	19.33	14.372	23.1	17.237
Max	19.8	17.242	22.5	18.908	28	22.962
KS distr. pv		0		0		0
Anom KS distr. pv		0.063		0.657		0.1
St anom KS distr. pv		0.73		0.621		0.294

Tabla 4.1: Estadísticos de los datos de Tmax en Zaragoza y en la trayectoria CGCM3.1 en su nodo más próximo. p-valores del test KS de comparación de distribuciones en las series observada y simulada, en las series de anomalías y en las de anomalías estandarizadas.

	J	F	Mr
pv KS obs/scaled sim variables	0.574	0.397	0.292
Observed Mean (C)	10.3	13.3	16.6
Scaled CGCM3t63 20c3M	10.4	13.3	16.5
Mean (C) bias	0.1	0	0
Observed Stdev	4	3.6	4
Scaled CGCM3t63 20c3M	4.1	3.6	3.9
Stdev bias	0.1	0	-0.1
Observed p05 (C)	3	7	10.4
Scaled CGCM3t63 20c3M	3.4	7.3	10.3
p05 (C) bias	0.4	0.3	-0.2
Observed p10 (C)	4.8	8.3	11.7
Scaled CGCM3t63 20c3M	4.9	8.4	11.5
p10 (C) bias	0.1	0.1	-0.2
Observed p25 (C)	8	11	13.8
Scaled CGCM3t63 20c3M	7.8	11	13.9
p25 (C) bias	-0.2	0	0.1
Observed p75 (C)	13	15.6	19.5
Scaled CGCM3t63 20c3M	13.1	15.9	19.1
p75 (C) bias	0.1	0.3	-0.4
Observed p90 (C)	15	18.2	21.8
Scaled CGCM3t63 20c3M	15.3	17.8	21.4
p90 (C) bias	0.3	-0.4	-0.4
Observed p95 (C)	16.4	19.3	23.1
Scaled CGCM3t63 20c3M	16.7	19.1	22.6
p95 (C) bias	0.4	-0.3	-0.5

Tabla 4.2: Estadísticos de los datos de Tmax en Zaragoza, y de los de la trayectoria CGCM3.1 reescalada y sesgos correspondientes

observada y en la trayectoria reescalada y el sesgo correspondiente expresado en °C o en % en el caso de la desviación típica. En esos tres meses la reproducción de la distribución es adecuada y verifica los criterios señalados para superar el segundo filtro.

4.1.3. Análisis de la reproducción de los datos extremos para Tmax y Tmin

En la tabla 4.3, para cada estación del año y cada trayectoria, se muestran en la primera terna de números y separados por comas, el número de meses donde el p–valor del test KS que compara la distribución de los datos extremos es, al menos, 0.10, 0.05 y 0.01 en el test aplicado a la cola del percentil 5. Las siguientes ternas corresponden al resultado de los tests para las colas correspondientes a p10, p90 y p95. Vemos que los mejores resultados, en el caso de Tmax, los encontramos en los meses de verano pero que se está lejos de tener una buena representación de la distribución observada en los valores extremos.

Zaragoza	Spring	Summer	Autumn	Winter
E5.run1.Tx.anom	—	1,1,1-2,2,2-1,1,2-1,1,1	—	—
E5.run1.Tx.stdan	0,1,1-1,1,1-2,2-2,2,2	1,1,2-2,2,2-2,2,3-2,2,3	1,1,1-1,1,2-2,2,2-0,0,1	—
E5.run3.Tx.anom	—	—	—	—
E5.run3.Tx.stdan	1,1,1-0,0,1-0,0,0-1,1,2	1,2,2-2,2,3-0,1,2-3,3,3	—	0,0,0-0,0,0-0,0,0-1,1,1
E5.run4.Tx.anom	—	0,0,0-1,1,1-2,2,2-0,0,1	—	—
E5.run4.Tx.stdan	1,1,1-1,2,2-2,3,3-1,1,1	0,0,3-2,3,3-2,3,3-3,3,3	1,1,1-1,1,2-2,2,2-0,0,1	0,0,0-1,1,1-1,2,2-1,1,1
CGCM.run1.Tx.anom	1,1,1-2,3,3-0,0,0-0,0,0	0,0,0-1,1,2-0,1,1-0,0,0	1,1,1-0,1,1-0,0,0-0,0,0	0,0,0-0,0,0-0,0,0-0,0,0
CGCM.run1.Tx.stdan	3,3,3-2,2,2-1,1,1-1,2,2	2,2,2-1,2,2-1,1,3-0,0,1	2,2,2-1,1,1-3,3,3-2,2,2	1,3,3-2,3,3-1,1,2-1,1,1
MIROc3.run1.Tx.anom	0,0,0-1,1,3-1,1,3-1,1,2	0,1,1-1,1,1-3,3,3-0,0,2	0,0,0-0,0,0-1,1,1-0,0,0	—
MIROc3.run1.Tx.stdan	0,0,0-1,1,2-2,2,2-1,1,2	0,1,3-2,2,2-2,2,2-0,0,1	1,1,1-2,2,2-0,0,0-2,2,2	1,2,2-2,2,2-0,1,1-1,1,2
CNCM3.run1.Tx.anom	—	—	—	—
CNCM3.run1.Tx.stdan	0,2,2-2,2,2-1,1,1-0,0,0	—	—	1,1,2-1,2,2-1,2,2-0,0,0
HADGEM.run1.Tx.anom	1,2,2-1,1,1-0,1,1-1,1,1	0,0,0-2,2,2-0,1,1-1,1,2	1,1,2-2,2,3-2,2,3-1,1,1	1,1,1-1,1,2-1,2,2-0,1,1
HADGEM.run1.Tx.stdan	1,1,2-1,2,2-1,1,2-3,3,3	0,1,1-2,2,2-1,1,2-0,1,1	2,3,3-1,2,2-1,2,3-1,1,1	0,0,1-2,2,3-1,1,2-2,2,2

Tabla 4.3: Resultados de la comparación, para Tmax en Zaragoza, de las distribuciones de las colas definidas por los percentiles $p5$, $p10$, $p90$ y $p95$, en las muestras procedentes de las trayectorias 20c3M reescaladas y de la serie observada, partiendo de las anomalías y de las anomalías tipificadas. Para las trayectorias seleccionadas se muestra el número de meses de cada estación que presentan un p–valor en el test KS no inferior a 0.10, 0.05 y 0.01.

La tabla 4.4 muestra resumidamente los resultados relativos a la reproducción de las distribuciones de los datos extremos en los 10 observatorios analizados. Estos resultados indican la dificultad de los GCM para representar adecuadamente los extremos, por lo que se descarta el procedimiento de reescalado que estamos aplicando para el downscaling de este tipo de datos y, por consiguiente, de las series de datos diarios.

p5+p10/p90+p95	Tmax				Tmin			
	Sp	Su	Au	Wi	Sp	Su	Au	Wi
Alsasua	0/1	0/0	0/0	0/0	0/1	3/1	1/0	0/0
Burgos	0/0	0/0	1/0	0/0	3/1	1/0	0/0	0/0
Zaragoza	0/0	1/2	0/0	1/0	3/3	3/2	0/1	0/0
Tortosa	0/0	1/0	0/0	2/0	1/1	1/0	1/0	0/0
Barcelona	0/1	1/1	0/1	1/0	0/0	1/0	1/1	2/0
Albacete	0/0	0/0	0/0	1/0	2/2	1/0	0/1	0/0
Madrid	0/0	0/0	1/0	0/0	1/2	1/0	1/2	0/1
Badajoz	0/1	1/1	1/0	0/0	0/0	0/0	0/2	0/0
Sevilla	0/1	1/0	1/0	1/1	3/3	0/0	4/3	0/0
Bilbao	0/0	0/0	0/0	0/0	0/1	0/0	0/0	0/0
Oporto	0/0	0/0	0/0	0/0	1/0	0/0	0/0	0/0
Braganza	0/1	1/1	0/0	0/0	0/1	1/0	0/0	0/0
Lisboa	0/0	0/0	0/0	1/0	3/2	0/1	0/1	0/0

Tabla 4.4: Número de combinaciones observatorio–variable–estación–trayectoria con un p-valor no inferior a 0.01 en los tests KS de comparación de las distribuciones más allá de los percentiles $p10$ y $p5$, simultáneamente y para cada mes de la estación (número a la izquierda del símbolo “/”). A la derecha lo mismo para los tests KS aplicados a las colas definidas por $p90$ y $p95$.

Antes de abordar la ultima sección de este capítulo, relativa a las proyecciones de cambio climático en los valores medios del periodo 20131-60, se indica cuántas trayectorias pasan las dos fases de selección, en cada mes y cada uno de los 10 observatorios. La tabla 4.5 muestra los resultados obtenidos para Tmax y para Tmin. En el caso de esta última, los meses de invierno resultan los más problemáticos, pero en todos los observatorios se dispone de, al menos, 3 trayectorias en todos los meses, lo que implica una buena fiabilidad de la proyección obtenida. En el caso de Tmax los resultados son algo menos satisfactorios en alguno de los observatorios en el periodo más cálido: en Alsasua se selecciona sólo una trayectoria en junio y dos en mayo y julio; en Madrid en los meses de verano dos trayectorias y en Braganza tres.

4.2. Proyección de los valores medios mensuales de Tmax y Tmin en 2031-60 en tres escenarios de cambio climático

Hasta este momento se han analizado las 7 trayectorias descritas en el capítulo dos; sin embargo, para obtener el valor medio proyectado, se utilizarán solo 6. La proyección de MIROC3.2 hires no se introduce en el cálculo del valor medio ponderado porque este modela proyecta unos incrementos de temperatura desproporcionados respecto de los del resto de GCM.

		J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Albacete	Tmax	4	5	4	5	4	3	3	4	3	5	5	5
Alsasua	Tmax	4	5	7	7	2	1	2	3	3	3	4	6
Badajoz	Tmax	4	4	5	5	4	4	4	4	5	6	7	5
Barcelona	Tmax	4	5	6	6	3	5	5	5	5	5	4	5
Burgos	Tmax	5	6	6	5	5	5	4	5	4	4	5	6
Madrid	Tmax	6	5	4	5	4	2	2	2	4	4	4	6
Sevilla	Tmax	7	7	7	4	6	4	5	2	6	6	7	6
Tortosa	Tmax	6	6	5	5	3	4	4	4	5	4	5	6
Zaragoza	Tmax	4	5	7	7	6	6	6	6	4	5	5	5
Braganza	Tmax	6	6	3	4	4	3	3	3	5	6	7	4
Albacete	Tmin	3	5	7	7	5	5	4	5	6	7	7	3
Alsasua	Tmin	6	6	5	6	6	4	6	6	5	5	3	5
Badajoz	Tmin	4	6	7	7	7	5	4	5	6	6	6	4
Barcelona	Tmin	5	6	7	6	7	6	5	6	6	7	7	6
Burgos	Tmin	6	6	7	7	7	7	7	7	5	5	3	3
Madrid	Tmin	4	6	6	6	6	5	5	5	5	7	7	6
Sevilla	Tmin	3	6	7	7	7	7	7	6	6	6	6	5
Tortosa	Tmin	5	6	6	7	7	7	7	6	6	5	6	6
Zaragoza	Tmin	6	6	7	7	6	6	6	6	6	7	7	6
Braganza	Tmin	3	4	6	7	6	6	6	6	5	5	3	3

Tabla 4.5: Número de trayectorias (de 7) que superan los filtros de la fase de selección y sirven para proyectar los valores medios mensuales de Tmax y Tmin.

4.2.1. Obtención de las proyecciones para el valor medio en Zaragoza

El gráfico 4.3 muestra las diferentes proyecciones para el valor medio de Tmax en Zaragoza en el escenario A1B. Como se indicó en el capítulo anterior, utilizando un esquema de pesos se ha calculado un único valor mensual proyectado, que aparece en la gráfica con una línea de puntos.

En la tabla 4.6 se comparan los valores medios mensuales de Tmax observados en el periodo 1971–2000 en Zaragoza, los valores proyectados por los GCM útiles y el valor medio obtenido al ponderar esas proyecciones.

En la tabla 4.7 vemos para cada mes en Zaragoza el cambio esperado en los percentiles p25, p75, en la media recortada al 25 % y en el IQR de Tmax y Tmin en el escenario A1B, en el periodo 2031-2060. El mayor incremento se aprecia en el mes de agosto, que para el valor medio de Tmax llega a ser de 3.7°C y para Tmin 2.3°C. El incremento menor lo encontramos en el mes de febrero para Tmax con 1.6°C y en marzo 1.1° para Tmin.

Daily tx observed 9434 A1B and scaled GCMs

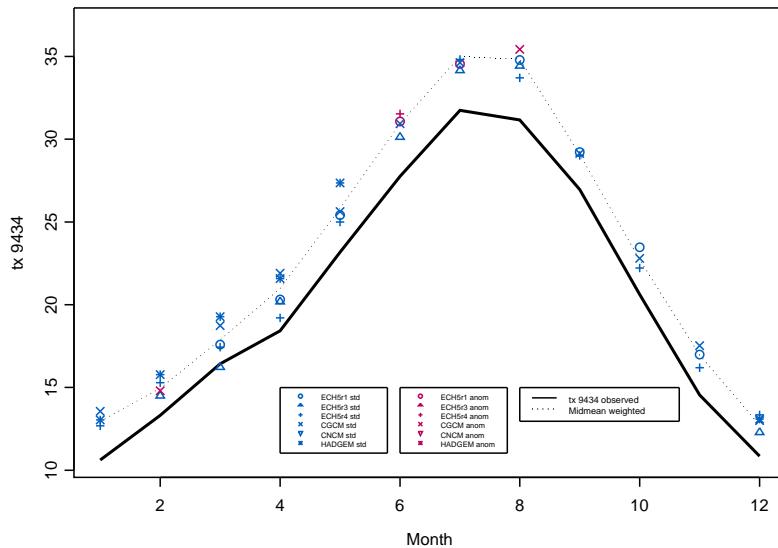


Figura 4.3: Perfil anual de los valores medios mensuales de Tmax en Zaragoza, 1971-2000 (línea continua) y valores medios proyectados 2031-60 en el escenario A1B por las distintas trayectorias GCM. La línea de puntos indica el perfil anual de los valores medios ponderados 2031-60, sin incluir la proyección de MIROC.

Tmax Zaragoza	J	F	Mr	Ap	My	Jn	Jl	Ag	S	O	N	D
Observed Tx 9434	10.6	13.3	16.4	18.4	23.2	27.8	31.7	31.2	27	20.6	14.5	10.9
Midmean weighted Tx 9434	12.9	15	17.9	21	25.8	30.9	35	34.8	29.1	22.7	17	12.7
A1B E5r1 anom						31.07	34.55					
Mean change (C)						3.32	2.81					
A1B E5r1 std.anom			17.59	20.32	25.42			34.78	29.22	23.47	16.99	
Mean change (C)			1.16	1.9	2.24			3.62	2.26	2.85	2.44	
A1B E5r3 std.anom		14.52	16.25	20.2		30.14	34.17	34.45				12.3
Mean change (C)		1.21	-0.19	1.78		2.39	2.43	3.29				1.45
A1B E5r4 anom						31.53						
Mean change (C)						3.78						
A1B E5r4 std.anom	12.68	15.29	17.44	19.2	24.99		34.81	33.71	29.01	22.22	16.19	13.34
Mean change (C)	2.07	1.98	1	0.78	1.82		3.07	2.54	2.05	1.59	1.64	2.49
A1B CGCM3t63 anom		14.8						35.42				
Mean change (C)		1.49						4.26				
A1B CGCM3t63 std.anom	13.56		18.74	21.91	25.63	30.94	34.62		29.13	22.8	17.52	13
Mean change (C)	2.94		2.31	3.49	2.45	3.19	2.88		2.18	2.18	2.97	2.14
A1B CNCM3 std.anom	13.03	15.77	19.28	21.58	27.36							13.09
Mean change (C)	2.42	2.46	2.85	3.16	4.18							2.24
A1B HADGEM anom	12.52			20.57			36.88	36.6				11.94
Mean change (C)	1.9			2.15			5.14	5.44				1.09
A1B HADGEM std.anom			17.49		26.33	30.33				22.93	17.01	
Mean change (C)			1.05		3.16	2.58				2.31	2.47	

Tabla 4.6: Valores medios mensuales observados en Zaragoza en el periodo 1971–2000, valores proyectados 2031–2060 y cambio asociado en el escenario A1B, según los GCM útiles para ese observatorio y variable y valor medio ponderado.

A1B	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Tx 9434 Q1 change	2.6	1.6	1.3	2.1	2.4	2.9	3.3	3.7	2.1	1.8	2.3	1.7
Tx Midmean change	2.3	1.6	1.4	2.6	2.6	3.2	3.2	3.7	2.1	2.1	2.4	1.9
Tx Q3 change	2.3	2	1.3	2.7	2.7	3.1	3.2	3.5	2.3	2.5	2.5	2.3
Tx IQR change	-0.3	0.4	0	0.5	0.3	0.2	-0.2	-0.2	0.1	0.7	0.2	0.7
Tn 9434 Q1 change	1.8	1.4	1.2	1.1	1.6	1.8	1.9	2.2	1.5	1.6	1.9	1.5
Tn Midmean change	1.7	1.5	1.1	1.3	1.7	2.1	2.1	2.3	1.7	1.6	1.9	1.6
Tn Q3 change	1.4	1.4	1.2	1.5	1.8	2.1	2.1	2.3	1.7	1.5	1.8	1.6
Tn IQR change	-0.4	0	0	0.4	0.2	0.3	0.2	0.1	0.1	-0.1	-0.1	0.1

Tabla 4.7: Cambio proyectado en Zaragoza, en el escenario A1B, para la media recortada al 25 %, los cuartiles Q1 y Q3, y el rango intercuartílico de las variables Tmax y Tmin

	Sp	Su	Au	Wi
Albacete.	2.54	3.43 *	2.1 *	2.04
Alsasua.	2.47 *	— *	2.78 *	1.8
Badajoz	2.1	2.96	2.46	1.88
Barcelona	2.45	3.29	2.38	2.11
Burgos	2.2	3.11	2.92	1.69
Madrid	2.49	3.48 *	2.48	1.55
Sevilla	2.34	2.97 *	2.37	1.75
Tortosa	2.03	2.24	1.96	1.93
Zaragoza	2.21	3.36	2.21	1.94
Braganza	2.72 *	3.22 *	2.43	2.08

Tabla 4.8: Cambio proyectado, por estaciones, en el valor medio de Tmax para los 10 observatorios.

	Sp	Su	Au	Wi
Albacete	1.64	2.8	2.24	1.56 *
Alsasua	1.87	2.49	2.61	1.89
Badajoz	1.55	2.03	2.02	1.69
Barcelona	2.15	3.17	2.55	2.03
Burgos	1.41	2.09	2.21 *	1.72
Madrid	1.49	2.96	1.78	1.22
Sevilla	1.59	2.41	1.95	1.38 *
Tortosa	1.36	2.16	1.69	1.67
Zaragoza	1.36	2.18	1.71	1.63
Braganza	1.32	2.54	1.79	1.56 *

Tabla 4.9: Cambio proyectado, por estaciones, en el valor medio de Tmin para los 10 observatorios.

4.2.2. Obtención de las proyecciones para el valor medio en todos los observatorios

En la tabla 4.8 se muestran los cambios en el valor medio de Tmax, y en la tabla 4.9 los de Tmin, proyectados para el periodo 2031-2060 en todos los observatorios, en cada estación del año. Aparece el valor del cambio acompañado de * en aquellos observatorios que tienen menos de tres trayectorias para proyectar en una estación. Destaca el observatorio de Alsasua (9269) que no se ha proyectado en verano, ya que ninguna trayectoria resultó utilizable para Tmax.

El incremento en Tmax en °C mayor lo vemos en Madrid en los meses de verano. En los observatorios de Barcelona y Tortosa vemos un aumento más suave de las temperaturas, donde en la primera, en los meses de primavera sólo se aumenta un 1.29°C, en media. Sin embargo en la región central se aprecian los mayores aumentos de temperatura. En cuanto a los valores para Tmin las primaveras tiene cambios menores. Podemos destacar que en Barcelona el aumento de temperatura en primavera, verano e invierno es el mayor de todos los observatorios.

Capítulo 5

Conclusiones

El objetivo de este estudio ha sido aplicar un procedimiento de corrección de sesgos como técnica de reducción de escala para los datos diarios de temperatura generados por un GCM.

Este procedimiento consiste en la corrección del valor medio y la variabilidad, si es necesario, de las series generadas por el GCM. Incialmente se compara la igualdad de las distribuciones de forma global y específicamente las de sus valores extremos, entre los datos observados y las trayectorias GCM 20c3M. En segundo lugar, se valoran las desviaciones que presentan los estadísticos de la serie GCM-20c3M reescalada, tras corregir el sesgo en la media y en la desviación típica. Estos dos pasos permiten seleccionar las trayectorias GCM útiles para obtener proyecciones de los valores medios mensuales de Tmax y Tmin en los escenarios A1B, A2 y B1 definidos por el IPCC.

Este procedimiento de reducción de escala se ha aplicado a 10 observatorios repartidos por toda la geografía de la Penísuma Ibérica para las series de temperatura Tmax y Tmin, utilizando siete trayectorias de cinco GCM diferentes.

La reproducción de las colas extremas se analiza a fondo, para concluir que el método de corrección del sesgo no se puede utilizar para generar series de temperatura diaria verosímiles. El estudio del efecto del cambio clímatico sobre los extremos requiere de un método de reducción de escala más complejo.

El procedimiento ha permitido que las trayectorias seleccionadas se puedan utilizar para obtener las proyecciones en el periodo 2031-2060 de los valores medios mensuales de Tmax y Tmin así como evaluar los cambios en los percentiles 25 o 75 y en el centro de

la distribución.

Agradecimientos

Agradezco al proyecto EsTcena (Acción Estratégica Energía y Cambio Climático, del Subprograma del Plan Nacional de I+D+i relativo a la mitigación no energética del cambio climático, observación del clima y adaptación al cambio climático) por el apoyo recibido para realizar este trabajo. Es uno de los dos proyectos que han contribuido a la generación de escenarios regionales de cambio climático dentro del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC): Escenarios-PNACC 2012 y fue financiado por el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Debo agradecer a los profesores D. Eduardo Martínez como responsable del Máster, D. Jesús Abaurrea y D^a. Ana Carmen Cebrián como Directores de este trabajo fin de máster y D. Jesús Asín por su inestimable ayuda y consejos. A todos ellos, muchas gracias.

Bibliografía

Abaurrea, J., Alvarez, E., Asín, J., Cebrián, A. C. (2012). Evaluating a simple statistical downscaling method for maximum and minimum daily temperature in a mountainous area. En revisión en Climate Dynamics.

Brands, S., Taboada, J.J., Cofiño, A.S., Sauter, T., Schneider, C. (2011). Statistical downscaling of daily temperatures in the northwestern Iberian Peninsula from general circulation models: validation and future scenarios. Clim Res 48:163/176. doi: 10.3354/cr00906

Errasti I, Ezcurra A, Sáenz J, Ibarra-Berastegi G (2011). Validation of IPCC AR4 models over the Iberian Peninsula. Theor Appl Climatol 103:61-79. doi: 10.1007/s00704-010-0282-y

Fowler HJ, Blenkinsop S, Tebaldi C (2007). Linking climate change modelling to impact studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. Int J Climatol 27:1547-1578. doi: 10.1002/joc.1556

Haerter JO, Hagemann S, Moseley C, Piani C (2011) . Climate model bias correction and the role of timescales. Hydrol Earth Syst Sci 15:1065-1079. doi:10.5194/hess-15-1065-2011

Hundecha Y, Bárdossy A (2008). Statistical downscaling of extremes of daily precipitation and temperature and construction of their future scenarios. Int J Climatol 28:589-610. doi: 10.1002/joc.1563

IPCC (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (ed). Cambridge University Press, Cambridge, UK Jeong DI, St-Hilaire A, Ouarda T, Gachon P (2011) CGCM3 predictors used for daily temperature and precipitation downscaling in Southern Québec, Canada. Theor Appl Climatol 107:389-406. doi: 10.1007/s00704-011-0490-0

Knutti R, Abramowitz G, Collins M, Eyring V, Gleckler PJ, Hewitson B, 708 Mearns L (2010a) Good Practice Guidance Paper on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. In: Stocker TF et al (ed) Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. IPCC Working Group I Technical Support Unit, Univ. of Bern, Switzerland Knutti R, Furrer R, Tebaldi C, Cermak J, Meehl GA (2010b) Challenges in combining projections from multiple models. *J Climate* 23:2739-2758. doi: 10.1175/2009JCLI3361.1

Piani C, Weedon GP, Best M, Gomes SM, Viterbo P, Hagemann S, Haerter JO (2010) Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *J Hydrol* 395:199-215. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.10.024

Räisanen J, Ruokolainen L, Ylhäisi J (2010) Weighting of model results for improving best estimates of climate change. *Clim Dyn* 35:407-422. doi: 10.1007/s00382-009-0659-8

Semenov MA, Stratonovitch P (2010) Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Clim Res* 41:1-14. doi: 10.3354/cr00836

Themeßl MJ, Gobiet A, Heinrich G (2012) Empirical-statistical downscaling and error correction of regional climate models and its impact on the climate change signal. *Clim Change* 112:449-468. doi:10.1007/s10584-011-0224-4