

ANÁLISIS DE EXTREMOS DE TEMPERATURA EN UN CONJUNTO DE PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA LA PENÍNSULA IBÉRICA

Sonia JEREZ RODRÍGUEZ, Juan Pedro MONTÁVEZ GÓMEZ, Juan José GÓMEZ NAVARRO ,
Pedro JIMÉNEZ GUERRERO y Raquel LORENTE PLAZAS
Grupo de Modelización Atmosférica Regional, Universidad de Murcia
sonia.jerez@gmail.com, montavez@um.es, jjgomeznararro@um.es, pedro.jimenezguerrero@um.es,
lorente.plazas@gmail.com

RESUMEN

Uno de los aspectos más interesantes del cambio climático es su efecto sobre fenómenos extremos. Para conseguir proyecciones de futuro fiables de fenómenos extremos es conveniente contar con simulaciones de alta resolución espacial en las que se tengan en cuenta efectos locales. Los modelos regionales de simulación climática son una herramienta muy utilizada para este propósito. Sin embargo, las fuentes de incertidumbre que afectan a este tipo de simulaciones van desde el escenario de emisiones futuro que se considere hasta la propia configuración física del modelo regional. En este trabajo se evalúan las incertidumbres asociadas a la configuración física de un modelo regional a partir de un conjunto de proyecciones de futuro de extremos de temperatura para la Península Ibérica. Concretamente se analizan los cambios proyectados para las funciones de distribución de probabilidad de la temperatura máxima diaria de verano. Los resultados muestran que el aumento de la temperatura media irá acompañado por una mayor variabilidad y asimetría de las funciones de distribución, y que la incertidumbre que introduce elegir unas u otras parametrizaciones físicas es del orden del 50% de los cambios medios que se proyectan. Sin embargo, la evaluación de la bondad de las simulaciones del presente permite discriminar cuáles son *a priori* las proyecciones más fiables.

Palabras clave: modelización climática regional, proyecciones de cambio climático, fuentes de incertidumbre, procesos parametrizados, extremos de temperatura

ABSTRACT

The effect of climate change over extreme events is one of the most interesting aspect for researches. In order to gain confidence in future projections of extreme events, high resolution simulations in which local effects are taken into account are required. Regional climate models are a very used tool to get them. Nevertheless, these simulations are affected by several sources of uncertainty, from the future emission scenario to the physics configuration of the regional model. In this work, the uncertainties due to the physics configuration of a regional model are evaluated through an ensemble of future projections of temperature extremes over the Iberian Peninsula. In concrete, the projected changes of the probability density functions of summer season daily maximum temperature are analyzed. Results show that the increase of the mean temperature will be accompanied by a greater variability and a greater assymetry of the distribution functions, and also that the uncertainty due to the election of the physic parameterizations is about 50% of the mean projected changes. Nevertheless, evaluating the performance of the present simulations allows to discriminate the most reliable projections.

Key words: regional climate modelling, climate change projections, sources of uncertainty, parameterized procesess, extreme temperature

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos climáticos regionales (RCMs) se han convertido en una herramienta fundamental para el estudio del clima, tanto del observado, como para reconstrucciones paleoclimáticas y proyecciones de futuro (GIORGI *et al.*, 1995). Estos modelos proporcionan bases de datos sobre una malla regular con resoluciones de unos pocos kilómetros que tienen multitud de aplicaciones: estudios de impacto del cambio climático global a escala regional, estudios de transporte de contaminantes, evaluación de recurso eólico y solar, acoplamiento a modelos hidrológicos, etc... (ej. GÓMEZ-NAVARRO *et al.*, 2010; JIMÉNEZ-GUERRERO *et al.*, 2010) Sin embargo, los RCMs no son herramientas autónomas, sino que necesitan unas condiciones de contorno (valores de las variables de pronóstico) que cubran todo el periodo que se quiera simular. Estas condiciones se toman de simulaciones realizadas con modelos de circulación globales (GCMs) cuando se hacen proyecciones de futuro o reconstrucciones del pasado, y de bases de datos de reanálisis (en las que se asimilan datos reales) para hacer simulaciones del clima observado (*hindcasts*). La ventaja de emplear RCMs es que permiten aumentar la resolución espacial a expensas del área del dominio de la simulación (se trata de modelos de área limitada) sin que se dispare el coste computacional de la simulación. En cambio, los GCMs simulan, por definición, para todo el globo, por lo que la resolución espacial que alcanzan es del orden de 100 km. Mayores resoluciones implicarían tiempos de ejecución demasiado altos. Aunque el aumento de la potencia computacional en los últimos años ha sido exponencial, aún se requiere de técnicas de regionalización (como el empleo de RCMs) para obtener bases de datos climáticas de alta resolución que seancapaces de reflejar efectos locales como la orografía, los usos de suelo, etc. que influyen en gran medida en las circulaciones y los climas regionales.

Las proyecciones regionales de cambio climático obtenidas con RCMs cuentan con varias fuentes de incertidumbre (VIDALE *et al.*, 2003). Algunas proceden del GCM al que se acople el RCM (la propia variabilidad interna del modelo global, sus errores sistemáticos, la resolución que emplee) y del escenario futuro de emisiones de gases de efecto invernadero que se considere. Otras aparecen en el propio proceso de regionalización y están asociadas a la configuración espacial de los dominios de la simulación (resolución, estrategias de anidamiento de dominios, posición de los dominios), la caracterización del suelo (usos de suelo, tipo de vegetación), la propia variabilidad interna y los errores sistemáticos del modelo regional, y la configuración física que se emplee. La configuración física de los modelos de simulación climática consiste en el conjunto de esquemas o parametrizaciones que se eligen para modelar ciertos procesos que no son resueltos por el núcleo del modelo (STENSRUD, 2007). Éste es el caso, por ejemplo, de los procesos que se desarrollan en escalas espaciales menores a las consideradas en la configuración espacial de los dominios.

Para hacer frente a las incertidumbres mencionadas, un procedimiento habitual es realizar conjuntos de simulaciones, analizar las diferencias entre ellas y adoptar un enfoque probabilístico a la hora de dar resultados (WU *et al.*, 2005; DÉQUÉ *et al.*, 2005; FERNÁNDEZ *et al.*, 2007). Si la diferencia entre los miembros del conjunto de simulaciones (ensemble) proviene del modelo global al que se acopla el modelo regional se tiene un conjunto multimodelo-global que permite evaluar la incertidumbre asociada a cambiar las condiciones de contorno empleadas; si la diferencia está en la configuración física del RCM (como en el trabajo que se presenta) se tiene un conjunto multifísica que permite evaluar la incertidumbre asociada a emplear unas u otras parametrizaciones. Además, a partir de estos conjuntos de simulaciones, se pueden filtrar las señales que sean comunes en todos sus miembros y que, por lo tanto, son independientes de la fuente de incertidumbre que se evalúa.

En este trabajo se analizan tres conjuntos multifísica de simulaciones de alta resolución (30 km) para la Península Ibérica realizadas con el modelo mesoescalar MM5 (GRELL *et al.*, 1995). Uno de los conjuntos está formado por *hindcasts* del periodo de referencia (1970-1999), otro por simulaciones del periodo de referencia alimentadas por las salidas de un modelo global, y el tercero

por simulaciones del periodo futuro 2070-2099 alimentadas por el mismo modelo global que las anteriores. Estos tres conjuntos permiten evaluar la bondad de las simulaciones del periodo de referencia enfrentándolas a los *hindcasts*, y hacer proyecciones de futuro comparando las simulaciones de futuro con las del periodo de referencia. Además permiten identificar y cuantificar las incertidumbres asociadas a las configuración física de MM5 tanto en los periodos presente y futuro, cómo en las proyecciones de futuro.

Los procesos que están parametrizados en MM5 son: los radiativos (forzamiento solar, concentración de gases de efecto invernadero), los que tienen lugar en el suelo (escorrentías, difusión del calor y transporte de humedad entre capas de suelo, etc.), el desarrollo de cúmulos, los procesos de microfísica (cambios de fase en la atmósfera), y los procesos de capa límite. En este trabajo se juega con dos de las opciones disponibles para estos tres últimos procesos. Se obtienen por tanto conjuntos de simulaciones con ocho miembros. El análisis se centra en las funciones de distribución de probabilidad (PDFs) de la temperatura a dos metros sobre la superficie; en sus valores medios, desviación estándar, *skewness* y valores extremos. Dado que la Península Ibérica se ha identificado como una de las regiones del planeta más vulnerables al cambio climático (GIORGI, 2006), es interesante contribuir al entendimiento de qué puede pasar, por qué, y con qué grado de incertidumbre, así como detectar qué procesos juegan un papel más importante a la hora de obtener simulaciones más realistas.

En la sección 2 se describen las simulaciones y se detalla la metodología. En la sección 3 se exponen los resultados. Y en la sección 4 se discuten y se extraen las principales conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS Y METODOLOGÍA

Se han realizado tres conjuntos de simulaciones para la Península Ibérica empleando el modelo regional MM5 (GRELL *et al.*, 1995). Estos conjuntos difieren entre sí en la naturaleza de las condiciones de contorno empleadas. En uno de ellos se emplean los datos del reanálisis ERA40 (UPPALA *et al.*, 2005) para simular el periodo de referencia 1970-1999 (conjunto de *hindcasts* MM5-ERA40), y en los otros dos las salidas del modelo global ECHAM5 (ROECKNER *et al.*, 2003) para simular los periodos 1970-1999 (conjunto MM5-ECHAM5-PR) y 2070-2099 (conjunto MM5-ECHAM5-A2). Para el periodo futuro se ha considerado el escenario de emisiones A2 de SRES (IPCC, 2007). Dicho forzamiento radiativo sólo se introduce a través de las condiciones de contorno.

El reanálisis ERA40 es en la actualidad la base de datos sobre una malla regular más fiable de la que se dispone, y se utiliza habitualmente como referencia para evaluar la bondad de otras simulaciones (ej. GÁLOS *et al.*, 2007). En nuestro caso usaremos el conjunto de simulaciones MM5-ERA40 para evaluar la bondad de las simulaciones del conjunto MM5-ECHAM5-PR.

La configuración espacial para MM5 se presenta en la Figura 1. Se trata de dos dominios anidados bidireccionalmente con resoluciones de 90 km (en el dominio 1, D1) y 30 km (en el dominio 2, D2). D2 cubre toda la Península Ibérica, la región de interés en este trabajo. D1 está desplazado hacia el este con el objetivo de captar bien toda la influencia que el Mediterráneo tiene sobre el clima de la Península Ibérica. Verticalmente se consideran 24 niveles hasta los 100 mb. Las salidas se graban cada 6 horas en D2, y cada 12 horas en D1.

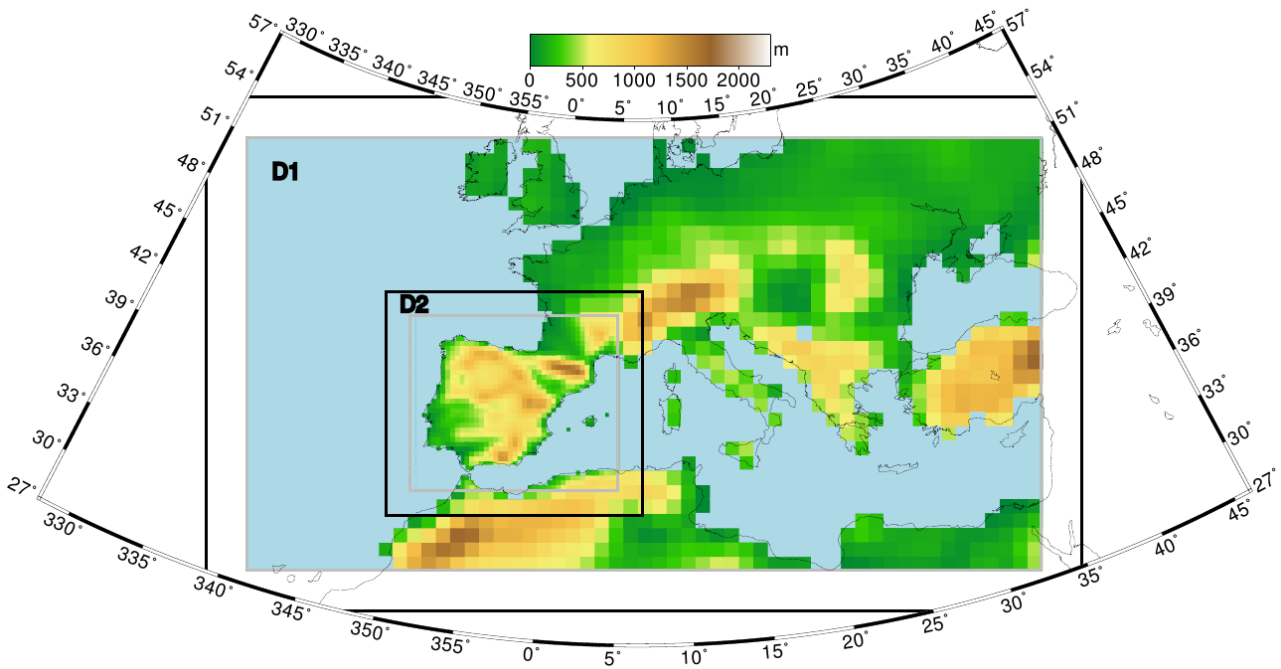


Figura 1: Configuración espacial empleada en las simulaciones con MM5. D1 tiene una resolución de 90 km, y D2 de 30 km. La escala de colores representa la topografía que ve el modelo regional. Las líneas grises recuadran dónde son válidas las simulaciones, eludiendo las zonas de *blending* (que consideramos como los 5 primeros puntos de la malla de cada dominio) en las que aún el modelo no ha alcanzado el equilibrio dinámico.

Cada conjunto de simulaciones consta de ocho miembros que difieren entre sí en la configuración física de MM5. Estos ocho miembros resultan de combinar las siguientes opciones de parametrización (Tabla 1): *MRF* (HONG *et al.*, 1996) ó *Eta* (JANJIC, 1994) para capa límite, *Grell* (GRELL *et al.*, 1991) ó *Kain-Fritsch* (KAIN *et al.*, 1993) para cúmulos, y *Simple Ice* (DUDHIA, 1989) ó *Mixed Phase* (REISNER *et al.*, 1998) para microfísica. El resto de la configuración física de MM5 es común en todos los experimentos: *RRTM* (MLAWER *et al.*, 1997) para radiación y *Noah Land-Surface Model* (CHEN, 2001) para los procesos de suelo.

Sim.	Microfísica	Cúmulos	Capa Límite
1	<i>Simple Ice</i>	<i>Grell</i>	<i>Eta</i>
2	<i>Simple Ice</i>	<i>Grell</i>	<i>MRF</i>
3	<i>Simple Ice</i>	<i>Kain-Fritsch</i>	<i>Eta</i>
4	<i>Simple Ice</i>	<i>Kain-Fritsch</i>	<i>MRF</i>
5	<i>Mixed Phase</i>	<i>Grell</i>	<i>Eta</i>
6	<i>Mixed Phase</i>	<i>Grell</i>	<i>MRF</i>
7	<i>Mixed Phase</i>	<i>Kain-Fritsch</i>	<i>Eta</i>
8	<i>Mixed Phase</i>	<i>Kain-Fritsch</i>	<i>MRF</i>

Tabla 1: Esquemas de microfísica, cúmulos y capa límite empleados en cada uno de los miembros de cada conjunto de simulaciones.

Las principales diferencias entre las parametrizaciones puestas en juego son las siguientes. *MRF* es una parametrización no local de capa límite, lo cual favorece la mezcla entre las capas más bajas de la atmósfera y capas superiores, mientras que *Eta* es local. Entre las parametrizaciones empleadas para cúmulos, la diferencia está fundamentalmente en cómo se activan y en cuánto tiempo permanecen activas. Comparativamente, *Kain-Fritsch* favorece la persistencia de la nubosidad y la convección de humedad. En cuanto a microfísica, *Mixed Phase*, a diferencia de *Simple Ice*, permite la existencia de agua súper-enfriada y un derretimiento lento de la nieve cuando la temperatura desciende por debajo de 0°C.

Dado que uno de los aspectos más interesantes del cambio climático es su influencia sobre fenómenos extremos, en este trabajo analizamos las PDFs que se obtienen para la temperatura máxima diaria de la estación estival (de mayo a septiembre, ambos inclusive). Es conocido que las mayores consecuencias del calentamiento global se manifiestan en la Península Ibérica en las temperaturas máximas de verano (GÓMEZ-NAVARRO *et al.*, 2010).

El análisis de las PDFs se realiza a través de sus magnitudes características: valor medio, desviación estándar, oblicuidad ó *skewness* (que llamaremos *skew*), percentiles 5 y 95, y rango interpercentílico 95-5. El *skew* es una medida de la asimetría de la función de distribución. Una PDF con *skew* negativo tiene la cola izquierda más larga y la cola derecha más pesada, y *vice versa*. Para la evaluación de percentiles se consideran las PDFs de anomalías, es decir, centradas en el cero. De esta forma evitamos que los cambios en los valores medios enmascaren los cambios en las colas de las distribuciones.

En primer lugar estudiaremos la media de los miembros de cada conjunto de simulaciones, así como de los cambios medios proyectados. De esta forma obtendremos una visión general de cómo se comportan las simulaciones y de cómo son los cambios que se proyectan (sección 3.1). En segundo lugar evaluaremos incertidumbres y estudiaremos cuál de los procesos parametrizados puestos en juego tiene un papel más decisivo (sección 3.2).

3. RESULTADOS

3.1. Descripción de las PDFs

En la Figura 2 se muestra la distribución espacial de cada una de las magnitudes analizadas de las PDFs de temperatura máxima diaria de verano que se obtienen en promedio en cada uno de los conjuntos de simulaciones (MM5-ERA40, MM5-ECHAM5-PR y MM5-ECHAM5-A2), así como los cambios medios proyectados. Por simplicidad se omiten las gráficas correspondientes a la desviación estándar de las PDFs ya que los patrones que se obtienen son análogos a los del rango interpercentílico.

La fiabilidad de las proyecciones de futuro se soporta, además de en la teoría de cancelación de errores (LIANG *et al.*, 2008), en la bondad de las simulaciones del periodo de referencia. Se asume que si las simulaciones reproducen bien el clima actual serán capaces también de reproducir el clima de futuro y, por lo tanto, las proyecciones que se hagan serán fiables. A falta de una base de datos observacional con la que comparar las simulaciones, tomaremos las simulaciones realizadas con ERA40 como referencia para evaluar la bondad de las simulaciones del periodo de referencia alimentadas con las salidas de ECHAM5. En general, se observa un buen acuerdo entre los patrones de MM5-ECHAM5-PR y de MM5-ERA40 mostrados en la Figura 2. Sin embargo, en realidad, estos últimos presentan valores intermedios entre los patrones de las simulaciones de presente y futuro realizadas con ECHAM5. De modo que, por un lado, las simulaciones realizadas con ECHAM5 tienden a ser demasiado conservativas (aunque capturan bien las distribuciones

espaciales), y, por otro lado, los patrones de futuro muestran sobre todo mayores valores, pero no distribuciones espaciales distintas de las magnitudes analizadas.

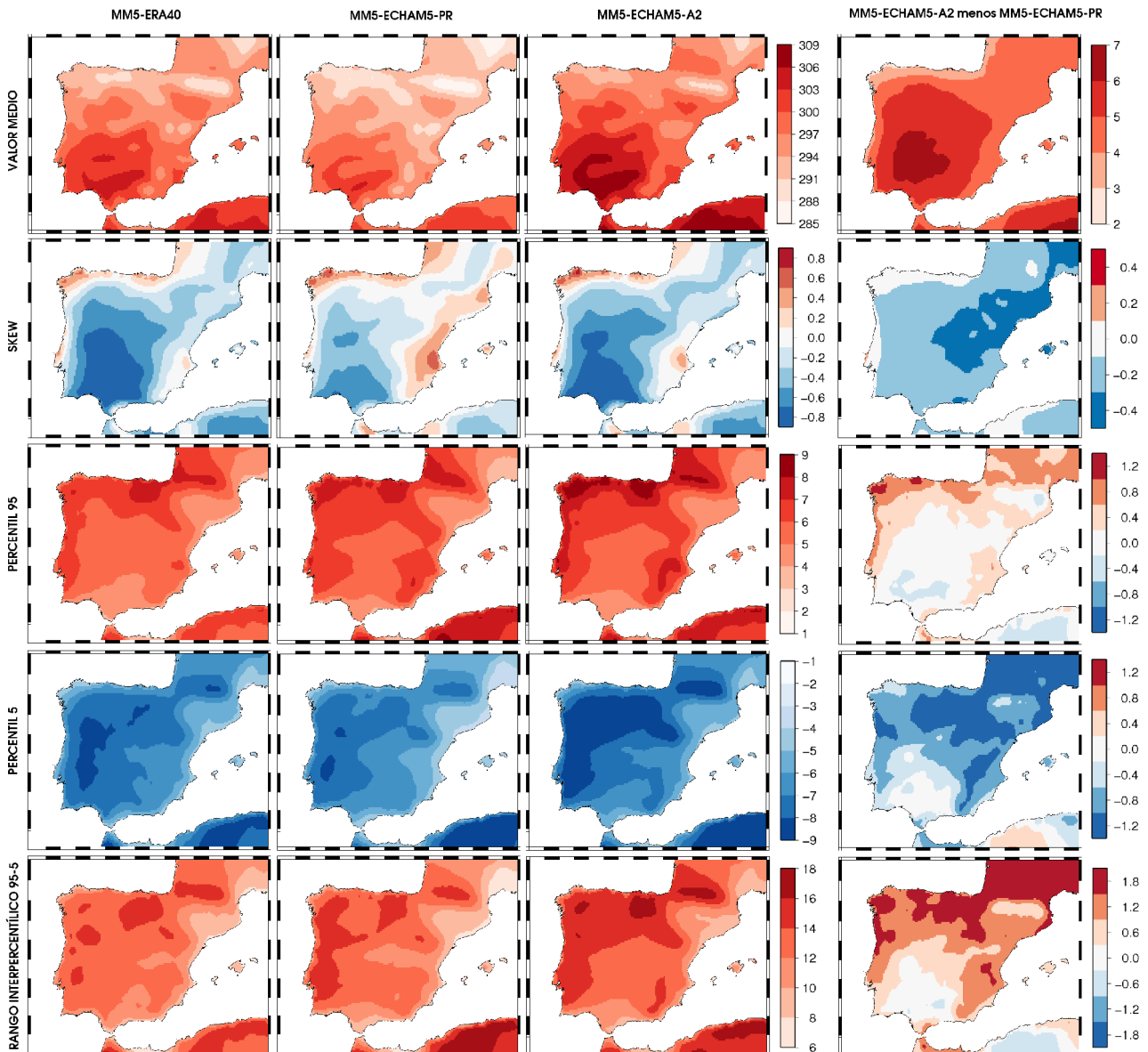


Figura 2: Valor medio, skew, percentiles 95 y 5, y rango interpercentílico 95-5 de las PDFs de temperatura máxima diaria de los meses de mayo a septiembre, ambos inclusive, obtenidas de la media de los miembros de cada uno de los conjuntos de simulaciones: MM5-ERA40, MM5-ECHAM5-PR y MM5-ECHAM5-A2. En la última columna se muestran las proyecciones medias de futuro para cada magnitud.

De la Figura 2 se extraen también los siguientes resultados. Se pueden distinguir dos zonas con características distintas. En el centro-sur peninsular, las PDFs muestran mayores valores medios y mayor skew (negativo) que en el norte. También son mayores los cambios proyectados. Sin embargo, las PDFs son más achatadas y se proyecta un mayor achatamiento en el norte que en el sur de la Península Ibérica (Figura 3). Además observamos que el percentil 5 contribuye más a este achatamiento que el percentil 95.

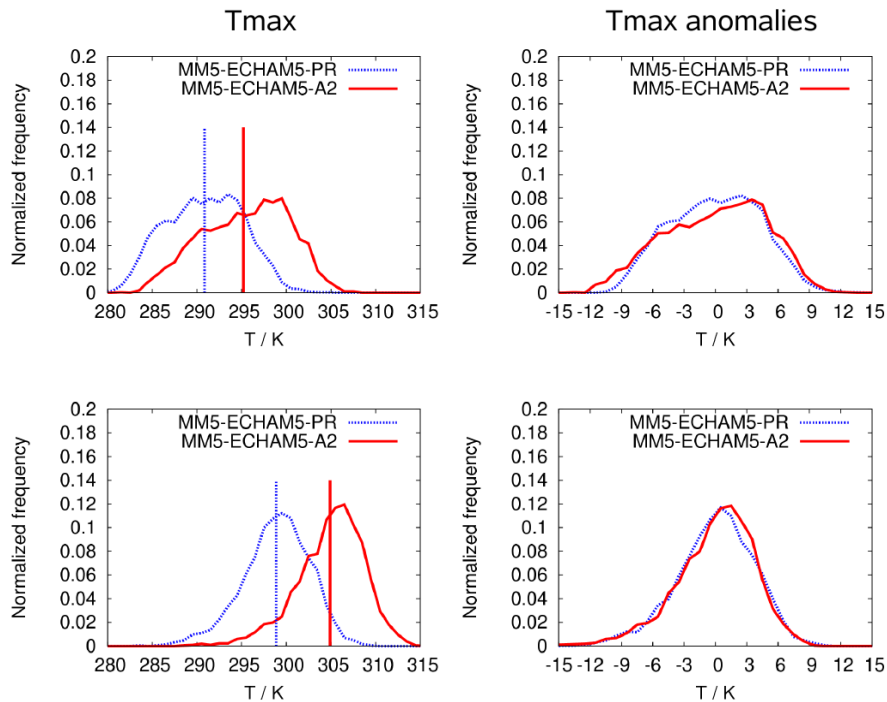


Figura 3: PDFs de temperatura máxima diaria (y de anomalías) de los meses de mayo a septiembre, ambos inclusive, obtenidas del *ensemble mean* de los conjuntos de simulaciones MM5-ECHAM5-PR y MM5-ECHAM5-A2 promediado espacialmente sobre una región del norte peninsular (gráficas superiores) y otra del centro-sur (gráficas inferiores). En las gráficas de la izquierda las líneas verticales representan los valores medios de las PDFs. Las PDFs de las gráficas de la derecha son de anomalías (por lo tanto, centradas en el cero).

3.2. Incertidumbres

Una vez descritos los cambios medios proyectados por el conjunto de simulaciones, evaluamos las incertidumbres asociadas a la configuración física del modelo regional en dichas proyecciones. En la Figura 4 se representa la dispersión del conjunto de proyecciones de futuro. Definimos dispersión como la desviación estándar de los ocho valores correspondientes a cada uno de los miembros del conjunto de simulaciones. También se representa cuál es el esquema (entre los tres puestos en juego: capa límite, cúmulos y microfísica) cuyo cambio conlleva mayores diferencias, y cuán importantes son. Lo interesante es ver, por un lado, dónde se dan las mayores diferencias entre las simulaciones y si existe alguna relación entre los patrones de cambio medio y de dispersión, y, por otro lado, ver cuál es la parametrización que introduce mayores diferencias allí donde la incertidumbre sea importante.

Observamos que, en general, las mayores discrepancias se obtienen en las áreas donde los cambios proyectados son mayores, excepto en el caso del skew. En el caso del valor medio, los patrones de cambio medio y de dispersión de los cambios proyectados por cada miembro están un poco desplazados uno con respecto al otro, pero existe bastante acuerdo. En el caso de los percentiles de las PDFs ambos patrones coinciden. Por lo tanto, en general podemos decir que las áreas más afectadas por cambios futuros son también en las que las proyecciones son más sensibles a cambios en la configuración física del modelo regional. Se obtienen diferencias entre los cambios proyectados por los distintos experimentos del orden del 50% del cambio medio proyectado (ver

Figura 5).

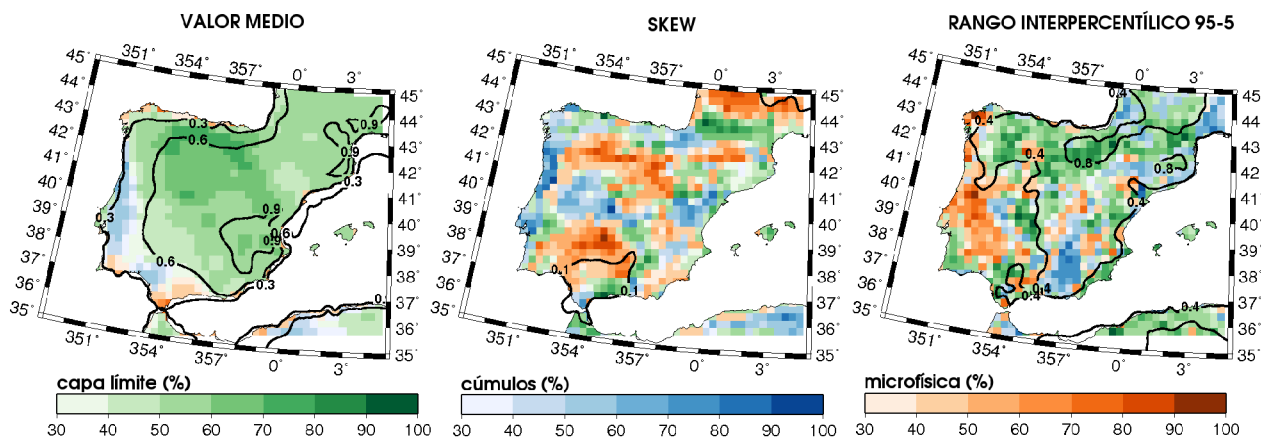


Figura 4: Con contornos, dispersión del conjunto de proyecciones de futuro (definido como la desviación estándar de los ocho valores que se obtienen para cada punto) de las magnitudes características de las PDFs que se indican (valor medio, skew y rango interpercentílico 95-5). Con colores, en qué porcentaje contribuye a dicha dispersión el cambio del esquema que más discrepancias introduce. Por ejemplo, verde significa que cambiar el esquema de capa límite introduce más diferencias que cambiar cualquiera de los otros dos esquemas, y la intensidad del verde indica el porcentaje de la dispersión total del que es responsable el cambio del esquema de capa límite.

En cuanto a qué procesos resultan más influyentes, se observa un claro predominio de la parametrización de capa límite en la incertidumbre asociada a las proyecciones del valor medio de las PDFs. Sin embargo, para el resto de magnitudes características de las PDFs (en las que la influencia de los valores medios desaparece), los esquemas de cúmulos y microfísica también parecen decisivos. Por lo tanto, las magnitudes que caracterizan la variabilidad son sensibles a cualquier cambio de esquema. En realidad, en este caso, la interacción y las realimentaciones entre los tres procesos evaluados serán las que determinen cuál de ellos aparece como predominante.

Por último, en la Figura 5 se representan las proyecciones individuales de cada experimento, en promedio espacial para toda la Península Ibérica. Estas gráficas permiten distinguir que siempre uno de los esquemas de capa límite, *MRF*, proyecta mayores cambios en todas las magnitudes analizadas (experimentos con *ID* par frente a impar); que siempre uno de los esquemas de cúmulos, *Kain-Fritsch*, proyecta también mayores cambios (simulaciones 1 y 2 frente a 3 y 4; 5 y 6 frente a 7 y 8); y que uno de los esquemas de microfísica, *Mixed Phase*, conduce a menores discrepancias entre las simulaciones que el otro (simulaciones 1, 2, 3 y 4 frente a 5, 6, 7 y 8). Además, existe una relación entre las configuraciones más cálidas o que simulan una mayor varianza en el presente y las que proyectan mayores cambios para el futuro. En general, son coincidentes. Teniendo en cuenta que, en comparación con los *hindcasts*, las simulaciones MM5-ECHAM5-PR tendían a infraestimar las magnitudes analizadas, las proyecciones más intensas son, en principio, las más fiables.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha analizado un conjunto multifísica (de ocho miembros) de proyecciones de cambio climático sobre la Península Ibérica para finales de siglo. Dado que uno de los aspectos más interesantes del cambio climático es su influencia en extremos, hemos analizado las funciones de distribución de probabilidad de la temperatura máxima diaria de verano: valores medios, asimetría y

colas de la distribución.

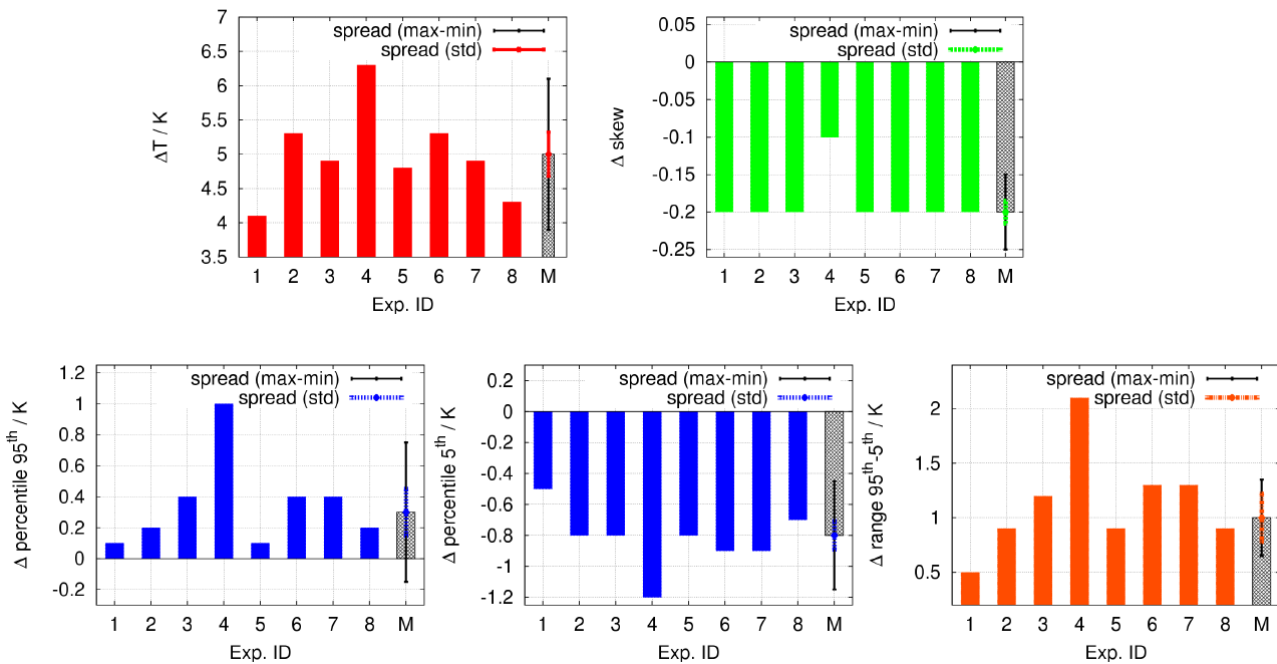


Figura 5: Cambios proyectados por cada uno de los miembros del conjunto de simulaciones MM5-ECHAM5, en promedio espacial para toda la Península Ibérica, para cada una de las magnitudes características de las PDFs analizadas. El *Exp. ID* “M” denota el promedio de todas las proyecciones, el resto se corresponde con las especificaciones de la Tabla 1. Las barras de error representan la dispersión del conjunto de proyecciones, definido como la desviación estándar entre ellos (“std”) o como la diferencia entre el máximo y el mínimo cambio proyectado (“max-min”).

Las proyecciones de futuro se han realizado acoplado al modelo regional MM5 el modelo global ECHAM5. Para evaluar la bondad de las proyecciones, las simulaciones del periodo de referencia se han comparado con *hindcasts* análogos a ellas. El acuerdo espacial entre unos y otros patrones es muy bueno, pero en general se infraestiman todas las magnitudes analizadas. Esto indica que las proyecciones de futuro probablemente sean demasiado conservativas.

Los patrones del periodo futuro muestran distribuciones espaciales similares a los patrones del periodo de referencia, pero son más intensos. Las proyecciones muestran un calentamiento especialmente intenso en el centro-sur de la Península Ibérica, un achatamiento de las PDFs (aumento de la variabilidad) en el norte peninsular, al que contribuye más el percentil 5 que el 95, y una intensificación del skew negativo (PDFs más asimétricas, con colas izquierdas más largas y colas derechas más pesadas). El comportamiento diferencial entre el norte y el sur de la península responde a características climáticas concretas. El mayor calentamiento se proyecta sobre áreas secas, y el mayor aumento de la variabilidad sobre áreas húmedas. En realidad estas últimas pertenecen a las llamadas *Transitional Climate Zones*, donde se proyecta un descenso severo de la humedad del suelo y, efectivamente, un aumento de la variabilidad (SENEVIRATNET *et al.*, 2006; FISCHER *et al.*, 2009).

En cuanto a las incertidumbres asociadas a la configuración física del modelo regional, encontramos diferencias entre las distintas proyecciones del orden del 50% de los cambios medios proyectados. La parametrización de capa límite es la más influyente sobre los valores medios de las PDFs, pero

en el resto de las magnitudes analizadas la interacción entre las distintas parametrizaciones puestas en juego no permite destacar a ningún proceso como el más decisivo. A pesar de ello, encontramos que las configuraciones que menos infraestiman en el periodo de referencia son también las que proyectan los mayores cambios.

Estos resultados enfatizan la importancia de la influencia de los procesos que suelen ser parametrizados en los modelos regionales de simulación climática, demandan mejoras en los esquemas ya desarrollados, y advierten sobre la no-despreciable fuente de incertidumbres que constituyen a la hora de realizar proyecciones de futuro. Los mecanismos físicos que están detrás de ellos serán investigados en trabajos futuros.

REFERENCIAS

CHEN, F. y DUDHIA, J. (2001). *Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity*. Monthly Weather Review, 129, pp. 569-585.

DÉQUÉ, M.; JONES, R.G.; WILD, M.; GIORGI, F.; CHRISTENSEN, J.H.; HASSELL, D.C.; VIDALE, P.L.; ROCKEL, B.; JACOB, D.; KJELLSTRÖM, E.; CASTRO, M.; KUCHARSKI, F. y VAN DEN HURK, B. (2005). *Global high resolution versus Limited Area Model climate change projections over Europe: quantifying confidence level from PRUDENCE results*. Climate Dynamics, 25, pp. 653-670.

DUDHIA, J. (1989). *Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model*. Journal of Atmospheric Sciences, 46, pp. 3077-3107.

FERNANDEZ, J.; MONTAVEZ, J. P.; SAENZ, J.; GONZALEZ-ROUCO, J. F y ZORITA, E. (2007). *Sensitivity of the MM5 mesoscale model to physical parameterizations for regional climate studies: Annual cycle*. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 112(D4), D04101.

FISCHER, E.M. y SCHÄR, C. (2009). *Future changes in daily summer temperature variability: driving processes and role for temperature extremes*. Climate Dynamics, 33, pp. 917-935.

GÁLOS, B.; LORENZ, P. y JACOB, D. (2007). *Will dry events occur more often in Hungary in the future?*. [Environmental Research Letters, 2\(L034006\)](#).

GIORGI, F. (1995). *Perspectives for regional earth system modeling*. Global and Planetary Change, 10, pp. 23-42.

GIORGI, F. (2006). *Climate change hot-spots*. Geophysical Research Letters, 33(L08707).

GOMEZ-NAVARRO, J. J.; MONTAVEZ, J. P.; JEREZ, S.; JIMENEZ-GUERRERO, P.; GARCIA-VALERO, J. A. y GONZALEZ-ROUCO J. F. (2010). *Warming patterns in regional climate change projections over the Iberian Peninsula*. Meteorologische Zeitschrift. En imprenta.

GRELL, G.; KUO, Y.H. y PASCH, R.J. (1991). *Semi-prognostic tests of cumulus parameterization schemes in the middle latitudes*. Monthly Weather Review, 119, pp. 5-31.

GRELL, G. A.; DUDHIA, J. y STAUFFER D.R. (1995). *A description of the fifth generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5)*. NCAR Tech Note NCAR/TN-398+STR, pp. 138.

HONG, S. Y. y H. L. Pan (1996). *Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model*. Monthly Weather Review, 124, pp. 2322-2339.

JANJIĆ, Z. I. (1994). *The step-mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes*. Monthly Weather Review, 122(5), pp. 927-945.

JEREZ, S.; MONTAVEZ, J. P.; GOMEZ-NAVARRO, J. J.; JIMENEZ-GUERRERO, P.; JIMENEZ, J.M. y GONZALEZ-ROUCO J. F. (2010). *Temperature sensitivity to the land-surface model in MM5 climate simulations over the Iberian Peninsula*. Meteorologische Zeitschrift. En imprenta.

JIMÉNEZ-GUERRERO, P.; JEREZ, S.; GÓMEZ-NAVARRO, J.J.; LORENTE, R.; GARCÍA-VALERO, J.A. y MONTÁVEZ, J.P. (2010). *Impacts of climate change on air quality levels in southwestern Europe for the 21st century*. In: Proceedings of the 13th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (1-4 June 2010, París, France). Edited by Armand Albergel, París, France, ISBN: 2-8681-5062-4, pp. 327-331.

KAIN, J.S. y FRITSCH, J.M. (1993). *Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. The Representation of cumulus in numerical models*. K. A. Emanuel and D. J. Raymond, [American Meteorological Society Monographs and Books](#), pp. 165-170.

LIANG, X.Z.; KUNKEL, K.E.; MEEHL, G.A.; JONES, R.G. y WANG, J.X.L. (2008). *Regional climate models downscaling analysis of general circulation models present climate biases propagation into future change projections*. Geophysical Research Letter, 35(L08709).

MLAWER, E. J.; TAUBMAN, S.J.; BROWN, P.D.; IACONO, M.J. y CLOUGH, S.A. (1997). *Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated model for the longwave*, Journal of Geophysical Research, 102, 16, pp. 663-682.

REISNER, J.; RASMUSSEN, R.M. y BRUINTJES, R.T. (1998). *Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 124 B, pp. 1071-1107.

ROECKNER, E.; BAEUML, G.; BONAVENTURA, L.; BROKOPF, R.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; HAGEMANN, S.; KIRCHNER, I.; KORNBLUEH, L.; MANZINI, E.; RHODIN, A.; SCHLESE, U.; SCHULZWEIDA, U. y TOMPKINS, A (2003). *The atmospheric general circulation model ECHAM5. Part 1: model description*. MPI-Berichte, 349. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.

SENEVIRATNE, S.I.; LÜTHI, D.; LITSCHI, M. y SCHÄR, C. (2006). *Land-atmosphere coupling and climate change in Europe*. Nature, 443(14).

STENSRUD, D. (2007). *Parameterization Schemes: Keys to Understanding Numerical Weather Prediction Models*. Cambridge University Press.

UPPALA, S.; KALLBERG, P.; SIMMONS, A.; ANDRAE, U.; ECHTOLD, V.; FIORINO, M.; GIBSON, J.; HASELER, J.; HERNANDEZ, A.; KELLY, G.; LI, X.; ONOGI, K.; SAARINEN S.; SOKKA, N.; ALLAN, R.; ANDERSSON, E.; ARPE, K.; BALMASEDA, M.; BELJAARS, A.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; CAIRES, S.; CHEVALLIER, F.; DETHOF, A.; DRAGOSAVAC, M.; FISHER, M.; FUENTES, M.; HAGEMANN, S.; HOLM, E.; HOSKINS, B.; ISAKSEN, L.; JANSSEN, P.; JENNE, R.; MCNALLY, A.; MAHFOUF, J.; MORCRETTE, J.;

RAYNER, N.; SAUNDERS, R.; SIMON, P.; STERL, A.; TRENBERTH, K.; UNTCH, A.; VASILJEVIC, D.; VITERBO, P.; WOOLLEN, J. (2005) *The ERA-40 re-analysis*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 131, pp. 2961-3012.

VIDALE, P.L.; LÜTHI, D.; FREI, C.; SENEVIRATNE, S.I. y SCHÄR, C. (2003). *Predictability and uncertainty in a regional climate model*. Journal of Geophysical Research, 108(D18), 4586.

WU, W.; LYNCH, A.H. y RIVERS, A. (2005). *Estimating the Uncertainty in a Regional Climate Model Related to Initial and Lateral Boundary Conditions*. Journal of Climate, 18, pp. 917-933.