

RECONSTRUCCIONES PALEOCLIMÁTICAS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA DESDE UNA PERSPECTIVA DE MODELIZACIÓN

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

RESUMEN

Se ha realizado una simulación de la evolución del clima en la Península Ibérica en el último milenio con el Modelo de Circulación Regional MM5 implementado con una resolución espacial de 30 km. Las condiciones de contorno para el modelo regional se han tomado del Modelo de Circulación General ECHO-G, que implementa una resolución espacial de 300 km aproximadamente sobre la Península Ibérica. Los forzamientos externos de ambos modelos están basados en reconstrucciones de la evolución de la potencia solar, concentraciones de gases de efecto invernadero y efectos radiativos debidos a grandes erupciones volcánicas. El modelo regional mejora la reproducción del clima en la península y es capaz de detectar diferencias regionales que el modelo global no capta. Por lo tanto, esta nueva simulación contribuye a entender mejor los mecanismos físicos responsables de eventos climáticos del pasado, y así mejorar nuestra comprensión de la evolución del clima en el futuro.

Palabras clave: Paleoclima, Modelo de Circulación General, Modelo de Circulación Regional, Downscaling Dinámico, MM5, ERA40, ECHO-G, Climatología, Variabilidad Interna.

ABSTRACT

A simulation of the climate of the Iberian Peninsula (IP) for the last millennium has been performed with the Regional Circulation Model MM5, implemented with a spatial resolution of 30 km. The experiment is driven by the General Circulation Model ECHO-G, which implements a spatial resolution about 300 km over the IP. External forcings are based on reconstructions of the evolution of the solar constant power, Green House Gases and the radiative effects of big volcano events. The regional model improves the simulation of the local climate, and depicts important differences respect to the global model. This simulation contributes to the understanding the physical mechanism under important past climate events, and hence improves our comprehension of the evolution of the future climate.

Key words: Palaeoclimate, General Circulation Model, Regional Circulation Model, Dynamic Downscaling, MM5, ERA40, ECHO-G, Climatology, Internal Variability.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se ha registrado un notable aumento de la temperatura media global, que ha ido acompañado de la modificación de otras variables climáticas, como la disminución de la

superficie de la criosfera o el aumento del nivel del mar (IPCC, 2007). Estos cambios recientes, que no parecen tener precedente en los registros instrumentales, conforman el denominado problema del Cambio Climático.

El sistema climático está compuesto por la Atmósfera, la Hidrosfera, la Criosfera, la Litosfera y la Biosfera. Cada una de estas partes tiene diferentes tiempos de respuesta (desde horas, como los cambios en nubosidad, hasta millones de años, como la deriva continental). Estos elementos interactúan entre sí dando como resultado un sistema complejo que está caracterizado por una importante variabilidad natural. Así pues, discernir qué parte del actual calentamiento climático es debido a esta variabilidad natural y qué parte lo es a causas antropogénicas es una cuestión compleja a la que todavía no se ha dado una respuesta totalmente satisfactoria (IPCC, 2007). A este respecto, en los últimos años ha habido un notable incremento en los esfuerzos por entender la variabilidad natural del último milenio (JONES *et al.*, 2001; ZORITA *et al.* 2005; MANN *et al.*, 2008; y muchos otros). Esto ha permitido poner el relativo corto período instrumental en un contexto climático más amplio, así como explorar los procesos físicos que subyacen a los eventos climáticos.

Este esfuerzo por entender la variabilidad climática en períodos preinstrumentales proviene principalmente de reconstrucciones basadas en fuentes de información indirectas (datos *proxy*), así como simulaciones numéricas basadas en Modelos de Circulación General (MCG). Las reconstrucciones climáticas permiten estudiar la variabilidad climática más allá de los registros instrumentales mediante el uso de información indirecta, como registros documentales, anillos de árboles, núcleos de hielo, etc. Todas ellas proporcionan información a diversas resoluciones temporales y espaciales, aunque en general se concentran en la temperatura y precipitación (JONES *et al.*, 2001; LUTERBACHER *et al.*, 2004; MANN *et al.*, 2008). Por otro lado, el enorme crecimiento en la capacidad computacional de los últimos años ha hecho posible simular el sistema climático con modelos de alta resolución espacial y temporal durante períodos de tiempo de siglos e incluso milenios (ZORITA *et al.* 2005).

La comparación de los datos que provienen de modelos y de reconstrucciones presentan un gran potencial, tanto para explorar las limitaciones de los modelos como para evaluar las metodologías empleadas en los métodos de reconstrucción (GONZALEZ-ROUCO *et al.*, 2009). En particular, dado que los MCG se utilizan para generar proyecciones de cambio climático, las simulaciones paleoclimáticas pueden ser de gran utilidad en ejercicios de validación de estos modelos. Sin embargo, mientras que las variables en las que se basan las reconstrucciones están muy influenciadas por las características locales de la región donde se extraen, los MCG no son capaces de reproducir estos detalles, debido principalmente a su vasta resolución espacial. Esta diferente sensibilidad a la evolución regional y global del clima dificulta la comparación entre ambas bases de datos, sobre todo cuando se pretende comparar la respuesta del sistema a escala interanual e incluso decadal.

Los Modelos de Circulación Regional (MCR) se presentan como un método para la mejorar las comparaciones entre los datos de gran escala con las características regionales del clima. La ventaja de este método es que un MCR reduce la escala horizontal de una manera físicamente consistente, ya que simula los procesos físicos que subyacen en el sistema climático de manera similar a como lo hace el MCG, pero en un área limitada. Esta técnica de regionalización, denominada habitualmente *Downscaling Dinámico*, se utiliza de manera habitual tanto en aplicaciones meteorológicas como en proyecciones de cambio climático (GOMEZ-NAVARRO *et al.*, 2010). Hay sin embargo pocos estudios paleoclimáticos basados en estos modelos, la mayoría de ellos cubriendo períodos de hace más de 1000 años (HOSTETLER *et al.*, 2000).

En este estudio se presentan los primeros resultados de una regionalización de una simulación realizada con el modelo global ECHO-G que se ha llevado a cabo mediante el modelo mesoescalar MM5, y que cubre el período 1000-1990. El estudio evalúa la capacidad del modelo regional de reproducir la climatología de la Península Ibérica cuando éste se acopla al modelo global. Para ello se comparan diversas variables climáticas obtenidas mediante una regionalización similar efectuada acoplada a datos de reanálisis. Finalmente, también se aborda la evolución del clima en los últimos 1000 años según el modelo, comentando las principales diferencias entre el modelo regional y el global.

2. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Para confeccionar este trabajo se han llevado a cabo dos simulaciones con el mismo modelo regional. Una de ellas se ha alimentado con datos de reanálisis ERA40 (UPALA *et al.*, 2005), y cubre el período de treinta años 1961-1990. Esta simulación se ha llevado a cabo para evaluar la capacidad del modelo regional para reproducir la climatología de la Península Ibérica, puesto que los datos de ERA40 son la mejor base de datos con la que se puede alimentar un modelo regional para reproducir el clima observado. La otra está acoplada al modelo global ECHO-G, y cubre el último milenio (1001-1990). La descripción de esta simulación es el propósito del presente trabajo.

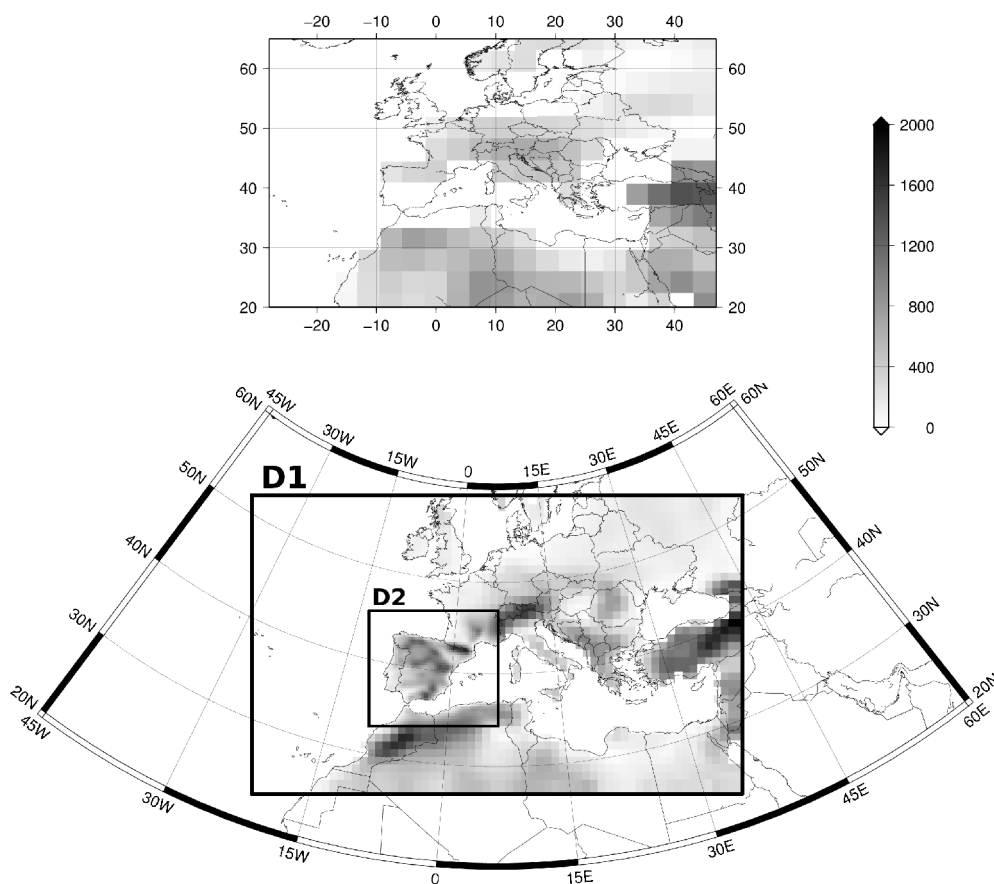


Fig. 1: En la superior se muestra la resolución del modelo global ECHO-G. En la figura superior se representan los dominios anidados bidireccionalmente utilizados en las simulación con el modelo regional MM5, que implementa resoluciones de 90 y 30 km, respectivamente. En ambas figuras la escala de grises representa la topografía utilizada por el modelo.

El modelo ECHO-G consiste en el modelo atmosférico ECHAM4 acoplado al modelo de océano HOPE-G (LEGUTKE y VOSS, 1999). Tiene una resolución espacial de 3.75° x 3.75° y 19 niveles verticales. El modelo está forzado por tres fuentes externas: concentraciones de gases de efecto invernadero, evolución de la radiación solar y efectos radiativos de grandes eventos volcánicos. Este último efecto se ha tenido en cuenta mediante la introducción de una constante solar efectiva. La evolución de estas variables se ha obtenido mediante reconstrucciones basadas en medidas indirectas. Para una descripción más completa de la simulación, puede consultarse (ZORITA et al., 2005) y referencias en ese artículo.

El modelo regional utilizado en este estudio es la quinta versión del modelo mesoescalar de Pennsylvania-State University-National Centre for Atmospheric Research, más conocido como MM5 (DUDHIA, 1993). La Figura 1 muestra los dos dominios de 90 km y 30 km respectivamente acoplados bidireccionalmente usados en las dos simulaciones, junto con la resolución del modelo global. El dominio principal cubre Europa y gran parte del Mar Mediterráneo. El segundo dominio cubre la Península Ibérica a mayor resolución, y es en el que se centra el presente estudio. Verticalmente se han considerado 24 niveles verticales, con el más alto en 100 hPa. La configuración física del modelo se ha elegido para minimizar el coste computacional, ya que se ha demostrado que no hay una combinación óptima que garantice los mejores resultados para todos los fenómenos y todas las áreas (FERNANDEZ *et al.*, 2007). Ésta es la misma que se ha empleado en diversas proyecciones de cambio climático (GOMEZ-NAVARRO *et al.*, 2010), así como otros estudios sobre el papel del modelo de suelo en simulaciones regionales (JEREZ *et al.*, 2010).

En la simulación del último milenio, los forzamientos externos comentados anteriormente (variaciones en la constante solar efectiva, así como en la concentración de gases de efecto invernadero) son exactamente los mismos en el modelo global y el regional. De esta manera se evitan inconsistencias físicas entre ambos modelos.

3. RESULTADOS

3. 1. Valor añadido del modelo regional

Para valorar si el modelo MM5 es capaz de mejorar la simulación de ECHO-G, se comparan los resultados de acoplar ambos modelos con los de acoplar MM5 a ERA40. Se ha elegido un período de tiempo en el que ambos conjuntos de datos solapen, 1961-1990. En trabajos previos, JEREZ *et al.*, (2010) han mostrado cómo esta última simulación es capaz de reproducir las características regionales de la Península Ibérica, por lo que en este trabajo se usarán los datos de esa simulación como marco de referencia.

En la Figura 2 se muestran los valores de temperatura media a dos metros (T2M) en el período 1961-1990 reproducida por ECHO-G y ERA40, así como el resultado de acoplar MM5 a ambos. Aparte de las diferencias debidas a la resolución espacial de ambos conjuntos de datos, la estructura espacial de la temperatura para ECHO-G y ERA40 es desigual. En general, ECHO-G sobrestima la temperatura, sobre todo en el tercio norte de la Península Ibérica. Así mismo, éste tiende a infraestimar la variabilidad del ciclo anual, desarrollando verano muy frescos e inviernos muy cálidos (no mostrado en la figura). Las diferencias entre ambos conjuntos son debidas a la mayor resolución de ERA40, a las diferentes parametrizaciones de ambos modelos y sobre todo al proceso de asimilación de datos observacionales que se ha llevado en los datos de reanálisis. Estas diferencias son sin embargo ampliamente reducidas cuando se acopla MM5 a ambos conjuntos de datos, como se observa en las dos figuras inferiores. Además de la mejora en la resolución, la estructura espacial de la temperatura es ahora muy similar, que está claramente marcada por la orografía en ambos casos (comparar con Figura 1). Hay una mejora también en la reproducción del

ciclo anual, aunque la simulación con ECHO-G sigue infraestimando la temperatura en verano (no mostrado en la figura). El hecho de que la simulación alimentada por ECHO-G genere un patrón de temperaturas muy similar a la que ha sido alimentada con ERA40 ilustra el importante valor añadido del proceso de regionalización.

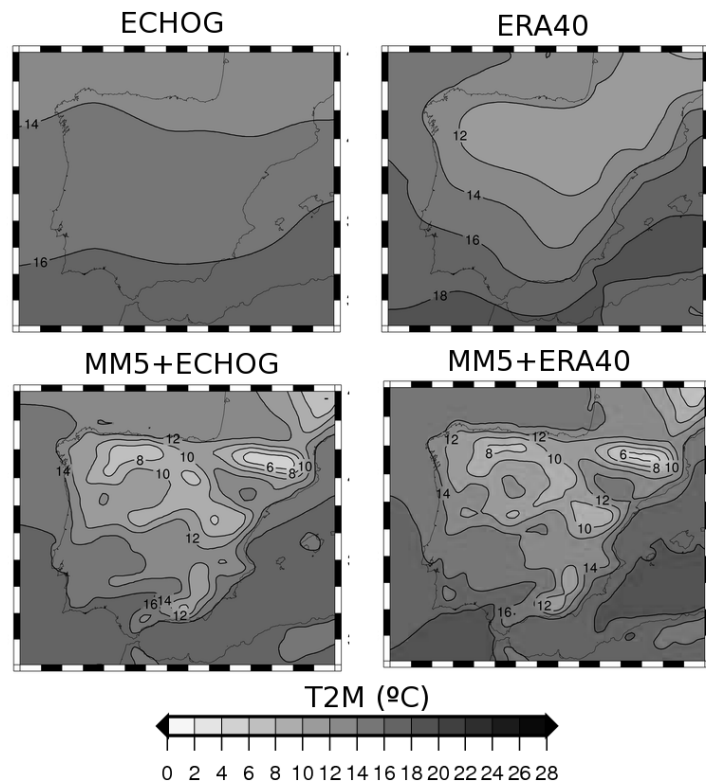


Fig. 2: Temperatura media a 2 metros para el período 1961-1990. Se presenta el resultado para ECHO-G (arriba izquierda), ERA40 (arriba derecha), MM5 acoplado a ECHO-G (abajo izquierda) y MM5 acoplado a ERA40 (abajo, derecha).

En la Figura 3 se representa la precipitación media anual en el período 1961-1990 reproducida por ECHO-G y ERA40, así como el resultado de acoplar MM5 a ambos. Como antes, hay importantes diferencias entre ambos modelos globales. En general, ECHO-G infraestima la precipitación en la zona del noreste, aunque ambos modelos reproducen el gradiente norte-sur de esta variable. Como en el caso de la temperatura, el modelo regional es capaz de estrechar las diferencias entre ambos modelos. Las principales zonas de precipitación están situadas en el norte de la península, sobre todo en zonas montañosas. Aunque los patrones de la simulación alimentada con ECHO-G y ERA40 son muy similares, en el primer caso se sobrestima la precipitación. Esto podría ser atribuible a una sobre estimación de la circulación zonal del modelo ECHO-G, la cual está relacionada con el desarrollo de veranos demasiado fríos (DEMUZERE *et al.*, 2009).

Otro aspecto interesante del proceso de regionalización es que no sólo mejora la reproducción de valores medios, sino que también mejora la variabilidad de las series. Aunque no se muestra por cuestiones de espacio, ECHO-G tiende a infraestimar la variabilidad interanual de la temperatura en invierno, así como la de la precipitación durante todo el año. Por el contrario, este modelo global sobrestima la variabilidad de la temperatura en verano, sobre todo en la zona norte de la Península. Ambos aspectos son mejorados por el modelo regional, aumentando o disminuyendo la variabilidad interanual de la precipitación y la temperatura, siempre en el sentido de reducir las diferencias entre las simulaciones MM5+ECHO-G y MM5+ERA40.

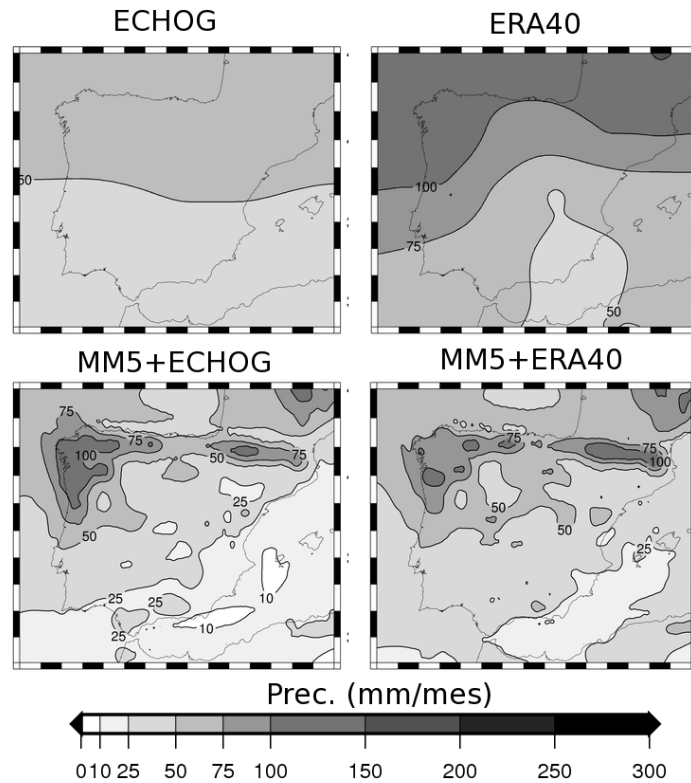


Fig. 3: Precipitación media anual para el período 1961-1990. Se presenta el resultado para ECHO-G (arriba izquierda), ERA40 (arriba derecha), MM5 acoplado a ECHO-G (abajo izquierda) y MM5 acoplado a ERA40 (abajo, derecha).

3.2 Evolución del clima en los últimos 1000 años

Una vez se ha ilustrado el valor añadido del proceso de regionalización, pasamos en esta sección a exponer las principales resultados de la simulación completa de 1000 años.

En la Figura 4 se representa la evolución del promedio espacial para el dominio 2 (ver Figura 1) de las anomalías de temperatura y precipitación respecto al siglo XX. Se presentan las series anuales obtenidas para el modelo ECHO-G, para MM5 acoplado a éste último, así como las series correspondientes a sendas reconstrucciones de temperatura (LUTERBACHER *et al.*, 2004) y precipitación (PAULING *et al.*, 2006), ambas comenzando en 1500. Todas las series han sido suavizadas mediante una media móvil de 31 años. Hemos separado la precipitación en en dos áreas, Noroeste y Sureste, ya que el régimen de precipitaciones es bastante diferente en ambas. En la figura se aprecia cómo ambos modelos siguen una evolución muy similar, con períodos fríos y cálidos reproducidos de manera casi simultánea en ambos casos.

De manera general, en las simulaciones se aprecia un período frío que abarca desde 1400 hasta 1850 aproximadamente. Este período coincide con la denominada Pequeña Edad de Hielo, que ha sido documentada de manera independiente por diversos registros fósiles y documentales de la época. Justo antes de ese periodo, en torno al año 1100, aparece un período cálido en el se reproducen temperaturas tan altas como en la actualidad, y que coincide con el denominado Óptimo Medieval. Por último, en el último tercio de la simulación aparece una tendencia casi uniforme hacia el calentamiento que coincide con la Era Industrial. Además de la tendencia general de baja frecuencia, hay una sucesión de períodos cálidos y fríos que parecen sucederse con una frecuencia de varias décadas. Así, puede apreciarse un importante mínimo en las temperaturas en torno al año 1700, que coincide con el período frío denominado Mínimo de Maunder. Algo similar ocurre con el mínimo de Dalton, en torno al 1820.

Aunque no es el el objetivo principal del presente estudio, hemos efectuado una comparación preliminar entre los resultados de la simulación y las reconstrucciones de LUTERBACHER *et al.* (2004) en la Figura 4. En invierno se aprecia en las reconstrucciones una clara tendencia hacia unas temperaturas más altas durante el siglo XX, en clara concordancia con los modelos. Aparece sin embargo un máximo en torno a 1800 que es incompatible con las simulaciones (de hecho, los modelos simulan un período corto muy frío que parece estar directamente forzado por un mínimo en la reconstrucción de la actividad solar que se ha utilizado para alimentar la simulación). La amplitud de la variabilidad tras aplicar la media móvil es similar, indicando que la variabilidad del modelo parece tener una amplitud similar a la natural. En verano nuevamente hay buen acuerdo en el último siglo, aunque en el resto del período las reconstrucciones tienden a sobrestimar la temperatura e infraestimar su variabilidad respecto a las simulaciones. Una causa plausible para estas diferencias es la limitada calidad de las reconstrucciones de LUTERBACHER *et al.* (2004) sobre la península, ya que éstas están basadas en muy pocos datos reales en este área. Un estudio posterior más exhaustivo habría de utilizar reconstrucciones más recientes y de mayor confianza.

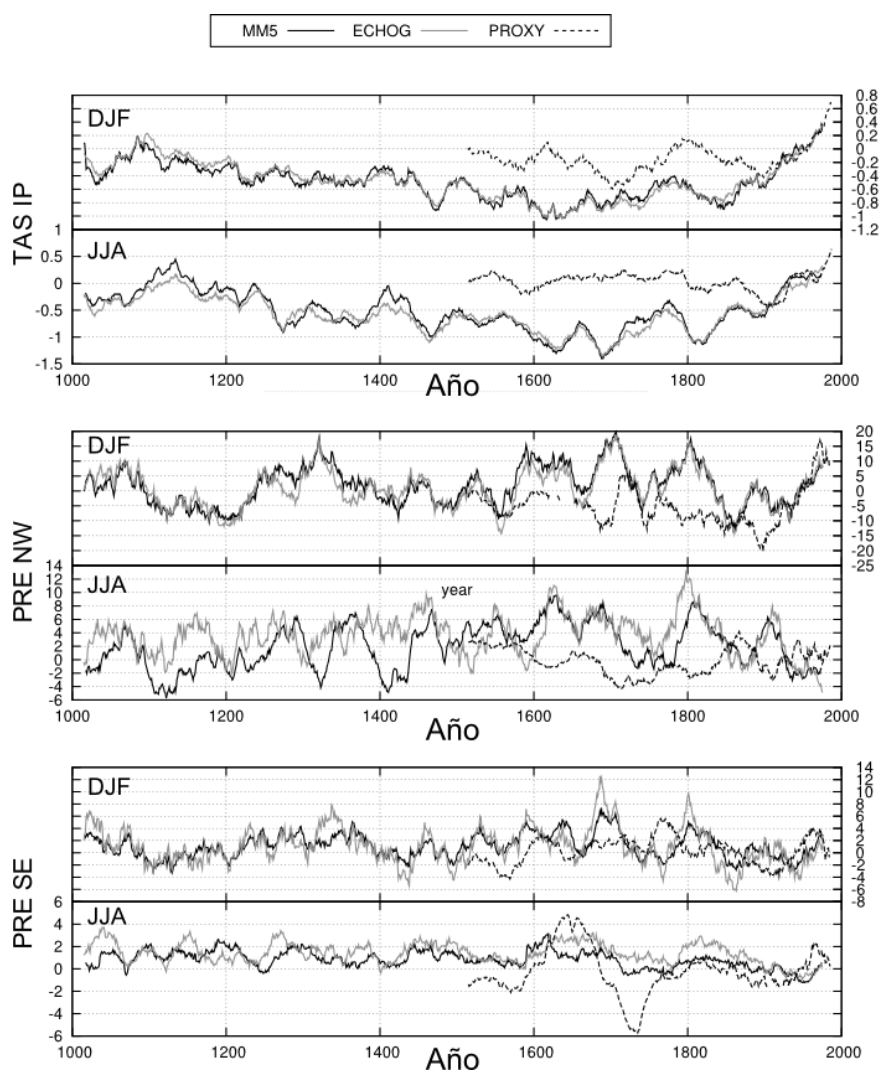


Fig. 4: Anomalías de la temperatura a dos metros para toda la península (arriba) y precipitación en el Noroeste (centro) y Sureste (abajo) respecto al siglo XX. Se presentan las series de verano (JJA) e invierno (DJF) correspondientes a ECHO-G (gris), MM5 (negro), así como a las reconstrucciones (negro en línea discontinua). Las series han sido suavizadas con una media móvil de 31 años.

Respecto a la precipitación, en este caso aparecen diferencias más importantes entre ambos modelos, si bien los períodos más importantes húmedos y secos van a la par en ambas simulaciones. El modelo regional introduce no obstante una mayor variabilidad a la serie de precipitaciones, intensificando los períodos secos y también húmedos, fruto de una física claramente diferente a la del modelo global, que es capaz de reproducir de manera más adecuada la climatología en la Península Ibérica, como se mostró en el apartado anterior. Tanto las reconstrucciones como el modelo regional muestran una clara tendencia positiva en la precipitación en el Noreste en invierno, siendo ésta la mayor coincidencia entre la simulación y la reconstrucción. Sin embargo, el aspecto más destacable de las reconstrucciones de PAULING *et al.* (2006) en la península es que presentan muy poca variabilidad (con la notable excepción de la precipitación en verano en el Sureste). Como en el caso de la temperatura, serían necesarias reconstrucciones más realistas de la precipitación en la península para poder extraer conclusiones firmes sobre la calidad de las simulaciones.

Dentro del modelo, y en términos generales, la tendencia de la precipitación parece ir invertida a la de la temperatura, sobre todo debido a un aumento en las precipitaciones en la Pequeña Edad de Hielo. Las causas de este fenómeno podrían estar relacionadas con la circulación zonal, pues es sabido que el régimen de precipitaciones en la PI está fuertemente anticorrelacionado con la Oscilación del Atlántico Norte (NAO). Durante la Pequeña Edad de Hielo, el modelo simula una fase de débil NAO (no mostrado). Así pues, una posible explicación a la alta precipitación podría ser una disminución de la intensidad de la NAO en los períodos fríos. La conexión entre altas temperaturas y bajas precipitaciones registrada en esta simulación parece estar en concordancia con diversas proyecciones e cambio climático en el área mediterránea (GIORGI y BI, 2005), y es un claro indicio de que las condiciones de aridez en este área podrían ir en aumento durante el presente siglo.

Las diferencias entre el modelo global y el regional no se aprecian tras hacer un promedio para todo el dominio, sino que se encuentran a escala regional. Para ilustrar este importante punto, en la Figura 5 se muestra la anomalía de temperatura simulada en verano para el periodo del mínimo de Maunder (1670-1700) respecto al promedio para el siglo XX. Se puede apreciar que aunque el valor medio espacial es similar (ver Figura 4), la estructura espacial de las anomalías es muy diferente. En particular, el modelo regional enfatiza las anomalías frías, sobre todo en el centro de la península donde llega a ser 0.9 grados mas frío que el siglo XX en algunas áreas, mientras que ECHO-G sólo es 0.5 grados mas frío. Esto es en parte debido a que su resolución espacial no le permite resolver la orografía de la PI (ver Figura 1).

CONCLUSIONES

Se ha realizado una simulación del clima de la PI durante el último milenio. Para ello se ha utilizado el modelo regional MM5 con una resolución espacial de 30 km. Las condiciones de frontera para el modelo han sido proporcionadas por una simulación análoga realizada con el modelo global ECHO-G. En ambos casos, los forzamientos externos están basados en reconstrucciones de la evolución de la concentración de gases de efecto invernadero, variaciones en la potencia solar y efectos de grandes volcanes.

Se han comparados los resultados del modelo regional con los equivalentes obtenidos cuando el modelo es conducido por datos de reanálisis. Esto ha permitido valorar la capacidad del modelo regional para mejorar la climatología del global sobre la península. MM5 es capaz de mejorar la reproducción del ciclo anual, y gracias a su mayor resolución espacial también reproduce las diferencias regionales que el modelo global no es capaz de ver.

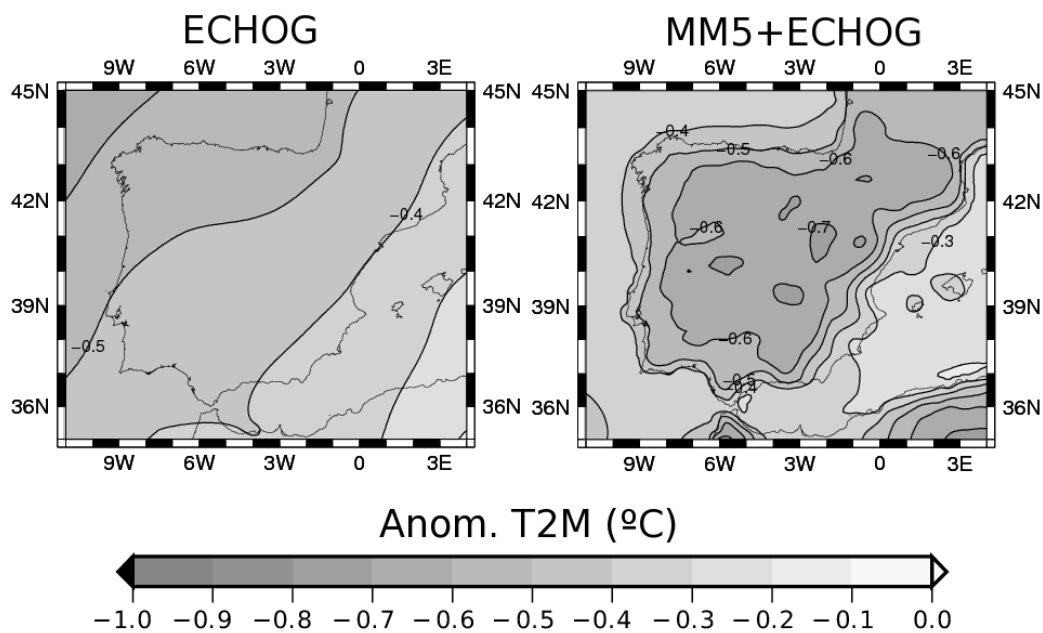


Fig. 5: Anomalías de T2M en verano en el mínimo de Maunder (1670-1700) respecto al periodo 1900-1990.

Aunque el modelo regional sigue al global cuando se miran las series de la evolución de los valores promediados para todo el dominio, hay grandes diferencias que son apreciables mirando los detalles regionales. Esta mayor capacidad del modelo regional para reproducir las características locales es crucial cuando se pretende comparar los resultados de la simulación del clima pasado con reconstrucciones procedentes de datos *proxy*, ya que éstas están influenciadas por las características locales del lugar en donde se extraen los datos, mientras que el modelo global es incapaz de reproducir tales detalles.

Las primeras comparaciones indican algunas correspondencias, así como también importantes diferencias, entre simulación y reconstrucciones. Las diferencias quizás sean debidas a la calidad de las reconstrucciones empleadas en este estudio, que no gozan de gran calidad sobre el dominio de interés. No obstante, el modelo puede estar cometiendo también importantes errores sistemáticos. El desarrollo de reconstrucciones más modernas y de mayor calidad podría mejorar esta comparación, y permitir así una evaluación más objetiva de las deficiencias de ambas metodologías.

REFERENCIAS

DEMEZERE, M.; WERNER, M.; VAN LIPZIG, N. P. M. y ROECKNER, E. (2009). *An analysis of present and future ECHAM5 pressure fields using a classification of circulation patterns*. International Journal of Climatology, 29, pp. 1796-1810.

DUDHIA, J. (1993). *A nonhydrostatic version of the Penn StateNCAR mesoscale model: Validation tests and simulation of an Atlantic cyclone and cold front*. Monthly Weather Review, 121, pp. 1493-1513.

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.

- GIORGI, F. y BI, X. (2005). *Updated regional precipitation and temperature changes for the 21st century from ensembles of recent AOGCM simulations*. Geophysical Research Letters, 32, L21715.
- 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.
- GONZALEZ-ROUCO, J. F.; BELTRAMI, H.; ZORITA, E. y STEVENS, M. B. (2009). *Borehole climatology: a discussion based on contributions from climate modeling*. Climate of the Past, 6, pp. 97-127.
- HOSTELER, S. W.; BARTLEIN, P. J.; CLARK, P. U.; SMALL, E. E.; y SOLOMON, A. M. (2000). *Simulated influences of Lake Agassiz on the climate of central North America 11,000 years ago*. Letters to nature, 405, pp. 334-337,
- 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.
- JONES, P. D.; OSBORN, T. J. y BRIFFA, K. R. (2001). *The evolution of climate over the last millenium*. Science, 292, pp. 662-667.
- LEGUTKE, S.; VOSS, R. (1999). *The Hamburg atmosphere-ocean coupled circulation model ECHO-G*. Technical report, DKRZ.
- LUTERBACHER, J.; DIETRICH, D.; GROSJEAN, M.; WANNER, H. (2004). *European seasonal and annual temperature variability, trends and extremes since 1500*. Science, 303, pp. 1499-1503.
- MANN, M. E.; ZHANG, Z.; HUGHES, M. K.; BRADLEY R. S.; MILLER S. K.; RUTHERFORD, S. y NI, F. (2008). *Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia*. P. Natl. Acad. Sci. USA, 105, pp. 13252-13257.
- PAULING, A.; LUTERBACHER, J.; CASTY, C.; WANNER, H. (2006): *Five hundred years of gridded high-resolution precipitation reconstructions over Europe and the connection to large-scale circulation*. Climate Dynamics, 26, pp. 387–405.
- 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.
- ZORITA, E; GONZÁLEZ-ROUCO, J. F; VON STORCH, H; MONTÁVEZ, J. P. y VALERO F. (2005). *Natural and anthropogenic modes of surface temperature variations in the last thousand years*. Geophysical research letters, 32, doi: 10.1029/2004RL021563