

ESCENARIOS REGIONALES DE CAMBIO CLIMÁTICO: DOWNSCALING ESTADÍSTICO Y DINÁMICO

José Manuel GUTIÉRREZ

Instituto de Física de Cantabria.

Consejo Superior de Investigaciones Científicas - Universidad de Cantabria.

RESUMEN

Los escenarios globales de cambio climático, proporcionados por ejemplo por el IPCC, no son adecuados para el estudio de impactos regionales, dada la escasa resolución espacial de los modelos globales del clima utilizados (~200 km). En este artículo se presenta una revisión actualizada de las distintas metodologías de regionalización (downscaling) desarrolladas en la última década para incrementar la resolución de estos modelos. Se analizan las metodologías dinámicas y estadísticas, y se describen los principales proyectos e iniciativas nacionales e internacionales en torno a este problema.

Palabras clave: Cambio climático, downscaling, modelos climático regionales (RCMs), métodos estadísticos, escenarios regionales.

ABSTRACT

The current climate change scenarios provided, e.g., by IPCC, are not suitable for regional impact studies due to the coarse spatial resolution (~200 km) of the Global Circulation Models (GCMs). In this paper we present an up-to-date revision of the different downscaling methodologies proposed in the last decade in order to increase the resolution of these models. We analyze both dynamical and statistical approaches and describe the main national and international projects on this topic.

Key words: Climate change, downscaling, Regional Climate Models (RCMs), statistical models, regional scenarios.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático global es una de las principales preocupaciones para la sostenibilidad futura de nuestro desarrollo dado su impacto en numerosos sectores socio-económicos de la actividad humana. En las últimas décadas se ha llevado a cabo un enorme esfuerzo tecnológico e investigador para explicar las posibles causas de este fenómeno y para tratar de predecir su tendencia futura. Este conocimiento es de vital importancia para tomar medidas preventivas de mitigación y también medidas de adaptación a través de la adecuada planificación de las actividades socio-económicas futuras que se puedan ver afectadas.

Las observaciones y estudios realizados hasta la fecha han permitido constatar un calentamiento global del planeta: los doce años más calurosos registrados desde 1850 han ocurrido en los últimos 13 años; por otra parte, se ha registrado un aumento de la temperatura media de la superficie de 0.74 °C en los últimos 100 años. Además de este calentamiento global, también se ha constatado el incremento de condiciones extremas que se traducen en olas de calor, sequías, inundaciones, etc. (STOTT *et al.* 2004), y su incidencia en la salud humana (PATZ *et al.* 2005). También se ha conseguido explicar el origen antropogénico del cambio debido, principalmente, al incremento de emisiones de gases de efecto invernadero (ver, por ejemplo, STOTT *et al.* 2001) y se han obtenido proyecciones de la tendencia futura de estos cambios utilizando modelos físico-matemáticos del clima (modelos de circulación general, GCMs). Estos modelos simulan en un ordenador la dinámica del sistema climático (atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera) bajo distintos escenarios de emisión que caracterizan la evolución futura de los factores que afectan al sistema climático, incluidos los factores antropogénicos como la emisión de gases de efecto invernadero (ver NAKICENOVIC *et al.* 2001, para más detalles sobre escenarios de emisión).

La actividad científica sobre el cambio climático está coordinada a nivel internacional por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC en sus siglas inglesas), que está organizado en tres grupos de trabajo: el Grupo I estudia los aspectos científicos, el II los impactos y adaptaciones al cambio climático y el III

las posibles opciones para mitigar este cambio. El último informe de este organismo ha sido presentado en 2007 (Fourth Assessment Report, AR4), y puede consultarse en <http://www.ipcc.ch/ipccreports> (ipcc-wg1.ucar.edu para el informe del Grupo I). Estos informes constituyen la referencia obligada de los estudios de cambio climático pues recopilan los resultados científicos más relevantes hasta la fecha.

La fuente principal de información para estos informes son las simulaciones de distintos GCMs, realizadas para distintos escenarios futuros relacionados con la actividad humana (emisiones de gases, etc.). Sin embargo, la resolución espacial de estos modelos es todavía limitada (~200 km, ver figura 1a), por lo que los escenarios globales no permiten analizar la magnitud de los posibles impactos locales en los ecosistemas, la agricultura, la hidrología, etc., ya que no tienen en cuenta las heterogeneidades regionales. Por ejemplo, las figuras 1(b) y (c) corresponden a las climatologías anuales de la temperatura máxima diaria en Madrid y en Navacerrada (que distan unos 50 km), y muestran una gran variabilidad regional que no puede ser tenida en cuenta por un modelo global.

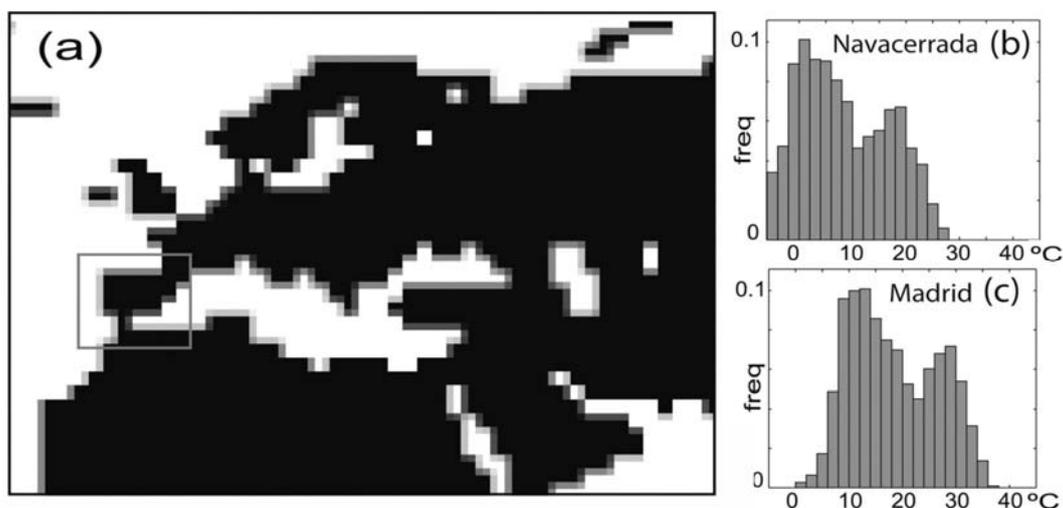


Fig. 1. Máscara tierra-océano de un modelo con 200 km de resolución horizontal resolution. (b)-(c) Histogramas de temperatura máxima en dos localidades.

Por tanto, es necesario realizar un esfuerzo adicional para obtener escenarios regionales de cambio climático. Este problema, que se denomina genéricamente *downscaling*, ha cobrado un fuerte interés en los últimos años y es uno de los objetivos prioritarios de los proyectos actuales de cambio climático y de los distintos gobiernos, para poder llevar a cabo estudios de impacto y planes de adaptación adecuados.

En este artículo se describe el estado actual de este tema, analizando las distintas técnicas de *downscaling* existentes. En primer lugar se describen las características de los modelos globales de circulación y se analizan las distintas fuentes de incertidumbre, que son tratadas con la metodología de "predicción por conjuntos". A continuación se describen las técnicas estadísticas y dinámicas de regionalización, que permiten proyectar estos conjuntos de simulaciones globales de baja resolución a nivel regional y local, utilizando modelos numéricos regionales y/o los registros históricos disponibles).

2. ESCENARIOS GLOBALES. INCERTIDUMBRES

Los Modelos de Circulación General (GCM en inglés) son la principal herramienta para explorar y simular la evolución futura del clima en distintos escenarios de cambio de las concentraciones de gases de efecto invernadero, que afectan al forzamiento natural de la radiación solar. Estos modelos consideran las ecuaciones fundamentales que describen la física y dinámica de los movimientos y procesos que tienen lugar en la atmósfera, el océano, el hielo y la superficie terrestre, así como ciertas parametrizaciones semi-empíricas que tienen en cuenta procesos de menor escala que no se consideran explícitamente en la dinámica del sistema. Estas ecuaciones son integradas numéricamente utilizando algoritmos apropiados que, a partir de una condición inicial, resuelven la dinámica de las ecuaciones en una rejilla discreta de puntos que cubre todo el globo (con una resolución horizontal para la atmósfera entre 150 y 300 km, y entre 20 y 40 niveles en la vertical), considerando las variables necesarias para describir el estado del sistema: presión, temperatura, velocidad, humedad atmosférica, salinidad oceánica, etc.

Para conocer la evolución futura del clima es necesario conocer primero cuál será la evolución de los distintos forzamientos del sistema en el futuro (forzamientos naturales, emisiones de gases, etc.). Como esta evolución depende de distintos factores socio-económicos, es necesario utilizar un conjunto de posibles “escenarios de emisiones”, que tengan en cuenta esta incertidumbre. Por tanto, la simulación de escenarios de cambio climático se caracteriza por la presencia de distintas fuentes de incertidumbre que afectan a todos los pasos del proceso, desde el establecimiento de escenarios de emisión, hasta la propia modelización de los GCMs (especialmente las parametrizaciones). Estas incertidumbres se pueden describir en forma jerárquica o de cascada (MITCHELL Y HULME, 1999; MURPHY, J.M. *et al.* 2004):

- En el vértice de las incertidumbres se sitúan los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, que influyen en el forzamiento natural del sistema, según distintas hipótesis sobre las futuras formas de desarrollo socio-económico (escenarios B1, A2, A1B, ver NAKICENOVIC, N. *et al.* 2001).
- A estas incertidumbres hay que añadir las asociadas al efecto de los gases de efecto invernadero en la dinámica del sistemas climático (ciclo del carbono, etc.), así como de otros componentes (aerosoles, etc.).
- Por otro lado, los diferentes modelos climáticos existentes son formulaciones similares de las ecuaciones que describen la dinámica atmosférica y oceánica, pero tienen distintas resoluciones horizontales y verticales, esquemas numéricos, parametrizaciones de procesos físicos, etc. También añaden incertidumbre a los resultados de los modelos otros subsistemas del modelo climático, como las variaciones en usos de suelo y los modelos de suelo.
- Los métodos de regionalización añaden un elemento adicional en la escala de incertidumbre pues, según se utilicen métodos dinámicos o estadísticos, aparecen nuevas incertidumbre características (parametrizaciones de los modelos dinámicos, error de las técnicas estadísticas, etc.).

En consecuencia, y a la vista de la gran cantidad de incertidumbres que existen en el proceso de generación de escenarios de cambio climático, se utilizan metodologías que permitan muestrear las fuentes de la incertidumbre, permitiendo hallar una distribución de valores, o un “intervalo de confianza”, para las simulaciones resultantes. Para ello, se recurre a una aproximación probabilística del problema, utilizando la predicción por conjuntos (ensemble forecast, en inglés), en la que se explora un conjunto representativo de métodos, modelos, emisiones, etc., muestreando un número razonable de realizaciones con sus correspondientes simulaciones (ver COLLINS 2007 para más detalles); este conjunto de realizaciones/predicciones ha de ser analizado con técnicas estadísticas adecuadas para poder proporcionar predicciones junto con la incertidumbre asociada. Por ejemplo, los resultados del AR4 se han obtenido a partir de las simulaciones de más de 20 modelos globales (ver RANDALL *et al.* 2007, <http://www-pcmdi.llnl.gov/>). Este conjunto de simulaciones permite obtener proyecciones globales futuras de variables climáticas como la temperatura o la precipitación, y también estimar la incertidumbre de las mismas (ver MURPHY *et al.* 2004).

El referente internacional actual de este tipo de aproximación probabilística al cambio climático lo constituye el proyecto ENSEMBLES (del 6º programa marco financiado por la UE, <http://www.ensembles-eu.org>, 2004-2009) que tiene, entre otros objetivos, el de acotar las incertidumbres en las predicciones seculares de cambio climático mediante integraciones con diferentes escenarios de emisión, y diferentes modelos globales, proporcionando también métodos de pesado y de combinación (por ejemplo métodos estadísticos Bayesianos, RAFFERTY *et al.* 2005) para aglutinar los distintos resultados individuales en una única predicción probabilística de consenso, más robusta que las basadas en un único modelo global y escenario.

3. EL PROBLEMA DEL DOWNSCALING

La tarea de regionalizar los escenarios globales de cambio climático es clave para poder llevar a cabo de forma adecuada estudios de impacto y adaptación, teniendo

en cuenta la variabilidad regional del clima en la zona de estudio (normalmente mucho menor que la resolución de los modelos globales, como se pone de manifiesto en la figura 1). Por ello, la regionalización (o downscaling) es actualmente un objetivo prioritario de todos los programas internacionales y nacionales de cambio climático. Las dos metodologías que se utilizan en este problema son (ver GUTIÉRREZ *et al.* 2004 para más detalles):

- La regionalización dinámica, utilizando modelos regionales del clima, con una resolución mayor (hasta 25km), que actúan en una región limitada, y que están acoplados con los modelos globales que proporcionan las condiciones de contorno para las simulaciones.
- La regionalización estadística, que utiliza modelos empíricos para proyectar las predicciones globales predichas en localidades con características climáticas locales conocidas (a través de observaciones). El principal punto débil de esta metodología es que se asume la robustez/validez de los modelos empíricos ajustados en clima presente para ser aplicados en clima futuro.

La figura 2 muestra un esquema ilustrativo de estas dos metodologías, cada una de las cuales tiene sus ventajas y sus limitaciones, pero que resultan complementarias para los estudios de regionalización; por ejemplo, en la literatura existen numerosos casos de estudio en los que se muestra, utilizando medidas de validación en clima presente, que ninguna de estas metodologías tiene un comportamiento superior a la otra, sino que en cada caso unas técnicas son más apropiadas que otras (ver, por ejemplo, el exhaustivo estudio realizado en MURPHY J. 1999, considerando 976 estaciones Europeas, o los resultados y publicaciones más recientes del proyecto STARDEX, <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/>).

El punto de partida para la generación de escenarios regionales de cambio climático son las simulaciones globales de las condiciones futuras del clima, que se obtienen en rejillas que oscilan entre los 250 y 350 km. Por ejemplo, la figura 2 muestra las distribuciones decadales de temperaturas máximas diarias previstas sobre la península Ibérica por uno de los modelos globales del clima (el modelo ECHAM5

del MPI), para un único escenario de cambio climático (el escenario A1B). Esta figura muestra los valores del modelo interpolados directamente a las dos localidades mostradas en la figura 1 (Madrid y Navacerrada), así como los valores observados.

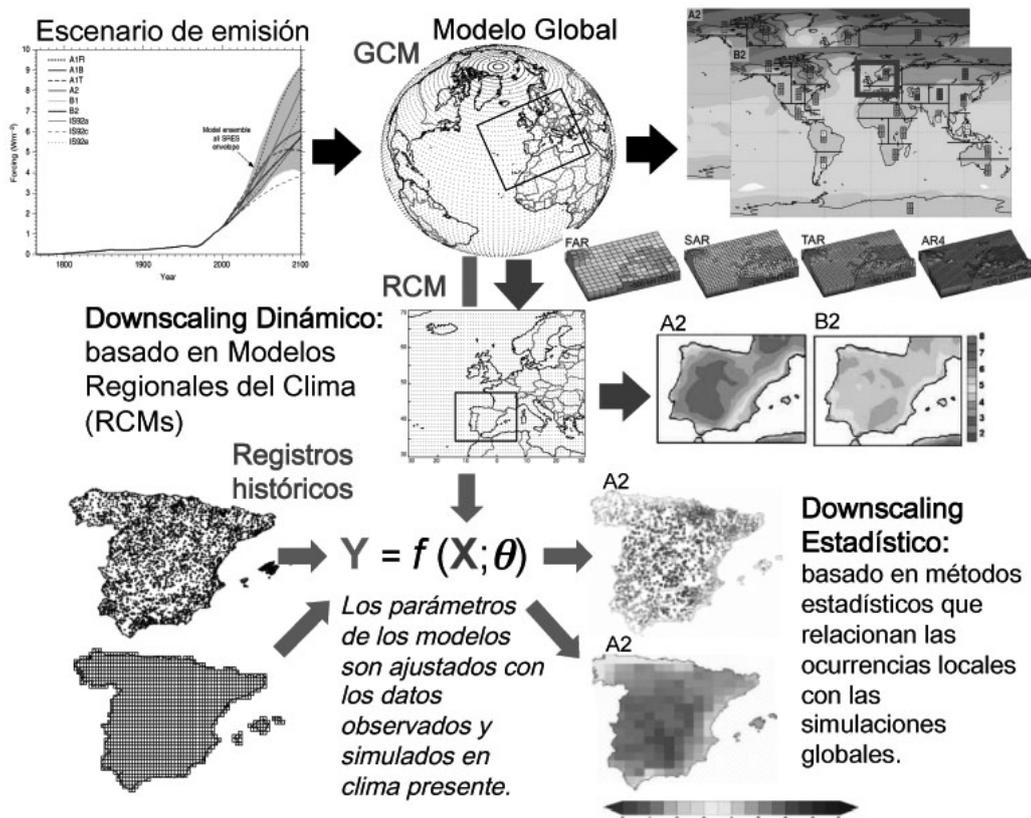


Fig. 2. Esquema de las metodologías de regionalización (dinámica y estadística), aplicadas a los escenarios globales de cambio climático.

Esta figura muestra claramente que la simulación directa del modelo sobreestima las temperaturas de Navacerrada, y sobreestima las temperaturas de Madrid, por lo que

no se reproduce de forma apropiada la climatología de esa región. Para resolver este problema pueden utilizarse las técnicas de regionalización antes descritas.

Como ya se ha comentado, este nuevo proceso de regionalización puede aumentar o disminuir la incertidumbre asociada con las predicciones globales, haciendo que éstas sean más o menos útiles en distintas zonas geográficas de una misma región (ver MURPHY *et al.* 2004). En ocasiones la incertidumbre sólo afecta a la magnitud del cambio (por ejemplo, todas las predicciones de cambio futuro de temperatura en el hemisferio norte indican un calentamiento, y la incertidumbre sólo afecta a la magnitud mayor o menor del mismo). En otras ocasiones la incertidumbre también afecta al carácter de la propia señal (como en el caso de la variación de precipitación en diversas zonas del planeta, que unos modelos y escenarios dan positiva y otros negativa). Por tanto, la correcta definición de la cadena de incertidumbres, comenzando por los datos de validación y terminando con las técnicas de proyección empleadas, es un problema fundamental en la producción de escenarios regionales de cambio climático.

El problema de la regionalización de cambio climático ha sido tratado en distintos proyectos europeos usando modelos regionales dinámicos (PRUDENCE, prudence.dmi.dk), estadísticos (STARDEX, www.cru.uea.ac.uk/projects), o combinando ambos (ENSEMBLES, www.ensembles-eu.org, 2004-2009).

Downscaling Dinámico

Las técnicas de regionalización dinámica se basan en el uso de modelos regionales o de área limitada (RCM, del inglés Regional Climate Model). Para aumentar la resolución de los modelos climáticos globales se “anida” un modelo regional de mayor resolución en el interior del modelo global, únicamente en la zona de interés (ver figura 2). El modelo regional toma como condiciones de contorno los valores del modelo global a lo largo de toda la integración (GIORGI y MEARNNS, 1999; LEUNG *et al.* 2003). Las técnicas dinámicas tienen la ventaja de ser físicamente consistentes y la desventaja de necesitar una gran capacidad de cálculo, lo que limita actualmente las simulaciones a resoluciones de 25 km.

En el marco del proyecto europeo ENSEMBLES se ha llevado a cabo un conjunto de simulaciones regionales, anidando 10 RCMs con una resolución de 25 km en distintos modelos globales de circulación, considerando simulaciones de clima presente (1950-2000) así como simulaciones de un escenarios futuro (2000-2100, escenario A1B). De esta manera se puede "separar" la variabilidad debida a los modelos globales y a los modelos regionales, y entender mejor este tipo de regionalización (ver <http://ensemblesrt3.dmi.dk/> para más detalles).

Por otra parte, dentro de las actividades de la WCRP (World Climate Research Program), se está diseñando una "Task Force on Regional Climate Downscaling" para producir escenarios regionales uniformes en todos los continentes (utilizando los mismos GCMs, escenarios y RCMs) de cara a tener una información global regionalizada, contribuyendo así a los próximos informes del IPCC. Esta actividad de regionalización se ha venido desarrollando hasta la fecha de forma muy dispersa, mediante distintos proyectos de regionalización a escala continental con poca conexión y transferencia (http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/SF_RCMTerms.html).

Downscaling Estadístico

Estos métodos se basan en modelos que relacionan de forma empírica las variables de circulación (campos 3D) a gran escala, proporcionadas por los modelos numéricos de circulación global, con las variables locales/regionales observadas en superficie, relacionadas con el fenómeno de estudio (típicamente, la temperatura y la precipitación en superficie). Estos modelos se ajustan utilizando el clima presente (por ejemplo, un período de referencia de 30 años) y son utilizados posteriormente para proyectar las predicciones futuras suponiendo la estacionariedad del modelo (WILBY *et al.* 2004). La ventaja de estas técnicas es que utilizan la climatología real observada de la variable local de interés durante el período de referencia y, por tanto, calibran/corrigen estadísticamente las posibles deficiencias y desajustes sistemáticos de los modelos globales (debidos, por ejemplo, a la grosera representación de la orografía, ver figura 1). Otra ventaja de estos métodos es que permiten incluir como predictores del método estadístico sólo aquellas variables de circulación que sean reproducidas con mayor fiabilidad por los modelos numéricos y

que dependan en menor medida de parametrizaciones, que son ajustadas de forma semiempírica en los modelos de circulación global y regional (por ejemplo, la precipitación depende en gran medida de numerosas parametrizaciones, y éstas también son ajustadas de forma semi-empírica introduciendo una mayor incertidumbre en las mismas).

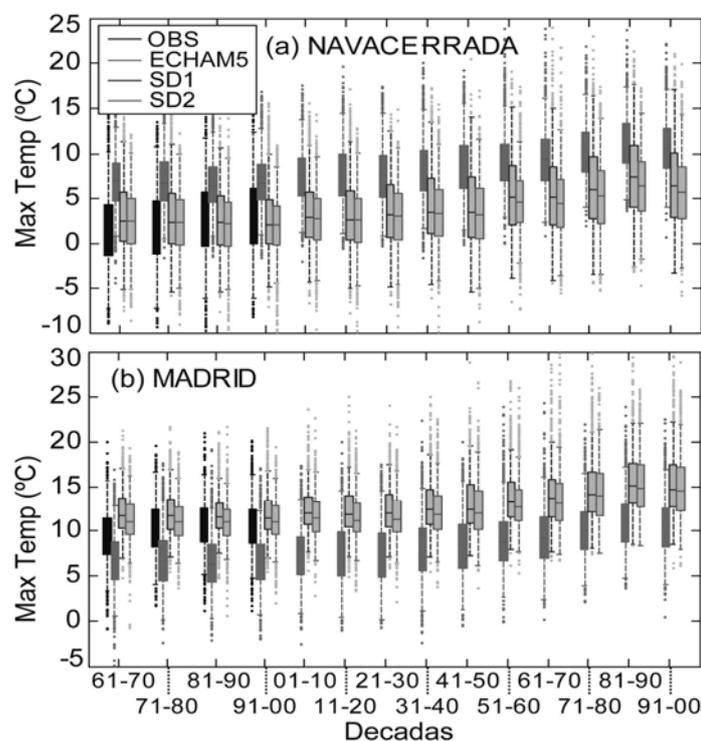


Fig. 3: Distribuciones decadales (box-plots) de temperaturas máximas diarias en (a) Navacerrada y (b) Madrid mostrando las observaciones (en negro, hasta la década 91-00), las simulaciones del modelo ECHAM5 (gris oscuro) y las simulaciones regionalizadas obtenidas utilizando dos métodos de downscaling estadístico distintos (SD1 y SD2, en gris claro).

Por otra parte, las necesidades de cálculo de estas técnicas son menores que las requeridas para integrar modelos numéricos de circulación, si bien en algunos casos las técnicas estadísticas no lineales utilizadas consumen también muchos recursos de computación.

Por tanto, se pueden utilizar los recursos computacionales para realizar un número adecuado de realizaciones/simulaciones con diferentes métodos de downscaling que cubran la variabilidad estadística de los resultados permitiendo obtener intervalos de confianza para las proyecciones finales y permitiendo también obtener medidas de calidad de los distintos métodos en las distintas regiones.

Las características anteriores hacen que la regionalización estadística se haya potenciado en los últimos proyectos de cambio climático, que incluyen tareas específicas a este respecto. Por ejemplo, en los proyectos Europeos ACCORD y STARDEX se compararon distintos métodos estadísticos sobre distintas regiones de Europa y para distintas variables concluyendo que ningún método es, en general, superior a los otros (HAYLOCK *et al.*, 2006). Por tanto, es necesario considerar un conjunto amplio y robusto de métodos estadísticos para poder llegar a conclusiones basadas en conjuntos (o ensembles) que permitan cuantificar la incertidumbre introducida por el método de regionalización, que constituye otro elemento de incertidumbre en la cascada.

Las distintas técnicas de downscaling estadístico que se han propuesto en la literatura se suelen clasificar en tres grupos (ver GUTIERREZ *et al.* 2004 para más detalles):

- Funciones de transferencia, basadas en modelos de regresión lineales y no lineales para inferir las relaciones entre los predictandos locales y los predictores de larga escala. Estos métodos son “generativos”, en el sentido de que las predicciones se derivan de un modelo, que se obtiene a partir de los datos. En ocasiones se utilizan técnicas espaciales para reducir la

dimensión del problema (Componentes Principales, etc.), o para predecir con patrones correlacionados (Correlación Canónica lineal o no lineal).

- Tipos de tiempo y métodos de análogos, basados en algoritmos de vecinos cercanos (k-NN) y/o en una preclasificación en un número finito de grupos (tipos de tiempo) obtenidos acorde a la similitud sinóptica de los campos; normalmente estos métodos son no generativos, pues se basan en un procedimiento algorítmico para obtener la proyección.
- Generadores de tiempo, que se utilizan cuando se dispone de predicciones a una escala temporal superior a la deseada (por ejemplo, mensual o estacional, cuando se necesita predicción diaria), y simulan estocásticamente series de valores diarios consistentes con la climatología prevista. Estos métodos son, en realidad, técnicas de desagregación temporal y tienen la ventaja práctica de permitir generar tantas realizaciones como se necesiten en el modelo de impactos que se aplique.

Como ejemplo de aplicación de estas técnicas, la figura 3 muestra (gris claro) el resultado de aplicar distintas técnicas de downscaling estadístico a las salidas del modelo global también respresentado en la figura. Puede observarse fácilmente cómo la regionalización permite reducir el error del modelo y adecuar las simulaciones a las climatologías locales de los puntos consdierados.

4. SITUACIÓN ACTUAL EN ESPAÑA

Existe un primer informe, elaborado por la Agencia Estatal de Meteorología, la Fundación para la Investigación del Clima y la Universidad de Castilla-La Mancha, en el que se aplicó un modelo regional dinámico (el modelo PROMES) y dos métodos estadísticos (uno a escala diaria y otro mensual) para obtener, a partir de los modelos globales entonces disponibles (los utilizados en el tercer Informe del IPCC, 2001), un primer conjunto de escenarios regionales para España. Esta información se puede consultar en http://www.aemet.es/es/elclima/cambio_climat/escenarios, así

como un conjunto de datos diarios correspondientes con resolución regional (25 km) y local (en miles de puntos correspondientes a localidades con registros históricos de precipitación y temperatura).

Actualmente, se está llevando a cabo una acción coordinada de mayor envergadura entre distintos grupos de investigación, conducente a actualizar estos escenarios regionales, partiendo de la información del AR4 y analizando también las tendencias en indicadores y valores extremos de las distribuciones climáticas. Los resultados de esta acción estarán disponibles a partir del 2011.

5. CONCLUSIONES

La proyección regional de los escenarios de cambio climático es un problema actual de gran importancia, de cara a poder realizar los estudios de impacto del cambio climático a la escala adecuada, para tener en cuenta la variabilidad espacial del clima y su sensibilidad en problemas de agricultura, ecología, hidrología, recursos energéticos, etc. En la actualidad existen distintas metodologías complementarias para abordar este problema, que han sido desarrolladas y aplicadas a distintas regiones del mundo, mostrando sus ventajas e inconvenientes. Sin embargo, con la excepción de algunos proyectos a escala continental (como el proyecto europeo ENSEMBLES, o sus equivalente Americanos y Asiáticos), la comunidad de escenarios regionales ha trabajado de forma descoordinada sin lograr producir resultados homogéneos a escala global. Sin embargo, recientemente se han lanzado acciones internacionales conducentes a resolver este problema, por lo que en los próximos años se producirán los primeros resultados de regionalización del cambio climático a escala global.

6. REFERENCIAS

COLLINS, M. (2007). *Ensembles and probabilities: A new era in the prediction of climate change*. Phil. Trans. R. Soc. A, 365, doi:10.1098/rsta.2007.2068.

GIORGI, F., MEARNNS, L.O. (1999). *Regional climate modeling revisited: an introduction to the special issue*". Journal of Geophysical Research, 104(D6), 6335-6352.

GIORGI, F., FRANCISCO, R. (2000). *Uncertainties in regional climate change prediction: a regional analysis of ensemble simulations with HadCM2 coupled AOGCM*. Climate Dynamics, 16, 169-182.

GUTIÉRREZ, J.M., CANO, R., COFIÑO, A.S., SORDO, C. (2004). *Redes probabilísticas y neuronales en las ciencias atmosféricas*. Monografías del Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.

GUTIÉRREZ, J.M., PONS, M.R. (2006). *Modelización numérica del cambio climático: Bases científicas, incertidumbre y proyecciones para la Península Ibérica*. Revista de Cuaternario y Geomorfología 20, 15-28, 2006.

HAYLOCK, M.R., CAWLEY, G.C., HARPHAM, C., WILBY, R.L., GOODESS, C.M. (2006). *Downscaling heavy precipitation over the United Kingdom: a comparison of dynamical and statistical methods and their future scenarios*. International Journal of Climatology. 26, 1397–1415.

LEUNG, L.R., MEARNNS, L.O., GIORGI, F., WILBY, R.L. (2003). *Regional Climate Research: Needs and Opportunities*. Bulletin of the American Meteorological Society, 84, 89-95.

MITCHELL, T. D., HULME, M. (1999). *Predicting regional climate change: living with uncertainty*. Progress in Physical Geography 23(1): 57-78.

MURPHY, J.M. et al. (2004). *Quantification of modelling uncertainties in a large ensemble of climate change simulations*. Nature 430, 768-772.

NAKICENOVIC, N. et al. (2001). *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*. Cambridge University press. 599 pp.

PATZ, J.A., CAMPBELL-LENDRUM, D., HOLLOWAY, T., FOLEY, J.A. (2005). *Impact of regional climate change on human health*, Nature, 438, 310-317.

RAFTERY, A. E., GNEITING, T., BALABDAOUI, F., POLAKOWSKI, M. (2005). *Using Bayesian model averaging to calibrate forecast ensembles*. Monthly Weather Review, 133, 1155-1174.

RANDALL, D.A., WOOD, R.A. BONY, S. COLMAN, R. FICHEFET T., FYFE, J. KATTSOV, V. PITMAN, A. SHUKLA, J. SRINIVASAN, J. STOUFFER, R.J., SUMI, A., TAYLOR, K.E. (2007). *Climate Models and Their Evaluation*. In: *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., D. et al. (eds.)]. Cambridge University Press.

STOTT, P.A., STONE, D.A., ALLEN, M.R. (2004). *Human contribution to the European heatwave of 2003*, Nature 432, 610-614.

STOTT, P.A., TETT, S.F.B., JONES, G.S., ALLEN, M.R., INGRAM, W.J., MITCHELL, J.F.B. (2001). *Attribution of Twentieth Century Temperature Change to Natural and Anthropogenic Causes*, Climate Dynamics, 20, 789-850.

WILBY, R.L., CHARLES, S.P., ZORITA, E., TIMBAL, B., WHETTON, P., MEARN, L.O. (2004). *Guidelines for use of Climate Scenarios developed from Statistical Downscaling Methods*. Supporting Material of the Intergovernmental Panel on Climate Change.