

Regionalización de la información sobre el cambio climático para la evaluación de impactos y la adaptación a los mismos

por Filippo Giorgi*

Introducción

A día de hoy, queda claro que todo lo relacionado con el cambio climático antropogénico y su impacto en las sociedades y los ecosistemas naturales se encuentra dentro de los desafíos medioambientales y científicos más importantes de este siglo. El desarrollo de políticas adecuadas destinadas a adaptarse al cambio climático y a estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) por debajo del umbral de “peligro” depende de la disponibilidad de información climática a escalas que van desde la regional a la nacional e incluso local. Esta información, junto con la incertidumbre asociada, se tiene que comunicar de forma clara a los usuarios finales y a los encargados de la elaboración de políticas, de tal manera que puedan adoptarse las decisiones políticas adecuadas para responder ante el cambio climático de manera totalmente informada.

A escala regional y global, las señales del cambio climático se ven afectadas por dos tipos de procesos: cambios en las circulaciones de gran escala que afectan a la secuencia de fenómenos meteorológicos que caracterizan el clima de una región (por ejemplo, la localización del desplazamiento de las tormentas) y los efectos de los forzamientos regionales y locales que modulan la señal de cambio climático a gran escala (por ejemplo, la topografía compleja, las líneas de costa y el uso del suelo). Además, en la medida en que la escala espacial se

reduce, la variabilidad climática aumenta, haciendo que la identificación de las señales antropogénicas desde la variabilidad natural subyacente sea cada vez más complicada. Además, el clima de una región determinada puede verse afectado por procesos que tienen lugar a grandes distancias, a través de los patrones de teleconexión. Como resultado de todos estos factores, las proyecciones de los cambios climáticos regionales y locales son extremadamente complicadas, y suelen caracterizarse por un alto grado de incertidumbre.

Los modelos de la circulación general acoplada atmósfera-océano (MCGAO) son las principales herramientas disponibles hoy en día para simular el cambio climático. Con el reciente desarrollo de plataformas informáticas cada vez más potentes, además, se ha aumentado la resolución horizontal de los MCGAO. Sin embargo, la mayor parte de los MCGAO empleados para obtener proyecciones de cambio climático (por ejemplo, para el reciente conjunto completado “CMIP3”, Meehl y otros, 2007) siguen teniendo resoluciones horizontales de unos 100-300 km, que son demasiado pequeñas para dar la información de cambio climático a escalas tan finas como las que se requieren para la mayor parte

de los estudios de evaluación de impactos. Esta resolución tampoco permite simular de forma precisa los episodios de tiempo extremo, fundamentales para evaluar muchos de los impactos de cambio climático. Por este motivo, desde finales de la década de 1980 y principios de la de 1990 se han desarrollado diferentes técnicas de “regionalización” para refinar espacialmente la información generada por los MCGAO y suministrar datos útiles para los estudios de evaluación de impactos (Giorgi y otros, 2001).

Las herramientas de regionalización se han aplicado cada vez más a un amplio abanico de problemas relacionados con el cambio climático, revelándose como un recurso importante en este tipo de investigación. Sin embargo, a la hora de aplicarlas es necesario comprender íntegramente los supuestos fundamentales sobre los que se cimienta su uso, junto con sus posibilidades y limitaciones. Este aspecto es especialmente importante a la vista del hecho de que, al ser más accesibles que los MCGAO desde un punto de vista tanto computacional como técnico, las técnicas de regionalización pueden aplicarse de forma más generalizada por toda la comunidad científica, y suelen representar el último paso de la conexión existente

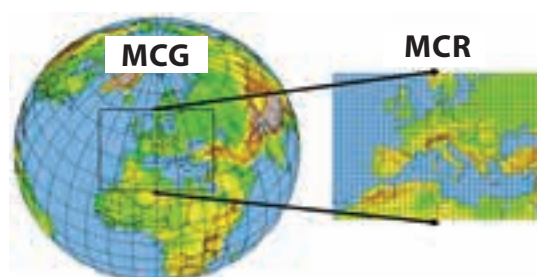


Figura 1 – Representación esquemática del enfoque de anidamiento del modelo climático regional (MCR)

* Centro internacional “Abdus Salam” de física teórica, Trieste (Italia)

entre la información climática y los impactos y la aplicación a los procesos encaminados a la elaboración de políticas.

Partiendo de estas consideraciones, este documento presenta, en primer lugar, una visión general de las diferentes técnicas de regionalización existentes hoy en día, centrándose en los supuestos en los que se basan, sus desarrollos más recientes, sus posibilidades y sus limitaciones. A renglón seguido figura una descripción de la aplicación de estas técnicas para suministrar la información de cambio climático a los estudios de evaluación de impactos. Finalmente, se podrá encontrar una relación de perspectivas y necesidades futuras encaminadas a mejorar la capacidad de aplicación y la fiabilidad de las herramientas de regionalización.

Técnicas de regionalización: supuestos esenciales básicos, desarrollos recientes, posibilidades y limitaciones

A grandes rasgos, podemos decir que, en la actualidad, existen cuatro herramientas de regionalización disponibles, destinadas a refinar la escala ("downscaling") de la información climática generada por los MCGAO. Estas herramientas se conocen tradicionalmente como:

- Modelos de circulación general atmosférica a "intervalos de tiempo" de alta resolución (MCGA)
- MCGAO de resolución variable (VarMCG)
- Modelos climáticos regionales anidados (MCR)
- Métodos de regionalización estadística (SD)

El enfoque de los MCGA (por ejemplo, Cubasch y otros, 1995) consiste en efectuar simulaciones con un modelo global única y exclusivamente atmosférico para unos períodos de tiempo determinados (o "intervalos de tiempo") de una simulación del MCGAO transitoria, estableciendo una simulación para las condiciones climáticas del momento actual (por ejemplo, 1960-1990) y otra para las del futuro (por ejemplo, 2071-2100). La temperatura de la superficie del

mar (TSM) necesaria para llevar a cabo estas simulaciones procede del MCGAO. Debido a que el modelo exclusivamente atmosférico se ejecuta para un período de tiempo de duración limitada, el modelo MCGA puede lograr resoluciones relativamente altas. De hecho, los experimentos de MCGA a intervalos de tiempo recientes han alcanzado resoluciones de varias decenas de kilómetros, mostrando claramente una mejora cuando las ejecuciones del modelo se realizan con una resolución mayor.

El principal supuesto conceptual esencial para la utilización de los MCGA a intervalos de tiempo es que el forzamiento de la TSM obtenido a partir del MCGAO sea consistente con la climatología del MCGA de alta resolución. Puesto que este caso podría no darse siempre, tales inconsistencias deberían valorarse a través del análisis de los resultados. La principal ventaja de los MCGA a intervalos de tiempo es su cobertura global y su capacidad para simular patrones de teleconexión entre regiones remotas. Por otro lado, las herramientas de regionalización más caras son los MCGAO por lo que tienen que ser ejecutados en plataformas informáticas grandes para lograr una resolución elevada.

El enfoque VarMCG consiste en ejecutar el mismo tipo de simulaciones que en un MCGA, pero utilizando un modelo global con una resolución horizontal que aumenta gradualmente hacia la zona de interés (por ejemplo, Deque y Piedelievre, 1995). De forma similar al caso de los modelos MCGA a intervalos de tiempo, las posibles incoherencias con los campos TSM rectores representan un problema, aunque este puede ser eludido mediante la relajación de los campos VarMCG hacia los del MCGAO, siempre y cuando la TSM se encuentre fuera de la zona de interés de alta resolución. Otra advertencia importante es el hecho de que las parametrizaciones físicas utilizadas por el modelo VarMCG tienen que funcionar en un amplio abanico de escalas espaciales, que en algunos casos, podrían traspasar los límites de aplicación de dichos esquemas. Hoy en día se dispone de bastantes VarMCG para la simulación climática a resoluciones regionales que pueden ser de varias decenas de kilómetros y recientemente se ha puesto en marcha un proceso de comparación de VarGCM (Fox-Rabinowitz y otros, 2006).

El enfoque MCR consiste en la ejecución del mismo tipo de experimentos que los que se llevan a cabo en un VarMCG, pero con un MCR de área limitada "anidado" sobre la zona de interés (Giorgi y Mearns, 1999). Debido a que el modelo sólo cubre una región limitada, puede alcanzar resoluciones horizontales muy elevadas. Con el fin de poder ser ejecutado, el modelo MCR necesita condiciones de contorno laterales (LBC). En el procedimiento de anidación, estas condiciones son facilitadas por las simulaciones del MCGAO correspondiente o, como alternativa, por los campos derivados del análisis a nivel global de las observaciones. La mayor parte de estudios MCR existentes hasta la fecha han empleado el método de anidación unidireccional, a través del cual la información del MCR no regresa al MCG. No obstante, recientemente se han completado algunos experimentos de anidación bidireccional, con resultados muy esperanzadores (Lorenz y Jacob, 2005).

El anidamiento MCR es, probablemente, el método de regionalización dinámica más utilizado. El supuesto básico de este enfoque es que el MCGAO simula la respuesta de la circulación global a los forzamientos de gran escala (por ejemplo, forzamiento radiativo de los GEI), mientras que el modelo MCR anidado simula el efecto de los forzamientos regionales a escala inferior a la del MCG (por ejemplo, topografía). Es importante hacer hincapié en el hecho de que, cuando se emplea el modo unidireccional, no se espera que los MCR anidados corrijan los grandes errores de los campos del MCG que se usan, sino que, generalmente, añaden información regional de pequeña escala a la señal climática de gran escala. Por este motivo, resulta fundamental analizar, en primer lugar, los campos del modelo global empleado en las condiciones de contorno laterales antes de proceder a realizar un experimento con un MCR.

Se han desarrollado unas cuantas decenas de sistemas MCR en laboratorios de todo el mundo, y se están realizando varios proyectos de intercomparación en diferentes áreas (por ejemplo, Takel y otros, 2007). Estos proyectos nos han permitido conocer mejor una serie de aspectos técnicos relacionados con la utilización de los MCR: elección de dominio y de parametrizaciones físicas, utilización de diferentes técnicas para así-

milar las condiciones de contorno laterales de forzamiento, efecto de la variabilidad interna del modelo frente al forzamiento de las condiciones de contorno laterales, intervalo de resolución óptima entre los campos de forzamiento y la solución del modelo y capacidad de transferencia de los modelos a través de las regiones. Los modelos MCR se han revelado como elementos capaces de mejorar la simulación de los detalles climáticos espaciales (por ejemplo, con arreglo a la influencia ejercida por la topografía compleja y las líneas de costa, véase la Figura 2) y los fenómenos extremos en comparación con los modelos globales rectores (Giorgi, 2006). Además, las simulaciones MCR para períodos pluridecenales a seculares realizadas para rejillas de varias decenas de kilómetros o menos, muestran cómo los forzamientos de pequeña escala pueden afectar de forma significativa a la señal de cambio climático (por ejemplo, Gao y otros, 2006). En la actualidad se están llevando a cabo muchos procesos de investigación encaminados a acoplar los MCR a los modelos de otros elementos del sistema climático (por ejemplo, modelos regionales de océano/hielo marino, química/aerosoles y biosfera terrestre); además, una nueva aplicación reciente de MCR es su uso para los estudios de predicción estacional (Wang y otros, 2004). Existen varios documentos disponibles que hacen referencia al desarrollo y a la aplicación de MCR (Giorgi y Mearns, 1991, 1999; McGregor, 1997; Leung y otros, 2003; Wang y otros, 2004; Giorgi, 2006).

En la técnica de regionalización estadística (por ejemplo, Hewitson y Crane, 1996), la estrategia básica es desarrollar relaciones estadísticas entre los predictandos de interés (por ejemplo, precipitaciones en un lugar determinado) y los predictores que pueden obtenerse de las simulaciones de los modelos globales (por ejemplo, geopotencial de 500 hPa). Estas relaciones se construyen a partir de las observaciones y, posteriormente, se aplican a los resultados de las simulaciones del MCGAO del clima futuro para obtener información del cambio climático a nivel local. Aunque esta es la filosofía básica que subyace en la regionalización estadística, existen muchas otras variantes diferentes (por ejemplo, Giorgi y otros, 2001; Christensen y otros, 2007).

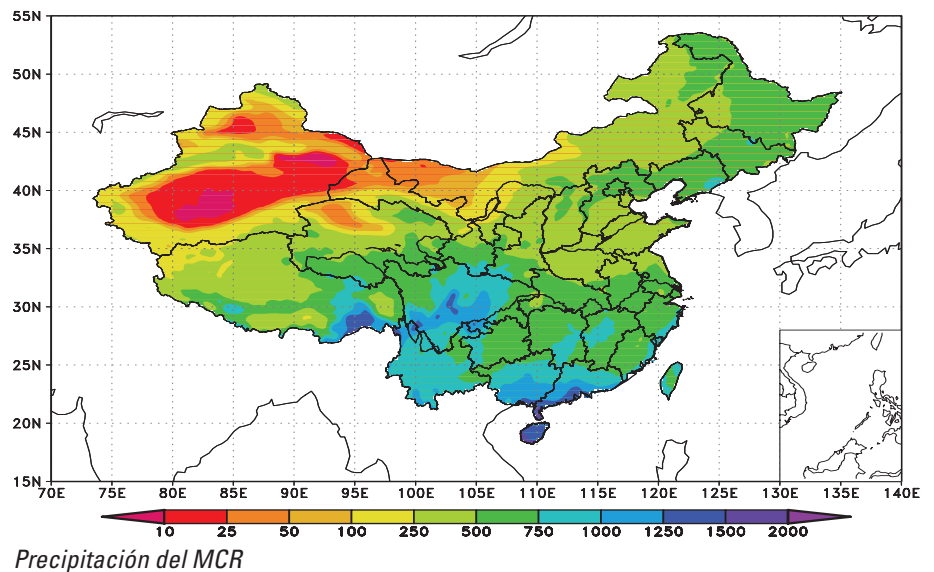
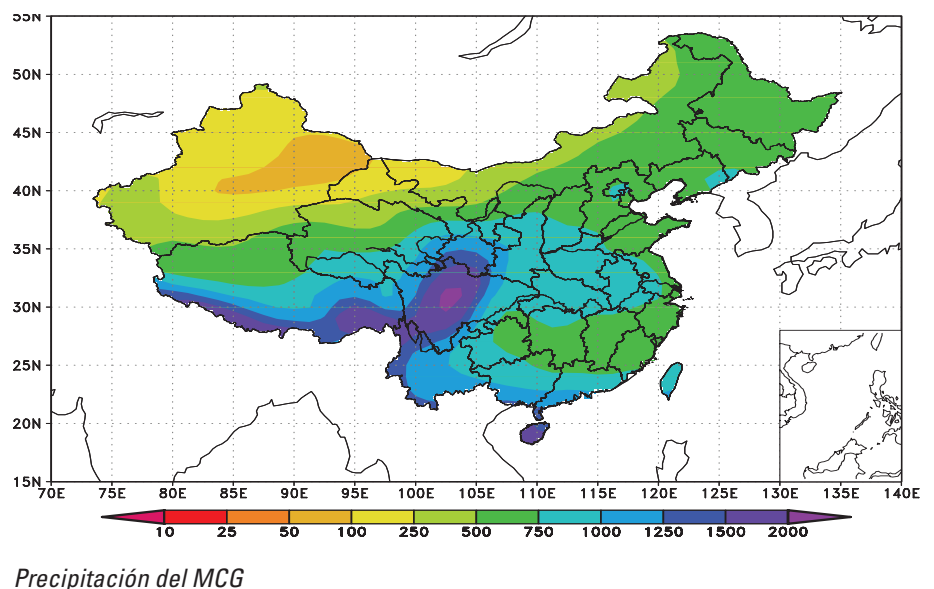
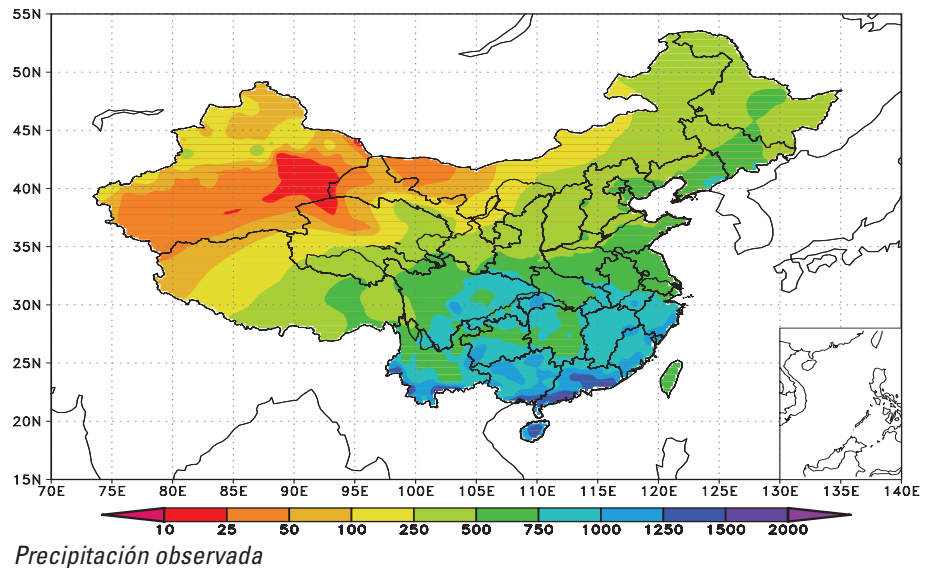


Figura 2 – Precipitaciones monzónicas observadas y simuladas en China (mayo-septiembre) por un MCR y por el MCG rector. La precipitación se ha obtenido como la media de 30 años de la simulación del clima actual y la rejilla del MCR es de 20 km. Las unidades son mm/día. La figura es un ejemplo de la mejora conseguida por el MCR en comparación con el MCG rector (extraído de Gao y otros, 2008).

Los métodos de regionalización estadística se basan en el supuesto esencial de que las relaciones estadísticas desarrolladas utilizando la información del clima actual son válidas incluso bajo condiciones climáticas diferentes (Hewitson y Crane, 1996). Este supuesto es difícil de verificar, puesto que podría esperarse que las condiciones existentes con un forzamiento por GEI mayor fueran considerablemente distintas a las condiciones de los registros históricos utilizados para desarrollar los modelos de regionalización estadística. Una segunda hipótesis importante es que los predictores empleados en estos modelos son completamente representativos de la señal de cambio climático, lo que podría requerir la utilización combinada de una serie de predictores que se basen en el objetivo concreto establecido por un estudio específico. Los métodos de regionalización estadística no son excesivamente caros desde un punto de vista informático, lo que permite su aplicación inmediata a los productos de salida de los diferentes MCG. Otra ventaja de estos modelos es que pueden suministrar información local o información adaptada a aplicaciones concretas de impacto que podrían no estar disponibles desde los modelos numéricos. Un aspecto fundamental es la disponibilidad de conjuntos de datos de observación de calidad y con longitud suficiente como para desarrollar relaciones estadísticas sólidas.

Hoy en día existen numerosas técnicas de regionalización estadística, entre las que se incluyen los modelos de regresión, los esquemas de clasificación de tipos de tiempo y de generadores de tiempo, las redes neuronales, los métodos de análogos y de cambio de escala de patrones (Giorgi y otros, 2001; Christensen y otros, 2007). La disponibilidad de este amplio abanico de métodos de regionalización estadística hace que su evaluación sea una tarea especialmente complicada, puesto que los modelos suelen asociarse a aplicaciones específicas. Sin embargo, los métodos han experimentado un proceso de maduración, hasta el punto de que en la actualidad se emplean en una amplia y variada gama de estudios de impacto a escala regional y local (Christensen y otros, 2007). Wilby y otros (2004) ofrecen una exhaustiva relación de aspectos referentes a las aplicaciones.

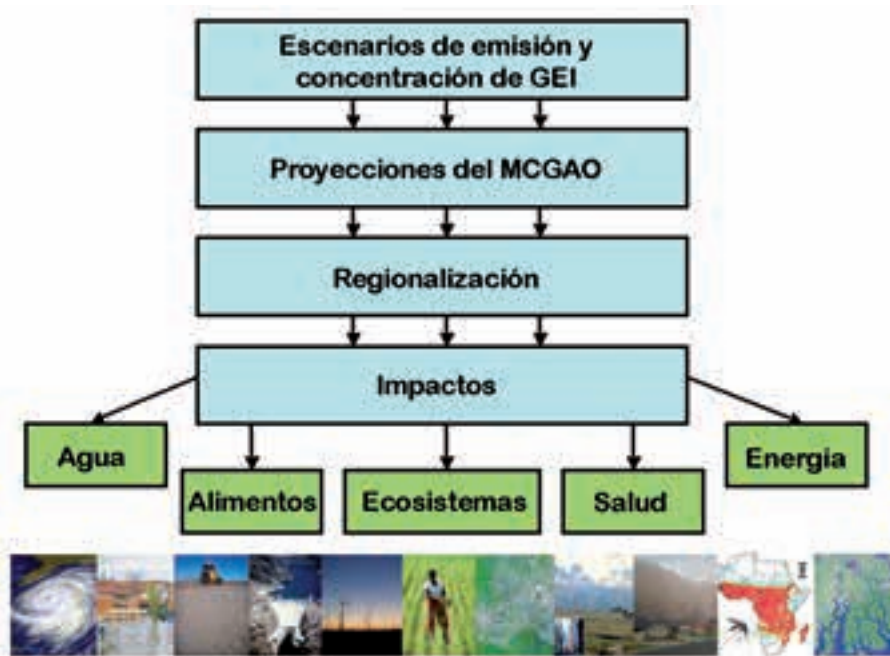


Figura 3 – Representación esquemática de los pasos implicados en la generación de información de cambio climático útil para el trabajo de evaluación de impactos a través de los métodos de regionalización

Uso de herramientas de regionalización destinadas a suministrar la información climática necesaria para evaluación de impactos y estudios de adaptación

Todas las técnicas de regionalización han experimentado un enorme desarrollo y uso creciente en un amplio abanico de aplicaciones, desde estudios de proceso hasta simulaciones del cambio climático y paleoclimáticas.

La Figura 3 muestra la secuencia de pasos necesaria para generar un escenario de cambio climático “regionalizado” con el fin de poder utilizarlo en estudios de evaluación de impactos (Giorgi, 2005). En primer lugar, se generan los escenarios de emisión y concentración de gases de efecto invernadero en función de los supuestos de desarrollo socioeconómico o de los entornos de estabilización que se persiguen. A continuación, estos datos se introducen en los MCGAO asociados para generar simulaciones transitorias del cambio climático para el siglo XXI y, posiblemente, más allá. Los campos de estas simulaciones se introducen en las herramientas de regionalización, que generan la información que van a utilizar los modelos de impacto y, finalmente, la planificación para la adaptación.

Cada uno de los pasos del proceso se caracteriza por un determinado nivel de incertidumbre que se transmite en cascada de un paso al siguiente. Las principales fuentes de incertidumbre proceden de la utilización de diferentes escenarios de emisión de gases de efecto invernadero, de diferentes configuraciones de los modelos globales y de los diferentes métodos y modelos de regionalización (Giorgi, 2005). Como resultado de este proceso en cascada, la incertidumbre de las proyecciones regionales es muy elevada, y a día de hoy sólo confiamos en las proyecciones de cambio climático generadas por los modelos sobre un número limitado de regiones (Giorgi y otros, 2001; Christensen y otros, 2007).

El valor añadido por las herramientas de regionalización, así como de la elección del método de regionalización, son los dos aspectos fundamentales que afrontan los usuarios de las técnicas de regionalización. En relación con el primero de ellos: para una aplicación determinada, se debe evaluar de forma minuciosa si la utilización de una herramienta de regionalización aportará información adicional útil. Este es el caso, por ejemplo, de las zonas con una topografía compleja o del estudio de fenómenos extremos. Sin embargo, es posible que para algunas aplicaciones pueda utilizarse la información del MCGAO directamente.

En lo relativo al segundo aspecto, las diferentes técnicas de regionalización tienen distintas ventajas y limitaciones, y la elección del enfoque apropiado depende de la aplicación concreta y de la disponibilidad de recursos. Las limitadas intercomparaciones disponibles entre métodos indican que los modelos de regionalización dinámica y estadística muestran un rendimiento comparable a la hora de reproducir el clima actual. Sin embargo, la señal de cambio climático simulado puede ser muy diferente, en gran medida como consecuencia de la utilización de predictores y de supuestos concretos en los métodos de regionalización estadística.

Lo que un usuario final puede esperar de los métodos de regionalización basados en modelos son series temporales, que llegan hasta escalas temporales de menos de 24 horas, de las variables climáticas básicas (por ejemplo, temperatura, precipitación o viento) en las respectivas resoluciones del modelo para la totalidad del siglo XXI o para un período seleccionado del mismo. Actualmente, la resolución habitual que puede obtenerse a partir de los modelos físicos de regionalización es del orden de varias decenas de kilómetros. Si fuera necesaria una resolución mayor, se necesitará una herramienta de regionalización estadística para reducir la escala de la información del modelo climático hasta situarla a escala local y generar series temporales de las variables climáticas pertinentes.

A partir de estas consideraciones, puede argumentarse que un enfoque óptimo sería el combinar diferentes técnicas de regionalización. Por ejemplo, se podría usar un modelo MCGA a intervalos de tiempo para obtener información para una resolución intermedia que conectara un MCGAO con un VarMCG o un MCR, que puede generar campos climáticos a escala más pequeña. Estos, a su vez, pueden ofrecer predictores más detallados y coherentes internamente para los modelos de regionalización estadística destinados a suministrar información adaptada a las necesidades de los estudios de evaluación de impactos.

Un ejemplo del enfoque mencionado (sin incluir el último, el paso SD) puede verse en la Figura 4 (extraída de Diffenbaugh y otros, 2007). Esta figura presenta el cambio en la aparición de fenómenos con un índice de calor de alto riesgo (una medida de la sobrecarga térmica basada en la temperatura y en la humedad relativa) en la cuenca mediterránea para el período 2071-2100 con respecto al período 1961-1990 y el escenario A2 de emisiones del IPCC (2000). Para su obtención, primero se utilizó un modelo MCGA a intervalos de tiempo con las TSM de un MCGAO acoplado. Los campos del MCGA se utilizaron como condiciones de contorno laterales para una simulación de un modelo MCR anidado con una rejilla de 50 km. Los campos obtenidos a partir de esta simulación, a su vez, se emplearon como condiciones de contorno laterales

para un MCR anidado con una rejilla de 20 km. El aspecto fundamental de la Figura 4 es la capacidad de este enfoque múltiple de regionalización para suministrar información extremadamente fina de la sobrecarga térmica (obsérvese, por ejemplo, la nitidez de la señal costera), que puede ser utilizada posteriormente para concebir medidas de adaptación adecuadas.

Otro ejemplo de aplicación de la regionalización se muestra en la Figura 5, donde se emplea un modelo de regionalización estadística para obtener los cambios en las precipitaciones de junio-julio-agosto en África a partir de diferentes MCGAO. Este ejemplo, en concreto, muestra la capacidad de los modelos SD para ser aplicados fácilmente a los resultados de las diferentes simulaciones de los modelos globales.

Perspectivas y necesidades de cara a la futura utilización de técnicas de regionalización en los estudios sobre el cambio climático

Hoy en día, las herramientas de regionalización representan un elemento fundamental y establecido para la investigación del cambio climático. Actualmente, la mayor parte de las técnicas de regionalización se pueden implantar en plataformas informáticas relativamente baratas (por ejemplo, en ordenadores personales o en grupos de ellos), lo que está ampliando en gran medida la base del usuario. Por un lado, este proceso de "proliferación" ayuda a comprender mejor y a evaluar la aplicabilidad de los modelos, pero por otro lado, dicho proceso requiere un cuidado cada vez mayor para poder llevar a cabo su aplicación de forma correcta.

¿Cuáles son las necesidades más acuciantes en relación con este incremento en el uso de las técnicas de regionalización? Una de ellas, desde luego, es la disponibilidad de conjuntos de datos de observación mejorados para la validación y el calibrado de los modelos dinámicos y estadísticos. Los modelos MCR actuales pueden llegar a escalas de 10 km o menos, mientras que los modelos de regionalización estadística pueden alcanzar el nivel de la escala local. Además, la necesidad aumenta de cara a la aplicación de estos

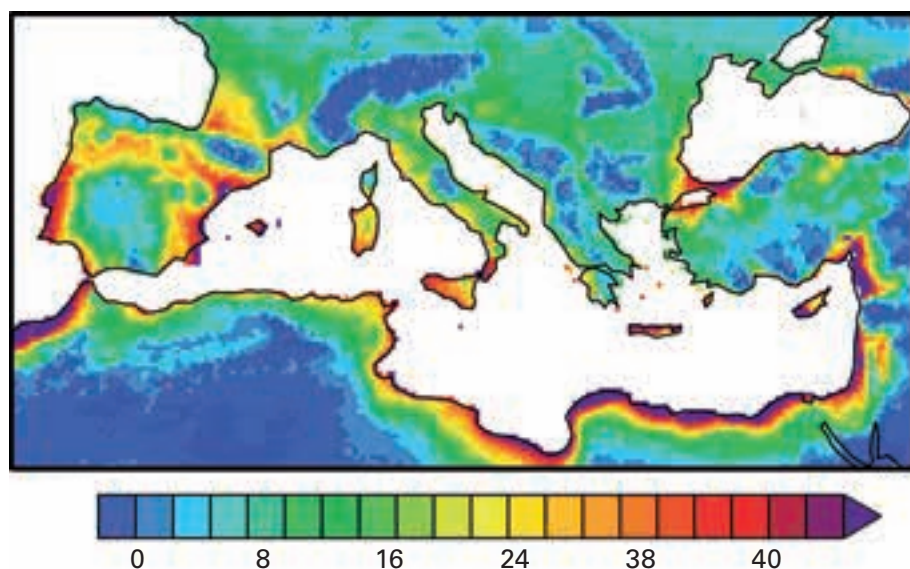


Figura 4 – Incremento del número de días con un índice de calor de alto riesgo simulado por un sistema MCR anidado múltiple (véase el texto) (extraído de Diffenbaugh y otros, 2007)

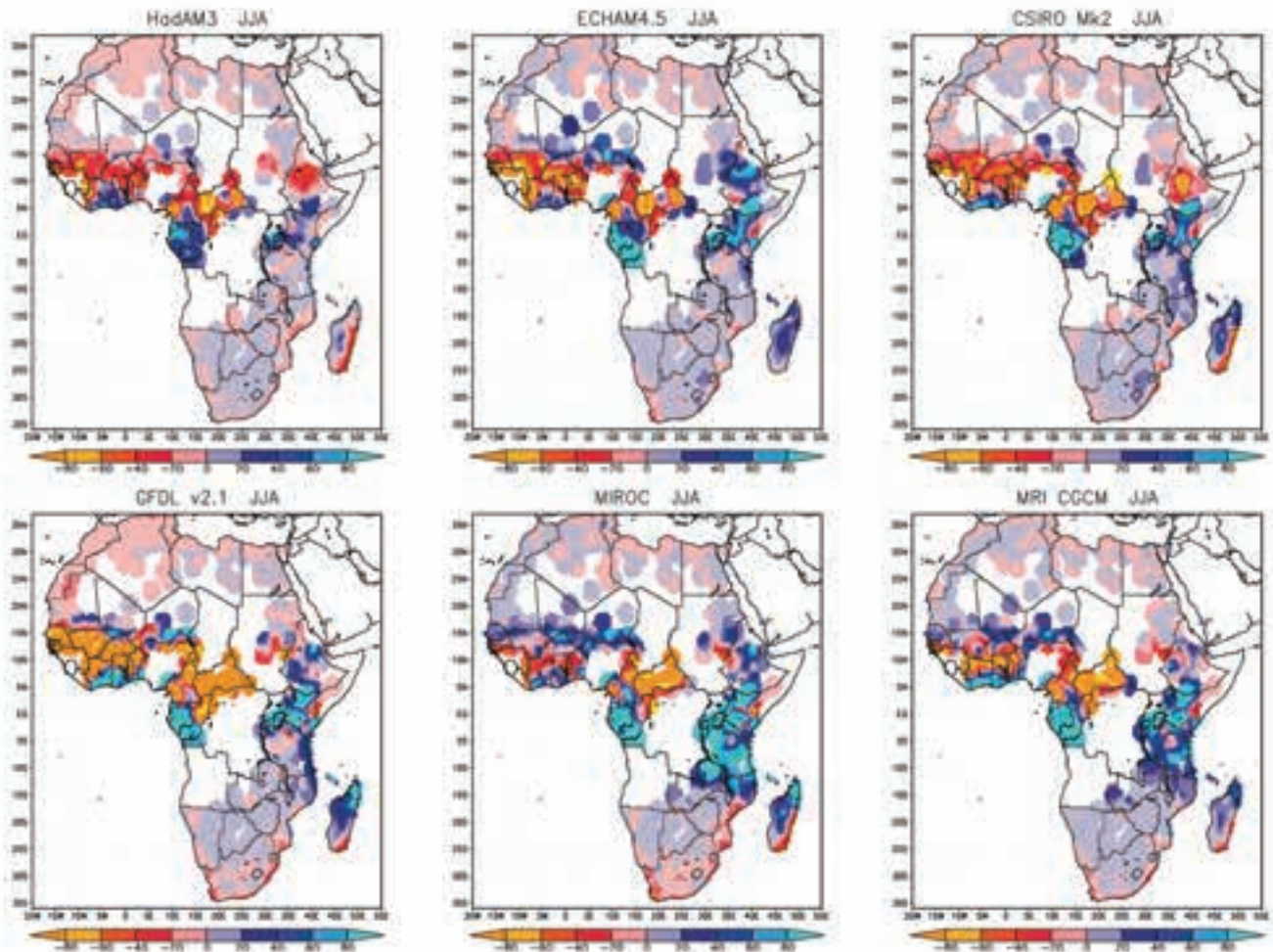


Figura 5 – Cambio en la precipitación de junio-julio-agosto en África, simulado a partir de un modelo de regionalización estadística (SD) aplicado sobre los datos procedentes de simulaciones de diferentes modelos globales (B. Hewitson, comunicación personal)

modelos a todas las regiones del mundo, incluyendo las áreas remotas y montañosas. Esto requerirá conjuntos de datos de observación a pequeña escala y de muy alta calidad y posiblemente de cobertura mundial, que puedan emplearse en la validación y comprobación del modelo dinámico y en el calibrado del modelo SD. A este respecto, por ejemplo, el SMOC puede facilitar un marco básico para mejorar la calidad de los actuales conjuntos de datos de observación

El objetivo de los modelos físicos, en cuanto a la resolución horizontal, se está acercando rápidamente a los 10 km ó incluso menos. Con esta resolución, muchos sistemas actuales tienen que someterse a un proceso de mejora tanto en sus componentes dinámicos como físicos. Por ejemplo, muchos MCGA, VarMCG y MCR emplean la hipótesis hidrostática y utilizan esquemas de convección basados en una separación clara de escalas entre la escala de las nubes y la

escala de la rejilla del modelo. Sin embargo, ninguno de estos supuestos se mantiene cuando la resolución horizontal se aproxima a valores de 10 km ó menos. Los esquemas relativos a la capa límite también podrían requerir una mejora similar. Por este motivo, durante los próximos años seremos testigos de importantes esfuerzos en el desarrollo de los modelos.

La comprensión de las fuentes de incertidumbre asociadas a las proyecciones del cambio climático a nivel regional se erige como un elemento fundamental de información para cuantificar los impactos del cambio climático (Giorgi, 2005). Tal y como ya se ha mencionado, una fuente fundamental de incertidumbre es la utilización de diferentes modelos o de distintas herramientas de regionalización. La evaluación de esta incertidumbre necesita la conclusión coordinada de grupos de simulaciones para diferentes escenarios de cambio climá-

tico, distintos modelos y diversos métodos. Esta coordinación no es fácil de conseguir en un contexto de investigación regional debido a que los diferentes participantes suelen estar interesados en regiones y temas distintos. A este respecto, la OMM puede desempeñar un papel central y fundamental a la hora de facilitar la interacción de las diferentes comunidades dedicadas al desarrollo de modelos, con el fin de construir así marcos comunes para los procesos de intercomparación y para el uso combinado de modelos y métodos.

Finalmente, las herramientas de regionalización pueden desempeñar el papel fundamental de implicar directamente a los científicos de los países en vías de desarrollo para que salten a la palestra de la creación de modelos de cambio climático (Huntingford y Gash, 2005). Es probable que estos países sean los más vulnerables ante el cambio climático y, por tanto, tienen una gran nece-

sidad de contar con políticas de adaptación. Por este motivo, resulta fundamental que creen conocimiento a nivel interno en relación con el desarrollo de la información relativa al cambio climático a escala regional y local de relevancia directa para sus necesidades concretas. Este proceso requerirá un gran esfuerzo de formación y de conexión en todo lo relacionado con la comprensión y el uso de todas las herramientas de modelización que se describen en el presente documento, así como el uso de la información suministrada por los modelos disponibles a partir de proyectos internacionales. Esto puede conseguirse a través de programas regulares de seminarios de formación, visitas de intercambio y proyectos de colaboración investigadora sur-sur y sur-norte. Aunque algunos de estos procesos ya se están llevando a cabo (Pal y otros, 2007: <http://www.aiaccproject.org/>; <http://precis.metoffice.com/>), el papel de la OMM en este sentido será esencial.

Referencias

- CHRISTENSEN, J.H. et al., 2007: Regional Climate Projections. Capítulo 11 de: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (S. Solomon et al., eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 847-940.
- CUBASCH, U. et al., 1995: Regional climate changes as simulated by time-slice experiments. *Climatic Change*, 31, 273-304.
- DEQUE, M. and J.P. PIEDELIEVRE, 1995: High resolution climate simulation over Europe. *Climate Dynamics*, 11, 321-339.
- DIFFENBAUGH, N.S., J.S. PAL, F. GIORGI and X. GAO, 2007: Heat stress intensification in the Mediterranean climate change Hot-Spot. *Geophysical Research Letters*, 34, L11706.
- FOX-RABINOWITZ, M. et al., 2006: Variable resolution general circulation models: stretched grid model intercomparison project (SGMIP). *Journal of Geophysical Research*, 111, D16104.
- GAO, X., J.S. PAL and F. GIORGI, 2006: Projected changes in mean and extreme precipitation over the Mediterranean region from high resolution double nested RCM simulations. *Geophysical Research Letters*, 33, L03706.
- GAO, X. et al., 2008: Reduction of future monsoon precipitation over China: comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM. *Meteorology and Atmospheric Physics* (en imprenta).
- GIORGI, F., 2005: Climate change prediction. *Climatic Change*, 73, 239-275.
- GIORGI, F., 2006: Regional climate modeling: status and perspectives. *Journal de Physique*, IV, 139, 101-118.
- GIORGI, F. and L.O. MEARNES, 1991: Approaches to the simulation of regional climate change: a review. *Reviews of Geophysics*, 29, 191-216.
- GIORGI, F. and L.O. MEARNES, 1999: Introduction to special section: regional climate modeling revisited. *Journal of Geophysical Research*, 104, 6335- 6352.
- GIORGI, F. et al., 2001: Regional climate information—evaluation and projections. Capítulo 10 de: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (J.T. Houghton et al., eds.), Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 583-638.
- HEWITSON, B.C. and R.G. CRANE, 1996: Climate downscaling: techniques and application. *Climate Research*, 7, 85-95.
- HUNTINGFORD, C. and J. GASH, 2005: Climate equity for all. *Science*, 309, 1789.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2000: Special Report on Emission Scenarios, N. Nakicenovic et al. (eds.), Cambridge University Press, New York, 599 pp.
- LEUNG, L.R., L.O. MEARNES, F. GIORGI and R.L. WILBY, 2003: Regional climate research: needs and opportunities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82, 89-95.
- LORENZ, P. and D. JACOB, 2005: Influence of regional scale information on the global circulation: a two-way nesting climate simulation. *Geophysical Research Letters*, 32, L14826.
- MCGREGOR, J.L., 1997: Regional climate modeling. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 63, 105-117.
- MEEHL, G.A. et al., 2007: The WCRP CMIP3 multimodel ensemble—a new era in climate change research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1383-1394.
- PAL, J.S. et al., 2007: Regional climate modeling for the developing world: the ICTP RegCM3 and RegCM3. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 1395-1409.
- TAKLE, E.S. et al., 2007: Transferability intercomparison—an opportunity for new insight on the global water cycle and energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, 375-384.
- WANG, Y. et al., 2004: Regional climate modeling: progress, challenges and prospects. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82, 1599-1628.
- WILBY, R.L. et al., 2004: *Guidelines for Use of Climate Scenarios Developed from Statistical Downscaling Methods*. IPCC Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis (TGICA), http://ipcc-ddc.cru.uea.ac.uk/guidelines/StatDown_Guide.pdf.

Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a Rupa Kumar Kolli por sus sugerencias relacionadas con el aspecto editorial y a E. Coppola por su ayuda técnica.