

Uso del método de escalado de patrones con distintos generadores de escenarios climáticos aplicados sobre la península Ibérica

Ernesto Rodríguez Camino⁽¹⁾

⁽¹⁾ INM, P.O. Box 285, 28071 Madrid,
e.rodriguez@inm.es

1. Introducción.

La representación y evaluación de las incertidumbres en los escenarios de cambio climático para su posterior utilización en las evaluaciones nacionales de vulnerabilidad y adaptación constituye un requerimiento de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (UNFCCC) a los diferentes países. Estas evaluaciones deben explorar, y en la medida de lo posible cuantificar, la vulnerabilidad de los distintos sectores y sistemas al cambio y a la variabilidad climáticos (UNFCCC 2005). Para ello se necesitan descripciones robustas de los futuros climas regionales en las escalas espaciales y temporales más finas posibles.

Una gran parte de las incertidumbres asociadas a las proyecciones climáticas proviene de los diferentes escenarios de emisión que se manejan y que a su vez están condicionados por la evolución futura del marco socioeconómico y por la tecnología disponible. Otra dificultad se relaciona con el diseño de los modelos climáticos de circulación general (AOGCM) y por la representación todavía poco fina de importantes mecanismos de retroalimentación en dichos modelos. Consecuencia de ambas incertidumbres –escenarios de emisión y diseño de modelos-- es el hecho de que las proyecciones climáticas presenten una gran dispersión sobre todo a nivel regional. La utilización de un solo escenario de emisión y un único modelo impide transmitir una idea de las incertidumbres inherentes a la predicción del clima futuro.

Los AOGCM indican que las concentraciones crecientes de gases de efecto invernadero tienen unas implicaciones significativas en el clima a escala global y regional. Desgraciadamente, los AOGCM tienen una utilidad muy restringida para los estudios de impacto debido a su escasa resolución espacial (típicamente del orden de 50 000 km²) y su incapacidad para resolver importantes características de escala subrejilla tales como las nubes y la topografía. Como consecuencia aparecen dos técnicas para obtener las variables locales que describen el tiempo (como p.e., precipitación, nubosidad, temperatura a 2m) a partir de las salidas con baja resolución de los AOGCM. En primer lugar, la

técnica de regionalización estadística que es análoga a los métodos denominados “model output statistics (MOS)” y “perfect prog” desarrollados para la predicción numérica del tiempo a corto plazo. En segundo lugar, la utilización de modelos climáticos regionales (MCR) anidados dentro de los AOGCM, análoga a la técnica similar de uso de modelos de área limitada (LAM) en la predicción regional a corto plazo. Esta técnica se denomina habitualmente regionalización dinámica. Puede verse un resumen de ambas técnicas, p.e., en Wilby *et al.* (2002).

La mayor resolución y detalle de las predicciones regionalizadas obtenidas por ambas técnicas, tanto estadística como dinámica, puede dar lugar a confundir el hecho de tener predicciones con más detalle y por lo tanto más realistas con el hecho de que sean más precisas. Análogamente a como sucede con los modelos de predicción mesoscalares de corto plazo, en los que el aumento de resolución por sí solo no tiene por qué ir acompañado de la mejora en los índices de verificación de ciertas variables (como es el caso de la precipitación y la nubosidad), las proyecciones climáticas regionalizadas no tienen por qué ser más precisas que las obtenidas a partir de las salidas directas de los modelos globales. En consecuencia la utilización de las técnicas de regionalización, aunque proporcionan productos adecuados, por su mayor resolución espacial, a las necesidades de los modelos de impacto no debe impedir una discusión detallada de la cascada de incertidumbres con las que vienen afectadas las proyecciones climáticas regionalizadas. Entre estas fuentes de incertidumbres hay que mencionar (además de los escenarios alternativos de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y aerosoles azufrados y las distintas proyecciones obtenidas con diferentes AOGCM, mencionadas más arriba): (i) la conversión de emisiones en concentraciones de gases de efecto invernadero y aerosoles, (ii) la conversión de concentraciones en forzamiento radiativo (iii) las distintas realizaciones con un mismo modelo AOGCM y distintas condiciones iniciales; (iv) los distintos métodos de regionalización; y finalmente (v) las incertidumbres asociadas a los distintos modelos de impacto (Mitchell y Hulme, 1999).

Para tener una idea aproximada de las incertidumbres mencionadas muchos autores recomiendan

utilizar al menos una multiplicidad de escenarios de emisión, de resultados de diferentes AOGCM y de técnicas de regionalización que permitan una estimación a nivel regional de los rangos de las incertidumbres acumuladas en los distintos pasos.

Los métodos de escalado de patrones permiten explorar un amplio rango de posibles forzamientos futuros (p.e., la totalidad de los escenarios de emisión SRES) y sensibilidades climáticas (p.e., el rango entre 1.5° y 4.5° del IPCC). En cualquier caso un rango mucho mayor que si se empleasen solamente resultados directos de modelos climáticos de circulación general. El método incluye la normalización de los patrones de respuesta de los modelos globales de circulación general según el cambio de la variable (normalmente temperatura y precipitación) media global. Estos patrones normalizados se re-escalan a continuación utilizando un escalar deducido de modelos climáticos simples y representando diferentes escenarios de emisión.

El método de escalado de patrones ha sido ampliamente adoptado por los generadores de escenarios climáticos (GEC). Un GEC es una cadena integrada de modelos simples que toman escenarios de emisión o forzamientos como entradas y que generan escenarios climáticos distribuidos geográficamente mediante la combinación de los patrones de respuesta de los diferentes GEI con diferentes AOGCM y utilizando datos climáticos observacionales. Normalmente los GEC constan de dos módulos: (i) cálculo del cambio climático global mediante un conjunto de modelos climáticos simples que emulan el comportamiento de los AOGCM, y (ii) representación del cambio climático regional mediante una base de datos que contiene resultados de un gran número de experimentos con AOGCM, así como datos globales de observación.

Las conclusiones que se muestran en esta contribución proceden de utilizar diferentes GEC, algunos de los cuales se han utilizado en los sucesivos informes de evaluación del IPCC.

El INM ha propuesto recientemente un plan en dos fases temporales que intenta estimar las mencionadas incertidumbres en las proyecciones climáticas regionalizadas valiéndose de multiplicidad de escenarios de emisión, modelos globales y técnicas de regionalización. Entre los elementos que figuran en dicho plan hay que mencionar un estudio preliminar basado en las salidas de los modelos globales utilizados en el IPCC y la utilización de herramientas flexibles específicamente diseñadas para asistir en los estudios de impacto. Entre estas herramientas ocupan un lugar muy destacado las que se basan en el escalado de patrones. Un resumen de este estudio preliminar es el objeto de este trabajo.

La sección 2 describe someramente el método de escalado de patrones y algunas de las herramientas aquí utilizadas que se basan en este método para estimar las incertidumbres asociadas a las proyecciones climáticas regionalizadas. La sección 3 presenta salidas directas de un conjunto de modelos globales sobre puntos de rejilla que caen dentro de la península Ibérica. La sección 4 hace uso de la herramienta MAGICC-SCENGEN 2.3 y 4.1 para estimar la dispersión resultante de los modelos globales en diferentes parámetros meteorológicos. La sección 5 hace una aproximación a la validación de los modelos globales comparando con la climatología en un periodo de referencia y para la región de interés. En la sección 6 se discute la consistencia de los resultados obtenidos con distintos AOGCMs. Finalmente, la sección 7 presenta resultados de proyecciones probabilísticas basadas en multitud de escenarios de emisión y de salidas de modelos globales.

2. Método de escalado de patrones

El método de escalado de patrones se desarrolló a finales de los años 80 (Santer et al., 1990) y se basa en el hecho de que los patrones de cambio climático futuro permanecen bastante similares independientemente de la magnitud total (media global) del cambio, al menos por lo que respecta a los GEI. La situación es bastante más compleja cuando se consideran los efectos de los aerosoles. Lo que esto implica es que se puede tomar el patrón de cambio generado para un momento futuro y con un cierto AOGCM y correspondiente a un calentamiento global medio de ΔT_e y simplemente escalar

$\Delta T / \Delta T_e$ para obtener el patrón de cambio correspondiente a un mayor o menor calentamiento global (ΔT). El método de escalado de patrones puede escribirse como $\Delta X_i(t) = \Delta X_{e,i}(\Delta T(t) / \Delta T_e)$.

Donde X se refiere a cualquier variable climática (temperatura, precipitación, etc), el subíndice i se refiere a un punto de rejilla particular, y Δ representa el cambio relativo a un periodo de referencia (que con frecuencia es 1961-90). En la práctica, los datos de los AOGCMs se almacenan en forma "normalizada", es decir patrones de cambio por unidad (1°C) de calentamiento global.

El GEC más ampliamente utilizado es el MAGICC/SCENGEN acrónimo que corresponde a "Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induce Climate Change/SCENario Generator". La versión 2.4 de MAGICC/SCENGEN (Wigley et al., 2000; Hulme et al. 2000) ha sido ampliamente utilizada en el tercer informe de evaluación del

IPCC. La reciente versión 4.1 (Wigley, 2003a, 2003b) actualiza la versión de MAGICC utilizada por el tercer informe de evaluación y utiliza todos los escenarios de emisión SRES y entre otras mejoras permite investigar los cambios en variabilidad y hacer proyecciones probabilísticas.

El COSMIC2 (“Country Specific Model for Inter-temporal Climate”, Version 2) también ha sido muy utilizado en estudios de impacto y proporciona a nivel de país estimaciones del cambio en temperatura y precipitación media mensual con datos de 14 AOGCM y 28 escenarios de emisión. Otros GEC, tales como OZCLIM y CLIMFACTS, se circunscriben a regiones concretas (Australia y Nueva Zelanda) y no permiten su aplicación a nuestra zona de interés. Si bien su diseño podría inspirar un futuro prototipo de GEC, que incluyese no solamente la información procedente de AOGCM sino también la información disponible de integraciones regionales y diferentes métodos de regionalización estadística.

La utilización de GEC permite una tangible evaluación de las incertidumbres inherente a la predicción del clima futuro. Muy pocos países tienen la capacidad, los recursos o el tiempo para realizar experimentos utilizando modelos globales o regionales dedicados a la producción de escenarios nacionales o regionales. La utilización de tales modelos, cuando es factible, sólo permite explorar una pequeña parte del amplio rango de posibilidades que se abren cuando se intenta barrer un gran número de escenarios de emisión, de modelos climáticos, etc. La utilidad de los GEC reside en que: (i) pueden emular el comportamiento de modelos más complejos; (ii) son rápidos y eficientes para explorar las incertidumbres de la predicción climática; y (iii) pueden utilizarse fácilmente en muchas regiones.

La principal característica de los resultados alcanzados relativos a futuros escenarios climáticos utilizando diferentes GEC es, en primer lugar, la robustez de los mismos, ya que las proyecciones pueden fácilmente barrer una gran mayoría de las simulaciones globales realizadas hasta la fecha. Asimismo, el uso de los GEC permite estimar muy fácilmente la cascada de incertidumbres asociadas a todo el proceso de generación de escenarios climáticos.

Los modelos, como MAGICC-SCENGEN, que se basan en el escalado de patrones constan de dos módulos diferenciados. Por una parte de un modelo climático simple (véase (Harvey et al., 1997) para una definición de estos modelos) que emula el comportamiento de los modelos 3D. Estos modelos producen valores de temperatura media global en superficie y de sus implicaciones en el nivel medio de la superficie del mar para unas ciertas emisiones

de gases de efecto invernadero y de dióxido de azufre. Los usuarios pueden fácilmente jugar con los escenarios de emisiones y con ciertos parámetros del modelo para explorar las incertidumbres. La segunda componente es fundamentalmente una base de datos que contiene los resultados de un gran número de experimentos con AOGCM, así como datos correspondientes al clima en un periodo de referencia para poder expresar las proyecciones climáticas en forma de cambios con respecto al periodo de referencia. Los diferentes campos en la base de datos esencialmente almacenan patrones normalizados que se modifican con los valores globales del modelo climático simple. El modelo climático simple en el caso de MAGICC se trata de un modelo acoplado de ciclo de gases, temperatura global media y nivel del mar global medio. El modelo es del tipo difusión hacia arriba-balance de energía (upwelling difusión-energy balance (UD/EB)) dividido en dos hemisferios y los dos hemisferios divididos a su vez en una “caja” de tierra y otra de océano. En IPCC-TAR (Ap.9.1) puede verse una detallada descripción de cómo sintonizar un modelo simple como el MAGICC a los resultados obtenidos con AOGCMs. Una vez sintonizado MAGICC puede utilizarse para emular y extender sus resultados. Los modelos simples permiten comparar diferencias entre escenarios fácilmente sin los efectos enmascaradores de la variabilidad natural, o de la variabilidad similar que tiene lugar en los AOGCMs (Harvey et al., 1997). Además los modelos sencillos permiten explorar el efecto de las incertidumbres provenientes de la sensibilidad del clima y de la captura de calor del océano.

3. Modelos globales sobre la península Ibérica

Una primera aproximación al tema de los escenarios de emisión regionalizados sobre la península Ibérica consiste en explorar qué evolución proporcionan los diferentes modelos globales participantes en el IPCC-TAR. Si se utilizan los datos extraídos por Mitchell et al. (2002) de la base de datos IPCC-DDC para el período (2070-2100) y se representa el cambio de precipitación en función del cambio de temperatura respecto al periodo de referencia (1961-1990) (véanse figs.1 y 2), se observa para el escenario de emisión SRES B2 un claro aumento de temperatura de entre 2 y 6 °C (entre 3 y 9 °C para SRES A2) en verano y entre 1.5 y 4 °C (entre 2 y 5 °C para SRES A2) en invierno. Por el contrario, el cambio de precipitación apenas es significativo en invierno y es predominantemente negativo en verano, aunque algunos modelos invierten esta última tendencia.

Si se representa ahora en cambio promediando por meses, se observa una clara variación estacional. La fig. 3 muestra el cambio proporcionado por 4 modelos globales (CGCM2, CSIRO2, HadCM3 y PCM) y cuatro escenarios de emisión SRES (A1FI, A2, B2 y B1) en cuatro parámetros (temperatura, nubosidad, precipitación y oscilación diurna). Se muestra que el grado de robustez de las diferentes evoluciones varía ampliamente. Para la temperatura, la dispersión entre los distintos modelos y escenarios de emisión es bastante grande mostrando claramente valores mayores de cambio y mayor dispersión también en los meses de verano. La nubosidad muestra disminuciones bastante consistentes para casi todos los modelos y escenarios de emisión,

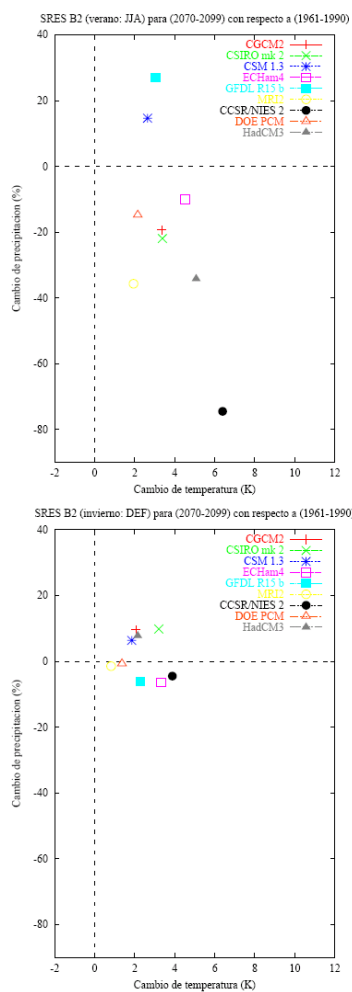


Fig.1. - Cambio de precipitación (%) y temperatura (°C) para el período (2070-2100) con respecto al período (1961-1990). Los datos proceden de 9 modelos globales revisados en el IPCC (2001). Se representan dos estaciones [verano (arriba) e invierno (abajo)], para el escenario de emisión SRES B2 y promediando los puntos de rejilla que caen sobre la península Ibérica.

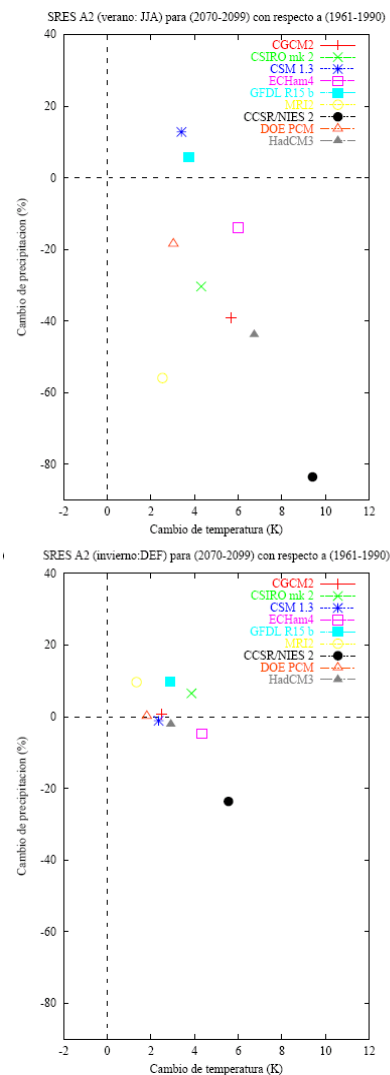


Fig.2.- Igual que fig.1, pero para el escenario de emisión SRES A2.

oscilando su valor entre una reducción de aproximadamente un 4% en invierno y hasta un 8% en verano. La precipitación muestra también una gran dispersión entre modelos y escenarios de emisión, si bien parece haber una tendencia generalizada a la reducción salvo en los meses invernales. La dispersión de la oscilación diurna es en general grande, con predominio del aumento de la oscilación, sobre todo fuera del periodo invernal.

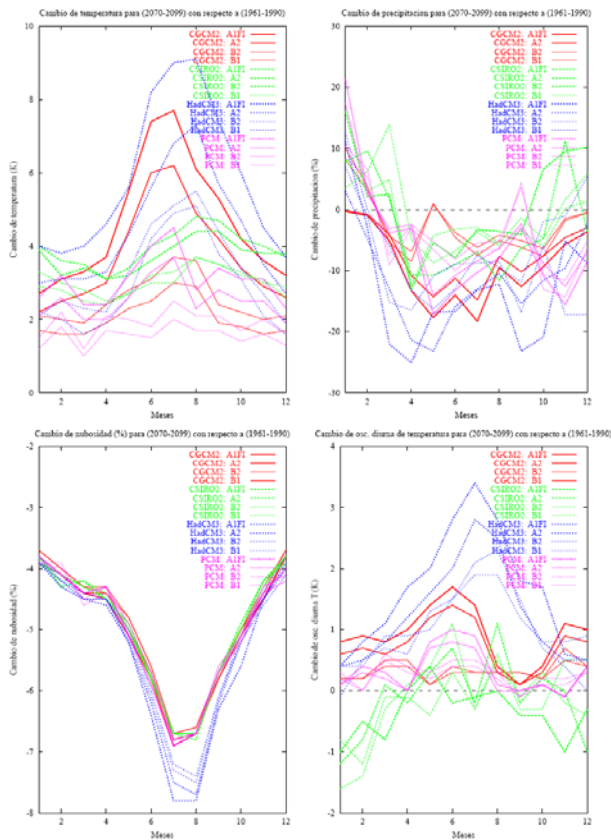


Fig.3.- Cambio de temperatura media (arriba izq.), precipitación (arriba der.), nubosidad (abajo izq.) y oscilación diaria (abajo der.) para el periodo (2070-2100) respecto al periodo de referencia (1961-1990) en función de los distintos meses proporcionado por 4 modelos globales (CGCM2, CSIRO2, HadCM3 y PCM) y cuatro escenarios de emisión SRES (A1FI, A2, B2 y B1).

4. Incertidumbre proveniente de los modelos globales

Un GEC como MAGICC-SCENGEN permite explorar fácilmente el grado de incertidumbre asociado con las proyecciones realizadas con una variedad de modelos globales. Dependiendo de las variables que se consideren los modelos muestran un grado mayor o menor de acuerdo y en consecuencia una mayor o menor robustez de las conclusiones. Las figura 4 muestra la gran dispersión que se observa para la variable precipitación entre las simulaciones realizadas con los 16 modelos incluidos en MAGICC-SCENGEN.

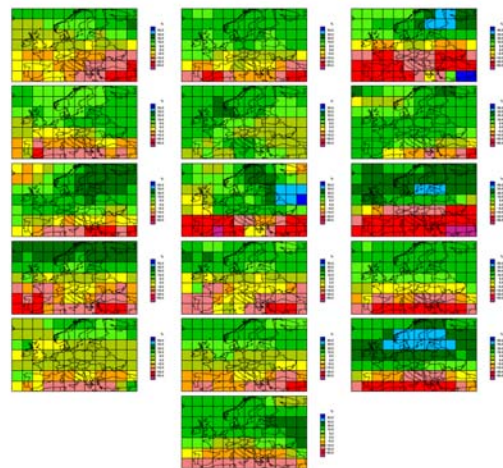


Fig. 4.- Cambio de precipitación anual bajo el escenario de emisión SRES A2 para el periodo (2086-2115) con respecto al periodo de referencia (1961-1990) obtenido con 16 AOCGMs Producido con MAGICCSCENGEN (versión 2.4) con la opción de sensibilidad climática media y los parámetros de MAGICC por defecto que producen un promedio global de incremento de temperatura (incluyendo GEI y SO4) de 3.04°C.

Para dar mejor interpretar los resultados se pueden aplicar algunas técnicas ya utilizadas operativamente en las predicciones a medio plazo. En particular, se pueden agrupar las distintas predicciones mediante técnicas de análisis cluster, se pueden promediar, se pueden presentar horquillas de valores máximos y mínimos en una región de referencia, etc.

El promediado de todos los miembros del conjunto de predicciones realizadas con distintos modelos puede proporcionar un resultado más robusto y plausible por la tendencia a la compensación de errores sistemáticos de los distintos modelos. Este hecho ya ha sido ampliamente demostrado en los plazos de predicción cortos, medios y estacionales. Sin embargo no debe olvidarse que el promediado puede enmascarar comportamientos extremales en el caso de variables que presenten signos positivos y negativos.

Las figs 5 y 6 muestran un promediado sobre todos los modelos para un escenario de emisión particular (SRES A2) y separando por estaciones. La figura 5, que corresponde a la precipitación, muestra sobre la península Ibérica una clara tendencia a la reducción anual de la precipitación y una engañosa tendencia a la disminución en los meses de verano. Esta disminución en términos porcentuales puede ser insignificante en términos absolutos debido a la poca precipitación estival sobre todo en la mitad meridional de la península. El promedio de los 16 modelos muestra una reducción de la precipitación entre el 10 y 20% para la mitad meridional de la peninsu-

la y entre 5 y 10% en los cuadrantes NW y NE de la península Ibérica. Por estaciones se observa una disminución de precipitación salvo en la mitad norte y en la estación invernal que se estima un aumento de la precipitación. La figura 6, correspondiente a la temperatura media, muestra también incrementos mayores en los meses veraniegos (superiores a 4.5°C en la mitad oriental de la península), consistentemente con lo que se había obtenido en la sección anterior.

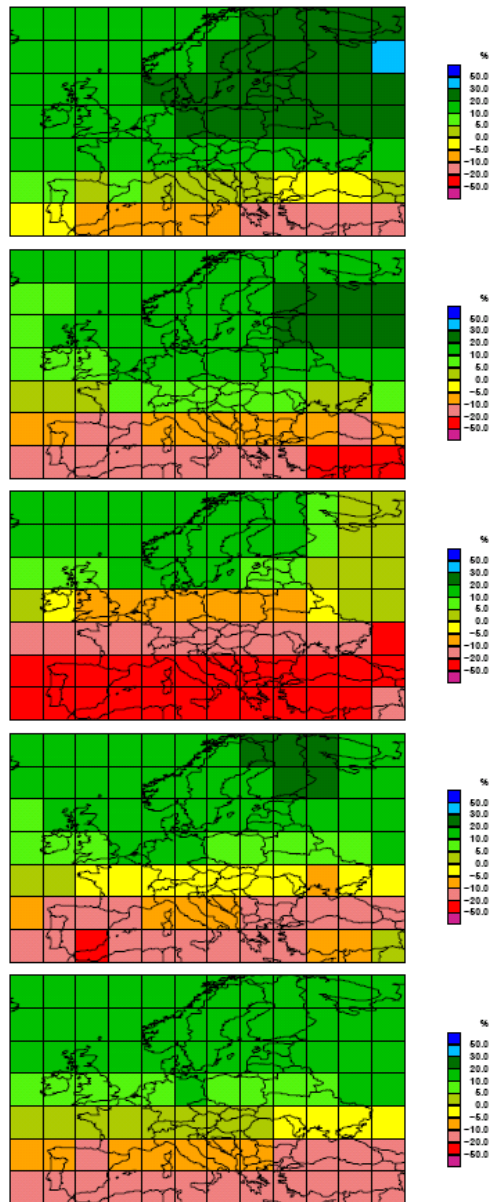


Fig.5.- Cambio de precipitación bajo el escenario de emisión SRES A2 para el período (2086-2015) con respecto al período de referencia (1961-1990) basado en el promedio de 16 AOCGM para invierno (fila 1ª), primavera (fila 2ª), verano (fila 3ª), otoño (fila 4ª) y para el promedio anual (fila 5ª). Producido con MAGICCSCENGEN (version 2.4) con la opción de sensibilidad climática media y los parámetros de MAGICC por defecto.

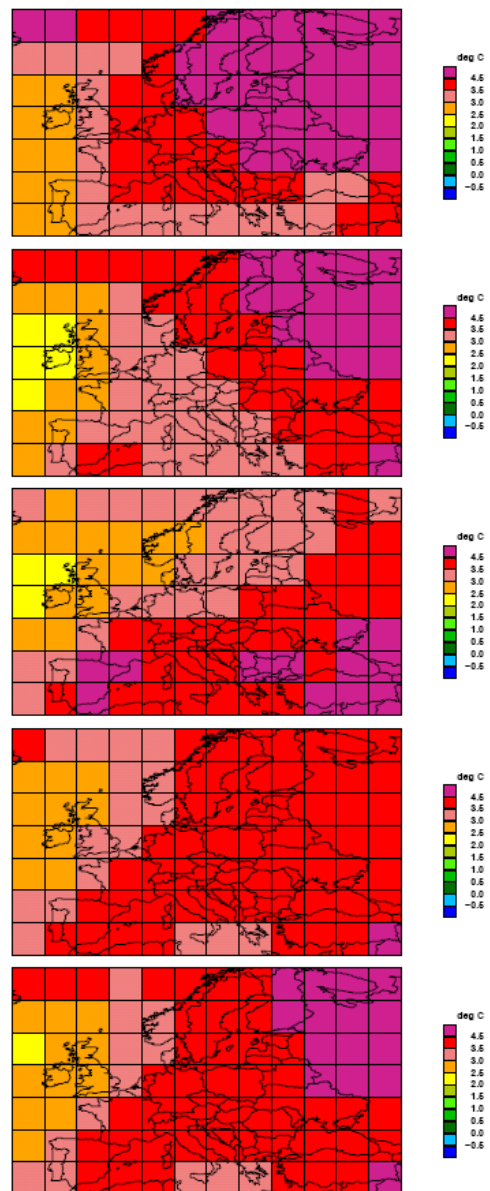


Fig.6.- Igual que fig.5, pero para la temperatura media.

Los promedios correspondientes a otras variables (no mostrados aquí) dan resultados consistentes en términos de tensión de vapor y de nubosidad. Cabe destacar que el promedio para la nubosidad muestra un ligero aumento de la misma en los meses invernales, frente a la reducción en el resto del año y en el promedio anual. Este aumento invernal es consistente con el ligero aumento invernal del promedio del cambio de precipitación. En términos del módulo de la velocidad, se nota una tendencia a la disminución porcentual en todas las estaciones salvo en el verano. De nuevo, hay que ser cautos a la hora de interpretar este aumento veraniego en una estación en la que predominan las situaciones con poco flujo debido a la circulación general.

5. Validaciones de los AOGCMs frente a observaciones.

Cuando se plantea el problema de qué modelo global elegir entre los muchos disponibles para preparar escenarios regionalizados y los posteriores estudios de impacto, hay una serie de criterios normalmente admitidos (Smith y Hulme, 1998). Entre estos criterios se pueden mencionar: (i) la menor antigüedad del modelo; (ii) la mejor representación del clima actual y paleoclimas; (iii) la mayor resolución; y (iv) la representatividad de los modelos para representar un amplio abanico de posibles climas futuros utilizando solamente dos o tres modelos.

La validación del modelo frente al clima actual es un criterio muy sólido y objetivo, pero debe tenerse siempre presente que una buena representación del clima actual no tiene por qué representar una garantía de buena simulación del clima futuro.

Las tablas I y II muestran los índices de verificación de la temperatura media anual y de precipitación media diaria de 17 modelos para un área que abarca desde los 27.5° a los 52.5° de latitud norte y desde los 22.5°E a 12.5°O en longitud. La comparación se ha realizado contra la climatología CRU.

MODEL	CORREL	RMSE	MEAN DIFF	NUM	PTS
		degC	degC		
BMRCTR	.968	2.242	-1.357	48	
CCC1TR	.901	2.182	-.391	48	
CCSRTR	.933	3.136	-2.536	48	
CERFTR	.929	2.351	-1.576	48	
CSI2TR	.979	1.171	.177	48	
CSM_TR	.855	2.797	1.481	48	
ECH3TR	.955	1.455	-.562	48	
ECH4TR	.988	.832	-.449	48	
GFDLTR	.962	3.237	2.959	48	
GISSTR	.947	2.452	.044	48	
HAD2TR	.987	1.076	.769	48	
HAD3TR	.987	1.052	.739	48	
IAP_TR	.926	2.085	.622	48	
LMD_TR	.932	1.659	-.132	48	
MRI_TR	.956	2.765	-2.293	48	
PCM_TR	.865	3.236	2.277	48	
W&M_TR	.896	5.361	-4.967	48	
MODBAR	.983	.922	-.306	48	

Tabla I.- Índices de verificación (correlación, error cuadrático medio, error medio) para los modelos listados en la columna de la izquierda y para la temperatura media en el periodo de referencia. (Producido con MAGICC-SCENGEN, version 4.1).

MODEL	CORREL	RMSE	MEAN DIFF	NUM	PTS
		mm/day	mm/day		
BMRCTR	.894	1.021	-.275	48	
CCC1TR	.930	.410	-.109	48	
CCSRTR	.908	.603	-.105	48	
CERFTR	.938	.707	-.372	48	
CSI2TR	.954	.481	-.274	48	
CSM_TR	.958	.530	-.321	48	
ECH3TR	.938	.417	.057	48	
ECH4TR	.972	.253	-.116	48	
GFDLTR	.929	.435	-.280	48	
GISSTR	.956	.552	-.260	48	
HAD2TR	.958	.438	-.222	48	
HAD3TR	.980	.332	-.251	48	
IAP_TR	.915	.496	.334	48	
LMD_TR	.798	.764	-.483	48	
MRI_TR	.938	.420	-.166	48	
PCM_TR	.951	.469	-.169	48	
W&M_TR	.908	1.038	-.716	48	
MODBAR	.967	.393	-.219	48	

Tabla II.- Igual que tabla I, pero para precipitación

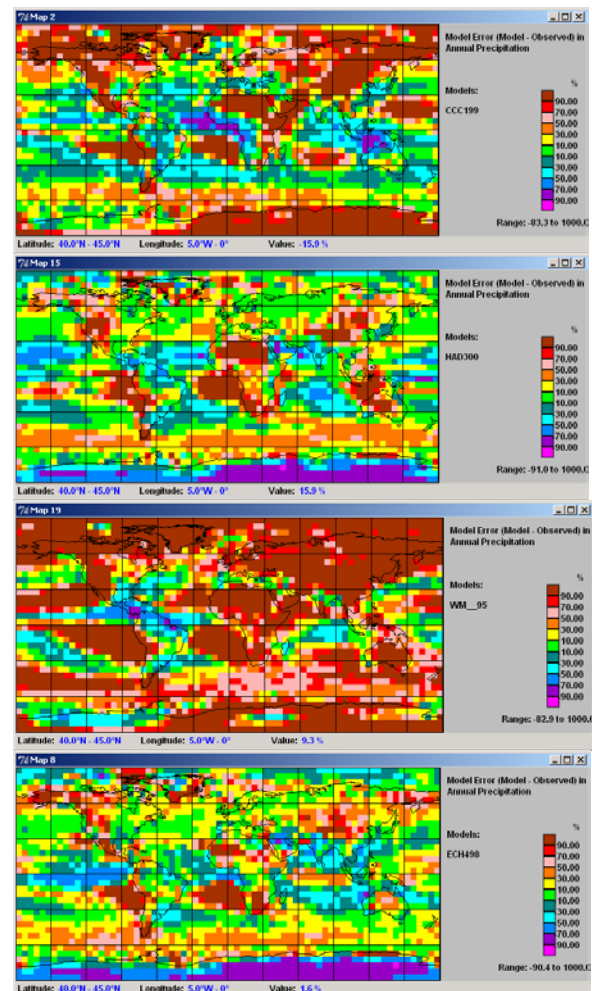


Fig.7.- Error medio de la precipitación anual en el periodo de referencia para los modelos CCC199, HAD300, WM_95 y ECH498 (producido con MAGICC-SCENGEN, version 4.1).

La distribución y magnitud de los errores medios (bias) permiten también hacer una primera selección de los modelos globales. La fig. 7 muestra los errores medios de la precipitación anual de cuatro modelos (CCC199, HAD300, WM_95 y ECH498) seleccionados entre los de la tabla II. Se observa que en términos de precipitación anual media el modelo WM_95 claramente simula peor la precipitación que los otros tres de la misma figura produciendo un error medio que en muchas partes del globo es superior al 90% de la precipitación media. Siendo además este peor funcionamiento de este modelo no sólo global sino también en la región de interés, tal y como se muestra en la tabla II. Estos errores reproduciendo el clima actual son suficiente

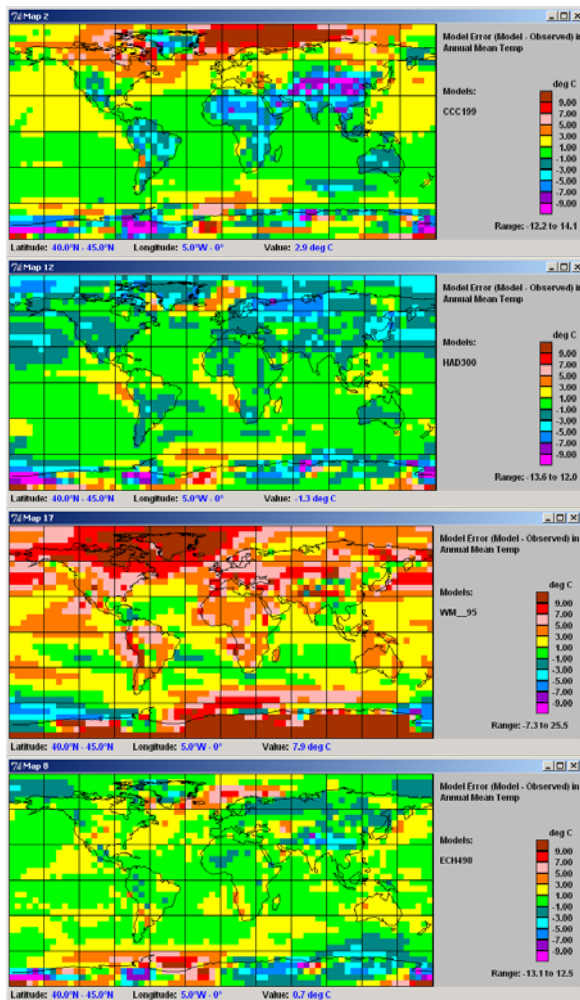


Fig.8.- Igual que fig.7, pero para el error medio de la temperatura media anual.

razón para descartar este modelo y no utilizarlo en estimaciones de escenarios de tiempo futuro. De entre los otros tres modelos representados en la figura, HAD300 y ECH498 son los que muestran menor error medio y por lo tanto son dos buenos candidatos para ser utilizados en la estimación de escenarios. Análogas consideraciones pueden

hacerse con los errores medios de la temperatura media anual. La fig.8 muestra los errores medios de la temperatura media anual para los mismos cuatro modelos (CCC199, HAD300, WM_95 y ECH498) considerados para la precipitación. Mientras que ahora el CCC199 muestra un bias cálido de entre 1-3°C en la mayor parte de Europa, el modelo HAD300 muestra por el contrario un bias similar pero de sentido opuesto (-1 a -3°C), el modelo WM_95 muestra un excesivo e inaceptable bias cálido y finalmente el modelo ECH498 muestra un bias muy reducido que se mueve entre +1 y -1°C. Los errores medios de temperatura también descartarían el modelo WM_95.

6. Consistencia entre las proyecciones de los AOGCMs.

Es muy importante estimar la consistencia de las proyecciones realizadas con distintos modelos globales. La consistencia de las mismas será una medida de la robustez de las conclusiones que se obtengan. A modo de ejemplo, la fig. 9 representa el cambio en variabilidad de la precipitación anual promediado sobre los 17 AOGCMs considerados por MAGICC-SCENGEN (4.1). En términos generales se observa que la variabilidad es pequeña, sin embargo esto sólo es consecuencia de que la variabilidad suministrada por los distintos modelos tiende a cancelarse y que no existe acuerdo entre los diferentes modelos. La fig. 10 muestra los correspondientes mapas de variabilidad en la precipitación anual en los modelos HAD300 y ECH498, respectivamente, donde los valores de variabilidad son relativamente altos y sobre todo no aparece consistencia espacial en los resultados proporcionados por ambos modelos para el caso de la precipitación. Este resultado claramente demuestra la poca fiabilidad de las proyecciones de cambio de variabilidad para la precipitación anual.

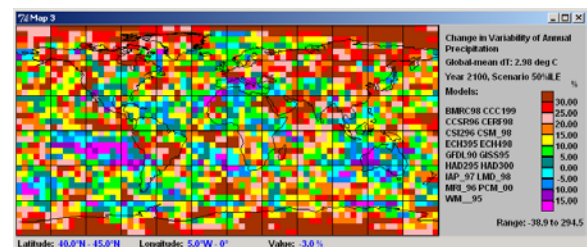


Fig.9.- Cambio en la variabilidad de la precipitación anual, para el año 2100 respecto al periodo de referencia 1961-90 (CRU) promediado sobre los 17 modelos incluidos en MAGICC-SCENGEN, version 4.1.

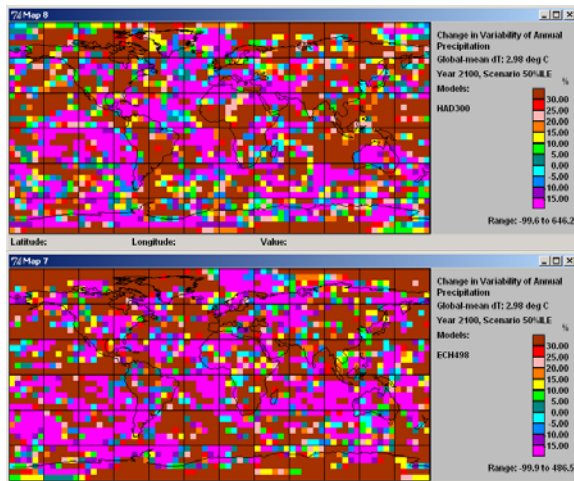


Fig.10.- Cambio en la variabilidad de la precipitación anual para el año 2100 respecto al periodo de referencia 1961-90 (CRU) utilizando los modelos HAD300 (arriba) y ECH498 (abajo) (producido con MAGICC-SCENGEN, version 4.1).

La tabla III representa (para un dominio alrededor de la península ibérica, igual que el utilizado en las tablas I y II) la correlación de patrones (pattern correlation) del cambio de variabilidad normalizada de precipitación anual entre los distintos modelos. Los valores que aparecen en la tabla demuestran cuantitativamente el poco acuerdo que muestran los modelos también en el área considerada. En consecuencia, se deberá ser muy cauto al aceptar los resultados de cualquier modelo para los cambios en variabilidad de precipitación.

	BMRCD1	CCC1D1	CCSRD1	CERFD1	CSI2D1	CSM_D1	ECH3D1	ECH4D1	GFDLD1	GISSD1	HAD2D1	HAD3D1	IAP_D1	LMD_D1	MRI_D1	PCM_D1	W&M_D1
BMRCD1	100	-12	2	44	44	26	-29	7	-24	5	-29	39	64	-6	-6	34	-25
CCC1D1	-12	100	-5	-36	-24	-22	4	-51	12	-7	45	-25	-16	20	1	-10	-33
CCSRD1	2	-5	100	-10	29	-5	30	-27	-24	-28	-25	7	2	-36	-17	-1	-19
CERFD1	44	-36	-10	100	28	29	-10	26	-36	38	-35	26	49	6	18	37	0
CSI2D1	44	-24	29	28	100	-22	1	25	-43	-12	-36	23	20	-6	-6	17	11
CSM_D1	26	-22	-5	29	-22	100	-34	-9	11	-1	-4	-3	37	-26	32	1	-16
ECH3D1	-29	4	30	-10	1	-34	100	2	-14	5	-25	-1	-15	11	-21	-11	-6
ECH4D1	7	-51	-27	26	25	-9	2	100	-9	30	-27	21	12	4	19	29	50
GFDLD1	-24	12	-24	-36	-43	11	-14	-9	100	-5	44	-29	-26	7	11	-14	12
GISSD1	5	-7	-28	38	-12	-1	5	30	-5	100	0	33	3	14	14	2	17
HAD2D1	-29	45	-25	-35	-36	-4	-25	-27	44	0	100	-41	-19	14	15	-41	12
HAD3D1	39	-25	7	26	23	-3	-1	21	-29	33	-41	100	33	-9	-12	12	-3
IAP_D1	64	-16	2	49	20	37	-15	12	-26	3	-19	33	100	-5	9	20	-15
LMD_D1	-6	20	-36	6	-6	-26	11	4	7	14	14	-9	-5	100	4	-11	18
MRI_D1	-6	1	-17	18	-6	32	-21	19	11	14	15	-12	9	4	100	-8	26
PCM_D1	34	-10	-1	37	17	1	-11	29	-14	2	-41	12	20	-11	-8	100	-3
W&M_D1	-25	-33	-19	0	11	-16	-6	50	12	17	12	-3	-15	18	26	-3	100
MEANMOD	49	-20	1	61	35	21	27	49	-16	41	-28	34	56	18	35	33	0
AVE-COR	BMRCD1	CCC1D1	CCSRD1	CERFD1	CSI2D1	CSM_D1	ECH3D1	ECH4D1	GFDLD1	GISSD1	HAD2D1	HAD3D1	IAP_D1	LMD_D1	MRI_D1	PCM_D1	W&M_D1
	14	-3	-2	16	9	6	-1	12	-2	12	-3	10	15	6	11	9	7

Tabla III.- Matriz de correlación de patrones (pattern correlation) del cambio de variabilidad normalizada de precipitación anual entre los modelos considerados en MAGICC-SCENGEN (versión 4.1)

7. Probabilidad de aumento de precipitación y de temperatura.

A la vista de la gran cantidad de incertidumbres (Mitchell y Hulme, 1999) que existen en el proceso de generación de escenarios climáticos regionalizados (p.e., en las emisiones de gases de efecto invernadero, en las realizaciones de los distintos modelos globales, en la estimación de las concentraciones de GEI a partir de las emisiones, en las diferentes técnicas de regionalización, etc.), las metodologías que se va paulatinamente imponiendo en las predicciones para las escalas temporales que

van desde el plazo medio (4-10 días) hasta las proyecciones seculares de cambio climático persiguen acotar las incertidumbres que contaminan el proceso de predicción. Las predicciones de tipo determinístico van cediendo a favor de las predicciones probabilísticas basadas en un conjunto o población de predicciones. El proyecto integrado ENSEMBLES (del 6º programa marco financiado por la UE) que se desarrolla entre los años 2005 y 2009 tiene entre otros objetivos el de acotar las incertidumbres en las predicciones seculares de cambio climático mediante integraciones con diferentes escenarios de emisión, diferentes modelos globales, diferentes modelos regionales y diferentes

técnicas estadísticas de regionalización. Esta metodología basada en multi-emisiones, multi-modelos y multi-regionalización permite explorar las incertidumbres asociadas a la generación de los escenarios climáticos regionalizados y proporcionar proyecciones de tipo probabilístico como las mostradas en la fig.11 para la predicción probabilística del aumento de precipitación y en la fig. 12 para el aumento de temperatura media.

La misma fig. 11 nos demuestra que las proyecciones de la precipitación sobre algunas regiones muestran un bajo nivel de fiabilidad. Las correspondientes predicciones para el incremento de la temperatura media muestran un alto porcentaje de probabilidad y por lo tanto son altamente fiables en la mayoría de las regiones. Tan importante como acotar y horquillar las incertidumbres es determinar la robustez con las que se pueden hacer proyecciones sobre la evolución de diferentes variables, sobre los comportamientos en las diferentes regiones, sobre la evolución de la variabilidad en distintas escalas temporales, etc.

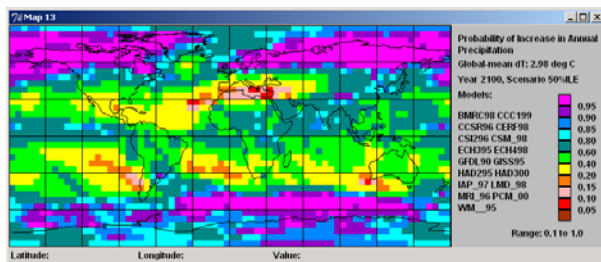


Fig.11.- Probabilidad de aumento de precipitación anual media obtenida mediante MAGICC-SCENGEN (versión 4.1) promediando 17 AOGCMs y para el percentil 50% de los escenarios de emisión SRES-IPCC.

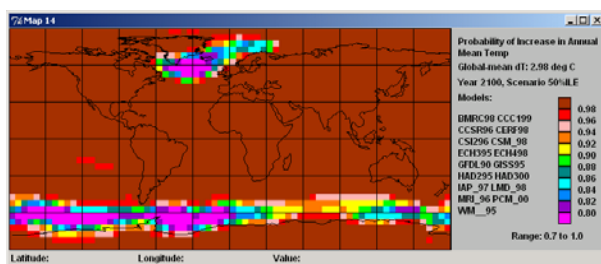


Fig. 12.- Igual que fig. 11, pero para la temperatura media anual.

7. Conclusiones

Las GEC basados en el método de escalado de patrones constituyen una herramienta muy poderosa y flexible para realizar regionalmente una primera evaluación de los posibles escenarios de cambio climático. Además permiten explorar muchas de las

incertidumbres a las que están sujetas las proyecciones climáticas.

La utilización de “ensembles” de escenarios de emisión y de proyecciones con distintos modelos se puede manejar de forma muy flexible con los GEC y además permiten extraer consecuencias muy robustas obtenidas utilizando variedad de modelos globales y escenarios de emisión.

Referencias

- * Harvey, L.D.D., J. Gregory, M. Hoffert, A. Jain, M. Lal, R. Leemans, S.C.B. Raper, T.M.L. Wigley, and J.R. de Wolde, 1997: An introduction to simple climate models used in the IPCC Second Assessment Report. *IPCC Technical Paper II* [Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, D.J. Griggs, and K. Maskell (eds.)]. Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 50 pp
- * Hulme, M., Wigley, T.M.L., Barrow, E.M., Raper, S.C.B., Centella, A., Smith, S. and Chipanshi, A., 2000. Using a climate scenario generator in vulnerability and adaptation assessments: MAGICC and SCENGEN Version 2.4 Workbook. Climatic Research Unit, University of East Anglia, Norwich, 60pp.
- * Mitchell, T. D. and Hulme, M., 1999. Predicting regional climate change: living with uncertainty. *Progress in Physical Geography* 23(1): 57-78.
- * Santer, B.D., Wigley, T.M.L., Schlesinger, M.E. and Mitchell, J.F.B., 1990: *Developing climate scenarios from equilibrium GCM results*. Max Planck Institute für Meteorologie, Report No.47, Hamburg, Germany
- * Schlesinger, M.E. and L.J. Williams, 1997. COSMIC – Country Specific Model for Intertemporal Climate, Computer Software, Electric Power Research Institute, Palo Alto.
- * Smith, J.B. and M. Hulme, 1998. Climate Change Scenarios. Chapter 3 in: Feenstra, J., I. Burton, J.B. Smith and R.S. J. Tol (eds.) *Handbook on methods of climate change impacts assessment and adaptation strategies*. UNEP/IES, Version 2.0, October, Amsterdam.
- * Wigley, T.M.L., Raper, S.C.B., Hulme, M. and Smith, S. (2000) The MAGICC/SCENGEN Climate Scenario Generator: Version 2.4, Technical Manual, Climatic Research Unit, UEA, Norwich, UK, 48pp.
- * Wigley, T.M.L. 2003a: MAGICC/SCENGEN 4.1: Technical Manual, National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA, October 2003, 14 pp.
- * Wigley, T.M.L. 2003b: MAGICC/SCENGEN 4.1: User Manual, National Center for Atmospheric Research, Colorado, USA, October 2003, 23 pp.
- * Wilby, R.L. and Wigley, T.M.L. 1997. Downscaling General Circulation Model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21, 530-548.
- * Wilby, R.L., Dawson, C.W. and Barrow, E.M. (2002): SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling Software*, 17, 145-157.
- * UNFCCC, 2005. Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change.