

Escenarios regionales de cambio climático

Miguel Ángel Gaertner, José Manuel Gutiérrez y Manuel Castro

1. Introducción

Para poder tomar medidas de mitigación del cambio climático antropogénico y de adaptación a sus consecuencias, es necesario disponer de información sobre la evolución previsible del clima. Una herramienta básica para ello son los denominados escenarios de cambio climático. Un escenario de cambio climático es una descripción coherente, internamente consistente y plausible de una evolución futura posible del clima. Los escenarios no son predicciones, sino posibilidades alternativas que dependen de factores cuyo desarrollo no podemos predecir. En el caso del cambio climático antropogénico, relacionado con la creciente acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero (en adelante GEIs), la evolución futura de la concentración de los GEIs dependerá de muchos factores económicos y sociales cuyo desarrollo no podemos conocer con antelación, como el crecimiento económico, las innovaciones tecnológicas o la demografía. Por ello se han desarrollado los escenarios de emisiones, derivados de un ejercicio de prospectiva sobre las evoluciones futuras de emisiones antropogénicas de GEIs y aerosoles. Esto se realiza considerando diversos supuestos acerca del futuro desarrollo demográfico y socio-económico en el mundo.

Los escenarios de emisiones que se han utilizado hasta ahora para realizar proyecciones con modelos de clima a lo largo del siglo XXI, se conocen por las siglas SRES (del inglés “Special Report on Emission Scenarios”). Constituyen un conjunto de escenarios de emisión elaborados por un grupo de expertos dentro del IPCC (Nakicenovic et al., 2000), teniendo en cuenta hipótesis coherentes sobre evoluciones futuras de crecimiento de la población mundial, la demanda de energía, la eficiencia de su consumo o el crecimiento económico global, entre otras consideraciones. Partiendo de estas hipótesis, se deducen las emisiones de GEIs y las concentraciones resultantes, que sirven de forzamiento radiativo para los modelos climáticos globales. A modo de ilustración, en la figura 1 se muestran las evoluciones de emisiones de CO₂ y SO₂ corres-

pondientes a los seis escenarios SRES principales utilizados para realizar proyecciones de clima. En la misma figura se incluyen las evoluciones de la concentración global de CO₂ para cada uno de los escenarios de emisiones considerados, según resulta de la aplicación de modelos de balance del carbono (por ejemplo Cramer y Field, 1999). Este procedimiento para obtener escenarios de emisiones se ha modificado recientemente por otro en el que se parte de ciertas trayectorias futuras posibles de forzamiento radiativo (el cambio en el balance entre la radiación saliente y entrante en la atmósfera, causado por cambios en la concentración de GEIs y aerosoles). A estos valores de forzamiento radiativo se puede llegar a través de diferentes evoluciones socio-económicas y tecnológicas. Para forzar los modelos climáticos se escoge una de las evoluciones de concentraciones de GEIs que puede dar lugar a las trayectorias de forzamiento radiativo consideradas. Dichas evoluciones de GEIs constituyen los denominados escenarios RCP (del inglés “Representative Concentration Pathways”; Moss et al., 2010).

Para obtener proyecciones del cambio climático debido al incremento en la atmósfera de GEIs y de aerosoles emitidos por actividades humanas, se utilizan modelos climáticos globales. Debido a la limitada resolución espacial de estos modelos globales, y a la necesidad de disponer de información a escala regional y local para estudios de impactos del cambio climático, se realiza la denominada regionalización (*downscaling*, en inglés) para aumentar la resolución espacial de los escenarios climáticos. Este proceso de regionalización se puede llevar a cabo por dos tipos de métodos: dinámicos y estadísticos. Tras describir el método de obtención de escenarios globales, se tratan estos métodos de regionalización.

2. Escenarios globales de cambio climático

Un modelo climático consiste en una representación matemática de los procesos que tienen lugar en el sistema climático, cuyo estado define el clima. El sistema climático se considera compuesto por cinco componentes: atmósfera, hidrosfera, criosfera, litosfera y biosfera (Peixoto y Oort, 1992). Entre ellos se producen grandes intercambios de materia, calor y momento y constantes interacciones mediante multitud de procesos físicos, químicos y biológicos, lo que hace que el sistema climático terrestre sea muy complejo. Los modelos globales de clima constituyen actualmente la herramienta básica de que se dispone para estudiar los procesos que conforman el estado del clima. Por esta razón resultan imprescindibles para derivar la respuesta del clima a las perturbaciones inducidas por actividades humanas. La capacidad de los modelos para proyectar

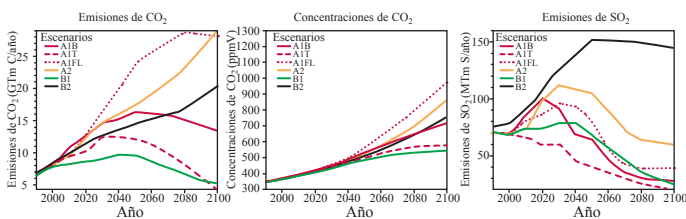


Fig.1. Evoluciones de emisiones globales de CO₂ y SO₂ a la atmósfera debidas a actividades humanas y de las concentraciones globales de CO₂ que resultarían de tales emisiones, según los diversos escenarios SRES. Tomada de IPCC (2001).

la evolución futura del clima depende básicamente del conocimiento de los procesos que gobiernan el sistema climático.

Actualmente la mayor parte de los modelos climáticos globales incluyen alguna representación de los cinco componentes del sistema climático, de los procesos que se producen en cada uno de ellos y de los que determinan los intercambios mutuos. A los modelos en los cuales la atmósfera y el océano interactúan de forma acoplada se les conoce generalmente por las siglas AOGCM (del inglés "Atmosphere-Ocean Global Climate Model"), que se utilizarán de aquí en adelante para referirse a ellos.

Los AOGCMs se basan en la resolución del conjunto de ecuaciones matemáticas que expresan las leyes de la Física que gobiernan la dinámica de la atmósfera y el océano. Es un complejo sistema no-lineal de ecuaciones diferenciales que no tiene solución analítica. Por ello, han de resolverse de forma aproximada aplicando técnicas numéricas, que requieren dividir el espacio ocupado por la atmósfera y el océano en celdillas tridimensionales. En cada una de ellas se asignan valores de las variables que caracterizan el estado de la atmósfera y el océano, como temperatura, movimiento, densidad, etc. Dicha asignación se realiza a partir de observaciones directas o indirectas de tales variables a escala global en un determinado instante inicial. Para derivar las evoluciones temporales de las variables en cada celdilla de la malla del modelo se resuelven las ecuaciones a partir de los valores iniciales. Estas evoluciones se obtienen en intervalos temporales discretos (paso temporal), cuya duración debe estar en concordancia con el tamaño de las celdillas. Cuanto menor sea dicho tamaño, también ha de serlo el paso temporal. En la tabla 1 se muestran como ejemplo las características de los AOGCMs empleados en los últimos escenarios globales de cambio climático generados en el marco del proyecto europeo ENSEMBLES (Van der Linden y Mitchell, 2009).

Además, la discretización que precisan las técnicas numéricas para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales implica que con ellas no pueden resolverse aquellos procesos atmosféricos u oceánicos con escalas espaciales o temporales menores que la resolución del modelo, por ejemplo

nubes individuales en los modelos atmosféricos o remolinos de escala intermedia en los modelos oceánicos. Por eso, su efecto debe calcularse mediante una representación paramétrica en función de valores de las variables básicas resueltas por el modelo. Este procedimiento se llama parametrización.

Los modelos AOGCM se combinan con representaciones matemáticas empíricas o semiempíricas de otros componentes del sistema climático, como la criosfera, la superficie del suelo o la cubierta vegetal. Los modelos actuales más completos incluyen también representaciones del ciclo del carbono, de la dinámica de la vegetación y de procesos que afectan a los aerosoles en la atmósfera.

Antes se ha señalado que el sistema de ecuaciones diferenciales de un AOGCM se resuelve en intervalos o "pasos" temporales discretos. Esto significa que, en cada uno de ellos, el modelo debe resolver todas las ecuaciones para calcular los valores actualizados de las variables en todas las celdillas de la malla tridimensional que abarca el globo terrestre. Esto implica tener que realizar millones de operaciones matemáticas simples en cada intervalo temporal (de 30 a 60 minutos según los modelos), hasta completar todo el periodo de integración, que normalmente se extiende a varios centenares de años. Obviamente, esto requiere el uso de los computadores más potentes disponibles.

Los modelos AOGCM que se utilizan para cuantificar la respuesta futura del clima a perturbaciones inducidas por actividades humanas han de ser previamente evaluados. El examen de la fiabilidad que presenta un AOGCM para reproducir los principales procesos en el sistema climático, se realiza mediante una comparación sistemática entre resultados de simulaciones con condiciones de clima actual y datos climatológicos observados. Las simulaciones de clima actual con AOGCMs se llevan a cabo considerando la evolución de valores observados de concentraciones atmosféricas de GEIs. Los modelos también pueden evaluarse considerando condiciones paleoclimáticas, por ejemplo la pasada era glacial. Una vez que se ha evaluado satisfactoriamente su calidad, el modelo se utiliza para realizar simulaciones de la evolución temporal del futuro cambio climático.

Tabla 1. Resumen de características de los AOGCMs empleados en los escenarios de cambio climático del proyecto europeo ENSEMBLES. Una validación de estos modelos, desde el punto de vista de la regionalización, puede consultarse en Brands et al. (2011a).

Institución	Modelo	Atmósfera	Resolución	Niveles	Océano	Resolución	Niveles
METO-HC	HadCM3 HadGEM1	HadAM3 HadGAM1	2,75x3,75° 1,25x1,875°	19 38	HadGOM1	1,25°x1,25° 0,33-1°	20 40
IPSL+ UCL-ASTR	IPSL-CM4	LMDZ-4	2,5x3,75°	19	OPA8.1	0,5-2°	31
MPIMET +DMI	ECHAM5/ MPI-OM	ECHAM5	T63 (~1,875°)	31	MPI-OM	1,5°	40
INGV-SX	INGV-CMCC	ECHAM4.6	T106 (~1,125°)	19	OPA8.2	0,5-2°	31
FUB	EGMAM	ECHAM4-MA	T30 (~3,75°)	19/39	HOPE-G	0,5-2,8°	20
CNRM	CNRM-CM3	ARPEGE V3	T63(~1,875°)	45	OPA8	0,5-2°	31
NERSC	BCM2	ARPEGE V3	T63(~1,875°)	31	MICOM 2.8 (modificado)	1,5°	35

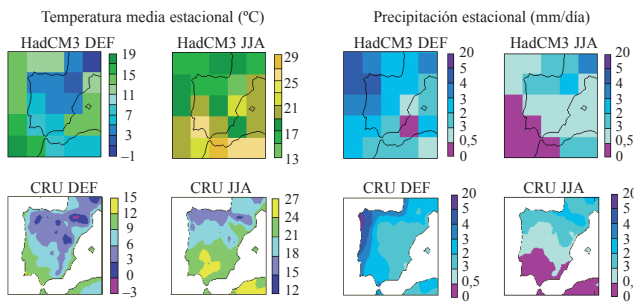


Fig.2. Comparación entre las temperaturas medias (en °C) y las precipitaciones (en mm/día) promedio en invierno (DEF) y verano (JJA) simuladas por el AOGCM HadCM3 (fila de arriba) y la climatología elaborada por la Unidad de Investigación del Clima (CRU) de la Universidad de East Anglia (fila de abajo). En ambos casos el periodo es 1961-1990. Nótese que los colores y valores en las escalas de temperatura son diferentes en cada mapa, pero los de precipitación son iguales.

En este tipo de evaluaciones se ha comprobado que la mayor parte de los actuales AOGCM han experimentado una notable mejora en los últimos años. Esto se atribuye a varias causas, entre las que destacan un mejor conocimiento de las características de los océanos y de los procesos de intercambio con la atmósfera, y la reducción en la resolución espacial de los modelos (tamaño de celdillas) permitida por el impresionante incremento en la potencia de computación. De hecho, por lo general las simulaciones reproducen de manera muy aceptable la evolución experimentada por la temperatura global a lo largo de los últimos 150 años. Tanto es así, que los ensayos realizados con diferentes evoluciones de GEIs han permitido discriminar la contribución de las actividades humanas al cambio experimentado por el clima, con un grado de confianza aceptable (Stott et al., 2001).

Aunque los resultados de proyecciones de clima obtenidos con diversos AOGCM son fiables a escala global, cuando se consideran escalas regionales (10-100 km) las distribuciones de temperatura y, sobre todo, de precipitación muestran notables discrepancias con los datos observados. Esta mengua en la fiabilidad de los resultados a escala regional se atribuye en buena medida a la insuficiente resolución espacial de los AOGCMs y al uso de parametrizaciones físicas no adaptadas a procesos de mesoescala. Una baja resolución espacial da lugar a que se distorsionen las líneas de costa y se suavicen las alturas de los accidentes orográficos. Además, ya se ha señalado que los modelos no pueden reproducir de forma realista procesos atmosféricos con un tamaño similar o inferior al de las celdillas en que se discretiza el dominio donde se aplica. Por ejemplo, los climas de la Península Ibérica son el resultado de la acción de la circulación global de la atmósfera, de las interacciones entre este flujo a macroescala y la orografía, de los contrastes mar-tierra y de otros efectos de carácter más local (Castro et al., 1995). Pero los actuales AOGCM no son capaces de reproducir adecuadamente estos rasgos del clima en la Península. Un ejemplo ilustrativo se muestra en la figura 2, donde se comparan las distribuciones de temperatura y precipitación estacionales simuladas por el modelo global HadCM3 para el periodo 1961-1990 y las climatológicas para dicho periodo.

Es evidente que los rasgos climáticos de escala regional en la Península no están reproducidos, porque la baja resolución

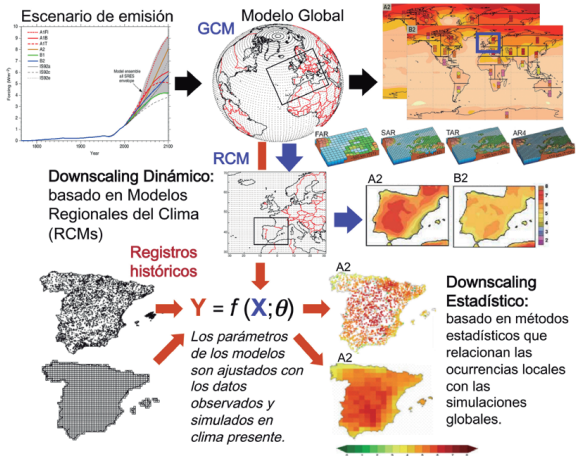


Fig.3. Esquema de las metodologías de regionalización (dinámica y estadística), aplicadas a los escenarios globales de cambio climático (fila superior).

espacial del AOGCM no lo permite. Pero aumentar la resolución de los AOGCM supondría un incremento muy considerable del tiempo de computación y también una adaptación de las parametrizaciones físicas a esa mayor resolución en todas las latitudes del planeta. En consecuencia, para obtener aproximaciones más adecuadas a los climas de escala regional o sub-regional, actualmente se aplican otras técnicas a partir de las simulaciones con los AOGCM, conocidas como técnicas de regionalización, con dos aproximaciones metodológicas distintas (dinámica y estadística), como se ilustra esquemáticamente en la figura 3.

3. Regionalización dinámica

La regionalización dinámica consiste en aplicar modelos regionales de clima (en adelante RCM, del inglés “Regional Climate Model”) para realizar proyecciones realistas de cambio climático a escala regional (10-100 km) de forma físicamente consistente (Rummukainen, 2010). Los RCMs son esencialmente similares al módulo atmosférico de cualquier AOGCM, pero se aplican a un área limitada del globo con más resolución, es decir discretizando espacialmente con celdillas de menor tamaño. Se utilizan anidándolos en la malla del modelo global (figura 4). Esto significa que en los RCM los valores iniciales de las variables simuladas y su evolución

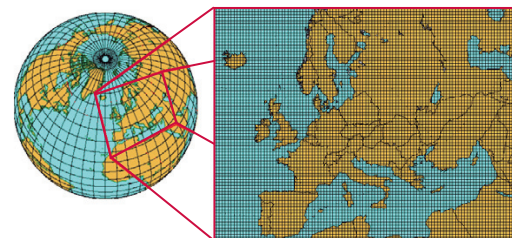


Fig.4. Ejemplo del dominio de aplicación de un RCM sobre Europa con una rejilla de 50 km. La técnica de anidamiento (“nesting”) consiste en proporcionar al RCM información de la evolución de las variables atmosféricas en los puntos del contorno del dominio. Dicha información se obtiene previamente de la simulación con un AOGCM que utiliza una rejilla con resolución más baja (celdillas con mayor tamaño).

temporal en los contornos del dominio se derivan de resultados obtenidos por un AOGCM. En definitiva, los RCM están forzados por los contornos con valores simulados por los AOGCM. Por tanto, el procedimiento que actualmente se sigue consiste en utilizar las salidas de un AOGCM para simular la respuesta de la circulación global a forzamientos de macroescala y los RCM para tener en cuenta los forzamientos a escala más pequeña que el tamaño de la celdilla en el AOGCM, de una forma acorde con principios físicos, y para resaltar la simulación de circulaciones atmosféricas y variables climáticas a escalas espaciales más finas (IPCC, 2007).

La técnica de los RCM, iniciada a principios de la última década del siglo XX (Dickinson et al., 1989), se utiliza actualmente para una gran variedad de aplicaciones, desde estudios paleoclimáticos a proyecciones de cambio climático antropogénico. Proporcionan resultados con mucha resolución espacial (entre 10 y 50 km) a partir de simulaciones de varias decenas de años, y son capaces de describir mecanismos climáticos de realimentación a escala regional. No obstante, se ha de tener presente que un RCM no puede corregir los errores generados en el AOGCM en que se anide, por lo que conviene elegir un AOGCM bien validado que represente de forma realista los rasgos de la circulación global que afectan a la región de interés, o bien considerar el anidamiento en un conjunto de diferentes AOGCMs para tener en cuenta la incertidumbre asociada a éstos. Asimismo es importante que el RCM incluya parametrizaciones físicas adecuadas para simular procesos convectivos, intercambios de energía entre el aire y el suelo o efectos radiativos de las nubes a escala regional. Finalmente, la elección del tamaño de las celdillas de la malla del RCM debe tomarse como un compromiso entre la escala de aquellos procesos atmosféricos que más influencia ejercen sobre el clima de la región de interés y la potencia de computación disponible. A pesar de que el dominio de aplicación de los RCM abarca una pequeña parte del planeta, el tiempo de computación es muy superior al que precisa un AOGCM para simular un mismo periodo. A lo largo de la última década, el incremento de potencial computacional ha permitido pasar de simulaciones de pocas décadas de duración, por ejemplo utilizando periodos discontinuos de 30 años (1961-1990 para el clima actual y 2071-2100 para el clima futuro, en el proyecto europeo PRUDENCE; Christensen et al., 2002) a simulaciones continuas de hasta 150 años (1951-2100, en el proyecto europeo ENSEMBLES; Van der Linden y Mitchell, 2009).

Para ilustrar la información que puede proporcionar un escenario regionalizado de cambio climático, se muestran en la figura 5 proyecciones de cambio de temperatura media del aire en superficie (°C) para cada estación del año. Los resultados proceden de uno de los RCM utilizados en el marco del proyecto europeo PRUDENCE, el modelo PROMES (Gallardo et al., 2001), desarrollado en la Universidad de Castilla-La Mancha. Se realizaron tres simulaciones anidadas en el modelo global HadAM3, abarcando periodos de 30 años. Una simulación correspondió a condiciones climáticas actuales (1960-1990), considerando los niveles observados de GEIs y aerosoles atmosféricos, y las otras dos simulaciones al último tercio del presente siglo (2070-2100), teniendo en cuenta los escenarios de emisiones SRES-A2 y

SRES-B2. Los resultados de las dos proyecciones climáticas (A2 y B2) se presentan en forma de diferencia entre los valores obtenidos para cada escenario de emisiones y los simulados para el periodo 1960-1990. El comportamiento general es que los incrementos térmicos más intensos corresponden al escenario SRES-A2, es decir el de mayores emisiones de GEIs. Las diferencias entre el escenario A2 y B2 se mantienen en torno a 1°C. Los meses de invierno son los que presentan menores incrementos de la temperatura diaria, con valores entre 2 y 4 °C para el escenario A2 y entre 1 y 3°C para el escenario B2. La distribución espacial de estos cambios en invierno es parecida en ambos escenarios, correspondiendo los menores incrementos a la zona noroeste de la Península y los mayores a la mitad suroriental de la Península. La estación en la que los incrementos de temperatura diaria son mayores es el verano, alcanzando valores superiores a 6°C en el escenario A2 y por encima de 5°C en el B2. Estos cambios tan elevados se localizan en el interior de la Península. También se percibe claramente un gradiente marcado entre la periferia y el interior, que podría relacionarse con el efecto regulador de las brisas costeras. Estas diferencias a escalas espaciales pequeñas se pueden representar en el RCM gracias a su elevada resolución espa-

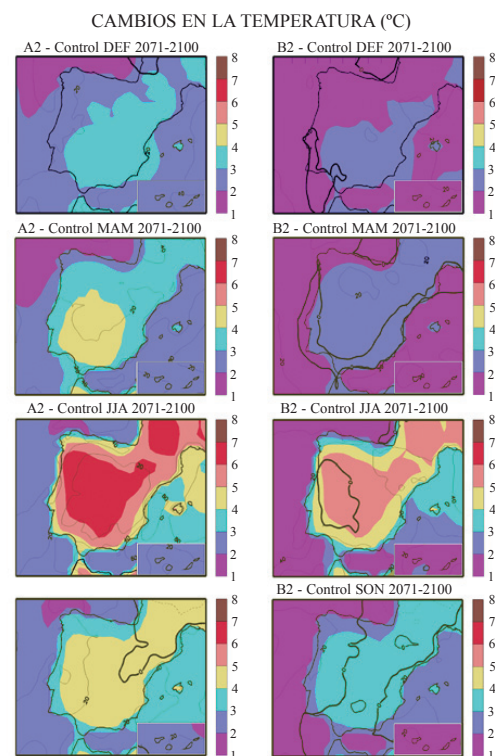


Fig.5. Proyecciones regionalizadas de cambio de temperatura media diaria del aire superficial (°C) realizadas con el RCM PROMES anidado en el AOGCM HadCM3. Se muestran los resultados promediados para cada estación del año (DEF invierno, MAM primavera, JJA verano y SON otoño) en la Península Ibérica, Baleares y Canarias (esquina inferior derecha en cada mapa), correspondientes a dos escenarios SRES de emisiones: A2 en la columna izquierda y B2 en la columna derecha. Los valores corresponden a diferencias entre la simulación del periodo 2071-2100 y la de control (1961-1990). Las isocías en las figuras muestran los porcentajes de cambio en la variabilidad interanual (positivos en trazo continuo, negativos en trazo discontinuo y cero en trazo grueso continuo).

cial. En la primavera y el otoño los incrementos proyectados alcanzan valores intermedios entre los del invierno y el verano. No obstante, los incrementos en otoño son superiores a los de los meses de primavera, en especial en el escenario B2. Aunque no se muestran gráficamente, los cambios proyectados para los promedios estacionales de temperaturas máximas y mínimas diarias presentan una distribución espacial semejante a los de las temperaturas medias. No obstante, los valores de los cambios son en torno a 1°C más elevados para las máximas que para las mínimas, siendo los de estas últimas similares a los de las temperaturas medias. Esto significa que la amplitud de la oscilación térmica diaria se incrementa respecto al clima presente. Este comportamiento se aprecia en todas las estaciones y en la mayor parte de las zonas del territorio, salvo en las áreas insulares o en las muy próximas a las costas.

Un aspecto importante en la técnica de regionalización dinámica es el empleo de conjuntos (*ensembles*) multi-modelo de simulaciones. Estos conjuntos multi-modelo consisten en realizar simulaciones de características comunes con distintos RCMs. Un tipo de conjuntos de simulaciones consiste en anidar distintos RCMs en un mismo GCM y para el mismo escenario de emisiones. Las diferencias de resultados entre los miembros del conjunto permitirán identificar la incertidumbre asociada a la formulación de los RCMs. Si los distintos RCMs proporcionan resultados similares en el cambio de variables climáticas, se le puede asignar mayor certidumbre a dicho cambio que si los modelos dan resultados distintos entre sí.

Uno de los aspectos climáticos donde la regionalización dinámica puede proporcionar información difícilmente obtenible mediante otros métodos es el relativo al cambio en los llamados extremos climáticos. Generalmente se entiende por extremos climáticos los valores de variables atmosféricas muy alejados de los promedios climatológicos, que se producen en situaciones meteorológicas excepcionales. El interés que presenta este otro tipo de análisis radica en que se considera que los impactos de las alteraciones del clima futuro debidos a cambios en los extremos climáticos serán probablemente más severos que los relacionados con el cambio del clima promedio. Aunque la frecuencia con que ocurren tales eventos es relativamente pequeña, su impacto social, económico y medioambiental suele ser muy notable. La simulación de extremos climáticos requiere alta resolución espacial, dado que se trata a menudo de fenómenos de escala relativamente pequeña, por lo que los RCMs los representarán en general mejor que los GCMs.

Una ilustración de la capacidad de los RCMs para generar información sobre fenómenos extremos es el estudio de Gaertner et al. (2007), en el que analizando la intensidad y estructura de ciclones simulados por un conjunto de RCMs, se detectó un riesgo de desarrollo de ciclones tropicales sobre el mar Mediterráneo en un escenario de cambio climático futuro. En la figura 6 se muestra un ciclón extremo simulado para clima futuro. En ella se representa la presión a nivel del mar, con un gran gradiente de presión asociado a vientos muy fuertes en superficie, y también una variable asociada a la temperatura de la columna de aire, que muestra en este caso como la temperatura sobre la depresión es más alta que en el

entorno. Esta estructura denominada de “núcleo cálido” es característica de ciclones tropicales, a diferencia de los ciclones extratropicales que tienen estructura de “núcleo frío”. Hay que indicar que esta posibilidad de ciclones tropicales aparece sólo en algunas simulaciones, lo que refleja una gran incertidumbre en este resultado. Esto resalta también la utilidad de los conjuntos de simulaciones para asignar mayor o menor certidumbre a los posibles cambios futuros.

En la actualidad se están desarrollando nuevos proyectos de investigación para generar escenarios de cambio climático mejorados. En el marco del proyecto ESCENA, en el que participan cuatro grupos de investigación españoles, se están generando escenarios de cambio climático de alta resolución espacial en un dominio que, además de la Península Ibérica, incluye zonas no cubiertas en anteriores proyectos como las Islas Canarias y el noroeste de África. Las proyecciones climáticas de este proyecto complementan y amplían los escenarios obtenidos en el proyecto europeo ENSEMBLES, mediante el uso de nuevos RCM y nuevas combinaciones AOGCM-RCM. Otro aspecto importante de este proyecto es el uso de una nueva base de datos observados para la evaluación de los modelos. La climatología con la que se comparen los resultados de una simulación realizada con un RCM debe estar discretizada en celdillas con un tamaño semejante a las del modelo, a fin de que la topografía del dominio sea similar. Recientemente se ha desarrollado en la Universidad de Cantabria la base de datos Spain02 (Herrera et al., 2010), que con una resolución de 0,2° en latitud y longitud se aproxima mucho a la resolución de los RCM (25 km). Spain02 se basa en una gran cantidad de estaciones de observación, lo que en particular permite resolver la compleja distribución de precipitación en España de forma mucho mejor que en bases de datos observados previas.

Otro proyecto actual es el proyecto internacional CORDEX (Giorgi et al., 2009), un programa patrocinado

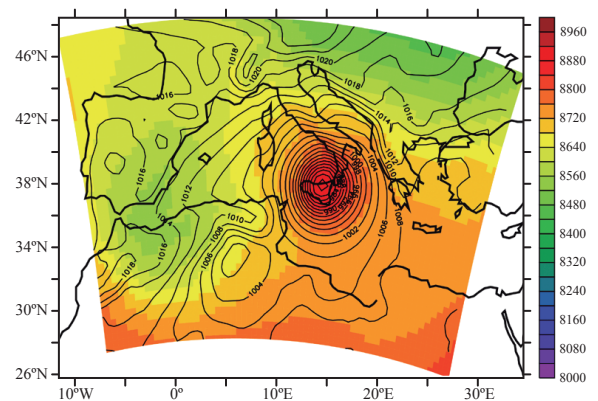


Fig.6. Ejemplo de extremos ciclónicos simulados con un RCM sobre el Mediterráneo en un escenario de cambio climático futuro. Las líneas continuas son isobaras de presión a nivel del mar (hPa) que muestran un centro de bajas presiones muy intenso sobre Sicilia. El sombreado indica el espesor de altura geopotencial (m) entre los niveles de presión de 300 y 900 hPa. Este espesor geopotencial es proporcional a la temperatura media de la columna de aire, de forma que el espesor geopotencial más alto (en rojo) situado sobre el centro de bajas presiones indica una estructura de “núcleo cálido”, característica de ciclones tropicales.

por el programa WCRP (del inglés World Climate Research Program) de la Organización Meteorológica Mundial para generar escenarios climáticos globalmente. Su principal objetivo es extender la aplicación de RCMs a regiones del mundo no consideradas anteriormente. Otros objetivos adicionales son aumentar la resolución en los escenarios para Europa, llegando hasta cerca de 10 km (0,11° de resolución espacial) y avanzar en el desarrollo y aplicación de modelos climáticos regionales con acoplamiento atmósfera-océano sobre la región mediterránea.

Este último aspecto está relacionado con un campo de actividad especialmente importante para el futuro de los escenarios regionalizados: el desarrollo de los modelos regionales del Sistema Tierra. Para ello, se están incorporando modelos regionales de océano acoplados a la atmósfera (Somot et al., 2008), modelos avanzados de vegetación y suelo con capacidad para simular la dinámica de la vegetación, así como modelos de química atmosférica y aerosoles. La realización de simulaciones acopladas entre estos componentes del sistema climático permitirá modelar con alta resolución espacial las importantes interacciones entre ellos, que pueden modular a escala local y regional la evolución futura del clima.

4. Regionalización estadística

Los métodos estadísticos de regionalización (en adelante SDMs, del inglés “Statistical Downscaling Method”) se basan en modelos estadísticos que relacionan de forma empírica las variables de circulación atmosférica a gran escala con las variables locales/regionales observadas en superficie, relacionadas con el fenómeno de estudio (típicamente, la temperatura y la precipitación). Estos modelos se ajustan/calibran utilizando datos de reanálisis (para caracterizar la circulación atmosférica, ver Brands 2011b) y registros históricos de observaciones para un período común de referencia (por ejemplo, un período histórico de 30 años, 1971-2000). Posteriormente, los modelos obtenidos son utilizados para proyectar localmente los escenarios globales futuros proporcionados por los AOGCMs (ver Wilby et al. 2004, para más detalles), lo que implica suponer la estacionariedad de los modelos, es decir, que las relaciones entre pequeña y gran escala establecidas en el período histórico no cambiarán en el futuro. Esta es una de las limitaciones más importantes de los distintos métodos de regionalización estadística para su uso en estudios de cambio climático.

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; por tanto, los resultados pueden utilizarse directamente en estudios de impacto, sin necesidad de ser calibrados. 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 AOGCMs y que dependan en menor medida de parametrizaciones; por otra parte, las variables de los AOGCMs también pueden pre-procesarse

(por ejemplo, eliminando sesgos en la media) antes de ser utilizadas en la regionalización estadística, lo que elimina una fuente de error debida a los errores sistemáticos de los modelos numéricos.

Por otra parte, las necesidades de cálculo de estas técnicas son mucho menores que las requeridas para ejecutar RCMs, si bien en algunos casos las técnicas estadísticas no lineales utilizadas consumen también muchos recursos de computación en costosos procesos de optimización (cuando se aplican a muchos puntos geográficos). Por tanto, con estas técnicas se puede realizar un gran número de realizaciones/simulaciones con diferentes métodos de downscaling y distintos AOGCMs, que cubran todas las posibles combinaciones y permitan analizar separadamente de forma adecuada las distintas fuentes de incertidumbre: escenarios, modelos globales, y técnicas de regionalización.

Las distintas técnicas de downscaling estadístico que se han propuesto en la literatura se suelen clasificar en tres grupos:

- *Funciones de transferencia*, basadas en modelos de regresión lineal o no lineal (e.g. redes neuronales) 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 (estadístico), 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, etc.).
- *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 a gran escala de los campos atmosféricos; normalmente estos métodos son no generativos, pues se basan en un procedimiento algorítmico para obtener la proyección. El método más popular de este grupo es el método de *análogos*, basado en usar días del pasado similares a los días futuros para obtener una 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.

A modo de ejemplo, y con el fin de poder comparar cualitativamente los resultados que proporcionan las técnicas estadísticas y dinámicas de regionalización, la figura 7 muestra las proyecciones de cambio de temperatura en superficie (°C) para cada estación del año obtenidas aplicando una técnica de regionalización basada en regresión, del primero de los grupos anteriores (utilizando presión a nivel del mar y temperatura a dos metros como predictores). A diferencia de en la figura 5, en este caso se muestra la temperatura máxima,

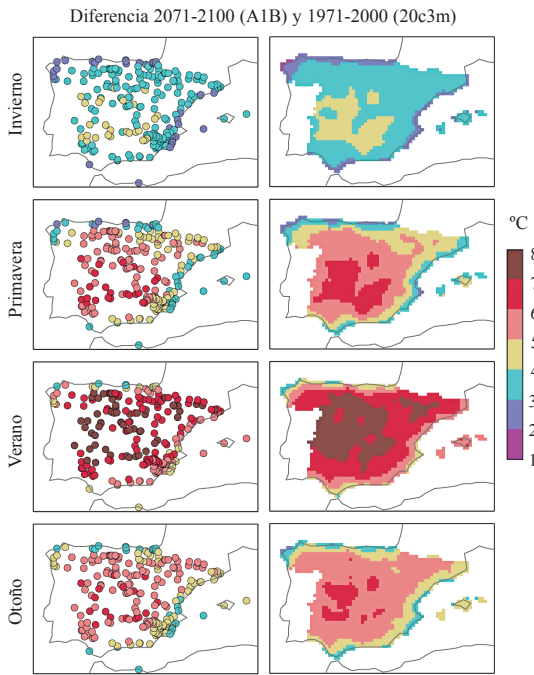


Fig. 7. Similar a la figura 5, pero obtenida con un SDM basado en regresión para la temperatura máxima diaria, considerando el escenario SRES A1B y el AOGCM HadGEM2. La columna de la izquierda muestra los resultados obtenidos utilizando un conjunto de estaciones de la AEMET, mientras que la columna de la derecha muestra los resultados para la rejilla regular Spain02 de observaciones interpoladas. Los valores corresponden a diferencias entre la simulación del periodo 2071-2100 y la de control (1971-2000).

y se utiliza el escenario de emisiones SRES-A1B del modelo HadGEM2 (que puede considerarse intermedio entre los dos escenarios B2 y A2 mostrados en la figura 5). Los resultados se presentan en forma de diferencia entre los valores obtenidos para el escenario de emisiones en el período 2071-2100 y los simulados para el período 1971-2000. Nótese que, a pesar de las diferencias observadas entre ambos experimentos, los resultados guardan una gran similitud en cuanto al patrón espacial y la estacionalidad de los resultados.

La figura 7 ilustra también el hecho de que las técnicas estadísticas pueden aplicarse tanto a registros históricos puntuales (como la red de estaciones de AEMET, eligiendo aquellas con datos de suficiente calidad, mostradas en la columna izquierda) como a datos históricos en forma de rejillas regulares (como los datos de Spain02 descritos con anterioridad, y mostrados en la columna derecha).

Las características anteriores han hecho 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 STARDEX y ENSEMBLES 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. Por tanto, es necesario considerar un conjunto amplio y robusto de métodos estadísticos para poder llegar a conclusiones que tengan en cuenta la incertidumbre introducida por el método de regionalización. Por ejemplo, en el marco del proyecto ENSEMBLES se desarrolló el portal de downscaling estadístico, que incorpora distintos métodos

estadísticos de regionalización y permite calibrarlos y utilizarlos libremente a partir de los AOGCMs de este proyecto, mostrados en la tabla 1 (se puede acceder libremente a esta herramienta en <http://www.meteo.unican.es/ensembles>).

Finalmente, a nivel nacional también se están llevando a cabo acciones coordinadas (en paralelo al proyecto ESCENA descrito en la sección anterior) para la generación de escenarios regionales con técnicas estadísticas (proyecto ESTCENA), en el que se están calibrando, validando y aplicando distintas técnicas estadísticas de regionalización para la generación de escenarios regionalizados en España para precipitación y temperatura, tanto en puntos locales (las estaciones de AEMET con datos de calidad), como en la rejilla Spain02 de, aproximadamente, 20km de resolución. Los resultados conjuntos de ambos proyectos permitirán llevar a cabo un estudio comparativo sistemático de las proyecciones obtenidas con ambas metodologías, para poder evaluar el efecto de las distintas hipótesis y limitaciones de las distintas técnicas.

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 (dinámicas y estadísticas) 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 los proyectos europeos PRUDENCE, ENSEMBLES, o sus equivalentes americanos y asiáticos), la comunidad de escenarios regionales ha trabajado de forma descoordinada sin lograr producir resultados homogéneos a escala global, teniendo menor visibilidad que la comunidad de modelos globales. Sin embargo, recientemente han comenzado acciones internacionales conducentes a resolver este problema, principalmente la acción CORDEX, que darán más visibilidad a este tema en los futuros informes sobre cambio climático (en particular los informes del IPCC).

Todas las técnicas de regionalización comparten la desventaja de que dependen de datos de entrada procedentes de AOGCMs y, por tanto, están al final de la cadena de incertidumbre, tras los escenarios de cambio climático y los modelos globales, lo que obliga a realizar un número mayor de simulaciones para muestrear adecuadamente estas incertidumbres.

Hasta la fecha, distintos estudios, han mostrado, utilizando medidas de validación en períodos históricos, que ninguna de estas metodologías (dinámica y estadística) tiene un comportamiento superior a la otra, sino que en cada caso (cada variable, región geográfica, etc.) unas técnicas son más apropiadas que otras (ver, por ejemplo, los resultados del proyecto STARDEX, <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/>). Por tanto, en cierta medida, ambas técnicas proporcionan resultados complementarios, por lo que la selección de escenarios regionalizados para la reali-

Tabla 2

Método	Ventajas	Inconvenientes
Regionalización dinámica	<ul style="list-style-type: none"> • Información con alta resolución espacial y temporal • Información basada en modelos físicos, con inclusión de realimentaciones entre componentes del sistema climático • Gran número de variables, físicamente consistentes entre sí • Capacidad para generar nuevos extremos climáticos 	<ul style="list-style-type: none"> • Gran coste computacional • Valores en celdillas representativos de promedios sobre el área de cada celdilla, no de valores puntuales
Regionalización estadística	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo coste computacional • Aplicación rápida a muchos escenarios y modelos globales distintos • Información con resolución espacial muy alta, en localidades puntuales o rejillas regulares. 	<ul style="list-style-type: none"> • Hipótesis de estacionariedad estadística: supone que las relaciones empíricas deducidas en clima actual son también válidas en clima futuro. • Necesita observaciones diarias de calidad (en puntos aislados o en una rejilla regular) para un período climático representativo. • Proporciona resultados sólo para las variables para las que se dispone de observaciones.

zación de estudios de impacto del cambio climático dependerá en parte de los requisitos de la aplicación concreta. En la tabla 2, se muestra un breve resumen de las ventajas e inconvenientes de estas metodologías (ver Winkler et al. 2011, para un estudio más detallado).

Referencias

- BRANDS, S., HERRERA, S., SAN-MARTÍN, D., GUTIÉRREZ, J.M. *Validation of the ENSEMBLES Global Climate Models over southwestern Europe using probability density functions: A downscaling perspective*. Climate Research, **48**, 145-161, 2011a, doi: 10.3354/cr00995
- BRANDS, S., GUTIÉRREZ, J.M., HERRERA, S., COFIÑO, A., *On the Use of Reanalysis Data for Downscaling*. Journal of Climate, in press, 2011b.
- CASTRO, M., FERNÁNDEZ, C., GAERTNER, M.A. AND GALLARDO, C., *Relevance of regional models for analyzing future climate change in the Iberian Peninsula*. Global Change and Mediterranean-type Ecosystems. Ecological Studies 117. Springer, 1-34, 1995.
- CRAMER, W. AND FIELD, C.B., *Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): introduction*. Global Change Biology, **5**, III-IV, 1999.
- CHRISTENSEN, J.H., CARTER, T. AND GIORGI, F., *PRUDENCE Employs New Methods to Assess European Climate Change*, EOS, Vol. **82**, p. 147, 2002.
- DICKINSON R.E., ERRICO, R.M., GIORGI, F., AND BATES, B.T., *A regional climate model for western United States*. Climatic Change, **15**, 383-422, 1989.
- GALLARDO, C., ARRIBAS, A., PREGO, J.A., GAERTNER, M.A. AND CASTRO, M., *Multi-year simulations with a high resolution regional climate model over the Iberian Peninsula: Current climate and 2xCO₂ scenario*. Quart. Jour. Roy. Meteor. Soc. **127**, 1659-1682, 2001.
- GIORGI, F., JONES, C., ASRAR, G., *Addressing climate information needs at the regional level: The CORDEX framework*. WMO Bulletin, **58**(3):175-183, 2009.
- HERRERA S., GUTIÉRREZ, J.M., ANCELL, R., PONS, M.R., FRÍAS, M.D. AND FERNÁNDEZ, J., *Development and analysis of a 50-year high-resolution daily gridded precipitation dataset over Spain (Spain02)*. International Journal of Climatology. DOI: 10.1002/joc.2256, 2010.
- Disponible libremente en <http://www.meteo.unican.es/spain02>
- IPCC, *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. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp, 2007.
- CHRISTENSEN, J.H., HEWITSON, B., BUSUIOC, A., CHEN, A., GAO, X., HELD, I., JONES, R., KOLLI, R.K., KWON, W.-T., LAPRISE, R., MAGAÑA RUEDA, V., MEARN, L., MENÉNDEZ, C.G., RÄISÄNEN, J., RINKE, A., SARR, A. AND WHETTON, P., *Regional Climate Projections*. 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. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- MOSS, R.H., EDMONDS, J.A., HIBBARD, K.A., MANNING, M.R., ROSE, S.K., VAN VUUREN, D.P., CARTER, T.R., EMORI, S., KAINUMA, M., KRAM, T., MEEHL, G.A., MITCHELL, J.F.B., NAKICENOVIC, N., RIAHI, K., SMITH, S.J., STOUFFER, R.J., THOMSON, A.M., WEYANT, J.P. AND WILBANKS, T.J., *The next generation of scenarios for climate change research and assessment*. Nature, **463**, 747-756. DOI:10.1038/nature08823, 2010
- NAKICENOVIC, N., ALCAMO, J., DAVIS, G., DE VRIES, B., FENHANN, J., GAFFIN, S., GREGORY, K., GRÜBLER, A., JUNG, T.Y., KRAM, T., LA ROVERE, E.L., MICHAELIS, L., MORI, S., MORITA, T., PEPPER, W., PITCHER, H., PRICE, L., RIAHI, K., ROEHRL, A., ROGNER, H.-H., SANKOVSKI, A., SCHLESINGER, M., SHUKLA, P., SMITH, S., SWART, R., VAN ROOIJEN, S., VICTOR, N. AND DADI, Z., *IPCC Special Report on Emissions Scenarios*, Cambridge University Press, 599 pp, 2000.
- PEIXOTO, J.P. AND OORT, A.H. *Physics of Climate*. American Institute of Physics. New York, 1992.
- RUMMUKAINEN, M., *State-of-the-art with regional climate models*. WIREs Clim. Change **1**, 82-96. DOI: 10.1002/wcc.008, 2010.
- SÁNCHEZ, E., GALLARDO, C., GAERTNER, M.A., ARRIBAS, A. AND CASTRO, M., *Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: first approach*. Global and Planetary Change (en prensa), 2004.
- SOMOT, S., SEVAULT, F., DÉQUÉ, M., CRÉPON, M., *21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled atmosphere-ocean regional climate model*, Global and Planetary Change, **63**, 112-126. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2007.10.003, 2008.
- STOTT, P.A., TETT, S.F.B., JONES, G.S., ALLEN, M.R., INGRAM, W.J. AND MITCHELL, J.F.B., *Attribution of Twentieth Century Temperature Change to Natural and Anthropogenic Causes*. Clim. Dynamics, Vol. **17**, 1-22, 2001.
- VAN DER LINDEN, P. AND MITCHELL, J.F.B. (eds.) *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160pp., 2009 <http://www.ensembles-eu.org/>
- WILBY, R.L., CHARLES, S.P., ZORITA, E., TIMBAL, B., WHETTON, P., MEARN, L.O., *Guidelines for Use of Climate Scenarios developed from Statistical Downscaling Methods*. Supporting material of the IPCC (Task Group on Data and Scenario Support for Impacts and Climate Analysis, TGICA), 2004.
- WINKLER, J.A., GUENTCHEV, G.S., LISZEWSKA, M., PERDINAN AND TAN, P.N., *Climate Scenario Development and Applications for Local/Regional Climate Change Impact Assessments: An Overview for the Non-Climate Scientist. Part II: Considerations When Using Climate Change Scenarios*, Geography Compass **5/6**, 301-328, 2011, 10.1111/j.1749-8198.2011.00426.x

Miguel Ángel Gaertner

Facultad de Ciencias Ambientales y Bioquímica.
Universidad de Castilla-La Mancha. Toledo

José Manuel Gutiérrez

Instituto de Física de Cantabria (IFCA).
CSIC-Universidad de Cantabria. Santander

Manuel Castro

Instituto de Ciencias Ambientales.
Universidad de Castilla-La Mancha. Toledo