

Resumen:

Andalucía, por su situación geográfica y sus características socioeconómicas, es una región muy vulnerable al cambio climático, como así se viene poniendo de manifiesto en los más recientes análisis e investigaciones. El objetivo de nuestro trabajo es el conocimiento de los posibles impactos así como de la adaptación al cambio climático en Andalucía, para lo cual es imprescindible la generación de escenarios futuros del clima en esta región.

Los Modelos de Circulación General y los Modelos Acoplados para crear escenarios de cambio climático son la categoría que en la actualidad está experimentando mayor desarrollo, sin embargo su resolución es tal que no permiten ser utilizados en estudios localizados de impactos.

Para la “regionalización” de escenarios se han desarrollado distintas técnicas, la mayoría de ellas son de alta complejidad y sólo abordables por equipos de supercomputación. La herramienta en la que se basa el presente trabajo se denomina MAGICC / SCENGEN y trata de paliar este hecho, puesto que se puede implementar en un ordenador de tamaño medio con el sistema operativo Windows y posibilita la construcción regional de escenarios de cambio climático. MAGICC /SCENGEN permite establecer conclusiones robustas sobre el análisis tendencial, por realizarse con una gran cantidad de datos correspondientes a un importante abanico de modelos, si bien sería deseable aún más detalle en cuanto a resolución espacial.

En Andalucía se ha obtenido un calentamiento de entre 1 °C y 3 °C para mediados de siglo, algo superior en Andalucía Oriental que en la parte más Occidental. Las predicciones para la vertiente mediterránea andaluza dan una disminución de la precipitación que oscila entre el -5% y el -15%. En Andalucía Occidental existe mayor incertidumbre. Los cambios para el año 2050 tienden a ser más significativos en los escenarios de emisiones que describen un mundo pro-individualismo y con un rápido crecimiento económico (A1).

1. Introducción

Según los distintos escenarios y previsiones de cambio climático desarrollados recientemente para Europa, los impactos más severos se prevén que ocurran en el suroeste europeo. Andalucía, por su situación geográfica y sus características socioeconómicas, es una región muy vulnerable al cambio climático.

Mientras que las acciones de mitigación requieren una respuesta conjunta y coordinada a nivel internacional, se reconoce que las acciones e iniciativas de adaptación deben ser definidas e implementadas a nivel nacional o subregional, pues los impactos y las vulnerabilidades son específicos de cada lugar.

La adaptación es una estrategia necesaria a todas las escalas para complementar los esfuerzos de mitigación de cambio climático. Si ambos elementos se utilizan de forma conjunta, pueden ayudar a alcanzar los objetivos del desarrollo sostenible.

En este contexto, y como continuación a los trabajos desarrollados desde la aprobación de la Estrategia Andaluza ante el Cambio Climático en 2002, se plantea en la actualidad establecer las labores de desarrollo de una Estrategia Andaluza de Adaptación ante el mismo, que efectúe por un lado el estudio de los impactos del cambio climático en

nuestra región y por otro lado el establecimiento de políticas, medidas y actuaciones concretas dirigidas a lograr la adaptación efectiva a estos impactos.

Para desarrollar los estudios sobre los impactos del cambio climático es imprescindible crear representaciones de los patrones espaciales y temporales del clima futuro. Estas representaciones se denominan escenarios de cambio climático y fueron definidos por Viner y Hulme (1992) como: “Una representación del clima futuro que es internamente consistente, que ha sido construida empleando métodos basados en principios científicos y que puede ser utilizada para comprender las respuestas de los sistemas ambientales y sociales ante el futuro cambio climático”.

La generación de escenarios de cambio climático en Andalucía es pues un elemento indispensable para la puesta en funcionamiento del Plan de Adaptación al Cambio Climático en la misma. Se desea disponer de los datos más fiables de los cambios que se esperan en el clima durante el siglo XXI, para así analizar proyecciones de los impactos del cambio climático en los diferentes ecosistemas y sectores socioeconómicos.

El objetivo del presente trabajo es doble: en primer lugar se pretende realizar un análisis de los modelos de cambio climático creados para su utilización en proyectos previos y bases de datos ya existentes, y en segundo lugar se persigue estimar mediante un ejemplo la tendencia de la temperatura y la precipitación para el año 2050 asociada al cambio climático inducido por los gases de efecto invernadero y aerosoles, empleando aquellas herramientas que presenten mayor utilidad para tal fin.

2. Escenarios climáticos futuros

Se pueden distinguir tres tipos de escenarios climáticos futuros globales: (1) escenarios incrementales, (2) escenarios analógicos y (3) escenarios basados en modelos de circulación general (GCM) y acoplados atmósfera-océano (AOGCM).

La última categoría de escenarios mencionada, los modelos de circulación general y los modelos acoplados, es la que en la actualidad está experimentando un mayor desarrollo. En estos modelos a partir de las leyes físicas y químicas fundamentales que gobiernan los procesos atmosféricos y oceánicos y tras imponer unas condiciones iniciales y de contorno se trata de predecir la evolución futura del clima. Debido a la complejidad y el gran número de parámetros y variables involucradas en las predicciones climáticas es necesario hacer un estudio sistemático de la incertidumbre y estudiar como esta se propaga y se manifiesta en su resultado final.

Sin embargo, aunque los distintos GCM y AOGCM producen resultados relativamente satisfactorios en las escalas hemisféricas y continentales, su resolución (de cientos de km) es tal que no permiten ser utilizados en los estudios de impactos, ya que precisan de una mayor definición espacial (de decenas de km o menos), especialmente en Andalucía, cuyos climas son el resultado de la circulación global de la atmósfera, y de las interacciones de este flujo a macroescala y con la orografía, de los contrastes mar-tierra y de otros efectos de carácter más local.

Para resolver este problema, se han desarrollado diversas técnicas cuyo objetivo es aumentar la resolución de los modelos globales, una de las más empleadas consiste en una “regionalización” que proporcione una descripción de las variables climáticas adecuada para trabajar a escala regional o subregional. Los modelos regionales de clima

son considerados como la técnica más prometedora para realizar proyecciones realistas de cambio climático a escala regional (IPCC, 2001).

El desarrollo (mediante técnicas de “regionalización”) de modelos (o submodelos) adaptados a las características particulares de una zona (en este caso Andalucía), son de alta complejidad y solo abordables con equipos de supercomputación y personal muy especializado. En España, esta alta capacidad está reservada al Instituto Nacional de Meteorología y a determinadas Universidades y Centros de Computación que desarrollan su labor de investigación en este campo.

Por último, se han desarrollado diversas herramientas de “regionalización” no excesivamente complejas de aplicar y con no muy elevados requerimientos computacionales, tales como SDMS (Statistical DownScaling Model), MAGICC / ESCENGEN (Model for the Assessment of Greenhouse-gas Induced Climate Change / SCENARIO Generador) o PRECIS (Providing Regional Climates for Impact Studies).

2.2. Escenarios climáticos en España

En el año 2006 se publica el programa del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, entre cuyos objetivos se encuentra en primer lugar el desarrollo de escenarios climáticos regionales para la geografía española. Este primer proyecto se encarga al Instituto Nacional de Meteorología (INM), el cuál para atender las necesidades de los diferentes sectores lo más rápidamente posible, articula el proyecto en dos fases.

En una primera fase, cuya duración se calcula en aproximadamente un año, se utilizarán fundamentalmente las metodologías ya desarrolladas y las bases de datos actualmente existentes, se utilizarán sobre todo los resultados de los proyectos del 5º Programa Marco de la Comisión Europea relacionados con la modelización climática, regionalización dinámica y estadística y estimación de extremos.

En una segunda fase se procederá a desarrollar nuevos métodos, fundamentalmente relacionados con la regionalización dinámica. Se formará el germen de un grupo de trabajo en modelización climática que permita a medio plazo (los siguientes tres o cuatro años) desarrollar metodologías específicamente adaptadas a las características del área de España. En esta fase se incorporará también a los grupos universitarios nacionales que trabajan en este campo (MIMAM, 2006).

Las fuentes de datos que el INM utilizará en la primera fase del proyecto son:

- Centro de Distribución de Datos del IPCC: es la fuente de información primaria de los modelos globales que contribuyen al IPCC. La exploración de esta base de datos permite hacerse una primera idea de las incertidumbres asociadas a los modelos globales y la información contenida en esta base de datos se refiere principalmente a valores medios mensuales.
- MAGICC / SCENGEN: La Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia (U.K.) y el National Center for Atmospheric Research (USA) han creado este generador de escenarios climáticos para asistir en la construcción regional y nacional de escenarios de cambio climático. MAGICC / SCENGEN es un modelo acoplado de modelos ciclo de gases/climáticos (MAGICC) que fuerza un generador espacial de escenarios de cambio climático (SCENGEN). MAGICC

ha sido el modelo básico utilizado por el IPCC para suministrar proyecciones futuras de temperatura media global y elevación del nivel del mar.

- Base de datos PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining EuropeaN Climate change risk and Effects): El proyecto PRUDENCE ha creado una base de datos muy valiosa que todavía está por explotar y analizar en detalle sobre la Península Ibérica. Estos datos permitirán proporcionar proyecciones a más resolución (en el entorno de los 50 km) y explorar la incertidumbre asociada a los diferentes modelos regionales. La base de datos PRUDENCE contiene dato diario de las proyecciones climáticas para el periodo 2070-2100.
- Salidas de modelos globales: Para la aplicación de las técnicas de regionalización estadística, en el INM se utilizarán inicialmente salidas de varios modelos globales disponibles con dato diario, datos del reanálisis ERA-40 y los datos diarios observados de precipitación y temperatura de la base de datos del INM.

El INM pretende preparar un informe detallado en el que se describan las conclusiones de las proyecciones sobre la Península Ibérica e islas obtenidas con los diferentes escenarios de emisión en esta primera fase, el citado informe será la síntesis del conjunto de los resultados obtenidos en cada una de las fuentes de datos anteriormente mencionadas.

Tras considerar todas estas fuentes de datos (y a la espera del mencionado informe) se ha seleccionado la herramienta MAGICC / SCENGEN como la más idónea para realizar las primeras estimaciones de las tendencias de la precipitación y la temperatura para Andalucía, por ser una herramienta de libre disposición y por el tiempo de cálculo necesario, dada nuestra capacidad computacional. Además la versión 4.1 de MAGICC / SCENGEN está actualizada al Tercer Informe de Evaluación del IPCC y el módulo SCENGEN permite la validación de los AOGCM contra datos climáticos observados y promediado sobre áreas seleccionadas.

3. Modelos de Circulación General aplicados a la evaluación del cambio climático

El modelo climático usado por MAGICC / SCENGEN consiste en dos módulos independientes. Por una parte el programa MAGICC es un modelo que, mediante la prescripción de las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles calcula el aumento de la temperatura global y del nivel del mar. A partir de los resultados de MAGICC, el programa SCENGEN, mediante una base de datos que contiene los resultados de numerosos modelos de circulación general más complejos, calcula los impactos locales del calentamiento promedio del planeta sobre variables como temperatura y precipitación.

3.1. El modelo MAGICC

MAGICC se basa en los modelos descritos por Wigley y Raper (1987). El modelo considera separadamente los hemisferios norte y sur y dentro de cada uno de ellos se considera una capa atmosférica que recibe materia y energía de la superficie continental y de la capa de mezcla oceánica. El océano profundo contiene un sistema de circulación y difusión que regula la circulación termohalina, fundamental en los intercambios energéticos a escala planetaria. Aunque el modelo es conceptualmente simple, es capaz

de reproducir correctamente los resultados de modelos mucho más complejos (Kattenberg et al., 1996 y Harvey et al., 1997).

El modelo necesita como entrada unas concentraciones iniciales de los principales gases de efecto invernadero así como de su evolución futura. MAGICC utiliza esta información para calcular el forzamiento radiativo correspondiente y lo traduce en el aumento de la temperatura global. Además, es necesario suministrar unas condiciones de contorno sobre las emisiones de CO₂, el forzamiento de los aerosoles y la sensibilidad del sistema climático.

3.1.1. El ciclo del carbono

Aunque son varios los gases de efecto invernadero, el más importante desde el punto de vista de los cambios introducidos por el ser humano es sin duda el CO₂. MAGICC emplea el modelo para el ciclo del carbono descrito en Wigley (1993).

Al igual que todos los ciclos para el CO₂, las fuentes son la quema de combustibles fósiles “E_{fos}” y la emisión de CO₂ neta desde el suelo (es decir la diferencia entre todas las emisiones en la biosfera y lo retirado por la respiración vegetal) “D_n”.

El principal sumidero de CO₂ está en los océanos “F_{oc}”. Por último el modelo considera la retirada “F_{fert}” de CO₂ por el “efecto de fertilización”. La variación neta ΔM de CO₂ en la atmósfera se expresa como:

$$\Delta M = E_{\text{fos}} + D_n - F_{\text{oc}} - F_{\text{fert}} \quad (1)$$

El ciclo anterior debe inicializarse con los valores actuales antes de utilizarlo para estimar las concentraciones futuras (Enting et al. 1994). Se han empleado los valores correspondientes a la década de 1980, en la que se dispone de estimaciones razonables para ΔM, E_{fos} y F_{oc} (Schimel et al. 1996). Una de las principales fuentes de incertidumbre para el modelo radica en que los valores para D_n y F_{fert} son muy inciertos. La mejor estimación del IPCC para D_n es 1.1 ± 0.7 GtC/año. La estimación de F_{fert} se realiza a la inversa, despejando su valor una vez conocidos los demás factores de la ecuación de balance para ΔM.

3.1.2. Efecto de los aerosoles

Los aerosoles tienen una influencia nada despreciable en el balance radiativo del planeta. Hay muchos tipos diferentes de aerosoles que se producen tanto artificialmente como de manera natural. Entre los de origen antropogénico destacan los sulfatos, producidos por la oxidación del SO₂ y generados principalmente en la combustión del carbón.

Para simular el forzamiento radiativo directo del aerosol sulfato, MAGICC utiliza un método desarrollado por Wigley (1989), que asume que la cantidad de aerosol SO₄ es directamente proporcional a las emisiones de SO₂ (su principal precursor). Este modelo simple es una buena aproximación, ya que los tiempos de vida en la atmósfera del SO₂ y SO₄ son cortos, y en escalas de tiempo de años, sus evoluciones son prácticamente paralelas. Tomando como referencia el forzamiento radiativo debido al aerosol sulfato en 1990, MAGICC calcula el forzamiento para cualquier otra concentración mediante una sencilla regla de proporcionalidad. Cuantificar los efectos indirectos del aerosol sulfato es

mucho más complejo y MAGICC utiliza formulaciones empíricas ajustadas a datos observados.

Es fundamental tener en cuenta que debido a las propiedades de los aerosoles y a los complejos procesos en los que se ven involucrados en la formación de nubes, la incertidumbre ligada a ellos en predicciones a largo plazo con grandes emisiones son bastante considerables.

3.1.3. La sensibilidad del sistema climático (ΔT_{2x})

En un sentido general la sensibilidad climática nos da la relación entre el cambio en los forzamientos sobre el sistema climático y la magnitud de la respuesta térmica. La sensibilidad del clima a las variaciones en los forzamientos externos depende de muchos factores, a menudo formando bucles de realimentación. Entre los procesos más importantes se encuentran: cantidad de vapor de agua, nubes, área de la capa de hielo y nieve, vegetación, el ciclo del carbono.

En los modelos de cambio global (y MAGICC no es una excepción), por sensibilidad climática se entiende el incremento de la temperatura global que se produce como respuesta a la duplicación del nivel de CO₂ en la atmósfera. Esta definición se basa en que la concentración de CO₂ es el factor principal en el calentamiento del planeta.

Es importante destacar que la principal fuente de incertidumbre en los estudios de calentamiento global radica en este parámetro, razón por la cual en todos los modelos aparece como un parámetro ajustable por el usuario. Es difícil limitar en la actualidad la sensibilidad climática basándonos en las tendencias observadas de la temperatura (Boer et al., 2000).

El IPCC estima que el valor de la sensibilidad climática se encuentra entre 1.5 °C y 4.5 °C con un nivel de confianza del 90%. Este intervalo no ha variado desde el Primer Informe de Evaluación del IPCC (1990). La mejor estimación de este parámetro parece ser 2.6 °C (IPCC, 2001).

3.2. El modelo de cambio climático regional SCENGEN

El modelo descrito en la sección anterior, produce, para un escenario de emisiones determinado, el incremento de temperatura global previsible. Esta visión global, aunque fundamental, no es capaz de informar sobre los efectos concretos que se pueden esperar a una escala regional.

Para ayudar a valorar los efectos regionales del cambio climático MAGICC incorpora un módulo denominado SCENGEN (SCENARIO GENerator) que estima las variaciones locales de la temperatura y de la precipitación a partir del valor generado por MAGICC para el aumento global de temperatura. El método utilizado por SCENGEN para obtener la regionalización se denomina *método de los patrones de escala*, y su fundamento es sencillo; se considera una malla en latitud y longitud sobre el planeta y mediante un modelo de circulación general complejo, se obtiene para cada punto de malla el cambio en temperatura o precipitación por cada °C de aumento de la temperatura global. Así, multiplicando en cada punto dicho valor por el aumento global generado por MAGICC se obtienen los patrones de variabilidad en las diferentes regiones. Este método fue inicialmente desarrollado por Wigley a finales de la década de 1980 y se describe con

detalle en Santer et al (1990). SCENGEN contiene las proyecciones regionales de 17 modelos de circulación general, todos ellos entre otros, han sido utilizados en el Tercer Informe de Evaluación del IPCC (2001).

3.2.1. Modelos de Circulación General empleados

De los posibles modelos de circulación con los que permite trabajar SCENGEN se han elegido los siguientes porque son los que mejores resultados ofrecían al contrastarlos con los datos observados en el periodo de referencia (1961-1990): HadCM2, ECHAM4, CGCM1 y ARPEGE/OPA. Seguidamente se especifican brevemente cada uno de ellos.

Modelo HadCM2

Este experimento fue realizado en el Hadley Center durante 1995 y 1996. Se utilizó un modelo de alta resolución para la circulación global atmosférica que consideraba 19 capas acoplado con un modelo oceánico de 20 capas. La resolución horizontal era de 2.5° de latitud por 3.75° de longitud. Se consideró una sensibilidad climática ($2xCO_2$) de $2.5^{\circ}C$ y una sensibilidad para la precipitación de 1.6% por $^{\circ}C$. Una descripción más detallada del modelo puede encontrarse en Johns et al. (1997).

Modelo ECHAM 4

El modelo climático ECHAM fue desarrollado por el European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) en Hamburgo. Este experimento fue realizado con un modelo de circulación atmosférica de 19 capas con una resolución espacial de 2.8° de latitud por 2.8° de longitud acoplado a un modelo de circulación oceánica. Se estimó una sensibilidad climática del $2.6^{\circ}C$. Una descripción más detallada del modelo puede encontrarse en Roeckner et al. (1996).

Modelo CGCM1

Este fue el primer modelo climático desarrollado por el Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma) que incluye una componente oceánica completa en 3D. Este experimento fue realizado en el año 1999, acoplando la segunda generación de modelos atmosféricos de circulación general (10 capas verticales) con un modelo modular oceánico el cual contiene 29 capas verticales (las cuatro capas superiores están igualmente espaciadas a 50m). La resolución horizontal del modelo atmosférico es de 3.8° de latitud por 3.8° de longitud. El modelo oceánico acoplado tiene el doble de resolución, 1.875° de latitud por 1.875° de longitud. La sensibilidad climática utilizada por el CCCma en este modelo es de $3.5^{\circ}C$, la cuál está en la mitad superior del rango estimado por el IPCC ($1.5^{\circ}C$ a $4.5^{\circ}C$). Una descripción más detallada del modelo puede encontrarse en Boer et al. (2000) y en Flato et al. (2000).

Modelo ARPEGE/OPA2

Este modelo climático ha sido desarrollado por el Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS) acoplando el modelo de circulación general atmosférica de 19 capas ARPEGE-climat con el modelo oceánico OPA (31 capas). La resolución horizontal es de 3.9° de latitud por 3.9° de longitud para el modelo atmosférico y 2.0° de latitud por 2.0° de longitud para el modelo oceánico. Una descripción más detallada del modelo puede encontrarse en Barthelet et al. (1998a,b).

En la herramienta MAGICC/SCENGEN se emplean códigos para cada uno de los modelos (los cuáles se utilizarán de aquí en adelante). Así, el código para HadCM2 es Had295, ECH498 es el código de ECHAM4, el modelo ARPEGE/OPA2 se nombra como CERF98 y al modelo CGCM1 lo denomina CCC199.

4. Escenarios de emisiones

Se ha mencionado en varias ocasiones la incertidumbre que hay ligada a la predicción climática. Esta incertidumbre puede tener dos orígenes diferentes: conocimiento incompleto e información impredecible. El conocimiento incompleto afecta sobre todo al diseño del modelo climático y es de esperar que los avances científicos minimicen esta fuente de incertidumbre. La información impredecible, sin embargo, es inherente a la predicción climática, ya que ésta es la que se refiere a la evolución de la sociedad.

Los escenarios SRES fueron publicados en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones del IPCC (Nakicenovic et al., 2000) y se han construido para explorar la evolución futura de las emisiones de sustancias que pueden ser radiativamente activas (ej. gases de efecto invernadero, aerosoles).

Se han desarrollado 4 líneas tendenciales, llamadas A1, A2, B1 y B2, donde se describen las relaciones entre las fuerzas que van a gobernar las emisiones de GEI y aerosoles a lo largo del siglo XXI. Cada línea narrativa representa diferentes condiciones demográficas, de desarrollo socioeconómico y de cambios tecnológicos que divergen progresivamente de forma irreversible. En la tabla 1 se muestra un resumen de estas cuatro líneas narrativas.

La línea evolutiva y familia de escenarios A1 describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones y la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales.

La familia de escenarios A1, se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía. Los tres grupos A1 se diferencian en su orientación tecnológica: utilización intensiva de combustibles de origen fósil (A1FI), utilización de fuentes de energía no de origen fósil (A1T), o utilización equilibrada de todo tipo de fuentes (A1B) (entendiéndose por “equilibrada” la situación en la que no se dependerá excesivamente de un tipo de fuente de energía, en el supuesto de que todas las fuentes de suministro de energía y todas las tecnologías de uso final experimenten mejoras similares).

La línea evolutiva y familia de escenarios A2 describe un mundo muy heterogéneo. Sus características más distintivas son la autosuficiencia y la conservación de las identidades locales. El índice de natalidad en el conjunto de las regiones converge muy lentamente, con lo que se obtiene una población en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

“MUNDO A1” Dimensión pro-individualismo, fuertes valores económicos	“MUNDO B1” Dimensión colectiva, fuertes valores ambientales
“MUNDO A2” Dimensión globalista	“MUNDO B2” Dimensión regional y local

Tabla 1. Familias de escenarios de emisión.

La línea evolutiva y familia de escenarios B1 describe un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios en las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos.

La línea evolutiva y familia de escenarios B2 describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y ambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas A1 y B1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del medio ambiente y a la igualdad social, se centra principalmente en los niveles local y regional.

En la figura 1 se muestran estas cuatro familias, las cuales se desarrollan en 40 escenarios de emisiones diferentes, cada uno con su trayectoria de emisiones a lo largo del siglo.

Cada familia tiene un número variado de escenarios. Algunos de estos son “armonizados”, es decir, comparten algunos supuestos en cuanto a las fuerzas que los impulsan. En cada familia hay también un escenario marcador ilustrativo (líneas de trazo continuo), que es armonizado, y es el que refleja de mejor forma la historia narrativa respectiva. Puesto que la familia de escenarios A1 se subdivide en tres grupos dependiendo de la trayectoria que vaya a tomar el perfil de uso de combustibles fósiles, es en el grupo que representa el perfil balanceado (A1B) donde se encuentra el escenario marcador de esta familia. Además, el IPCC consideró conveniente tener un escenario ilustrativo de los otros dos grupos de la familia A1 (líneas de trazos). Entonces en total hay cuatro escenarios marcadores ilustrativos y dos ilustrativos.

MAGICC incluye estos 40 escenarios e incluso la posibilidad de editar uno propio. Todos los escenarios son igualmente válidos y no tienen asignadas probabilidades de hacerse realidad.

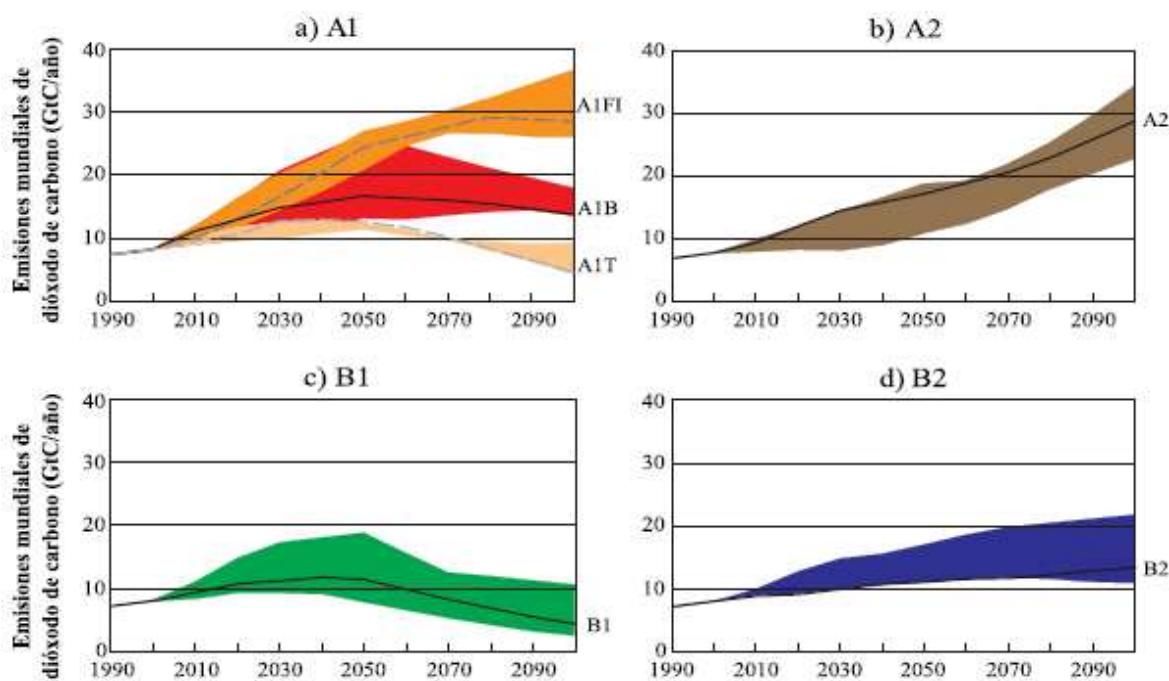


Figura 1. Emisiones anuales totales de CO₂ provenientes de todas las fuentes entre 1990 y 2100 (en GtC/año) para los seis grupos de escenarios a) A1FI (incluye los escenarios de alto nivel de carbón y de alto nivel de petróleo y gas), A1T (combustibles predominantemente de origen no fósil) y el A1B (equilibrado); b) A2; c) B1 y d) B2. Cada franja de emisiones coloreada indica el repertorio de escenarios armonizados y no armonizados dentro de cada grupo. Se ofrece un escenario ilustrativo para cada uno de los seis grupos de escenarios, incluidos los cuatro de referencia (A1, A2, B1 y B2, en líneas de trazo continuo), y dos escenarios ilustrativos para A1FI y A1T (líneas de trazos).

En la figura 1 se puede observar que la evolución de las emisiones de CO₂ hasta el año 2010 es muy similar para las cuatro familias de escenarios de emisiones. En Andalucía la evolución de GEI sigue esta misma tendencia, pasando de 36.714.940 (tCO₂ equivalente) en 1990 a 57.615.726 (tCO₂ equivalente) en 2003, la evolución observada respecto al incremento de emisiones en Andalucía en el periodo 1990-2003 es del 57% (Inventario Nacional de Emisiones y de sus datos CORINAIR para el periodo 1990-2003 para Andalucía). En la región no es probable esperar reducciones demasiado grandes en la tasa de crecimiento de la población ni un crecimiento muy acelerado. No hay razón para desviarse de los marcadores ilustrativos, es decir, escoger otros escenarios.

No obstante, en la actualidad se van a desarrollar nuevos escenarios de emisiones debido a las necesidades de los múltiples usuarios de los mismos: modelistas del clima, analistas de impactos, vulnerabilidad y adaptación, responsables políticos nacionales e internacionales, etc.

Son muchas las peticiones de los diferentes usuarios que trabajan dentro de la comunidad del cambio climático: más relevancia de las políticas, distinción entre mitigación y adaptación, escenarios a más corto y más largo plazo, combinación entre la desagregación regional y sectorial, etc. En el encuentro del grupo encargado de los nuevos escenarios de emisiones celebrada en Marzo de 2006 se dice que hay grandes

dificultades en general y se contemplan varias posibilidades en las cuales el IPCC juega papeles distintos (IPCC, 2006).

4. Metodología de trabajo

Con objeto de estudiar la respuesta de la temperatura y la precipitación a diferentes escenarios de cambio climático se investiga la respuesta del modelo bajo diferentes condiciones de contorno, concretamente se describen las variaciones en la temperatura y la precipitación al cambiar el escenario de emisión de gases de efecto invernadero y aerosoles y el modelo de circulación general en que se basa SCENGEN.

Como se indicó anteriormente, se han seleccionado los seis escenarios de emisiones ilustrativos y se han elegido los siguientes modelos por ser los que mejores resultados ofrecían al contrastarlos con los datos del periodo de referencia: HAD295, ECH498, CERF98, CCC199.

La comparación de las predicciones utilizando diferentes modelos de circulación general manteniendo el resto de condiciones en el mismo estado, posibilita un análisis de los márgenes de error de estas predicciones.

En el presente trabajo se ha tomado 2.6 °C para la sensibilidad climática por ser el valor más probable que estima el IPCC, que además es el valor que posee MAGICC por defecto, pero es necesario recalcar la incertidumbre que existe respecto a este parámetro y que si se experimentara con esta variable, probablemente se obtendrían los escenarios más heterogéneos.

En primer lugar, se han generado escenarios de precipitación y temperatura para el año 2050 a partir de estos cuatro modelos de circulación general, introduciendo en cada caso uno de los seis escenarios de emisiones ilustrativo.

Seguidamente, se ha investigado la variación de estas variables para cada una de las estaciones del año. En este caso se ha optado por los escenarios de emisiones más extremos así como por una combinación de los cuatro modelos anteriores obteniendo promedios, lo cual reduce incertidumbres al compensar debilidades de cada modelo.

5. Resultados

Para analizar y comparar los resultados, se ha dividido el área de estudio (Andalucía) en dos zonas, cada una de las cuales está comprendida en una cuadrícula de salida de los resultados de los distintos modelos (figura 2).

Zona de Andalucía Occidental (zona 1): se encuentra en la cuadrícula 1, la cual comprende la vertiente atlántica andaluza (y abarca hasta Extremadura y la mitad sur de Portugal), está limitada al sur por el paralelo 35 °N y al norte por el paralelo 40 °N, al oeste por el meridiano -10 °W y al este por -5 °W.

Zona de Andalucía Oriental (zona 2): se encuentra en la cuadrícula 2, que abarca la vertiente mediterránea andaluza (comprende también Castilla La Mancha, Valencia y Murcia), está limitada por los paralelos 35 °N y 40 °N, y al oeste por el meridiano -5 °W y al este por el meridiano de Greenwich.

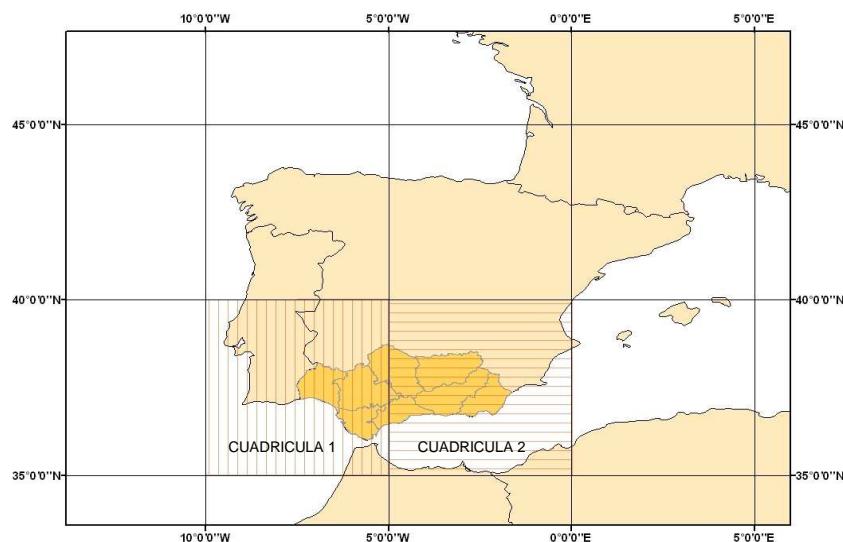


Figura 2. Resolución espacial de los modelos de SCENGEN ($5^{\circ} \times 5^{\circ}$) y cuadrículas de los datos utilizados en el presente trabajo.

5.1. Variación prevista de la temperatura para el año 2050

En las figuras 3 y 4 se exponen las diferencias que se esperan en la temperatura para el año 2050 con respecto a la temperatura promedio del periodo 1961-1990 (16.8 y 16.1 °C para las zonas 1 y 2 respectivamente). Los resultados se presentan para los seis escenarios de emisiones ilustrativos y para los cuatro modelos de circulación seleccionados en SCENGEN.

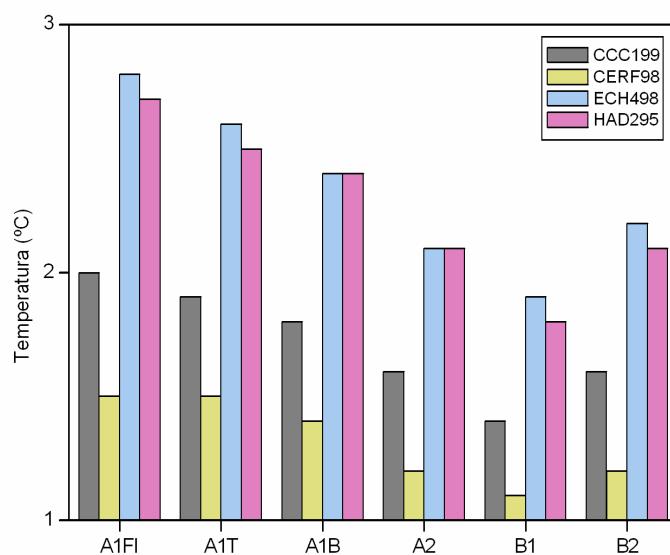


Figura 3. Variación esperada de la temperatura para el año 2050 con respecto al promedio de los años 1961-1990 en la zona de Andalucía Occidental.

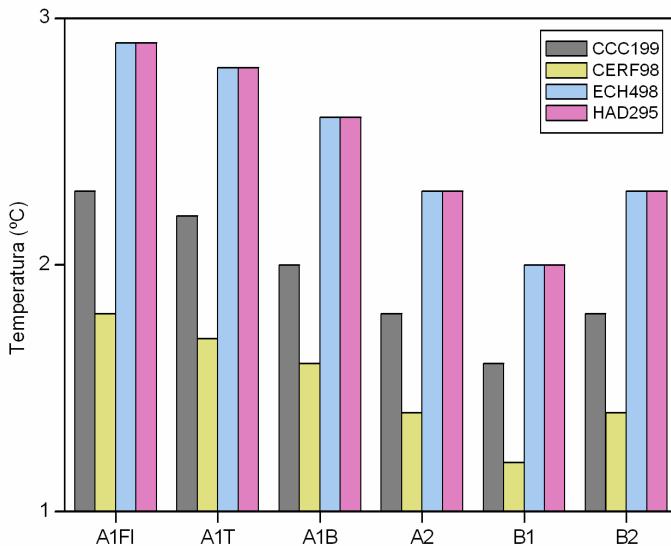


Figura 4. Variación esperada de la temperatura para el año 2050 con respecto al promedio de los años de los años 1961-1990 en la zona de Andalucía Oriental.

Se percibe un claro calentamiento para el año 2050 en ambas regiones, aunque su intensidad y su cadencia son diferentes según los escenarios, las zonas y los modelos.

En la zona 1 (Andalucía Occidental) el modelo CERF98 es el que predice menores incrementos en la temperatura para todos los escenarios de emisiones oscilando entre 1 °C para el escenario B1 y 1.5 °C para los escenarios A1FI y A1T. Los modelos ECH498 y HAD295 muestran valores muy similares, presentando las mayores diferencias para el año 2050. El modelo HAD295 vaticina un aumento de la temperatura de entre 1.8 °C (escenario B1) y 2.7 °C (escenario A1FI) y el modelo ECH498 pronostica un calentamiento de entre 1.9 °C (escenario B1) y 2.8 °C (escenario A1FI).

En la zona 2 (Andalucía Oriental) al igual que en la zona 1 es el modelo CERF98 el que pronostica un menor calentamiento (entre 1 °C y 2 °C para los escenarios B1 y A1FI respectivamente). Los modelos ECH498 y HAD295 proporcionan exactamente los mismos resultados en el incremento de temperatura para la cuadricula limitada por los paralelos 35 °N y 40 °N, y por los meridianos -5 °W y 0 °E en la cual se encuentra la zona de Andalucía Oriental. Estos dos modelos predicen un calentamiento de entre 2 y 3 °C para el año 2050 con respecto al periodo de referencia.

5.2. Variación de la precipitación para el año 2050

En las figuras 5 y 6 se exponen las diferencias que se esperan en la precipitación para el año 2050 para las dos zonas de estudio con respecto al promedio de lluvias registrado entre los años 1961-1990 (1.6 y 0.9 mm/día respectivamente). Se muestran los resultados de los escenarios climatológicos generados por los cuatro modelos seleccionados bajo los distintos escenarios de emisiones.

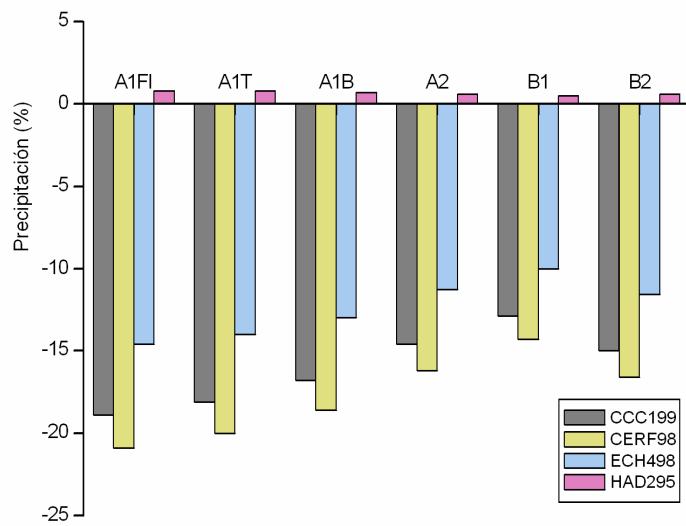


Figura 5. Variación esperada de la precipitación para el año 2050 con respecto al promedio de los años 1961-1990 en la zona de Andalucía Occidental.

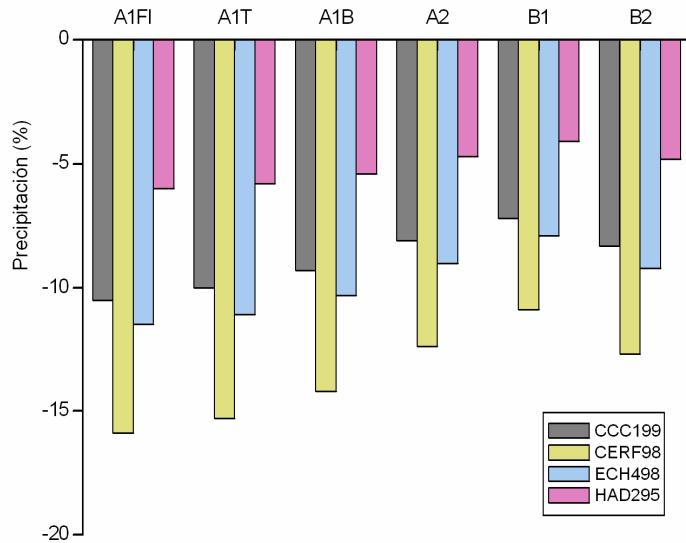


Figura 6. Variación esperada de la precipitación para el año 2050 con respecto al promedio de los años 1961-1990 en la zona de Andalucía Oriental.

En la zona de Andalucía Occidental la precipitación tiende a disminuir para los modelos CCC199, CERF98 Y ECH498, en cambio el modelo HAD295 predice un ligero ascenso. El modelo CERF98 pronostica las mayores reducciones en la pluviosidad para el año 2050 con respecto al periodo de referencia. Este modelo predice una reducción del 14% para un escenario B1 y un 21% para el escenario de emisiones A1FI. El modelo HAD295 predice un cambio neto positivo de la precipitación de entre un 0.5% y un 0.8%.

En la zona de Andalucía Oriental todos los modelos seleccionados muestran la misma tendencia. El modelo HAD295 es el que predice menores cambios en la precipitación, pronosticando reducciones del 4% para el escenario B1 y del 6% para el escenario A1FI. Al igual que en la zona de Andalucía Occidental, es el modelo CERF98 el que predice mayores reducciones en la precipitación variando entre un 11% y un 16% para los escenarios B1 y A1FI respectivamente. En esta zona hay mayor uniformidad de los resultados lo cual indica que la incertidumbre es menor.

Estos resultados coinciden con la tendencia generalizada para la Península Ibérica a una menor precipitación acumulada (MIMAM, 2005). Sin embargo, también es un hecho conocido que sobre diferentes zonas de latitudes medias se espera que exista un incremento de precipitación (Mosmann et al., 2004; Kont et al., 2003).

5.3. Variaciones de la precipitación y la temperatura previstas por estaciones para el año 2050

En la figura 7 se muestran los resultados de las proyecciones en las distribuciones de la temperatura media del aire en superficie con respecto a los datos observados para el periodo climatológico 1961-1990 en la zona de a) Andalucía Occidental y b) Andalucía Oriental. En este apartado se ha elegido una combinación de los cuatro modelos anteriores obteniendo promedios.

Debido a que se obtienen resultados muy parecidos para la mayoría de los escenarios se han representado solamente el caso más desfavorable (A1FI) y el más favorable (B1).

En general, el incremento de temperatura media es mayor en los meses de verano (JJA) que en los de invierno (DEF) y en Andalucía Oriental que en Andalucía Occidental.

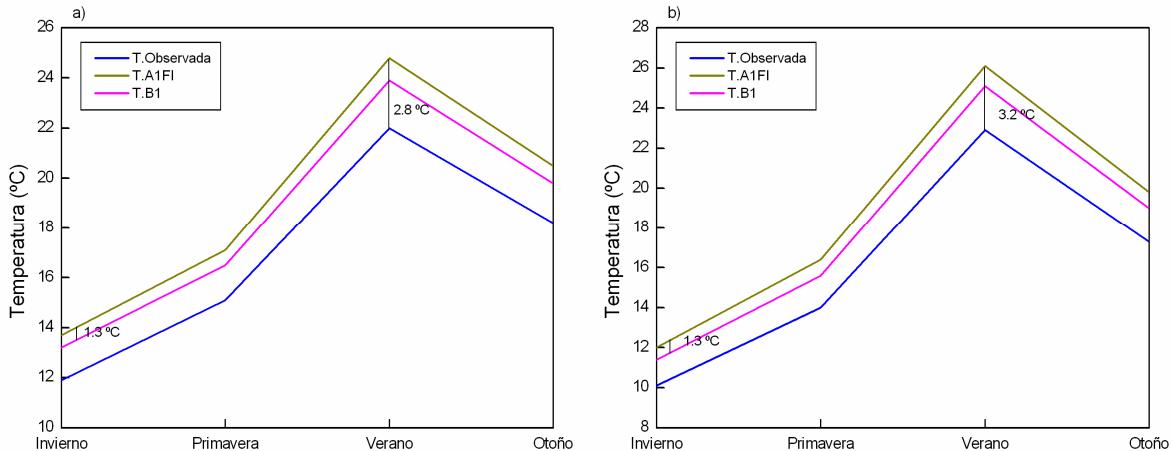


Figura 7. Valores de las temperaturas observadas (1961-1990) y de las temperaturas y pronosticadas por el promedio de los modelos (HAD295, ECH498, CERF98, CCC199) para el año 2050 y una sensibilidad climática de 2.6°C según los escenarios de emisiones A1FI y B1 para a) la cuadrícula de 5° latitud / longitud que contiene a Andalucía Occidental y b) la cuadrícula de 5° latitud / longitud que incluye Andalucía Oriental.

Los cambios en la precipitación presentan en general una mayor variabilidad espacial cuando se expresan en forma de porcentaje. Esto se debe en gran parte a que en algunas zonas las precipitaciones climatológicas son tan escasas, que un pequeño cambio futuro se traduce en un porcentaje artificiosamente elevado. Por esta razón en este apartado se ha preferido analizar los cambios en la precipitación en función de las diferencias entre valores de clima futuro y clima actual. Los valores de cambio absoluto facilitan una cuantificación más directa de las alteraciones en la disponibilidad de agua en cualquiera de las zonas.

En la figura 8 se muestran los cambios absolutos proyectados en las precipitaciones estacionales con respecto a los datos observados para el periodo climatológico 1961-1990 en la zona de a) Andalucía Occidental y b) Andalucía Oriental. Al igual que para la temperatura, se representan los escenarios de emisiones A1FI y B1.

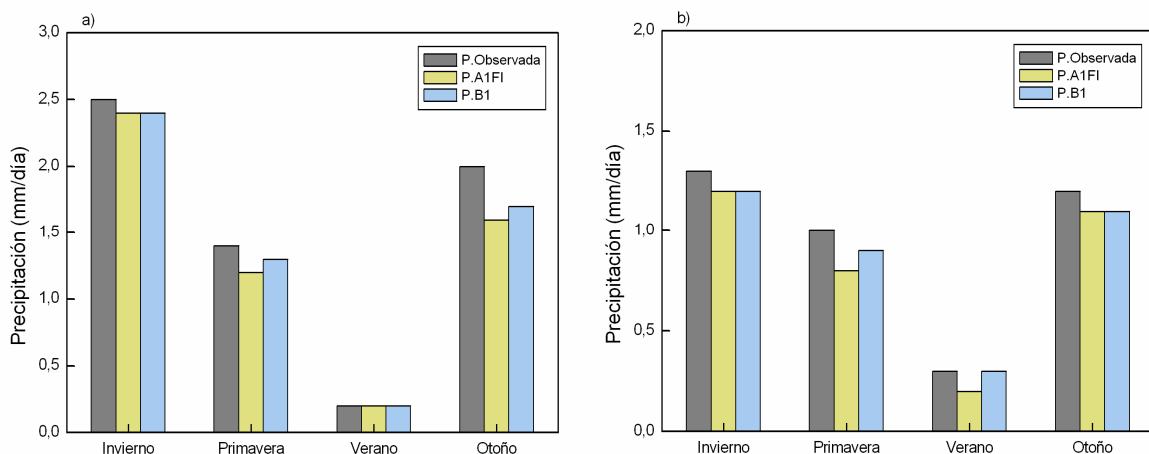


Figura 8. Valores de las precipitaciones observadas (1961-1990) y de precipitaciones pronosticadas por el promedio de los modelos (HAD295, ECH498, CERF98, CCC199) para el año 2050 y una sensibilidad climática de 2.6 °C según los escenarios de emisiones A1FI y B1, para a) la cuadrícula de 5° latitud / longitud que contiene a Andalucía Occidental y b) la cuadrícula de 5° latitud / longitud que incluye Andalucía Oriental.

En contraste con los cambios obtenidos para la temperatura, que siempre tienen signo positivo (calentamiento), los de precipitación no resultan del mismo signo en las diversas zonas y épocas del año. Así los cambios de la cantidad de precipitación en los meses de verano son nulos en Andalucía Occidental para todos los escenarios de emisiones considerados. Sin embargo en las demás estaciones así como en Andalucía Oriental predominan los cambios de signo negativo, es decir una disminución de la cantidad de precipitación en el clima proyectado con respecto al periodo de referencia. Los cambios en otoño para Andalucía Occidental y en primavera en general tienen mayor magnitud absoluta.

Es necesario destacar que una característica de las evoluciones de los cambios de precipitaciones estacionales a lo largo del siglo es que no presentan tanta linealidad en la tendencia como en el caso de las temperaturas (MIMAM, 2005). Precisamente las irregularidades espaciales y temporales que se aprecian en los cambios proyectados en

las precipitaciones indican la mayor incertidumbre que presentan, si se comparan con los obtenidos para el caso de las temperaturas.

6. Conclusiones

Los resultados que se obtienen de MAGICC / SCENGEN (al igual que los obtenidos con cualquier modelo de simulación de clima) no son predicciones climáticas, sino proyecciones de cómo podría alterarse el clima futuro, tomando como referencia las características actuales del clima (periodo 1961-1990). Dicho esto, las conclusiones obtenidas con el presente trabajo son las siguientes:

- Tendencia al incremento de las temperaturas medias a lo largo del siglo. Se puede hablar de un calentamiento de entre 1 °C y 3 °C en Andalucía para mediados del presente siglo.
- En Andalucía Oriental (vertiente mediterránea andaluza) el calentamiento previsto para mediados del presente siglo es algo superior que en Andalucía Occidental, lo cual era de esperar puesto que los expertos coinciden en que el Mediterráneo será una de las zonas más afectadas del mundo.
- Tendencia al calentamiento más acusada en la familia de escenarios A1, los cuales hasta mediados de siglo son escenarios de emisiones aceleradas.
- Los aumentos de temperatura media son significativamente mayores en los meses de verano que en los de invierno, con valores intermedios en los demás.
- Las predicciones para la zona mediterránea de Andalucía dan una disminución de la precipitación que oscila entre el -5% y el -15%. La heterogeneidad de los resultados obtenidos para Andalucía Occidental indica una alta incertidumbre. Sin embargo una visión común de todos los escenarios generados permite hablar de un cambio neto negativo en la precipitación en la mayoría de ellos, es decir, un descenso de la misma respecto al promedio sobre los años 1961 a 1990.
- Los cambios de la precipitación para el año 2050 tienden a ser más significativos en los escenarios de emisiones de la familia A1.
- La mayor reducción de la precipitación se proyecta en Andalucía Occidental para los meses de otoño y para Andalucía en general durante los meses de primavera para casi todos los escenarios de emisiones. Estabilidad en la evolución de la precipitación en verano al oeste de Andalucía.
- Para cada modelo las diferencias entre las predicciones de precipitación obtenidas con cada uno de los seis escenarios de emisiones son menores que las diferencias existentes entre los diferentes modelos para un mismo escenario de emisiones. Esto significa que la incertidumbre que introducen los modelos de circulación general es más importante que la generada por los escenarios de emisiones utilizados en este experimento.
- Las predicciones en la precipitación coinciden cualitativamente en la medida de que el signo de las tendencias no cambia en las distintas predicciones (excepto para los resultados del modelo HAD295 en la zona de Andalucía Occidental), lo que permite

asumir la validez de las mismas en este aspecto. Ahora bien este trabajo pone de manifiesto que la cuantificación de las tendencias presenta todavía márgenes de error muy elevados, de magnitud similar a los propios valores predichos, por lo que resulta imprescindible seguir investigando en este campo.

7. Líneas Futuras

Se establecerá un seguimiento y recopilación de la información existente. Se actualizarán los informes periódicamente complementando el trabajo con nuevas herramientas, teniendo en cuenta los resultados generados por el INM dentro del Plan Nacional de Adaptación, así como los resultados que se vayan generando en nuevos proyectos.

Bibliografía

- Barthelet, P., Bony, S., Braconnot, P., Braun, A., Cariolle, D., Cohen-Solal, E., Dufresne, J.L., Delecluse, P., Déqué, M., Fairhead, M., Filiberti, A., Forichon, M., Grandpeix, J.Y., Guiyadi, E., Houssais, N., Imbard, M., LeTreut, H., Lévy, C., Li, X.Z., Madec, P., Marquet, P., Marti, O., Planton, S., Terray, L., Thual, O. and Valcke, S. (1998a). Simulations couplées globales de chagements climatiques associés à une augmentation de la teneur atmosphérique en CO₂. *C.R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la terre et des planètes*, 326, 667-684 (In French with English Summary).
- Barthelet, P., Terray, L. and Valcke, S. (1998b). Transient CO₂ experiment using the ARPEGE/OPAICE nonflux corrected coupled model. *Geophysical Research Letters*, 25, 2277-2280.
- Boer, G.J., Flato, G., Reader, M.C., Ramsden, D. (2000). A transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing: experimental design and comparison with the instrumental record for the twentieth century. *Climate Dynamics*, 16, 405-425.
- Enting, I.G., Wigley, T.M.L. and Heimann, M. (1994). Future emissions and concentrations of carbon dioxide: key ocean/atmosphere/land analyses, CSIRO Division of Atmospheric Research Technical Paper No. 31, 118 pp.
- Flato, G.M., Boer, W.J., Lee, W.G., McFarlane, N.A., Ramsden, D., Reader, M.C., Weaver, A.J. (2000). The Canadian Centre for climate Modelling and Analysis global coupled model and its climate. *Climate Dynamics*, 16, 451-467.
- Harvey, L.D.D., Gregory, J., Hoffert, M., Jain, A., Lal, M., Leemans, R., Raper, S.B.C., Wigley, T.M.L. y de Wolde, J. (1997). An introduction to simple climate models used in the IPCC Second Assessment Report: IPCC Technical Paper 2 (eds J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, D.J. Griggs and M. Noguer), Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 50pp.
- IPCC. (2001). Climate change 2001. The scientific basis. Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J. y Xiausu D. (eds). Cambridge University press
- IPCC. (2006). Recommendations on New Emission Scenarios Final Report. Prepared by the IPCC Task Group on New emission Scenarios (TGNES), Sevilla, March 28 2006.
- Johns, T.C., Carnell, R.E., Crossley, J.F., Gregory, J.M., Mitchell, J.F.B., Senior, C.A., Tett, S.F.B., Wood, R.A. (1997). The second Hadley Centre coupled ocean-atmosphere GCM: model description, spinup and validation. *Climate Dynamics*, 13, 103-134.
- Kattenberg, A., Giorgi, F., Grass H., Meehl, G.A., Mitchell J.F.B., Stouffer, R.J., Tokioka, T., Weaver, A.J. and Wigley, T.M.L. (1996). Climate models (Eprojections of future climate. (In) Climate Change 1995: The Science of Climate Change (eds J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg y K. Maskell), Cambridge University Press, New York, 285 CE357.
- Kont, A., Jaagus, J., Aunap, R. (2003). Climate Change scenarios and the effect of sea-level rise for Estonia. *Global and Planetary Change*, 36, 1-15

MIMAM. (2005). El clima de España: Pasado, presente y escenarios de clima para el siglo XXI. Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático.

MIMAM. (2006). Plan de trabajo del proyecto “Escenarios climáticos nacionales”.

Mosmann, V., Castro, A., Fraile, R., Dessens, J. and Sanchez, J.L. (2004). Detection of statistically significant trends in the summer precipitation of mainland Spain. *Atmospheric Research*, 70, 43-53.

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenner, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grubler, 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., Dadi, Z. (2000). Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 599pp.

Roeckner, E., Oberhuber, J.M., Bacher, A., Christoph, M., Kirchner, I. (1996). ENSO variability and atmospheric response in a global coupled atmosphere-ocean GCM. *Climatic Dynamics*, 12, 737-754.

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-Institut für Meteorologie Report No. 47, Hamburg, Germany, 29pp.

Schimel, D., Alves, D., Enting, I.G., Heimann, M., Joos, F., Raynaud, D. and Wigley, T.M.L. (1996). Section 2.1 of Radiative forcing of climate change. (In) *Climate Change 1995: The science of Climate Change* (eds J.T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskell), Cambridge University Press, New York, pp. 76CE86.

Vinner D. and Hulme M. (1992). Climate change scenarios for impact studies un U.K. Climatic Research Unit, UEA, UK.

Wigley, T.M.L. and Raper, S.C.B. (1987). Thermal expansion of sea water associated with global warming. *Nature* 330, 127CE131.

Wigley, T.M.L. (1989). Possible climatic change due to SO₂-derived cloud condensation nuclei. *Nature* 339, 365CE367.

Wigley, T.M.L. (1993). Balancing the carbon budget. Implications for projections of future carbon dioxide concentration changes. *Tellus* 45B, 409CE425.