

# **PROGRAMA COORDINADO PARA GENERACION DE ESCENARIOS REGIONALIZADOS DE CAMBIO CLIMATICO**

**Diciembre 2006**



# **PROGRAMA COORDINADO PARA GENERACION DE ESCENARIOS REGIONALIZADOS DE CAMBIO CLIMATICO**

## **INDICE**

Resumen ejecutivo

1. Introducción
2. Objetivos
3. Estructura y alcance del Programa Coordinado
4. Descripción metodológica
  - 4.1 Modelos de circulación general
  - 4.2 Regionalización de las proyecciones realizadas con modelos globales
  - 4.3 Incertidumbres que afectan al proceso y metodología probabilística.
5. Líneas propuestas para el programa coordinado
  - 5.1 Bases de datos. Acceso y distribución de información vía web. Escenarios combinados y orientaciones de uso.
  - 5.2 Tendencias del clima reciente y validación de modelos en periodos observacionales.
  - 5.3 Detección y atribución de cambio climático
  - 5.4 Modelos globales. Validación
  - 5.5 Modelos dinámicos regionales. Validación
  - 5.6 Modelos estadísticos de regionalización. Validación
  - 5.7 Modelos oceánicos regionales. Validación.
6. Resumen de recursos necesarios
7. Calendario
8. Resultados
9. Conclusiones

Bibliografía

Anexo I: Proyectos relacionados

Anexo II: Contexto europeo

Anexo III: Comisión redactora y revisores

## Resumen ejecutivo

La disponibilidad de información relativa a los previsibles impactos asociados al cambio climático a escala regional y local es de gran importancia para el desarrollo futuro de la sociedad y de los ecosistemas naturales. La posibilidad de un aumento en la frecuencia y/o intensidad de sucesos extremos justifica, entre otras razones, que la información climática sea un importante factor a tener en cuenta en la toma de decisiones políticas que afectan a una gran variedad de sectores que demandan estudios de impacto y estrategias de adaptación al cambio climático. La necesidad de disponer de una estimación cuantitativa de los cambios que se esperan en el clima de España durante en siglo XXI, en las escalas espaciales y temporales con la resolución más alta posible, plantea el problema de generar escenarios regionalizados de cambio climático.

El objetivo fundamental de este programa es el establecimiento de un esquema de principio y metodológico que permita la generación de forma coordinada y consensuada de escenarios de cambio climático regionalizados, que estén avalados por la comunidad científica española. Estos escenarios constituirían una referencia básica para ulteriores estudios de impacto en el marco del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC). El programa tiene una vocación de continuidad, ya que los escenarios regionalizados se deben revisar periódicamente con una frecuencia similar a la de los informes de evaluación del IPCC. En la generación de los escenarios colaborarán el INM y la comunidad investigadora española implicada en este asunto y en temas afines. El PNACC asigna al INM, como parte del MMA, la tarea de coordinación de las actividades del programa.

El programa tiene en cuenta tanto los proyectos recientemente finalizados como aquellos en curso, fundamentalmente financiados por la UE, orientados precisamente a la generación de escenarios a escala regional con una gran variedad de métodos y modelos climáticos globales y regionales. Asimismo, el programa intenta promover la coordinación y complementariedad con dichos proyectos.

Una de las características del problema asociado a la estimación de proyecciones climáticas a escala regional es la existencia de incertidumbres que, de forma jerárquica, afectan a todo el proceso de generación de escenarios. La metodología que se propone aquí está basada en el desarrollo de proyecciones probabilísticas realizadas con diferentes escenarios de emisión, diferentes modelos globales, diferentes modelos regionales y diferentes técnicas estadísticas de regionalización. Esta metodología permite explorar las múltiples incertidumbres asociadas a la generación de los escenarios climáticos regionales y proporcionar proyecciones de tipo probabilístico más robustas que las basadas en un único modelo global y en una única técnica de regionalización. La aplicación de esta metodología lógicamente implica la movilización de una gran cantidad de recursos, sin los cuales la exploración y delimitación de las incertidumbres difícilmente podría llevarse a cabo.

Se proponen una serie de líneas de actuación conducentes tanto a la generación de escenarios regionales de cambio climático como a su validación y contextualización, siguiendo una metodología similar a la utilizada en otros proyectos internacionales, (e. g., el proyecto ENSEMBLES de la UE; véase Anexo II). A la vez que se describen las líneas de actuación, se hace un intento de cuantificar los recursos humanos necesarios para desarrollar el programa.

El programa propone en definitiva la coordinación de la comunidad científica española para proporcionar de forma continua, y con revisiones periódicas, una imagen probabilística de la evolución del clima en España a lo largo del siglo XXI que sirva a los diferentes sectores sensibles a las condiciones climáticas para tomar sus decisiones estratégicas de adaptación a un clima cambiante. Asimismo, se intenta que esta información relativa a las futuras condiciones climáticas sea la mejor disponible en el momento de su distribución y que esté siempre científicamente avalada.

## 1.- Introducción

En este documento, el término *calentamiento global* se refiere a algunos de los efectos que las actividades humanas tienen en el clima, actividades entre las que se encuentran la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural), deforestación, cambio de usos de suelo, etc. Estas actividades contribuyen a la emisión a la atmósfera de grandes cantidades de *gases de efecto invernadero*, de los cuales el más importante es el dióxido de carbono. Los gases de efecto invernadero absorben radiación infrarroja emitida por la superficie de la Tierra manteniendo la temperatura de la atmósfera más alta que la que tendría sin su presencia. Los aspectos científicos básicos del *efecto invernadero* y el calentamiento global, resultado de su intensificación, se conocen razonablemente bien. Desde que Fourier propuso en 1827 la existencia del efecto invernadero y Arrhenius en 1860 aventuró el primer cálculo del posible cambio de temperatura del planeta asociado a una intensificación del mismo, la ciencia del cambio climático ha avanzado enormemente y, en especial, de forma paralela al avance de las redes de observación y los medios computacionales a lo largo de las últimas décadas del siglo XX. El avance en el conocimiento detallado de los mecanismos físicos que se activan con la intensificación del efecto invernadero se fundamenta en el uso de modelos numéricos del clima en los que se integran las ecuaciones termodinámicas y dinámicas que describen el sistema.

Al calentamiento global se asocian cambios en el clima en distintas escalas espaciales y temporales. Con la ayuda de los modelos climáticos se pueden identificar y estimar la previsible evolución de variables climáticas a escala global y regional (aumentos/descensos de precipitación, cambios en la frecuencia de extremos, alteraciones en el nivel del mar, etc.). Lamentablemente, existe todavía un conocimiento muy limitado de muchos de los mecanismos que contribuyen al cambio climático (estimación en la intensidad del forzamiento futuro, sensibilidad climática, mecanismos de realimentación, etc.) lo que somete a no pocas incertidumbres la estimación de los cambios a escala global y, más aún, a escala regional. A pesar de las incertidumbres existentes, evidencia del hecho de que el calentamiento global es un problema científico abierto, la ciencia está en posición de ofrecer respuestas útiles a la sociedad y a los gobiernos en la toma de decisiones sobre su futuro medioambiental.

Los impactos derivados del calentamiento global serán de enorme importancia en la sociedad y en los ecosistemas (posible aumento del nivel del mar, desertificación<sup>1</sup>, etc.). La perspectiva futura de una sociedad que tendrá que adaptarse a cambios inciertos y las posibles implicaciones ecológicas y sociales de tales cambios no sólo ha suscitado el interés de la comunidad científica sino también la preocupación de la sociedad en general. A escala regional el problema aumenta en complejidad por el alto número de factores que pueden tener un papel importante en perfilar el clima de una zona y que pueden ser alterados en un contexto de cambio climático.

El área de la Península Ibérica es un buen ejemplo en su papel de transición; sometida al paso de las depresiones atlánticas por un lado y a la influencia de la ciclogénesis

---

<sup>1</sup>Se suele llamar desertización a la transformación de tierras usadas para pastos o cultivos en tierras desérticas o casi desérticas. La mayor parte de la desertización es natural en las zonas que bordean a los desiertos. Cuando la desertización está originada por actividades humanas, tales como el cultivo y el pastoreo excesivo, la deforestación o la falta de riego, se suele utilizar el término desertificación.

mediterránea por otro; bajo la influencia de las altas presiones del Anticiclón Siberiano o como zona de advección del Atlántico subtropical o de los vientos más secos del Norte de África, sin olvidar la influencia de la circulación y formación de masas de agua en el Atlántico teleconexiones con zonas geográficamente distantes puestas de manifiesto en situaciones climáticamente extremas como las de El Niño/Oscilación del Sur (ENSO, según siglas en inglés). El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, según siglas en inglés; Houghton et al., 2001) ha indicado que la zona mediterránea constituye una de las regiones de especial atención en el contexto de los posibles impactos del cambio climático: las proyecciones de cambio climático apuntan a que podría haber aumentos en la frecuencia de olas de calor, temperaturas máximas, disminución de la precipitación, etc (Lionello et al., 2006, ECCE, 2005). Estos cambios podrían tener consecuencias importantes en los ecosistemas naturales y también en la sociedad, la salud y la economía.

La detección y atribución del cambio climático asociado a la influencia humana en el clima, la estimación de los posibles impactos y las posibles acciones de adaptación para minimizar los efectos negativos son tareas que se fundamentan en el conocimiento profundo de los mecanismos que contribuyen a la variabilidad climática en distintas escalas espaciotemporales. La sociedad demanda de la comunidad científica respuestas claras y, en lo posible, precisas sobre la evolución climática futura. Dichas respuestas, en el estado del conocimiento actual, han de ir necesariamente acompañadas de un alto grado de incertidumbre, situación, que como anteriormente se indicaba, evidencia un problema científico en continuo estado de investigación. Una evolución madura del tratamiento del problema debe llevar a posturas constructivas y que incentiven la aplicación de políticas responsables, información y educación de la sociedad y que fomenten la investigación y el avance del conocimiento en un nivel acorde con la importancia del tema.

Debido a los potenciales impactos negativos en la sociedad y los ecosistemas, el calentamiento global es el problema medioambiental más importante al que nos enfrentamos. La situación sugiere necesariamente una adaptación a cambios inevitables así como estrategias de respuesta para reducir en lo posible la magnitud de dichos cambios. En el ámbito internacional, gobiernos y comunidades científicas han acordado tomar acciones responsables en la dirección de adoptar políticas de eficiencia energética y la potenciación de fuentes de energía no basadas en los combustibles fósiles (Kioto 1997 y Montreal 2005). Es de especial relevancia la aprobación en la pasada Conferencia de las Partes (COP) de la CMNUCC<sup>2</sup> (Montreal 2005) del “*Programa de trabajo quinquenal sobre los aspectos científicos, técnicos y socioeconómicos de los efectos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático*” Este programa refleja la importancia del tema en el marco de las Naciones Unidas y se establece como objetivo general fortalecer la capacidad de adaptación al cambio climático de todas las Partes. En la reciente conferencia sobre riesgos climáticos de la OMM celebrada en Espoo (Finlandia) entre el 17 y el 21 de julio de 2006 se emitió un comunicado, consensuado entre expertos en desastres naturales, salud pública, energía, recursos hídricos, seguridad alimentaria, clima y políticos, en el que se reconocía la gran importancia, social, económica y ambiental del cambio y la variabilidad climáticos. Este comunicado ([http://www.livingwithclimate.fi/en/en\\_18.html](http://www.livingwithclimate.fi/en/en_18.html)) está teniendo una gran repercusión tanto entre el público general como entre los responsables políticos.

---

<sup>2</sup> CMNUCC, Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático

En el anterior contexto internacional, España se ha integrado desarrollando el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC, 2006). Este plan supone el cumplimiento de los compromisos adquiridos al amparo de la CMNUCC y establece el marco de referencia para la evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. La evaluación de impactos se apoya en la disponibilidad de estimaciones de la evolución climática a escala regional a partir de las cuales se pueda analizar el posible efecto sobre los ecosistemas naturales y subsistemas sociales, contexto en el que cobra sentido el presente documento.

La necesidad de disponer de proyecciones de los impactos del cambio climático en los diferentes ecosistemas y sectores socioeconómicos españoles, plantea el problema de disponer de una estimación cuantitativa de los cambios que se esperan en el clima durante en siglo XXI.

El PNACC tiene entre otros objetivos específicos el de “desarrollar escenarios climáticos regionales<sup>3</sup> para la geografía española” para estudios de impacto y adaptación de los diferentes ecosistemas y sectores socioeconómicos. En el Primer Programa de Trabajo de dicho plan se le asigna al INM la tarea de coordinación con la comunidad científica en la generación de escenarios regionalizados de cambio climático para estudios de impacto.

El INM, por su parte, para responder a este mandato ha articulado un plan en dos fases. En una primera fase (hasta diciembre de 2006) se están utilizando fundamentalmente los métodos ya desarrollados y las bases de datos actualmente existentes (resultado de proyectos del 5º programa marco de la UE) para proporcionar, con carácter de urgencia, las primeras proyecciones regionales de escenarios de cambio climático a los diferentes usuarios que demandan estimaciones para sus modelos de impacto. En una segunda fase se desarrollará un plan con una perspectiva más exhaustiva, teniendo en cuenta las múltiples facetas científicas, técnicas y de coordinación del problema. Esta fase tendrá una proyección de continuidad con vocación de producir resultados a intervalos regulares en el tiempo, de forma similar a los informes del IPCC. En esta fase se incluirán una variedad de técnicas y modelos de regionalización, aspectos de investigación y desarrollo que redunden en la calidad de las proyecciones de cambio climático y la interacción de todos aquellos grupos de investigación que puedan contribuir en esta tarea.

El MMA, a través del INM, siendo consciente de la actividad desplegada a lo largo de los últimos años por la comunidad académica e investigadora española en temas directa e indirectamente relacionados con la generación y evaluación de escenarios climáticos regionales y de cara a planificar la generación de escenarios regionalizados, convocó unas jornadas sobre “Escenarios de cambio climático regionalizados” que se celebraron los días 30 y 31 de marzo de 2006 en el salón de actos del MMA. A las jornadas fueron invitados todos los investigadores cuya actividad pasada, actual o planificada para el futuro próximo se había identificado como relevante para el tema de las jornadas. Las jornadas constaron de tres partes claramente diferenciadas: (i) una parte de

---

<sup>3</sup> El término “escenarios climáticos regionales o regionalizados”, que forma parte del título de este texto proviene directamente del PNACC. En el presente documento se utilizará indistintamente esta nomenclatura, por consistencia con el PNACC, y el término “proyección regional de cambio climático” o “proyección climática regional”, en consistencia con el IPCC.

presentaciones breves que describían la actividad de los diferentes grupos en temas relacionados con proyecciones regionales de cambio climático<sup>4</sup> (ii) una segunda parte dedicada a discutir en mesa redonda las necesidades de algunos de los diferentes sectores en los estudios de impacto y, (iii) una tercera parte de debate en la que se discutieron las posibles formas de colaboración de los grupos activos en escenarios regionalizados y temas afines. En la parte de discusión se trató de identificar las necesidades y posibles obstáculos a una abierta colaboración entre el INM y los grupos de la comunidad investigadora. También se discutió el alcance y los posibles formatos de colaboración. Algunas de las conclusiones y puntos más relevantes debatidos durante éstas se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Existen varios grupos que desarrollan su actividad investigadora en el campo de las técnicas (estadísticas y dinámicas) de regionalización, con potencial demostrado para su uso en la generación de escenarios climáticos regionalizados y, en varios casos, con participación en proyectos internacionales en este ámbito.
- Existe la necesidad de coordinación para optimizar y dar prioridad a los esfuerzos de los distintos grupos en este ámbito. El PNACC podría ser un instrumento adecuado para desarrollar esta coordinación.
- Entre las necesidades identificadas para desarrollar esta coordinación se destacó una política de datos abierta por parte del MMA, a través del INM, que garantice el acceso rápido y eficaz a los datos para fines de investigación. Existen resoluciones que garantizan acceso gratuito a los datos para fines de investigación (Orden 4193 de 18 de febrero de 2000, BOE 2 de marzo de 2000), si bien en la práctica la tramitación de las peticiones sufre retrasos. Asimismo se destacó la necesidad de una información clara sobre las bases de datos existentes y de su contenido, así como de los métodos de acceso eficaz (posiblemente vía sitio web) a los mismos por parte de todos los usuarios interesados de la comunidad científica.
- La comunidad científica participante en la reunión hace constar el limitado apoyo económico recibido hasta ahora por parte de las instituciones y sugiere la conveniencia de que surjan iniciativas como ésta que redundarían en la mejora de medios disponibles para estudios de clima y cambio climático. El problema del cambio climático asociado al calentamiento global es científico en su base y un tratamiento adecuado del mismo debe apoyar de forma responsable la investigación en clima y cambio climático. Algunos análisis recientes (Informe CLIVAR-es, 2006) constatan la diferente disponibilidad de medios en nuestro país respecto a otros del entorno. El carácter multidisciplinar del problema científico y las incertidumbres existentes deben hacernos tomar conciencia de que el tratamiento científico del problema debe ser integrador, teniendo en cuenta áreas de conocimiento afines que conduzcan a lograr el objetivo final de desarrollar y poner a disposición de los interesados una base de datos documentada de escenarios regionalizados de cambio climático.

---

<sup>4</sup> Las presentaciones están accesibles en <http://www.inm.es>, en la sección de divulgación: ponencias y resultados de simposios y conferencias

- Los escenarios de cambio climático regionalizado están sometidos a múltiples incertidumbres y el plan debería permitir el desarrollo de una divulgación sobre su uso. Asimismo, debería existir un mecanismo de intercambio de información entre la comunidad de generadores de escenarios y la comunidad de usuarios para estudios de impacto.
- Parece claro que el desarrollo de proyecciones regionales de cambio climático ha de hacerse desde una aproximación que utilice tantos modelos climáticos globales, modelos climáticos regionales y métodos empíricos de regionalización como sea posible, una vez que hayan sido validados. La aproximación final a desarrollar será por tanto probabilística.

Finalmente, se encargó a una comisión de redacción<sup>5</sup> la elaboración de un documento de consenso que propondría un plan de trabajo integrado al MMA para el tema de escenarios de cambio climático regionalizados. Previamente, un borrador del mismo se distribuiría entre el sector científico relacionado con el tema, y mayoritariamente asistente a la reunión de los días 30 y 31 de marzo en el MMA, para incorporar nuevas modificaciones y mejoras (ver Anexo III). Se estableció el mes de octubre de 2006 como fecha tentativa para tener finalizado el documento y listo para su presentación al Secretario General para la Prevención de la Contaminación y del Cambio Climático. El presente texto es el resultado de dicho proceso.

---

<sup>5</sup> La comisión de elaboración de esta propuesta está formada por Miguel Ángel Gaertner (Univ. Castilla-La Mancha), José Manuel Gutiérrez (Univ. Cantabria), Fidel González (Univ. Complutense), Antonio Ruiz-Elvira (Univ. Alcalá) y Ernesto Rodríguez (INM)

## 2.- Objetivos

El objetivo fundamental del programa es el de establecer un proceso coordinado y consensado para la generación de proyecciones regionales de cambio climático en España, avalados por la comunidad científica, que serán referencia básica para ulteriores estudios de impacto dentro del PNACC. A su vez, las proyecciones regionales habrán de ser revisadas periódicamente con una frecuencia similar a la de los informes de evaluación del IPCC. En la generación de los escenarios colaborarán el INM y la comunidad investigadora española implicada en este asunto y en temas afines.

En el desarrollo de su tarea, la comisión ha considerado oportuno tener en cuenta la experiencia previa por parte de distintos grupos que podían aportar distintos puntos de vista y ofrecer recursos para el desarrollo del plan. Este es el caso por ejemplo de proyectos europeos recientes o en desarrollo (PRUDENCE, STARDEX, ENSEMBLES) orientados precisamente a la generación de proyecciones a escala regional con una gran variedad de métodos y modelos climáticos globales y regionales. Resulta conveniente tener en cuenta la experiencia aportada por el anterior informe del proyecto ECCE<sup>6</sup>, el cual representa un precedente de coordinación entre distintos grupos. El reciente Informe CLIVAR-es, (2006) constituye también un análisis útil de la comunidad científica española en temas de clima y cambio climático, ofreciendo una visión de su actividad y potencial científico y un diagnóstico de sus carencias y posibilidades de desarrollo.

El consenso en procedimiento y resultado estará objetivamente garantizado por el aval del proceso de revisión científica. Por tanto, es importante, y constituye la recomendación de esta comisión, que los productos que ofrezca el plan desarrollado en términos de bases de datos de escenarios regionalizados, métodos utilizados, resultados innovadores que supongan un avance en el contexto científico, sean objeto en el proceso de su desarrollo de publicación científica en revistas internacionales de impacto, además de formar parte de informes coordinados emitidos por el responsable ejecutivo del programa.

Otro aspecto relevante en el ámbito del respaldo y consenso por parte de la comunidad científica es el procedimiento para ofrecer a la administración pública escenarios regionalizados útiles en el desarrollo del PNACC. Para disponer del respaldo de la comunidad, dicho procedimiento ha de estar abierto a todos aquellos grupos que quieran y puedan comprometerse a contribuir con el uso de modelos climáticos globales, regionales, metodologías o bases de datos. La concesión de financiación debería de otorgarse mediante proceso de concurrencia competitiva conforme a los principios de publicidad, transparencia, igualdad y no discriminación, valorando de manera crítica la coordinación entre proyectos y su adecuación al objetivo fundamental de la convocatoria. El proceso de evaluación de la contribución debe atenerse a las buenas prácticas internacionalmente admitidas para la evaluación científico-técnica de la investigación. Se recomienda para este proceso la participación de evaluadores internacionales y nacionales no participantes en el plan y de reconocido prestigio científico. También sería deseable que los distintos grupos que puedan contribuir a las líneas de este programa se organizaran en una o varias propuestas con el mayor grado

---

<sup>6</sup> ECCE, 2005: Evaluación preliminar general de los impactos en España por efecto del cambio climático (<http://www.mma.es/oecc/impactos2.htm>)

de coordinación posible que diesen respuesta a los planteamientos del PNACC en el tema de generación de escenarios regionalizados.

El carácter periódico del plan hace que la generación de escenarios climáticos a escala regional esté sujeta a una revisión continuada del estado del conocimiento científico en esta temática. Los productos ofrecidos han de estar sometidos por tanto a una evolución acorde con el avance del conocimiento en cuanto a modelos climáticos, métodos de *downscaling*, mejora de las bases de datos observacionales, conocimiento de la variabilidad climática, estudios de detección y atribución, reducción de incertidumbres, etc., aproximadamente cada 4 años. Este aspecto de mejora continua solamente se puede asegurar si el plan ofrece una visión integrada y renovadora, en la cual se incorpore la posibilidad de apoyar productos de investigación y desarrollo que contribuyan a la mejora de los productos finales en cada convocatoria. Los resultados finales deben ir acompañados de un texto o textos explicativos en los cuales se expongan el potencial y limitaciones, en cuanto a su posterior uso e interpretación, de las bases de datos de escenarios climáticos, dando una clara interpretación de incertidumbres y de lo significativo de las proyecciones futuras en el contexto de lo que actualmente se conoce del clima.

### **3.- Estructura y alcance del programa coordinado**

El objetivo del presente programa, que es la elaboración y actualización periódica de escenarios regionalizados de cambio climático, exige dos líneas de actuación de importancia comparable. Por un lado se pretende conseguir proyecciones de cambio climático para España en un plazo breve de tiempo. Por otro se quiere que puedan actualizarse periódicamente introduciendo en los métodos y datos que se precisan para la generación de los mismos los avances que se vayan produciendo en nuestra comprensión de los procesos responsables de la evolución del sistema climático. Para conseguir este objetivo general es imprescindible el trabajo de forma coordinada de muchos grupos de investigación españoles.

El alcance de la colaboración de los distintos grupos de investigación existentes en España en un programa para generar escenarios de cambio climático regionalizados no presenta una fácil definición ya que en primer lugar hay que delimitar exactamente el campo de actividad. La generación de proyecciones de cambio climático puede considerarse en un marco muy restrictivo que limite el campo de trabajo a aplicar ciertas técnicas de regionalización, previamente conocidas o experimentadas, a salidas de un modelo climático o a una colección de modelos o, por el contrario, puede considerarse en un marco más amplio en el que tengan acomodo, por ejemplo, las actividades de validación en periodos paleoclimáticos, el estudio de la variabilidad en diferentes escalas temporales, los estudios de detección y atribución del cambio climático, etc.

Esta comisión entiende que el programa que aquí se presenta sería así una fuente adicional de financiación a la línea de investigación de clima del Plan Nacional de I+D, que se plantea conseguir objetivos concretos y dirigidos en plazos de tiempo especificados.

Una visión excesivamente restrictiva del campo de actividad excluiría a la mayoría de los grupos que trabajan en temas relacionados con el clima y ceñiría la colaboración a unos pocos grupos, con posibilidad de comprometer la existencia de consenso. Asimismo, el alcance del proyecto se vería seriamente disminuido y posiblemente limitaría la colaboración a generar unos pocos escenarios regionalizados basados en pocos modelos globales y pocas técnicas de regionalización. Por el contrario, una visión excesivamente amplia del campo de actividad nos llevaría a un programa bastante inmanejable en el que pesarían tanto los temas centrales de generación de escenarios regionalizados como otros temas más colaterales.

La tarea que se ha planteado este grupo de redacción es la de conjugar los intereses del MMA con el potencial de los grupos investigadores a los que hay que ofrecer alicientes para que en algunos casos modifiquen sus líneas de trabajo y contribuyan al objetivo del programa.

El potencial investigador en temas de clima en España puede contribuir a esta necesidad en un proceso que atienda a factores como:

- (i) El establecimiento de un marco para desarrollar, comparar y validar distintos métodos de regionalización y ofrecer escenarios regionalizados desde una perspectiva interpretativa apoyada en criterios científicos.
- (ii) La contribución con financiación adicional que ayude a impulsar la actividad

- en los estudios climáticos en los que necesariamente ha de basarse un plan estable en el tiempo.
- (iii) La creación/potenciación de estructuras fuertes de coordinación y colaboración entre grupos, aprovechando por ejemplo la sinergia de redes temáticas existentes (MM5, CLIVAR-es, ...)
  - (iv) El dialogo y coordinación entre las comunidades de generación de escenarios regionales de cambio climático y de impactos. Se precisa de un avance en la identificación de productos necesarios para los estudios de impacto y de un proceso informativo y divulgativo de la interpretación de los escenarios regionalizados. Este punto no es el objetivo de este documento y debería potenciarse en el desarrollo futuro del PNACC.
  - (v) La simplificación del acceso a datos

En esencia, se requieren soluciones de carácter científico, i. e., estimaciones de cambios climáticos a escala regional, para alimentar modelos de impacto que permitan desarrollar estrategias de adaptación con implicaciones ecológicas y sociales. La comunidad científica española dispone claramente de un alto potencial útil específicamente para la generación de escenarios de cambio climático regionalizados y temas relacionados (mejora y validación de modelos, estudios de mecanismos de variabilidad climática que aportan predecibilidad, etc). Sin embargo, simultáneamente con este potencial se observan profundas carencias de coordinación entre grupos, lo que dificulta la optimización en la consecución de resultados. Parece razonable aprovechar aquel potencial y que el programa se utilice para, apoyando con financiación y exigiendo coordinación, fomentar y contribuir al avance científico en este campo, puesto que la aportación de la comunidad científica es la única que puede permitir el desarrollo del PNACC.

La perspectiva de esta comisión es que el conocimiento científico debe servir de base para hacer frente al problema del cambio climático, que ofrece múltiples facetas y debe ser tratado de forma integral, incorporando generación de escenarios regionales de cambio climático, validación de modelos climáticos, estudios de detección y atribución, desarrollo de métodos de *downscaling* dinámico y estadístico, estudios de predecibilidad climática a escala regional y análisis de variabilidad climática en escalas temporales largas que permitan situar las proyecciones climáticas futuras en un contexto interpretativo adecuado. Solamente con una aproximación integradora se puede hacer un tratamiento adecuado de las incertidumbres y responder a las exigencias de renovación y mejora de un plan que pretende ser periódico en el tiempo.

Para intentar introducir de forma constructiva el alcance de un esquema coordinado de trabajo se ha estudiado una experiencia previa y reciente en la que se solicitó la colaboración de la comunidad científica por parte de instancias ministeriales: el desastre del Prestige.

Cuando ocurrió este desastre un grupo de expertos convocado por el Ministerio de Fomento (el equivalente a la comisión de redacción de este documento) realizó un Plan de Intervención Científica donde se detallaban los estudios que habría que hacer, a corto y largo plazo, para disponer, entre otras herramientas, de un modelo operativo de dispersión de contaminantes en el océano, que fuese utilizable en situaciones de emergencia como la del vertido accidental del Prestige. Para los estudios a corto plazo el Ministerio de Ciencia y Tecnología hizo una convocatoria pública extraordinaria de

ayudas (Orden CTE/634/2003 de 18 de marzo, BOE de 21 de marzo de 2003) para la realización de proyectos de investigación científica y desarrollo tecnológico, y se abrió una convocatoria del Programa de Fomento de la Investigación Técnica (PROFIT) en relación con los Programas Nacionales de Recursos Naturales y de Medio Ambiente del Plan Nacional de I+D+I, en el marco de la Acción Estratégica sobre actuaciones de I+D contra vertidos marinos accidentales aprobada en el marco del Acuerdo del Consejo de Ministros de 24 de enero de 2003, y la Reunión de la Comisión Permanente de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología del 13 de marzo de 2003. El monto total de las ayudas para proyectos de hasta 3 años fue de alrededor de 10 M€. La parte de oceanografía física de los proyectos financiados fue concedida a un macroproyecto integrado (Establecimiento de un Sistema Español de Oceanografía Operativa, ESEOO, <http://www.esooo.org>). ESEOO tiene tres años de duración y pretende promover la oceanografía operativa en el ámbito nacional y, más concretamente, los servicios capaces de proporcionar respuestas a situaciones de emergencia en el mar, tales como vertidos y seguimiento de objetos a la deriva.

Tal como lo aprecia el presente grupo de redacción, el caso de los escenarios regionalizados podría ser comparable al mencionado anteriormente en tanto en cuanto parece necesario un importante esfuerzo de coordinación. En el desarrollo del programa sería deseable que surgiese uno o varios proyectos fuertemente coordinados en los que se integrasen grupos con experiencia contrastada (publicaciones, participación en proyectos de la UE y/o del Plan Nacional) con otros grupos que puedan aportar nuevos métodos y propuestas de desarrollo interesantes por su contribución a medio y largo plazo a las líneas que se describen en el programa. La coordinación general del programa daría respuesta a los objetivos específicos que pide el MMA, y garantizaría su continuidad con la presencia de nuevos desarrollos que posibiliten las revisiones futuras, en respuesta a una convocatoria extraordinaria del MEC, del MMA o de ambos actuando de forma coordinada. Un punto sensible a tener en cuenta es el de no bloquear la participación de los grupos de investigación involucrados en este plan en los proyectos del plan nacional. En este sentido los proyectos integrados en el plan de generación de escenarios regionales no deberían consumir EDPs (Equivalente Dedicación Plena) evitando así el veto a la participación en el Plan Nacional de I+D.

En este sentido la comisión entiende que el contexto apropiado para el desarrollo y consecución de los objetivos del PNACC sería la generación y financiación de un programa nacional *ad hoc*. Dicho programa contemplaría las distintas líneas de actividad sobre las que se sustenta la generación e interpretación de proyecciones de cambio climático a escala regional (escenarios regionalizados de cambio climático) tal y como quedan reflejadas en los informes del WG1 del IPCC.

Un programa de la magnitud del propuesto aquí precisaría para su perfecta coordinación de un responsable ejecutivo (*programme manager*) que se dedicase a tiempo completo a esta tarea de coordinación. En caso contrario sería difícil garantizar la consecución de los objetivos anteriormente descritos. Asimismo, debería existir un grupo de 3 o 4 personas responsables de área (*area leaders*) encargados de la coordinación de las distintas grandes áreas de trabajo (p.e., regionalización dinámica, bases de datos, regionalización estadística, etc.), que dedicarían una parte sustancial de su tiempo (al menos 30%) a tareas de dirección y coordinación. Los responsables de área dependerían del responsable ejecutivo, y aparte de las tareas de coordinación deberían estar fuertemente involucrados en el desarrollo de las tareas científicas y técnicas del

programa en sus respectivas áreas de actividad. La adecuada sincronía de los distintos equipos precisaría de frecuentes reuniones parciales de los responsables de área, así como de una reunión plenaria con periodicidad anual de todo el personal involucrado en el programa.

Las tareas ejecutivas de dirección y coordinación llevadas a cabo por el responsable ejecutivo y por los responsables de área deberían estar sometidas a una continua revisión externa, sobre todo de carácter científico, que asegurase que la metodología aplicada y la marcha general del programa tuviese una sólida y rigurosa base científica. Esta revisión y a la vez asesoría podría ser realizada por un comité rector (*steering committee*) o por un comité asesor (*scientific advisory committee*), constituidos por personas de reconocido prestigio internacional en el tema, que emitirían un informe anual sobre la marcha del proyecto y harían recomendaciones conducentes a su mejora. El responsable ejecutivo debería rendir cuentas sobre la marcha del programa con periodicidad anual al comité asesor.

Finalmente, un programa de la magnitud del que aquí se presenta precisa una adecuada estructura de generación y distribución de la información. Independientemente de que las diferentes líneas de trabajo puedan producir trabajos académicos (tesinas, tesis) o publicaciones en el circuito habitual de revistas científicas, es esencial la generación de un sistema coordinado de informes de dominio público, a diferentes niveles de detalle, que proporcionen una visión panorámica de la marcha del programa. Esto implica la producción de informes anuales que describan la evolución del programa (*annual progress reports*) y de informes finales que se emitirían aproximadamente cada 4 años (con tendencia a coincidir con los ritmos de los informes del IPCC). Tanto los informes anuales como los finales deberían realizarse tanto en versión detallada como resumida. Los primeros incluirían todo tipo de detalles técnicos y los segundos serían versiones abreviadas dirigidas fundamentalmente a los responsables de la toma de decisiones.

## 4.- Descripción metodológica

### 4.1.- Modelos de Circulación General

La herramienta más importante para explorar la posible evolución futura del clima en escenarios de cambio de las concentraciones de gases de efecto invernadero son los Modelos de Circulación General del Océano y la Atmósfera (AOGCM, del inglés *Atmosphere-Ocean General Circulation Models*). Los AOGCM resuelven numéricamente las ecuaciones matemáticas fundamentales que describen la física y dinámica de los movimientos y procesos que tienen lugar en la atmósfera, el océano, el hielo y la superficie terrestre. Al contrario que los modelos utilizados en otras ramas de la ciencia, si bien incluyen relaciones empíricas, no descansan sobremanera en el uso de las mismas, sino en el planteamiento de las leyes físicas del sistema. Los AOGCMs resuelven las ecuaciones del movimiento de los fluidos (Navier-Stokes), ecuación de continuidad (conservación de masa), termodinámica (conservación de energía) y ecuación de estado. Las variables (p. e., presión, temperatura, velocidad, humedad atmosférica, salinidad oceánica) necesarias para describir el estado de los sistemas se proporcionan en una red de puntos que cubre el globo, habitualmente con una resolución horizontal para la atmósfera entre 100 y 300 km, y aproximadamente el doble de resolución (la mitad del tamaño de la malla) para el océano, con el fin de poder resolver la dinámica de corrientes oceánicas. En ambos casos la resolución vertical suele ser de unos 20 niveles. Esta separación de puntos de red está limitada con frecuencia por la disponibilidad de recursos computacionales.

Dada la limitada resolución espacial, los modelos climáticos deben contener una representación de los procesos físicos que no pueden ser explícitamente resueltos por el modelo. Estos se incluyen mediante *parametrizaciones* (algoritmos relativamente sencillos de cálculo paso a paso que permite evaluar variables a escala espacial inferior a la de resolución). Este es el caso de los procesos de cambio de fase (evaporación, condensación, formación de nubes), el intercambio radiativo (absorción, emisión y reflexión de radiación solar), procesos convectivos en escalas inferiores a la de resolución, cambios en vegetación, albedo, cubierta de hielo, etc.

La mayor parte de las ecuaciones en los AOGCMs son ecuaciones diferenciales, para la tasa de cambio de una cantidad, p. e., la velocidad del fluido, de tal forma que si es conocido su valor en un determinado instante, puede evaluarse el correspondiente en un instante posterior a través de la integración de las ecuaciones apropiadas. Por tanto, los AOGCMs tienen una orientación predictiva y permiten obtener soluciones de las ecuaciones, i. e. simulaciones climáticas, a partir de un estado inicial del sistema (condiciones iniciales).

El potencial de los AOGCMs reside en que permiten agrupar los efectos de un alto número de procesos físicos y dinámicos de los distintos subsistemas climáticos, no lineales en esencia y con múltiples interacciones, que serían muy difíciles de analizar de otro modo. En la realización de experimentos de cambio climático se suelen hacer integraciones de estos modelos en los que no se alteran las condiciones de contorno o forzamiento externo (solar, volcánico, cubierta vegetal, concentraciones de gases de efecto invernadero). Estos ejercicios reciben el nombre de simulaciones de control y constituyen estados climáticos de referencia con los cuales se comparan los resultados de simulaciones con perturbación externa o de cambio climático. En las simulaciones de

cambio climático, la concentración de gases de efecto invernadero va aumentando de forma gradual de acuerdo con futuros escenarios preestablecidos (IPCC-SRES). Estas simulaciones pueden compararse con las de control para hacer evaluaciones de los cambios esperables en el clima medio y sus extremos en distintas escalas espaciales. En sentido estricto, por tanto, estas simulaciones no son predicciones sino que constituyen estados climáticos compatibles con el forzamiento externo que se aplica al modelo. Desde otro punto de vista indicarían la previsible evolución del clima (global, hemisférico, gran escala...) en un sentido estadístico (clima medio y extremos) condicionada a la suposiciones adoptadas en cuanto a la evolución de los factores de forzamiento externo y las propias características del modelo.

La comparación de simulaciones globales con observaciones sugiere que los modelos son bastante fiables en la reproducción de las características del clima a gran escala, p. e. la célula de Hadley, la circulación en latitudes medias, etc. Ahora bien, el realismo a escala regional es limitado y, de hecho, distintos modelos ofrecen considerables diferencias a escala regional en simulaciones con el mismo forzamiento externo. Hay varias razones para explicar las desviaciones de los modelos en la escala regional, entre las cuales podemos citar: la limitada resolución espacial que impone una descripción inadecuada de la topografía, distribución tierra-océano suavizada, la truncación numérica en la resolución de las ecuaciones diferenciales que obliga a parametrizar, utilizando diferentes algoritmos, los procesos en escalas espaciales inferiores a la resolución, el carácter global de las parametrizaciones que pueden no ser apropiadas para distintas zonas del globo, etc.

El clima global es la respuesta a las estructuras a gran escala en la superficie de la Tierra (distribución tierra-océano, topografía, etc.) y el calentamiento diferencial para diferentes latitudes y épocas del año. Los climas regionales, por otro lado, representan el resultado de la interacción del clima a gran escala con los detalles a escala regional. Por tanto, es posible simular el clima global adecuadamente aunque los detalles regionales no se simulen de modo totalmente realista. De hecho, esta dependencia por parte del clima regional de los factores a gran escala es precisamente el mecanismo que se explota en modelización regional para deducir el clima en estas escalas a partir de las simulaciones proporcionadas por los AOGCMs.

#### **4.2.- Regionalización de las proyecciones realizadas con modelos globales**

La modelización a escala regional surge de la motivación de solventar estas limitaciones en los AOGCM y entender mejor los procesos que contribuyen a la variabilidad climática regional así como la necesidad de evaluar los cambios que se pueden producir en estas escalas espaciales en el contexto de la predicción meteorológica, estacional, anual, decadal y secular. La demanda más importante se encuentra en estos momentos en la necesidad de disponer de información de alta resolución espacial y temporal para estudios de impacto y diseño de políticas de adaptación al cambio climático.

Las proyecciones climáticas realizadas con modelos globales para diferentes escenarios de emisión carecen de la suficiente resolución espacial que demandan la mayoría de los usuarios para los estudios de impacto y adaptación al cambio climático. Para acomodar

las proyecciones globales, con resoluciones espaciales del orden de 200-300 km, a las características regionales o incluso locales se utilizan diferentes técnicas de regionalización o reducción de escala (*downscaling*). Estas técnicas adaptan las salidas de los modelos globales a las características fisiográficas de una determinada región vistas con una resolución apta para ser directamente utilizada por las distintas aplicaciones que tienen como datos de entrada las proyecciones climáticas (bien en rejillas regulares o en las posiciones de los observatorios) (Wilby y Wigley, 1997) . Algunas instituciones utilizan la alternativa del doble anidado en la que se realizan, como paso intermedio previo a la regionalización, simulaciones globales con un modelo atmosférico de mayor resolución (aprox. entre 100 y 150 km). Este enfoque (Hulme et al., 2002), si bien recomendable, introduce aumentos considerables en los requerimientos computacionales.

Todas las técnicas de regionalización parten de las proyecciones suministradas por los AOGCMs a los que dotan de detalles de escala más pequeña asociados con información adicional de orografía, fisiografía, etc. En consecuencia, las proyecciones regionalizadas heredan todos los defectos y debilidades de los modelos “padre” globales. Si el modelo global simula incorrectamente aspectos de la variabilidad a gran escala relevantes para el clima regional/local, carece de sentido regionalizar proyecciones climáticas realizadas con el mismo. Ahora bien, si la simulación de la variabilidad climática natural es aceptable, entonces tiene sentido trasladar la información de los patrones globales a información local. Es importante tener también en cuenta que debido a que la variabilidad natural es mayor en las escalas regionales y locales que en la gran escala, las proyecciones de cambio climático en escalas regionales estarán sometidas forzosamente a más incertidumbre que las de los AOGCMs. Esta limitación de las técnicas de regionalización debe tenerse siempre presente. Los AOGCMs proporcionan las proyecciones climáticas a gran escala y las técnicas de regionalización introducen los detalles en las escalas no resueltas por la rejilla de los modelos globales. En este proceso se incluye información relevante que permite aumentar la resolución de las proyecciones climáticas, incorporando relaciones entre variables a más resolución que la proporcionada por los AOGCMs o resolviendo procesos físicos en estas escalas, ahora bien, se incluyen también incertidumbres adicionales que hay que estimar.

Existen diferentes técnicas que implican un muy distinto nivel de complejidad pero que se pueden agrupar en dos grandes categorías: (i) regionalización dinámica y (ii) regionalización estadística. Ambas técnicas de regionalización se conocen y se han aplicado desde los años 70 y 80 del siglo pasado en la predicción numérica del tiempo mediante el uso muy extendido de modelos atmosféricos de área limitada y de técnicas de adaptación estadística basadas en relaciones empíricas entre variables, tales como el MOS (Model Output Statistics) y el Perfect Prog (Perfect Prognosis). Aunque estas técnicas se han aplicado en distintas escalas temporales (por ejemplo en la predicción a corto plazo), las aplicaciones de cambio climático requieren de modelos estadísticos y modelos de área limitada que tengan en cuenta los procesos de escala interanual.

Las técnicas de regionalización dinámica, que se basan en el uso de modelos regionales o de área limitada (RCM, del inglés *Regional Climate Model*), tienen la ventaja de ser físicamente consistentes y la desventaja de necesitar un gran volumen de cálculo. Las técnicas de regionalización estadística agrupan multitud de algoritmos entre los que se incluyen los métodos de clasificación, los modelos de regresión y los generadores de tiempo (IPCC, 2001). Las técnicas estadísticas se basan en relaciones cuantitativas entre

variables atmosféricas de gran escala (predictores) y las variables locales de superficie (predictandos), usualmente precipitación y temperatura máxima y mínima. Las técnicas estadísticas son relativamente simples y normalmente requieren poco cálculo, aunque los nuevos métodos no lineales desarrollados recientemente se basan en costosos algoritmos de optimización no lineal y requieren un tiempo mayor de cómputo. La regionalización estadística se basa en la hipótesis de que las relaciones establecidas entre los predictores y predictandos son invariables frente al cambio en el clima; ésta es una desventaja de este tipo de técnicas frente a los modelos dinámicos. Aunque existen multitud de técnicas de tipo estadístico, que proporcionan resultados diferentes, no es posible determinar cual de ellas es la mejor, pues ninguna de ellas es superior al resto en todas las regiones y para todas las variables, tal y como aparece en las conclusiones del proyecto STARDEX (del 5º programa marco financiado por la UE, 2002 - 2005). Un problema similar se presenta en los RCMs en lo que respecta al uso de distintas parametrizaciones físicas.

El procedimiento arriba esbozado para generar proyecciones climáticas regionales/locales, basado en AOGCMs que suministran información bien sea en forma de condiciones de contorno para modelos regionales o bien en forma de predictores (basados en las variables atmosféricas a gran escala) para las técnicas empíricas, no permite incluir las posibles retroalimentaciones de las escalas regionales/locales en las escalas globales. Estas posibles retroalimentaciones podrían tratarse, por ejemplo, utilizando modelos anidados con flujo de información en los dos sentidos (*two-way nesting*, en inglés) o modelos globales con rejilla variable. El procedimiento basado en el anidado en dos sentidos requiere que las integraciones de ambos modelos, global y regional, se realicen simultáneamente. Esta limitación es muy restrictiva desde el punto de vista operativo, y muy poco habitual incluso para predicciones a corto plazo. La otra alternativa basada en el uso de modelos globales con rejilla variable presenta otros problemas asociados con las posibles opciones de parametrización de los procesos físicos, que en principio son dependientes de la resolución de los modelos. Una alternativa interesante en este contexto es la realización de experimentos de sensibilidad del clima a gran escala a cambios en las condiciones locales que pueden imponerse a través de cambios en alguna parametrización, cambios repentinos en la cubierta vegetal o usos de suelo, etc. Este tipo de estudios se conocen con frecuencia como de *upscaling* y permiten estudiar la influencia de cambios a escala local/regional en el clima a gran escala. Un ejemplo interesante lo constituye la válvula salina de los flujos a través del Estrecho de Gibraltar

Un tema igualmente importante, y con frecuencia relacionado con el anterior por su carácter frecuentemente local, es el de los posibles procesos umbral (*tipping points*) que, si bien representan escenarios de baja probabilidad en el siglo XXI, son procesos plausibles que se deben tener en cuenta. Además del ya mencionado ejemplo relacionado con el estudio del papel de válvula salina en el Estrecho de Gibraltar, se puede mencionar también los cambios en la circulación termohalina en el Atlántico Norte (Schellnhuber and Held, 2002).

#### **4.3.- Incertidumbres que afectan al proceso**

La obtención de proyecciones regionales de cambio climático está sujeta a multitud de incertidumbres que afectan a todos los pasos del proceso, desde el establecimiento de

escenarios de posible evolución del forzamiento radiativo hasta la simulación a escala regional. Estas incertidumbres se pueden describir por tanto en forma jerárquica o de cascada (Mitchell y Hulme, 1999):

- En el vértice de las incertidumbres se sitúan los escenarios de emisión, que se basan en consideraciones de tipo socio-económico inciertas (demografía, fuentes disponibles y consumo futuro de energía, etc.). Para abarcar las diferentes alternativas de evolución ligadas a la actividad socio-económica, a la demografía, a las opciones energéticas y tecnológicas, etc. se utiliza una colección de escenarios de evolución (SRES) propuestos por el IPCC. Adicionalmente se deben de considerar otras incertidumbres relativas a los forzamientos externos no predecibles, como la evolución temporal de la actividad solar o volcánica.
- A las incertidumbres sobre la evolución futura de las emisiones hay que añadir las asociadas a cómo éstas afectan a las concentraciones de gases de efecto invernadero, puesto que no se conoce exactamente el destino de las emisiones o lo que es lo mismo no se conoce plenamente el ciclo del carbono. Este es un punto muy importante, porque algunos procesos implicados en el ciclo del carbono (equilibrio oceánico del dióxido de carbono, por ejemplo) son dependientes de la temperatura, que, a su vez, es sensible a las concentraciones de dióxido de carbono. Por otro lado, las mismas herramientas utilizadas para generar las proyecciones climáticas, es decir los modelos acoplados atmósfera océano de circulación general muestran en su nivel actual de desarrollo también muchas incertidumbres. Los diferentes AOGCMs son distintas formulaciones de las ecuaciones que describen los distintos componentes del sistema climático, considerando distintas mallas, resoluciones, esquemas numéricos, parametrizaciones de procesos físicos, etc. Las simulaciones de cambio climático producidas con distintos AOGCMs en los mismos escenarios de cambio climático muestran una considerable dispersión, reflejando distintas representaciones de la sensibilidad del clima a cambios en el forzamiento externo (sensibilidad climática), y por lo tanto un alto nivel de incertidumbre, que depende altamente de las regiones, estaciones, variables, etc. Los procesos mismos simulados por los AOGCMs incluyen incertidumbres. De hecho la modelización del sistema climático ha ido añadiendo complejidad y subsistemas adicionales con el paso de los años. Por ejemplo, gran parte de las simulaciones realizadas en los últimos años suponían que la vegetación era constante en el tiempo y permanecía invariable en simulaciones seculares de cambio climático antropogénico. En la realidad, la vegetación lógicamente depende de las condiciones climáticas cambiantes, tiene capacidad para afectar al clima, y como tal debe simularse.
- Las distintas técnicas de regionalización (estadísticas y dinámicas) contribuyen a la incertidumbre con fuentes de error adicionales. Los métodos estadísticos sufren, en su capacidad predictiva, limitaciones específicas a cada metodología y a los dominios espaciales y temporales considerados en cada estudio. Los RCMs añaden fuentes de error similares a las de los AOGCMs con los que son forzados y algunas específicas a la simulación a escala regional. La incertidumbre en el forzamiento radiativo asociada a la distribución espacio temporal de aerosoles tiene una relevancia especial a escala regional debido a la heterogeneidad del

forzamiento y la respuesta. Otro aspecto que incide de forma importante en estas escalas son las variaciones en usos de suelo y el realismo en los modelos de suelo. La evaluación de incertidumbres a escala regional se complica adicionalmente por la baja relación de la señal de respuesta frente a la variabilidad climática interna. Este es especialmente el caso de variables, como la precipitación, no directamente relacionadas con el forzamiento externo. Los modelos de impacto en los diferentes sectores sensibles a las condiciones climáticas (p.e., sector hidrológico, agrícola, energético, etc.) añaden fuentes adicionales de incertidumbre que hay que estimar y acotar a la hora de determinar los impactos.

En consecuencia, y a la vista de la gran cantidad de incertidumbres que existen en el proceso de generación de escenarios climáticos regionalizados, se intenta utilizar metodologías que permitan estimar las incertidumbres asociadas a cada paso de los arriba mencionados. Debido a la dificultad de este proceso, la evaluación de incertidumbres asociadas a las proyecciones de cambio climático se lleva a cabo con una aproximación probabilística en la que se explora un conjunto representativo de métodos, modelos, emisiones, etc. (métodos de predicción por conjuntos). Por ejemplo, la incertidumbre asociada a la variabilidad interna del sistema se puede acotar creando conjuntos de simulaciones con distintas condiciones iniciales. Las incertidumbres asociadas a aspectos del diseño estructural de los modelos (discretización de las ecuaciones, resolución espacial, suposiciones físicas en las que se basan las parametrizaciones, etc.) pueden tratarse realizando conjuntos de simulaciones con diferentes modelos, esquemas de parametrizaciones, etc. Las simulaciones en distintos escenarios de cambio climático intentan abarcar en este contexto distintas posibilidades de evolución del forzamiento radiativo. A todo lo anterior hay que añadir la limitada extensión temporal y aspectos de calidad de las bases de datos observacionales tanto atmosféricos como oceanográficos. Esta incertidumbre observacional cobra un papel relevante en el contexto de validación de modelos climáticos.

Esta metodología de predicción por conjuntos, que se ha impuesto en la última década para la predicción probabilística, es la que se pretende adoptar en este programa. El referente internacional actual de este tipo de aproximación probabilística al cambio climático lo constituye el proyecto integrado ENSEMBLES (del 6º programa marco financiado por la UE) que se desarrolla entre los años 2005-2009, y que tiene entre otros objetivos el de acotar las incertidumbres en las predicciones seculares de cambio climático mediante integraciones con diferentes escenarios de emisión, diferentes modelos globales, diferentes modelos regionales y diferentes técnicas estadísticas de regionalización, proporcionando también métodos de pesado y de combinación (por ejemplo métodos estadísticos Bayesianos) para aglutinar los distintos resultados individuales en una única predicción probabilística de consenso, más robusta que las basadas en un único modelo global y en una única técnica de regionalización.

El programa que se propone para la regionalización de escenarios de cambio climático en España tiene una aproximación metodológica paralela a este proyecto, aprovechando los productos y avances que se logren en él y haciendo énfasis en las necesidades específicas que se tienen en nuestra geografía y que no serán suficientemente exploradas en ENSEMBLES (la conexión entre estos dos programas estará garantizada por la presencia de grupos nacionales en ambos, identificados en este documento).

La tarea de construcción de escenarios probabilísticos a partir de los conjuntos de predicciones requiere el desarrollo de técnicas de combinación apropiadas que tengan en cuenta la bondad de los distintos modelos para reproducir el clima de referencia en distintas regiones y para distintas variables. Este problema constituye un área de investigación activa y se han propuesto varias técnicas que se están explorando en distintos proyectos: técnicas Bayesianas, métodos de escalado espacial, etc. Sin embargo, hasta la fecha existen pocos ejemplos operativos de construcción de escenarios probabilísticos regionales de cambio climático basados en estas técnicas. Por tanto, será necesario dedicar un esfuerzo investigador y de desarrollo en el programa para probar las técnicas existentes y tratar de desarrollar nuevas metodologías óptimas para la variabilidad climática de nuestra geografía.

Finalmente, conviene mencionar que aunque la predicción por conjuntos proporciona un amplio rango de posibilidades de evolución del sistema que puede estudiarse desde un punto de vista probabilístico, no explora necesariamente todas las fuentes posibles de incertidumbre. Este es el caso de incertidumbres estructurales como las referidas a retroalimentaciones en el ciclo del carbono y la influencia del acoplamiento océano-atmósfera en las mismas o el hecho de que todos los AOGCMs comparten similares limitaciones en la resolución espacial (lo que constituye también una fuente de sesgo común al conjunto de simulaciones). Este tipo de dificultades constituye un problema de intensa discusión en el tratamiento integral de incertidumbres, que tiende a mitigarse cada vez más con el uso de aproximaciones bayesianas en vez de las tradicionales frecuentistas.

De todo lo anteriormente expuesto, se deduce la gran complejidad y magnitud de la tarea de estimar proyecciones de cambio climático regionalizadas. No obstante, no debe sacarse la errónea conclusión de que nos encontramos frente a un problema en el que predomina la falta de conocimiento y en el que las incertidumbres no nos permiten extraer conclusiones útiles para planificar nuestro futuro.

## **5.- Líneas de actuación propuestas para el programa coordinado**

En esta sección se recogen las distintas líneas de actuación propuestas para el programa coordinado. La línea 5.1 se refiere principalmente a la base de datos y a la puesta a disposición de los escenarios combinados obtenidos por distintas vías. Las líneas 5.2, 5.3 y 5.4 tienen que ver fundamentalmente con la información suministrada por los AOGCMs y con evaluación y contextualización de las proyecciones de cambio climático en relación con el clima actual y el pasado reciente. Las líneas 5.5, 5.6 y 5.7 se refieren a la generación de escenarios regionalizados utilizando técnicas estadísticas y dinámicas, tal y como se describe más abajo.

Las líneas de actuación propuestas pueden contener un cierto solapamiento, por lo que es esencial la existencia de una fuerte estructura de coordinación que asegure que todas las tareas son adecuadamente desarrolladas.

### **5.1.- Bases de datos. Acceso y distribución de información vía web. Escenarios combinados y orientaciones de uso.**

Tanto el proceso de generación de escenarios regionalizados como el acceso por parte de los usuarios de la comunidad de impactos precisan de una base de datos convenientemente organizada, que deberá incluir al menos:

- (i) Datos climáticos de observación;
- (ii) Extracciones, en una región suficientemente amplia, de salidas de los diferentes AOGCMs;
- (iii) Datos de salida de escenarios regionalizados.

Los datos observacionales son esenciales tanto en posibles estudios de detección y atribución del cambio climático como para temas de regionalización estadística y de validación (estadística o dinámica). La principal fuente de datos atmosféricos observacionales disponible y con cobertura nacional es la base de datos climáticos del INM. El subconjunto de datos que se utilicen para este programa deberá ser fácilmente accesibles (p. e. vía web) a la comunidad de investigadores.

La base de datos deberá incorporar también extracciones, en una región suficientemente amplia, de salidas de los diferentes AOGCMs que permitan la comparación/validación con períodos de interés (p. e., siglo XX para variables en superficie, período de reanálisis para variables en altura) así como el análisis de las proyecciones climáticas para el siglo XXI. La base de datos debería contener datos de alta resolución espacio-temporal en el período de *reanálisis*; es recomendable la inclusión de series instrumentales largas de calidad contrastada y, en la medida de lo posible reconstrucciones paleoclimáticas locales y regionales que puedan utilizarse en estudios de validación. La base de datos deberá contener los parámetros, niveles y frecuencia temporal necesaria para poder aplicar técnicas de regionalización estadística y dinámica. En términos generales, las necesidades para la regionalización estadística se refieren a unas pocas decenas de campos con al menos resolución diaria, mientras que las necesidades para la regionalización dinámica precisan de un gran volumen de datos correspondientes a las condiciones de contorno que necesiten los modelos regionales del

clima. En este caso se precisa, al menos, datos cada seis horas. Hay que considerar que el repositorio de integraciones globales para el AR4 (<http://esg.llnl.gov:8443/index.jsp>) no alberga los resultados de todos los modelos con la frecuencia o niveles verticales necesarios para emprender estudios de *downscaling* dinámico. Sería necesario contactar con las instituciones que no ofertan los datos de las simulaciones con alta frecuencia temporal también para esos modelos. Para ello, una institución coordinadora tendría que facilitar a la comunidad de investigadores participantes (bajo los necesarios requisitos de confidencialidad y seguridad) acceso a estos datos externos.

El acceso externo a los datos, tanto observacionales como de AOGCMs, deberá ser proporcionado por una interfaz web ágil y flexible que podría ser mantenida por el INM. Los datos calculados de escenarios regionalizados estarán disponibles en la misma página web para los distintos usuarios de la comunidad de impactos.

## **5.2.- Tendencias del clima reciente y validación de modelos en periodos observacionales.**

La comparación de simulaciones con AOGCMs y observaciones climáticas es necesaria para interpretar en el contexto adecuado las proyecciones de cambio climático futuro y para validar los modelos climáticos globales y regionales (ver subsecciones 5.4 y 5.5) que contribuirán a una caracterización más adecuada de las incertidumbres. Asimismo, el análisis climático de bases de datos observacionales es también importante en estudios de desarrollo que aporten nueva información en las futuras revisiones de este programa de escenarios.

El análisis de series instrumentales y reconstrucciones climáticas puede contribuir notablemente al desarrollo y mejora del programa. Desde una perspectiva general se puede afirmar que la mayoría de los trabajos orientados al análisis de la variabilidad climática proporcionan resultados útiles para la interpretación de escenarios climáticos regionalizados.

Para evaluar la magnitud de cambio de las proyecciones de clima futuro y lo inusual del clima presente es necesario comparar éste con la historia climática pasada. La existencia de registros instrumentales se limita aproximadamente a los últimos 150 años, de los cuales, los últimos 50 ofrecen una razonable cobertura espacial sobre el Globo para el análisis de variabilidad climática. A escala regional en la Península Ibérica la situación es similar. La segunda mitad del siglo XX ofrece la mejor resolución temporal y espacial y a medida que retrocedemos en el tiempo la densidad espacial y calidad de los registros disminuye hasta lo meramente testimonial en el siglo XVIII y principios del XIX. La evidencia climática más allá de este límite reside en datos *proxy* que permiten desarrollar reconstrucciones del clima pasado. Estas fuentes en la Península Ibérica son, sobre todo, de carácter documental, si bien existen aportaciones muy significativas de *proxies* naturales biológicos y geológicos (dendrocronología, registros sedimentarios).

La comparación entre las simulaciones climáticas y las fuentes de datos observacionales (instrumentales y reconstrucciones climáticas) permitirá no sólo posicionar en la perspectiva climática adecuada el cambio climático futuro y la evolución presente del clima (p.e., en ejercicios de detección y atribución), sino también la validación de modelos climáticos globales y regionales y la evaluación de incertidumbres. Este tipo de

estudios permitirá: (i) la comparación a escala decenal de observaciones/simulaciones en un período instrumental de referencia con buena cobertura de datos instrumentales y de reanálisis; (ii) evaluar a escala entre decenal y secular, mediante la explotación de las bases de datos instrumentales en toda su longitud temporal, la capacidad de modelos climáticos globales y regionales de reproducir las tendencias en el clima medio y extremos a lo largo del siglo XX; (iii) comparar los resultados de modelos regionales y globales a escala secular con reconstrucciones climáticas a escala regional y local (p.e., desde 1500 AD hasta la actualidad) para evaluar la capacidad de los modelos climáticos de reproducir la evolución climática en estados climáticos diferentes al del siglo XX y dilucidar así su capacidad de reproducir estados climáticos futuros de forma realista. En este tipo de ejercicios, forzamiento externo, simulaciones y reconstrucciones están sometidos a incertidumbres de distinto tipo y su comparación es un ejercicio en el que se intentan acotar los posibles valores de la sensibilidad climática.

Este tipo de estudios permite también la validación de AOGCMs en condiciones climáticas diferentes a los de su diseño y validación habitual a través de la simulación de episodios climáticos pasados y en los que se compara la evidencia climática a partir de *proxies* con la simulación de modelos climáticos, p.e., el óptimo del Holoceno (hace aproximadamente 6000 años), el último máximo glacial (hace unos 21 000 años) o el máximo interglacial (hace unos 125 000 años). Este tipo de trabajos se está desarrollando en el contexto de los proyectos PMIP y PMIP2 (Paleoclimate Modeling Intercomparison Project) y están orientados tanto a la validación de modelos climáticos como a la comprensión de los mecanismos climáticos que operaron en épocas específicas.

En el contexto nacional existe actividad<sup>7</sup> en análisis y/o *downscaling* de AOGCMs, familiarizados con la interpretación de las simulaciones climáticas y su validación, que pueden acometer los trabajos arriba mencionados de validación. Adicionalmente, ofrecen potencial de participación grupos que han desarrollado su actividad en el ámbito del análisis de variabilidad climática y que pueden integrarse en estas tareas. Existen también simulaciones paleoclimáticas para la Península Ibérica que cubren el período temporal desde 1500 AD hasta la actualidad y continúan hasta 2100 AD bajo escenarios de cambio climático futuro. Estas simulaciones ofrecen la posibilidad de comparar reconstrucciones climáticas y observaciones instrumentales con las simulaciones de un modelo climático regional que se utiliza para realizar proyecciones de cambio climático futuro.

### **5.3.- Detección y atribución del cambio climático.**

Los estudios de detección y atribución tienen una orientación diferente aunque a menudo se presentan unidos. La detección del cambio climático es el proceso de demostración de que el clima ha cambiado en algún sentido estadístico, sin proporcionar razón alguna para ese cambio. Los estudios de atribución de cambio climático establecen las causas más probables para el cambio detectado de acuerdo a determinados niveles de significación preestablecidos. La atribución causal inequívoca es imposible en tanto en cuanto requeriría una experimentación controlada con el sistema climático. En un sentido práctico, se entiende por atribución del cambio

---

<sup>7</sup> El lector puede consultar estudios referidos a las actividades en España sobre las líneas mencionadas en la Sección 5, por ejemplo, en los textos Lionello et al. (2006) e Informe CLIVAR-es (2006).

climático: (a) una fase inicial de detección; (b) demostración de que el cambio climático detectado es consistente con simulaciones climáticas en escenarios de aumento de gases de efecto invernadero y (c) demostración de que los cambios detectados no son compatibles con otros mecanismos físicos relativamente conocidos (actividad solar, volcánica, variabilidad interna océano-atmósfera, etc.) y no relacionadas con la actividad humana.

Tanto la detección como la atribución se fundamentan en el uso de datos observados (instrumentales y reconstrucciones climáticas) y simulaciones climáticas. Las simulaciones de control (sin cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero) proporcionan información valiosa sobre la variabilidad interna del sistema en escalas decenales a seculares, información que se puede extraer también de series instrumentales largas y reconstrucciones climáticas. La detección involucra la identificación de tránsitos climáticos que se destacan estadísticamente en el contexto de la variabilidad natural observada y/o simulada. La atribución por el contrario, involucra la salida de simulaciones de cambio climático que incorporen la evolución histórica de forzamientos naturales (variabilidad solar, volcánica, vegetación) y humanos (gases de efecto invernadero, aerosoles), que permita contrastar y en su caso rechazar la hipótesis nula de que la variabilidad observada es consistente con cambios en factores de forzamiento externo naturales y variabilidad interna del sistema.

Este tipo de estudios son muy escasos en España. A escala internacional se han desarrollado numerosas aplicaciones en el terreno de detección y atribución a escala global, hemisférica y regional (Houghton et al., 2001; von Storch y Zwiers, 1999). Este tipo de estudios serían beneficiosos para el programa y podrían potenciarse con carácter de estudios de desarrollo. La disponibilidad de bases de datos largas y de calidad y reconstrucciones climáticas es fundamental. Existen grupos ya familiarizados con las técnicas estadísticas necesarias y se dispone también de bases de datos y simulaciones climáticas regionales que permitirían abordar este tipo de estudios. Su realización podría ser importante para dilucidar el carácter inminente del cambio climático y los impactos asociados. En los estudios de impactos en ecosistemas naturales y sociales se podría disponer de información sobre el carácter anómalo/normal del clima actual en la región de interés que sería útil de cara a la toma de decisiones en regiones sensibles. El propio desarrollo de este tipo de estudios supone un análisis comparativo de bases de datos y simulaciones climáticas que contribuiría también a desarrollar los sistemas de *downscaling*.

#### **5.4.- Modelos globales. Validación.**

Los resultados de los modelos globales que contribuyen al IPCC, y que se revisan periódicamente en los informes de evaluación, son la fuente primaria de información para cualquier estudio de regionalización de escenarios de cambio climático. Estos modelos globales deberán ser analizados y evaluados regionalmente en periodos observacionales de referencia para determinar el nivel de reproducibilidad por parte de cada uno de los modelos del clima actual y del clima pasado en la Península y en las Islas Baleares y Canarias.

Los grandes proyectos internacionales (Atmospheric Model Intercomparison Project (AMIC) y Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) (véase <http://www->

[pcmdi.llnl.gov/projects/amip/](http://pcmdi.llnl.gov/projects/amip/)) realizan fundamentalmente evaluaciones globales de los AOGCM, promediados sobre grandes zonas del globo (p.e., Norte y Sur de Europa, etc.). Sin embargo, la evaluación de los modelos globales a escala regional es escasa e insuficiente. Esta tarea deberá ser prioritaria para cualquier proyecto de escenarios regionalizados de cambio climático, ya que las proyecciones a gran escala suministradas por los diferentes AOGCMs constituyen el elemento básico de cualquier estimación regional. La forma en la que los AOGCMs recogen las características y peculiaridades del clima regional pasado, presente y futuro se debe abordar desde diferentes puntos de vista, todos ellos complementarios.

En primer lugar, se deben seleccionar entre los distintos AOGCMs disponibles aquellos que mejor representen las características climáticas de nuestra región de interés al menos considerando un periodo de referencia incluido en los reanálisis ERA-40 y NCEP. La selección de los distintos AOGCMs deberá basarse: (a) en los índices de verificación (anual, estacional y mensual) estándar (PDFs, percentiles, sesgo, kurtosis, estadísticos de error, etc.) de las variables habituales (precipitación, temperaturas máxima y mínima) en un periodo observacional de referencia y en la región de interés; (b) en la evaluación de la variabilidad atmosférica en diferentes escalas temporales, en particular en las escalas de baja frecuencia que influyen en la variación del clima.

Una vez realizada la selección de estos modelos, se procedería al estudio y comparación de las proyecciones climáticas suministradas por cada uno de ellos para diferentes escenarios de emisión sobre la región de interés. Asimismo, se evaluarían los cambios en los patrones espaciales de teleconexión que explicarían las diferencias climáticas con el periodo de referencia y las diferencias entre las distintas proyecciones de los diferentes AOGCMs.

Diferentes grupos han realizado estudios de variabilidad a diferentes escalas tanto a partir de reanálisis como de proyecciones de modelos climáticos y estarían bien preparados para abordar un estudio sistemático de los diferentes AOGCMs en la zona de interés.

La utilización de escenarios combinados, es un campo novedoso en las escalas temporales asociadas a los cambios climáticos. En el corto y sobre todo en el medio plazo existe una cierta experiencia, en muchos casos muy básica, de utilización equiprobable de todos los miembros de un “ensemble”. Los intentos de asignar un peso específico a cada miembro en función de su credibilidad normalmente asociada a los errores de predicciones previas constituyen un campo activo de investigación. En un escenario de mínimos, se podrían considerar dos escenarios de emisión y cuatro AOGCMs (y posteriormente cuatro métodos de regionalización). En este supuesto, se generarían ocho (y posteriormente 32) escenarios regionalizados que habría que suministrar a los usuarios en forma comprensible. La forma inmediata es el promediado de los miembros, considerándolos equiprobables. Sin embargo, esta utilización enmascara ciertas características de algunas variables y sobre todo tiende a suavizar extremos, conocimiento que resulta esencial en muchos casos. Se pueden ensayar también técnicas de agrupamiento a fin de proporcionar unos pocos escenarios regionalizados tipo (3-5) que sean más manejables por los usuarios de impactos. Finalmente, se puede relajar la hipótesis de equiprobabilidad y asignar un peso a los diferentes miembros.

Como ya se ha comentado, este tema novedoso de la asignación de pesos a los diferentes miembros está siendo objeto de investigación en el proyecto ENSEMBLES, y sería muy conveniente seguir la estela de sus trabajos y resultados.

La generación de una colección de escenarios regionalizados provenientes básicamente de la utilización de distintas hipótesis de emisión, de distintos GCM y de distintas técnicas de *downscaling* plantea la necesidad de informar al usuario en cuanto a su uso para que pueda extraer el máximo de información relativa a las incertidumbres de las proyecciones regionalizadas.

### **5.5.- Modelos climáticos regionales. Validación.**

El método de regionalización que utiliza la integración de modelos climáticos regionales (RCMs) forzados con condiciones de contorno suministradas por AOGCMs, requiere equipos con experiencia en modelización, incluyendo tanto la operación como el desarrollo y perfeccionamiento de los modelos.

La obtención de nuevas proyecciones climáticas con modelos climáticos regionales se debería coordinar en lo posible con los escenarios que se van a obtener en el proyecto europeo ENSEMBLES, teniendo en cuenta los resultados y experiencias adquiridos en el proyecto PRUDENCE (véase Anexo I). El proyecto ENSEMBLES, a pesar de su gran magnitud, no cubrirá todas las posibilidades de interés para España. Por ello, será de gran utilidad realizar nuevas simulaciones climáticas regionales en el marco del presente programa. Primeramente, estas nuevas simulaciones deben cubrir combinaciones de escenarios de emisiones y modelos globales no incluidas en ENSEMBLES. De cara a evaluar la incertidumbre debida a las diferencias entre modelos climáticos regionales, que como se ha visto en el proyecto europeo PRUDENCE puede ser importante, se pueden obtener conjuntos de simulaciones con los modelos regionales disponibles, para la misma combinación de escenarios de emisiones y modelos globales. Esto se realizaría para las combinaciones de escenarios de emisiones y modelos globales de mayor interés. Por otro lado, se pueden obtener escenarios con resolución horizontal superior a 25 km, así como escenarios para las Islas Canarias, que no están adecuadamente cubiertas en los dominios empleados en ENSEMBLES. Finalmente, podrían realizarse simulaciones climáticas regionales para zonas geográficas de particular interés para España, tales como Latinoamérica y el norte y el oeste de África. Lógicamente la apertura de esta última línea, no directamente relacionada con la regionalización sobre el territorio español, dependerá de las prioridades, compromisos y financiación del programa.

Además de la realización de simulaciones, una tarea importante es el desarrollo y mejora de los modelos climáticos regionales. Estos modelos climáticos se han desarrollado con frecuencia a partir de un modelo originariamente diseñado para predicción numérica del tiempo, mediante un rediseño sustancial de las rutinas responsables de las escalas estacionales, anuales y decadales. En este sentido es muy iluminadora la experiencia del Centro Rossby donde un equipo de alrededor 12-15 científicos y técnicos en computación desarrollaron un modelo climático regional (RCAO) modificando los aspectos del HIRLAM que no eran aptos para las escalas climáticas. Entre estos aspectos hay que hacer mención de: (i) un nuevo esquema de superficie con más complejidad y más niveles para que la humedad del suelo fuese

capaz de representar las escalas anuales y mayores, (ii) revisión sustancial de la radiación, (iii) revisión de las rutinas de condensación/convección, (iv) modelo acoplado del mar Báltico, (v) impacto y revisión de la formulación de las condiciones de contorno laterales, etc.

En el desarrollo de modelos regionales del sistema climático no solamente hay que prestar atención a la componente atmosférica y oceánica (que se desarrolla en la subsección 5.7), sino que también hay que considerar el desarrollo de componentes adicionales (p.e., modelos de vegetación y suelo con ciclo del carbono incluido, modelos hidrológicos, etc.). Este es un área de gran actividad actual, como se deduce por ejemplo del proyecto COSMOS (COmmunity earth System MOdelS, <http://cosmos.enes.org>), en el que participan diversos grupos europeos. El objetivo de esta línea de trabajo y de este proyecto es el de acoplar al componente atmosférico otros componentes climáticos para tener en cuenta de forma interactiva procesos y realimentaciones que pueden ser de gran importancia para el clima regional. En lo que respecta al clima peninsular, las interacciones entre usos de suelo, cubierta vegetal, hidrología (incluidas las aguas freáticas) y atmósfera pueden ser especialmente importantes, dado el riesgo de desertización que afecta a diversas regiones peninsulares. En este sentido se recomienda el análisis cuidadoso de los términos del balance hídrico.

En el contexto nacional existe un aceptable potencial para desarrollar este tipo de tareas avalado por la existencia de grupos con variada experiencia en el uso y desarrollo de diferentes modelos (PROMES, RAMS, RCA, WRF-MM5, etc.) que han participado y participan en proyectos de la UE (p.e. PRUDENCE, ENSEMBLES, etc.) o tienen publicaciones relevantes en el tema.

### **5.6.- Modelos estadísticos de regionalización. Validación**

Los métodos estadísticos de regionalización se basan en el uso de técnicas estadísticas que relacionan de forma empírica las variables climáticas a gran escala proporcionadas por los AOGCMs con las variables locales/regionales observadas en superficie relacionadas con el fenómeno bajo estudio. La ventaja de estas técnicas de *downscaling* estadístico es que, además de ser aplicables a variables estándar, como la precipitación y la temperatura, también pueden aplicarse a cualquier otra variable, como la altura de oleaje en un punto de rejilla o la producción de cereales en una región, que son dependientes de la circulación a gran escala, pero que no son proporcionadas por los modelos globales y regionales. Por otra parte, las necesidades de cálculo de estas técnicas son, en general, modestas, si bien en algunos casos las técnicas no lineales utilizadas (para hallar predictores óptimos, o para ajustar los modelos) consumen también grandes cantidades de recursos en los procesos de optimización involucrados. Estas características hacen que la regionalización estadística se haya potenciado en los últimos proyectos de cambio climático, que incluyen tareas específicas a este respecto.

Algunas de estas técnicas se han desarrollado y aplicado en el ámbito de la predicción a corto plazo y han sido posteriormente adaptadas a las escalas propias del cambio climático y al tratamiento de la incertidumbre asociada con la predicción por conjuntos. En este conjunto de técnicas se incluyen los métodos de regresión lineal (regresión múltiple, CCA, etc.) y no lineal (redes neuronales, etc.), y los métodos de condicionamiento o clasificación del tiempo (incluyendo las técnicas de análogos,

modelos de Markov ocultos, redes Bayesianas y otras técnicas de agrupamiento). Estas técnicas permiten trabajar con la máxima resolución temporal disponible y regionalizan los resultados mejorando la resolución espacial. Por otra parte, los generadores de tiempo (*weather generators*) han sido desarrollados para la predicción estacional, decadal y de cambio climático, trabajando con promedios mensuales o estacionales de los datos y permitiendo obtener al final del proceso series simuladas de datos diarios compatibles con las predicciones del modelo y con la estadística local observada. Una descripción más detallada de estas técnicas de *downscaling*, así como recomendaciones para su uso en la regionalización de cambio climático se tiene en Wilby et al. (2004). A continuación se describen algunos estudios que sería necesario realizar para la correcta generación de escenarios regionales en España.

En primer lugar, dado que existe un amplio abanico de técnicas de *downscaling* estadístico será necesario aplicar y comparar el mayor número de técnicas posibles en un marco común utilizando los mismos escenarios y las mismas redes de observación (utilizando, por ejemplo, el período ERA-40 y una rejilla común de observaciones de alta resolución, o un conjunto de observaciones fiables en una red de puntos representativa de la geografía). La validación de resultados permitirá descartar las técnicas no apropiadas y descubrir las ventajas de cada técnica en las distintas regiones españolas y escalas temporales. La interacción entre la circulación a gran escala y la orografía a escala regional/local así como las particularidades geográficas de cada zona perfilan el carácter espacialmente heterogéneo del clima. Por tanto, es de esperar que unas técnicas sean más apropiadas que otras para distintas variables y distintas zonas y, por tanto, resulte necesario este estudio comparativo para cuantificar adecuadamente la incertidumbre que, en cada zona, añade el uso de la técnica de *downscaling* estadístico. El proyecto Europeo STARDEX ha realizado un estudio comparativo de algunas técnicas para la regionalización de eventos extremos<sup>8</sup>

En segundo lugar, una de las principales críticas al uso de técnicas de *downscaling* en estudios de regionalización de escenarios de cambio climático es la imposibilidad de demostrar que los modelos son apropiados para el clima futuro, con forzamientos distintos a los del período utilizado para inferir los modelos. Este problema es crítico para los estudios de cambio climático en España dada nuestra gran variabilidad climática. Podría ocurrir, por tanto, que los modelos fuesen estacionarios para un tipo de clima, pero no para otro. Por tanto, es necesario realizar un estudio que estime la significación de la estacionariedad de los modelos en presencia de distintos forzamientos radiativos y distintos períodos del clima presente, aunque existen ya algunos estudios al respecto. Para ello será necesario diseñar pruebas estadísticas apropiadas que permitan cuantificar la variabilidad de los modelos respecto de la ventana temporal y los escenarios utilizados para entrenarlos. También será necesario determinar las variables de gran escala que son más robustas a estos cambios y que, por tanto, serían los predictores idóneos para las técnicas estadísticas, aún cuando no proporcionasen la mejor predicción del clima presente. De otra forma, se corre el peligro de sobreajustar los modelos a las condiciones actuales, perdiendo la capacidad de extrapolación.

---

<sup>8</sup> Véanse publicaciones STARDEX ([www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/reports/](http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/reports/)) y STARDEX, 2005: Statistical and Regional Dynamical Downscaling of Extremes for European Regions- final report. C. Goodess (Co.) CRU, UEA, Norwich.

Dado que el de los métodos estadísticos es inferior al de los métodos dinámicos, sería deseable realizar un abanico de proyecciones regionales lo más amplio posible, en cuanto a número tanto de modelos globales como de escenarios de forzamiento utilizados. Este es un tema insuficientemente explorado en casi todos los proyectos realizados hasta la fecha, donde grupos distintos se centran en regiones, modelos y escenarios distintos. Sería importante lograr un acuerdo de mínimos para obtener una matriz común de zonas, modelos y escenarios. Este trabajo requerirá de recursos de almacenamiento adecuados para poder distribuir esta matriz a los grupos que participarán en las tareas de *downscaling* estadístico (sería deseable que los grupos participantes adquiriesen el compromiso de simular la matriz completa). En este sentido se puede aprovechar parte de la infraestructura que se está desarrollando en ENSEMBLES para la creación de herramientas que aglutinen datos y métodos y permitan realizar estudios comparativos en un entorno común (véase, por ejemplo <http://www.meteo.unican.es/ensembles>).

También será necesario adaptar los métodos estadísticos para la regionalización de eventos extremos (olas de calor, inundaciones, etc.), basados en los percentiles extremos de un período de referencia, y que tienen un comportamiento estadístico distinto a los valores promedio. En este sentido, el Proyecto STARDEX ha identificado un conjunto de índices extremos de interés y ha realizado un primer estudio comparativo de la calidad de distintos métodos estadísticos de *downscaling*. Para este problema será necesario contar con datos de AOGCMs con la mayor resolución temporal disponible (vease Sec. 5.1).

En el contexto nacional existen varios grupos de investigación con una dilatada experiencia avalada por su participación tanto en proyectos de investigación Europeos (p.e. STARDEX, ENSEMBLES, etc.) como nacionales y que poseen publicaciones relevantes (ver Informe CLIVAR-es) en temas de regionalización estadística. Esto asegura la existencia de suficientes recursos humanos para explorar las incertidumbres asociadas a las técnicas de regionalización estadística. Además, la participación en el proyecto ENSEMBLES de algunos de estos grupos asegura también la necesaria coordinación con este proyecto.

### **5.7.- Modelos oceánicos regionales. Validación.**

Como se ha comentado más arriba, las herramientas básicas para generar proyecciones climáticas globales son los AOGCMs. A estas proyecciones se las puede dotar de detalle adicional mediante el anidamiento de modelos regionales de área limitada. Tradicionalmente, y por diferentes razones, estos modelos regionales sólo han constado de la componente atmosférica. La primera y más obvia razón es la simplicidad e inmediatez, ya que los modelos regionales utilizados en la predicción meteorológica a corto plazo solamente modelizan la parte atmosférica y mantienen constante la descripción de los océanos. Esta aproximación es buena para el corto y medio plazo (hasta 10 días) y está adoptada por todos los centros que realizan predicciones a estos alcances. En las proyecciones climáticas ha venido siendo práctica habitual utilizar directamente las salidas de temperatura superficial del mar proporcionadas por los modelos globales e interpoladas a la rejilla del modelo regional. De esta forma la adaptación de un modelo regional de predicción del tiempo para fines climáticos se centra exclusivamente en la mejora de las parametrizaciones que más efecto pueden

tener en escalas temporales largas, singularmente los procesos de superficie y radiativos.

En el caso de mares interiores o cuasi-interiores, cuya evolución (temperatura, salinidad, nivel del mar) esta claramente desacoplada o poco acoplada con los grandes océanos tiene especial interés su simulación con modelos regionales. Este es el caso del mar Báltico, cuya escasa profundidad, reducida comunicación con el Atlántico Norte, papel crítico de los hielos y deficiente representación por los modelos globales, hace que un modelo anidado para regionalizar un dominio que incluya al mar Báltico precise de un módulo oceánico en alta resolución acoplado. Estas son las razones que han llevado al Centro Rossby (Suecia) a incluir un módulo oceánico para el mar Báltico en su modelo climático regional RCA.

Este también es el caso del mar Mediterráneo, cuyas costas albergan a una parte sustancial de la población española y es una zona eminentemente generadora de riqueza. La evolución del Mediterráneo está muy dominada por los aportes de agua internos (precipitación local sobre todo) y por la evaporación. Además la frecuente existencia de estructuras atmosféricas que nacen y mueren en el Mediterráneo y de vórtices oceánicos muy condicionados tanto por la circulación atmosférica como por la forma de la cuenca mediterránea hace también que especialmente este mar precise de una simulación en alta resolución que no pueden aportar los modelos climáticos globales. La importancia de las interacciones entre atmósfera y el mar Mediterráneo queda reflejada en el ejemplo del excepcional verano del año 2003, en el que los valores extremos de temperatura del aire fueron acompañados por anomalías fuertes de temperatura superficial del mar Mediterráneo. La predicción de la temperatura, salinidad y nivel del mar está condicionada, especialmente en el caso del Mediterráneo, al desarrollo de modelos regionales acoplados atmósfera-océano.

El nivel de complejidad de los modelos oceánicos es variable. Mientras que los modelos barotrópicos solamente transportan los parámetros superficiales oceánicos (incluidas las temperaturas) de unos puntos a otros, los baroclínos implican una dinámica completa del océano, que puede generar variaciones in situ de la temperaturas superficial del mar. Es importante considerar que de una correcta modelización de la temperatura del mar dependerá una correcta evaluación de los impactos sobre los ecosistemas marinos, debido al papel fundamental desempeñado por esa variable en multitud de procesos bio-geo-químicos.

Además de los beneficios derivados del acoplamiento a modelos atmosféricos, el uso de modelos oceánicos va a permitir el diagnóstico de otra variable fundamental para los futuros escenarios climáticos como es el nivel del mar. Todas las previsiones indican que en el siglo XXI la subida de nivel del mar se situará entre los 20 y los 90 cm, con el consiguiente impacto sobre las costas y estructuras portuarias. Al menos tan importante como la subida del nivel medio puede ser el cambio en la amplitud y distribución de eventos extremos. Para la determinación de esos cambios suelen utilizarse modelos barotrópicos, que además sirven para determinar la componente atmosférica de la variabilidad de nivel del mar, al ser forzados por presión atmosférica y viento. Por otro lado, el uso de modelos baroclínos acoplados permitirá determinar una segunda componente, la estérica, derivada del aumento de volumen asociado a cambios en la temperatura y salinidad del agua. Finalmente, la tercera componente, el aumento de

masa derivado fundamentalmente de la fusión de hielos continentales, es esencialmente global, no regional, y puede estimarse a partir de datos gravimétricos.

En España existen varios grupos con experiencia en modelización oceánica que podrían contribuir a desarrollar e implementar varios módulos oceánicos de diferente complejidad para versiones regionales de modelos climáticos acoplados de atmósfera y océano. La posibilidad de disponer de varios módulos oceánicos alternativos permitiría explorar las incertidumbres provenientes de la modelización oceánica.

El trabajo a desarrollar debería consistir en la realización de integraciones mediante condiciones de contorno suministradas por AOGCMs, y posteriormente en el acoplamiento de modelos regionales atmosféricos. Idealmente, los modelos acoplados deberían ser baroclinos para permitir la evolución de la temperatura superficial por procesos distintos de la pura advección y permitir asimismo la predicción de la evolución de la componente estérica de nivel del mar. El uso de modelos barotrópicos debería restringirse a la predicción de la componente atmosférica de la variabilidad del nivel del mar y a la predicción de los cambios en el régimen de extremos. El trabajo a desarrollar para cada modelo oceánico implica dos tareas claramente diferenciadas. Por un lado, la troncal de optimización para los mares españoles de los modelos disponibles seleccionados y por otro una de desarrollo que implicaría el acoplamiento con los modelos atmosféricos regionales.

## 6.- Resumen de recursos necesarios

En las páginas precedentes se ha tratado de explicar la complejidad del problema, que está dominado por las incertidumbres que de forma jerárquica contaminan todo el proceso de generación de escenarios regionalizados de cambio climático. Para tratar dichas incertidumbres de una forma probabilística es necesario recurrir a explorar multiplicidad de escenarios de emisión, de modelos globales y de técnicas de regionalización con la esperanza de que dicha exploración barra la mayor parte del rango de posibilidades de la futura evolución del clima y permita asignar un intervalo de error a las proyecciones climáticas. Esta línea de trabajo, basada en *ensembles* es la filosofía que subyace en el proyecto ENSEMBLES de la UE y es la forma adecuada de acotar las incertidumbres basándose en proyecciones climáticas probabilísticas. Igualmente los proyectos PRUDENCE y STARDEX (5º programa marco de la UE), exploran y recomiendan la utilización de una colección de modelos regionales y de algoritmos estadísticos de regionalización como mejor forma de estimar las incertidumbres asociadas a la regionalización dinámica y estadística, respectivamente.

Necesariamente la exploración de multiplicidad de escenarios de emisión, de modelos globales y de técnicas de regionalización requiere movilizar un gran número de recursos. Estos recursos podrían ser drásticamente recortados si en lugar de utilizar, p.e., varios modelos regionales, se utiliza solamente uno. Pero en este caso ya no se tendría forma de valorar las incertidumbres asociadas a la utilización de distintos modelos regionales para refinar la escala de las proyecciones globales y por lo tanto no se podrían asignar los intervalos de incertidumbre correspondientes al caso de regionalización dinámica utilizando modelos regionales de clima.

Una cuantificación aproximada de los recursos humanos necesarios tendría que estimar el número mínimo de modelos regionales atmosféricos y oceánicos, así como de métodos estadísticos de *downscaling* que podrían explorar las incertidumbres asociadas a las diferentes técnicas. Las diferentes líneas de trabajo integrarán proyectos de carácter troncal, orientados a la generación de escenarios de cambio climático a escala regional, y de desarrollo, orientados a la mejora de métodos, técnicas, datos, etc. que contribuirían a la mejora del conocimiento científico y a la calidad del plan en sucesivas convocatorias del mismo. Dado que el objetivo final del proyecto es proporcionar escenarios a la comunidad de impactos, se estima que el presupuesto del programa debería repartirse entre las tareas propuestas para el programa (sección 5) dando más peso a las tareas directamente conducentes a generar dichos escenarios, sin excluir nunca las tareas de desarrollo que garantizarían su mejora futura.

Un tema que no recibe tratamiento en este texto es el de la disponibilidad y gestión de recursos informáticos. En España, globalmente hablando, existe y va a existir una considerable potencia de cálculo distribuida en varios centros (e. g. BSC, CESGA, INM, entre otros) por lo que no parece un factor limitante. En el desarrollo específico del programa deberían de garantizarse el acceso a tiempo de computación por parte de los diferentes grupos participantes.

## **7. Calendario**

Como ya se ha mencionado más arriba el programa está pensado y diseñado para complementar la información global que se genera con el ciclo de aproximadamente 4 años de los informes de evaluación del IPCC. Los informes de evaluación del IPCC (el próximo aparecerá a finales de 2007) incluyen, describen y desarrollan los resultados de proyecciones climáticas para el siglo XXI realizados fundamentalmente con una variedad de AOGCMs. La información de los modelos globales y los informes de evaluación del IPCC correspondientes no desciende sistemáticamente al nivel nacional o local. La información de escenarios de cambio climático a nivel regional/local es el que se pretende desarrollar con este programa, complementando la información generada en el marco del IPCC.

En consecuencia, el programa tendrá que ajustarse al ritmo marcado por la información suministrada por los modelos globales participantes en los sucesivos informes del IPCC. Normalmente, cada nuevo informe de evaluación del IPCC utiliza versiones más avanzadas de AOGCMs, que a su vez se utilizarán como datos de entrada en los algoritmos de regionalización que adapten esta información a nivel regional/local para su utilización por parte de los distintos usuarios de la comunidad de impactos del cambio climático.

Al igual que los informes del IPCC, este programa de escenarios regionalizados tiene que tener necesariamente una vocación de continuidad. Los escenarios regionalizados de cambio climático se revisarán, actualizarán y mejorarán aproximadamente cada 4 años utilizando siempre las mejores fuentes de información, tanto de modelos globales como de datos de observación, y los mejores algoritmos de regionalización disponibles en cada momento.

## **8. Resultados**

Los resultados del programa consistirán fundamentalmente en datos de escenarios de cambio climático e informes que describan, resuman y expliquen los datos.

Los datos de escenarios de cambio climático regionalizados que se pongan a disposición de la comunidad de impactos y adaptación se basarán en proyecciones estadísticas que delimitarán las incertidumbres asociadas a todos los pasos que han conducido a su generación. Esto implicará necesariamente el diseño de una página web ágil y flexible que integre resultados obtenidos con diferentes escenarios de emisión, diferentes AOGCMs y diferentes técnicas de regionalización. Los datos suministrados en forma probabilística alimentarán los distintos modelos de impacto de sectores sensibles a las condiciones climáticas.

Asimismo, se emitirán unos informes que describirán la generación e interpretación de las proyecciones de cambio climático regional y las incertidumbres asociadas para diferentes periodos del siglo XXI. Se prestará especial atención a las variables asociadas al ciclo del agua (precipitación, evapotranspiración, escorrentía, variación del contenido de agua en el suelo, etc.) además de otras variables de interés (precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima del aire, nivel, temperatura y salinidad del mar, etc.). Se incluirán capítulos que describan tanto la evolución de los valores medios como el cambio de la variabilidad en diferentes escalas temporales (desde la diaria, que viene afectada por las condiciones meteorológicas, hasta las decenales y seculares). En la medida en que se utilicen modelos con módulos predictivos de vegetación, se prestará también una especial atención a todos los temas relacionados con la evolución de vegetación y otras variables relacionadas con la desertificación, que tan crítica puede ser en nuestro territorio. El informe de previsiones debería ir complementado con resultados de estudios de contexto, detección y atribución del cambio climático. Sería deseable también que en cada informe se realice una evaluación de aspectos científicos críticos o deficitarios a desarrollar en entregas subsiguientes con objeto de la mejora del programa.

## 9. Conclusiones

El presente programa coordinado para la generación de escenarios de cambio climático regionalizados insiste en dos ideas principales. En primer lugar, que los escenarios sean desarrollados y estén avalados por la comunidad científica española y, en segundo lugar, que los escenarios así generados sean la referencia básica para ulteriores estudios de impacto en el marco del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. El presente texto sugiere que el aval de la comunidad científica se debe construir: i) en cuanto al procedimiento, sobre un sistema de financiación de proyectos basado en una convocatoria libre, sometida a revisión científica y con una fuerte estructura de coordinación que integre tareas de carácter troncal orientados a la generación de escenarios de cambio climático a escala regional y tareas de desarrollo planteadas de cara a la mejora de metodologías, datos, resultados que contribuirían a la calidad del plan en sucesivas ediciones; ii) en cuanto a los resultados científicos, el aval debe basarse en el proceso de publicación científica de métodos, bases de datos, simulaciones, etc.

Para poder incorporar las diversas fuentes de incertidumbre que proceden de los distintos pasos conducentes a la generación de los escenarios regionalizados, se pretende con este programa introducir una forma probabilística de presentar los resultados finales, consecuencia de la utilización de variedad de escenarios de emisión, variedad de modelos globales y variedad de técnicas de reducción de escala. Este nuevo paradigma probabilístico para las proyecciones de cambio climático ya ha sido ensayado con éxito en las predicciones a medio plazo y está en desarrollo tanto para el corto plazo (predicción del tiempo) como para los plazos estacionales y más largos, incluidos decenales y seculares.

El presente programa, tras pasar revista a las cuestiones metodológicas, a las experiencias previas y al enfoque del problema en otros países europeos, selecciona una serie de líneas de actuación para el adecuado desarrollo del programa. En el programa se insiste en que la exploración de las incertidumbres lleva aparejada una gran movilización de recursos, sin los cuales esta exploración no sería posible. Una drástica reducción de recursos humanos eliminaría o reduciría sustancialmente el carácter probabilístico de los resultados.

La dispersión de los recursos humanos y la utilización de variedad de métodos y fuentes de datos y sobre todo la expresión final de los resultados en términos probabilísticos obligan a un esfuerzo adicional de coordinación que asegure la sincronización de las tareas de los diferentes grupos. Por esta razón, se propone un esquema de organización similar al que utilizan los programas descentralizados de dimensiones comparables al del objeto de este programa. También se propone un sistema de control con un comité externo de expertos.

No es fácil trazar una línea que distinga nítidamente entre proyectos de carácter troncal y de desarrollo. Dicha tarea debería corresponder a aquellos que finalmente desarrollen el plan de actuación y, en última instancia, a los evaluadores en un proceso de revisión de proyectos. Esta comisión propone que exista una fuerte estructura de coordinación entre proyectos responsables de la generación de escenarios climáticos regionales mediante métodos estadísticos y dinámicos, y proyectos de desarrollo. Todas aquellas tareas que conduzcan a establecer estas bases de datos de escenarios climáticos

regionales y su correspondiente análisis de validación e incertidumbres, responden a la idea de troncalidad y deben garantizarse por parte de la estructura de coordinación para ofrecer la necesaria información para los estudios posteriores de impactos. Estas tareas se basarían en métodos, bases de datos, modelos y simulaciones climáticas, en buena medida disponibles hoy día o de generación relativamente rápida en el desarrollo de cada etapa del plan. Las actividades de desarrollo englobarían todas aquellas tareas que contribuyen a la mejora del plan y la calidad científica de los escenarios regionalizados en sucesivas convocatorias: mejora de metodologías, bases de datos y análisis/correcciones de calidad, análisis de variabilidad climática o predecibilidad con implicaciones en la mejora de los escenarios regionalizados, estudios de sensibilidad climática y comparación de AOGCMs y reconstrucciones climáticas, desarrollo/mejora de RCMs y métodos de regionalización, parametrizaciones, etc. Este tipo de tareas no deberían desviarse a la convocatoria del plan nacional sino que deberían, por su importancia en la generación de escenarios regionalizados, recibir un apoyo específico y formar parte de la estructura de coordinación. Este tipo de actividades han de ser fomentadas para mejorar la eficacia del plan y el nivel de conocimiento científico en el que reposa la calidad del mismo. Las actividades de desarrollo no son por tanto de menor importancia, ni deberían entenderse como prescindibles en el planteamiento de financiación del plan.

En la línea de lo comentado en el párrafo anterior, esta comisión entiende que el contexto apropiado para el desarrollo y consecución de los objetivos del PNACC sería la generación y financiación de un programa nacional *ad hoc*. Dicho programa contemplaría las distintas líneas de actividad sobre las que se sustenta la generación e interpretación de proyecciones de cambio climático a escala regional (escenarios regionalizados de cambio climático) tal y como quedan reflejadas en los informes del WG1 del IPCC.

## Bibliografía

- ECCE, 2005: Efectos del Cambio Climático en España. Evaluación Preliminar General de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático, MIMAM.
- Houghton J., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C. A. Johnson (Eds.), 2001: Climate Change, 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.
- Hulme, M., G. J. Jenkins, X. Lu, J. R. Turnpenny, T. D. Mitchell, R. G. Jones, J. Lowe, J. M. Murphy, D. Hassell, P. Boorman, R. McDonald, S. Hill, 2004: Climate Change Scenarios for the United Kingdom: The UKCIP02 Scientific Report, Tyndall. Centre for Climate Change Research, School of Environmental Sciences, University of East Anglia, Norwich, UK.
- Informe CLIVAR-es, 2006: Estado de la investigación del clima en España. Texto editado por el Comité Científico de la Red Temática Clivar España a partir de las contribuciones de los miembros de la Red. LRC-PCB, Barcelona, Junio 2006, 74pp.
- Lionello, P., P. Malanotte-Rizzoli, and R. Boscolo, Eds, 2006: The Mediterranean Climate: an overview of the main characteristics and issues, Elsevier.
- Mitchell, T. D., M. Hulme, 1999. Predicting regional climate change: living with uncertainty. *Progress in Physical Geography* 23(1): 57-78.
- Schellnhuber, H.-J., H. Held, 2002: How Fragile is the Earth System? In *Managing the Earth: The Linacre Lectures*, edited by J.C. Briden and T.E. Downing. Oxford: Oxford University Press, pp. 5-34.
- von Storch, H., F. Zwiers, 1999: Statistical Analysis in Climate Research. New York. Cambridge University Press.
- Wilby, R.L., S.P. Charles, E. Zorita, B. Timbal, P. Whetton, L.O. Mearns, 2004. 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).
- Wilby, R.L. and Wigley, T.M.L. 1997: Downscaling General Circulation Model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, 21, 530-548.

## **Anexo I: Proyectos relacionados**

Recientemente se han desarrollado, o están todavía en fase de desarrollo, algunos proyectos financiados por la UE que están directamente relacionados con el objetivo de generar escenarios de cambio climático regionalizados. Tanto para dimensionar la tarea a realizar, como para evitar innecesarias duplicaciones se describirán brevemente los proyectos PRUDENCE, STARDEX y MICE del 5º programa marco de la UE, recientemente finalizados, el proyecto ENSEMBLES del 6º programa marco, que está en fase de ejecución. Finalmente, se describirá también el proyecto ECCE del MMA y la Universidad de Castilla-La Mancha dedicado a estudiar los impactos del cambio climático en los diferentes sectores de la economía nacional.

El proyecto PRUDENCE (Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects, EU 5<sup>th</sup> Framework Project, Nov.2001-Oct.2004) se ha centrado en explorar las incertidumbres de los modelos regionales de clima con rejillas del orden de 50 km para regionalizar las salidas de los AOGCMs. Asimismo, el proyecto ha creado una base de datos muy valiosa que todavía está por explorar y analizar en detalle sobre la Península Ibérica. La base de datos incorpora promedios mensuales de 9 modelos regionales forzados con un único modelo global (HadAM3), además de resultados de otros modelos regionales forzados con salidas de otros modelos globales (ECHAM4/OPYC, ECHAM5, ARPEGE/OPA) distintos del HadAM3. Los primeros datos de PRUDENCE proporcionaron comportamientos promediados de todos los modelos regionales particularizados por países (presentados como “*side event*” en COP10, 6 - 17 Dic. 2004, Buenos Aires, Argentina). La mayoría de los estudios de este proyecto han generado resultados a nivel europeo que se refieren a valores medios y hasta el momento poco se ha explorado sobre variabilidad y extremos, si bien un número especial de Climatic Change (2006, en prensa) está dedicado exclusivamente a la explotación de los datos PRUDENCE. El uso de la base de datos PRUDENCE permite suministrar información en puntos rejilla sobre la Península Ibérica y utilizar algún tipo de técnica “ensemble” para reducir y compensar errores. La base de datos PRUDENCE contiene dato diario de las proyecciones climáticas para el periodo 2070-2100, siendo especialmente interesantes todos los campos relacionados con el ciclo del agua (precipitación, evapotranspiración, escorrentía, humedad del suelo) que permiten estimar la contribución a los distintos términos del balance proporcionada por los diferentes modelos regionales.

El proyecto STARDEX (Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions, EU 5<sup>th</sup> Framework Project) ha realizado una intercomparación sistemática y una evaluación de los métodos estadísticos para la construcción de escenarios de extremos. Ha identificado las características de las distintas técnicas utilizadas para producir escenarios futuros de extremos para regiones de estudio europeas en el periodo 2070-2100.

El proyecto MICE (Modelling the Impact of Climate Extremes, EU 5<sup>th</sup> Framework Project) se ha centrado en identificar y catalogar extremos tanto en datos observados como en datos procedentes de modelos climáticos. También ha evaluado los cambios futuros utilizando teorías de valores extremos, así como el impacto de los cambios en los extremos. MICE, junto con PRUDENCE y STARDEX, han constituido un “cluster” cooperativo de proyectos EU para explorar los cambios futuros en eventos extremos como consecuencia del calentamiento global.

El proyecto ENSEMBLES (ENSEMBLE-based Predictions of Climate Changes and their Impacts, EU 6<sup>th</sup> Framework Project) es un ambicioso proyecto integrado (72 grupos participantes y 15 MEuros) que se desarrollará entre septiembre de 2004 y septiembre de 2009. El proyecto desarrollará un sistema de predicción por conjuntos basado en los principales y más evolucionados modelos del sistema tierra, tanto globales como regionales, desarrollados en Europa y validados contra bases de datos reticulares de alta resolución y de calidad controlada, para producir por primera vez una estimación probabilística objetiva de la incertidumbre en el clima futuro a escalas temporales estacionales, decenales y mayores. El proyecto también cuantificará y reducirá la incertidumbre en la representación de los *feedbacks* físicos, químicos, biológicos y relacionados con las actividades humanas sobre el sistema Tierra. Los resultados de este proyecto suministrarán escenarios de cambio climático probabilísticos basados en un conjunto de datos procedentes de modelos globales, regionales y de diferentes métodos de regionalización estadísticos. Este proyecto significará un gran paso en la disponibilidad de escenarios regionalizados, si bien el proyecto no se completará hasta el año 2009.

El proyecto ECCE (Evaluación Preliminar de los Impactos en España por Efecto del Cambio Climático) ha realizado una primera evaluación por sectores económicos de los efectos del cambio climático. El estudio comienza con una descripción del clima actual y con una muy básica descripción de las proyecciones futuras basadas fundamentalmente en las salidas de modelos globales y en la regionalización suministrada por el modelo PROMES de la UCLM. El futuro programa de escenarios de cambio climático regionalizados pretende expandir este estudio utilizando una variedad de fuentes de datos globales (AOGCMs), de modelos regionales y de algoritmos estadísticos de regionalización para asignar a las proyecciones de clima futuro un carácter probabilístico en línea la próxima evaluación del IPCC (AR4) y con los objetivos del proyecto ENSEMBLES.

## Anexo II: Contexto europeo

En este anexo se esboza la muy diferente situación que existe en los distintos países europeos para enfocar la tarea de la generación de escenarios regionalizados de cambio climático.

En el contexto europeo la situación es muy variable. Hay países como UK o Alemania en los que la diversidad de centros de estudios climáticos permite una especialización de los mismos, de forma que la generación de escenarios de cambio climático tiene su nicho particular tanto para el desarrollo de modelos globales y regionales, estudios de comparación de métodos, estudios de impacto, etc. En el caso mismo de UK cuando se plantea la generación de un informe de escenarios de cambio climático regionalizados dirigido fundamentalmente a la comunidad de impactos, el grueso de la tarea (disponer de modelos, bases de datos, comparaciones, etc.) ya está hecha por los distintos grupos responsables de los distintos pasos. La realización del informe básicamente consiste sistematizar un trabajo ya previamente realizado por otros grupos. Este es el caso del informe UKCIP02 (Climate Change Scenarios for the United Kingdom, <http://www.ukcip.org.uk/>) que representa muy bien el espíritu de la tarea que plantea el MMA. En este caso de este informe es el Hadley Centre (<http://www.metoffice.com/research/hadleycentre>) el responsable de generar la información y simulaciones en los que se apoya. El caso de UK quizá no sea el modelo a seguir que se plantee, ya que las dimensiones y la actividad de la comunidad climática británica están realmente lejos de nuestra situación.

El caso de Alemania, al igual que el Reino Unido, también es singular por el gran número de instituciones que tiene dedicadas exclusivamente al estudio del clima y de su evolución desde diferentes perspectivas. Por ejemplo, el Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globales Umweltveränderungen (WBGU, Consejo Asesor sobre Cambio Global) analiza e informa de los problemas, revisa y evalúa la investigación nacional e internacional, elabora recomendaciones, etc. Además elabora unos informes que son modélicos en su tipo (<http://www.wbgu.de>). Muchas de las instituciones dedicadas al estudio del clima y de su evolución no tienen una clara vocación de estudiar los impactos locales, sino que estudian el problema globalmente (p.e., Postdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK, <http://www.pik-postdam.de>); Max Planck Institut für Meteorologie (MPI-M, <http://www.mpimet.mpg.de>)).

Francia posee una institución específica para el seguimiento del cambio climático: Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) (<http://onerc.org/home.jsf>) que proporciona información oficial de las proyecciones de cambio climático sobre Francia basadas exclusivamente en el modelo Arpege. Además tanto el Servicio Meteorológico (Météo-France) como el Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) y el Laboratoire d'Océanographie Dynamique et Climatologie (LODYC) (ambos integrados en el Institut Pierre-Simon Laplace del CNRS) son muy activos desde hace años en temas relacionados con la generación de escenarios de cambio climático con AOGCMs.

Un caso que bien puede tomarse como modelo es el de Finlandia. Para realizar las tareas asociadas a la generación de escenarios nacionales de cambio climático, se plantea el proyecto FINSKEN (<http://www.finessi.info/finsken>) de cuatro años (1999-2002) dentro de un programa más amplio de investigación sobre cambio global. El

proyecto fue financiado por la Academia de Finlandia (67%) y por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (33%). El proyecto fue coordinado por el Instituto del Medio Ambiente de Finlandia y comprende 6 grupos de trabajo de cuatro instituciones. Este proyecto fue muy modesto en cuanto a su alcance ya que la mayor parte de la información que utilizó procedía de modelos globales.

En el caso de los Países Bajos, la iniciativa de generar escenarios de cambio climático para estudios de impacto la toma el Servicio Meteorológico de los Países Bajos (KNMI) y realiza los correspondientes informes en solitario utilizando únicamente sus propios recursos dedicados a investigación. Se han generado dos revisiones en los años 2001 y 2006 (<http://www.knmi.nl/onderzk/klimscen/scenarios/Scenarios2001.pdf> y <http://www.knmi.nl/klimaatscenarios/knmi06/achtergrond/WR23mei2006.pdf>). Estos escenarios son considerados oficiales en los Países Bajos y para su generación se ha utilizado variedad de fuentes de información, incluidas las integraciones con el modelo climático regional RACMO2 desarrollado desde hace años en el propio KNMI.

En el caso de Portugal, se ha generado un documento parecido al del proyecto ECCE: “Climate Change in Portugal: Scenarios, Impact and Adaptation Measurements (SIAM) Project” (<http://www.siam.fc.ul.pt/>) financiado por la Fundación Calouste Gulbekian y la Fundación para la Ciencia y la Tecnología. La parte de los escenarios regionalizados se basó en los modelos regionales HadRM y PROMES.

El caso de Irlanda con el Proyecto C4I (Community Climate Change Consortium for Ireland-C4I, <http://www.c4i.ie/home.html>) merece también la pena comentarse. El proyecto nació en 2003. Tiene su sede en el Met Éireann (Servicio Meteorológico Nacional) y su principal objetivo es el de consolidar e intensificar el esfuerzo nacional en investigación del cambio climático así como construir la capacitación para desarrollar modelos climáticos regionales en Irlanda. Han partido del modelo regional RCA (heredero del modelo atmosférico para corto plazo HIRLAM) y han aprovechado en gran parte su experiencia dentro del consorcio HIRLAM. Su financiación proviene de 4 agencias nacionales y en parte también del Fondo Europeo para el Desarrollo Nacional.

En el caso de Suecia se creó el programa sueco de modelización climática regional SWECLIM (<http://www.smhi.se/sgn0106/if/rc/projects/SWECLIM.html>) que se desarrolló entre 1996-2003. El núcleo de este proyecto lo constituyó el Centro Rossby (RC), que al terminar el proyecto pasó a ser una unidad dentro del SMHI (servicio meteorológico sueco). El RC tiene un equipo de 12-15 científicos y técnicos en informática. La financiación inicial del programa provenía del SMHI y de MISTRA (fundación para investigación ambiental estratégica). Actualmente solamente el SMHI financia al RC, además de las contribuciones debidas a los numerosos proyectos en los que participa.

### **Anexo III: Comisión redactora y revisores**

La comisión de elaboración de este programa está formada por:

Gaertner, Miguel A.	(UCLM)
González, J. Fidel	(UCM)
Gutiérrez, J. Manuel	(UniCan),
Rodríguez, Ernesto	(INM)
Ruiz de Elvira, Antonio	(UAH)

Listado de participantes en la revisión de este documento:

Abaurrea, Jesús	(UniZar)
Álvarez, Enrique	(PE)
Bladé, Ileana	(UB)
Casado, M. Jesús	(INM)
Castro, Yolanda	(UGr)
Fernández, Fiz	(CSIC)
Gomis, Damiá	(IMEDEA)
Llasat, Carmen	(UB)
López, J. Antonio	(INM)
Míguez, Gonzalo	(USC)
Millán Millán	(CEAM)
Montávez, J. Pedro	(UM)
Montoya, Marisa	(UCM)
Orfila, Bartolomé	(INM)
Parrilla, Gregorio	(IEO)
Pastor, Asunción	(INM)
Pérez, Vicente	(MeteoGalicia)
Ramos, Petra	(INM)
Ribalaygua, Jaime	(FIC)
Rodó, Xavier	(UB)
Rodríguez, Concepción	(USal)
Romero, Romualdo	(UIB)
Rosell, Antoni	(UAB)
Sáenz, Jon	(UPV)
Tintoré, Joaquín	(IMEDEA)
Torres, Luis	(FIC)
Zorita, Eduardo	(GKSS)

La participación en la fase de revisión no responsabiliza a los revisores de las opiniones y contenidos del presente texto.