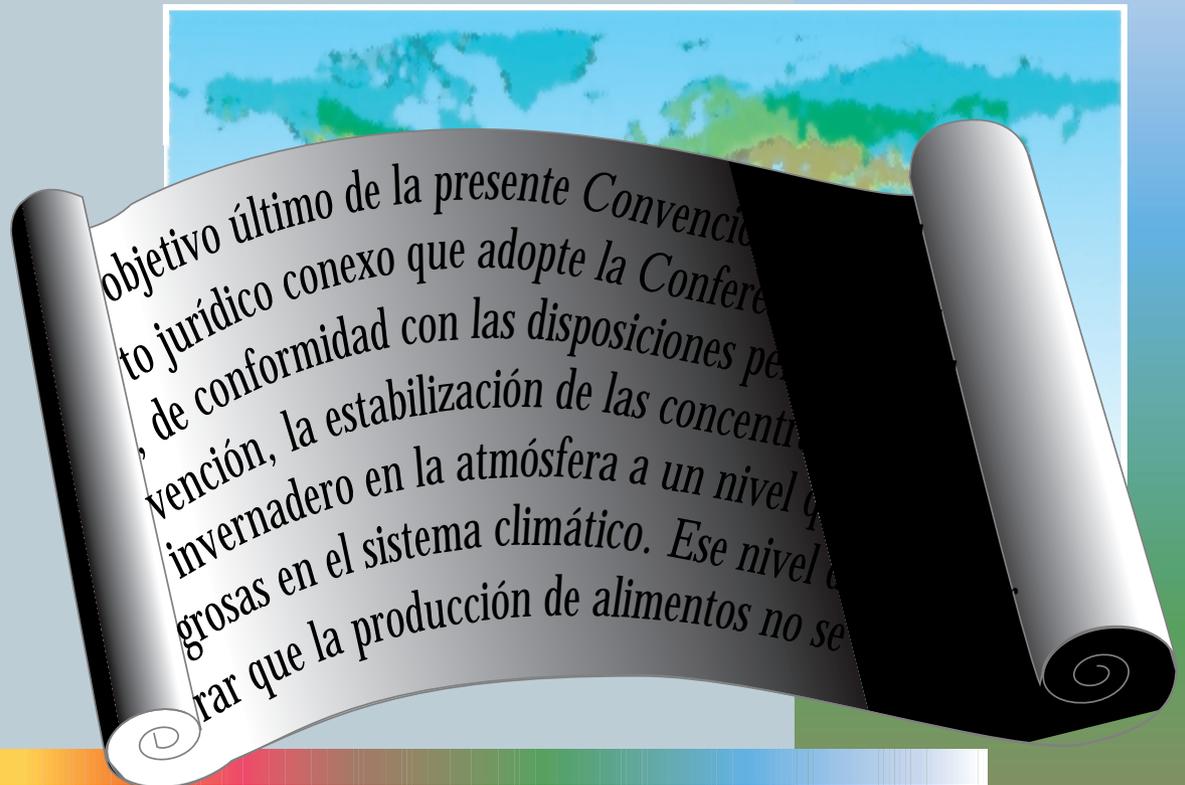




GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE
EL CAMBIO CLIMÁTICO



**ESTABILIZACIÓN DE LOS GASES
ATMOSFÉRICOS DE EFECTO INVERNADERO:
IMPLICACIONES FÍSICAS,
BIOLÓGICAS Y SOCIOECONÓMICAS**

Documento técnico III del IPCC



GRUPO INTERGUBERNAMENTAL DE EXPERTOS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO



Estabilización de los gases atmosféricos de efecto invernadero: implicaciones físicas, biológicas y socioeconómicas

Editado por

John T. Houghton

L. Gylvan Meira Filho

David J. Griggs

Kathy Maskell

Este es un documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) preparado en respuesta a una petición de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. El material que contiene ha sido examinado por expertos y gobiernos, pero no considerado por el Grupo para su posible aceptación o aprobación.

Febrero de 1997

Documento preparado bajo los auspicios del Grupo de Trabajo I del IPCC,
copresidido por Sir John T. Houghton del Reino Unido y el Dr L. Gylvan Meira Filho del Brasil.

© 1997, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático

ISBN: 92-9169-302-2

Índice

| | |
|---|-----------|
| <i>Prefacio</i> | v |
| Resumen | 3 |
| 1. Introducción | 7 |
| 1.1 Finalidades | 7 |
| 1.2 Aspectos más importantes | 8 |
| 1.2.1 Conceptos básicos sobre los gases de efecto invernadero y los aerosoles troposféricos (véase el SIE-GTI, para más información al respecto) | 8 |
| 1.2.2 Estabilización de las concentraciones de CO ₂ (véase el SIE-GTI, para más información al respecto) | 8 |
| 1.2.3 Incorporación de los efectos climáticos de otros gases de efecto invernadero y aerosoles: concepto de CO ₂ equivalente | 8 |
| 1.2.4 Implicaciones de una estabilización de gases de efecto invernadero a efectos de la temperatura mundial y del nivel del mar | 9 |
| 1.2.5 Impactos | 9 |
| 1.2.6 Costos de mitigación vinculados a la estabilización de las concentraciones de CO ₂ | 10 |
| 1.2.7 Integración de la información sobre los impactos y de los costos de mitigación | 10 |
| 1.3 Explicación descriptiva del presente informe | 11 |
| 1.3.1 Estrategia seguida en este informe | 11 |
| 1.3.2 Marcos para la adopción de decisiones | 12 |
| 2. Implicaciones geofísicas de la estabilización de los gases de efecto invernadero | 13 |
| 2.1 Principios generales de la estabilización: la estabilización del anhídrido carbónico y de otros gases | 13 |
| 2.2 Descripción de perfiles de concentración, otros escenarios de gases vestigiales, y computación de CO ₂ equivalente | 13 |
| 2.2.1 Consecuencias de la estabilización desde el punto de vista de las emisiones | 13 |
| 2.2.1.1 Perfiles de concentración que conducen a una estabilización | 13 |
| 2.2.1.2 Implicaciones de la estabilización de las concentraciones de CO ₂ desde el punto de vista de las emisiones | 14 |
| 2.2.1.3 Incertidumbres críticas con respecto al ciclo del carbono | 16 |
| 2.2.2 Estabilización de CH ₄ , N ₂ O y otros gases | 17 |
| 2.2.3 Escenarios de estabilización de referencia | 19 |
| 2.2.4 Estabilización de la concentración de CO ₂ equivalente | 19 |
| 2.2.5 Sensibilidades del CO ₂ equivalente | 21 |
| 2.3 Consecuencias de la estabilización de las concentraciones de CO ₂ en cuanto a la temperatura y al nivel del mar | 24 |
| 2.3.1 Análisis de la temperatura y del nivel del mar: metodología | 24 |
| 2.3.2 Implicaciones de la estabilización de los gases de efecto invernadero en la temperatura y en el nivel del mar | 25 |
| 3. Impactos y costos de mitigación asociados a la estabilización de los gases de efecto invernadero | 29 |
| 3.1 Impactos asociados a diferentes trayectorias de emisiones | 29 |
| 3.1.1 Importancia de los impactos para adoptar decisiones sobre la estabilización | 29 |
| 3.1.2 Evaluación de los posibles impactos biofísicos en el SIE-GTIII | 30 |
| 3.1.3 Evaluación económica de los impactos | 31 |
| 3.1.4 Incertidumbres en la proyección de impactos de trayectorias diferentes | 32 |
| 3.2 Costos de mitigación en la estabilización de las concentraciones de CO ₂ | 33 |
| 3.2.1 Consideraciones económicas vinculadas a los niveles de estabilización de CO ₂ | 33 |
| 3.2.1.1 La cantidad de carbono a eliminar | 33 |

| | | |
|--------------------|---|-----------|
| 3.2.1.2 | El objetivo de estabilización | 34 |
| 3.2.1.3 | Diferencia de precios entre las alternativas basadas en combustibles de origen fósil y las alternativas sin carbono | 34 |
| 3.2.1.4 | El recorrido de las emisiones | 35 |
| 3.2.2 | Modelización de los costos vinculados a la estabilización de las concentraciones de CO ₂ | 37 |
| 3.2.2.1 | Estudios disponibles cuando se realizó el SIE-GTIII | 37 |
| 3.2.2.2 | Limitaciones de los estudios existentes | 38 |
| 3.2.3 | Otras consideraciones clave | 38 |
| 3.3 | Integración de la información sobre los impactos y sobre los costos de mitigación | 38 |
| 3.3.1 | Introducción | 38 |
| 3.3.2 | Necesidad de coherencia y de una perspectiva amplia | 39 |
| 3.3.3 | Análisis de cartera | 39 |
| 3.3.4 | Toma secuencial de decisiones | 41 |
| Referencias | | 43 |
| Apéndices | | 45 |
| 1 | Consecuencias de la estabilización de las concentraciones de CO ₂ entre 1990 y 2300, desde el punto de vista de la temperatura y del nivel del mar | 45 |
| 2 | Glosario de términos | 47 |
| 3 | Acrónimos y abreviaciones | 51 |
| 4 | Unidades | 52 |
| 5 | Afiliación de los autores principales | 53 |
| 6 | Lista de publicaciones del IPCC | 54 |

Prefacio

Este documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) sobre "Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo informe de evaluación del IPCC" es el segundo de la serie de Documentos Técnicos del IPCC preparado en respuesta a una petición del Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico y Tecnológico (OSACT) de la Conferencia de las Partes (CP) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC).

Los documentos técnicos se preparan a petición de los órganos de la CP, con el acuerdo de la Mesa del IPCC, o por decisión del propio IPCC. Se basan en el material que figura ya en los informes de evaluación e informes especiales del IPCC y son redactados por autores principales elegidos con tal fin. Se sometieron a un examen simultáneo de expertos y gobiernos, durante el que se recibieron comentarios sobre este documento de 81 examinadores de 26 países, y a un examen final subsiguiente de los gobiernos. La Mesa del IPCC actúa como comité de redacción, para tener la seguridad de que los comentarios examinados son tratados debidamente por los autores principales al finalizar el documento técnico.

La Mesa se reunió en su duodécima reunión (Ginebra, 3-5 de febrero de 1997) y consideró los principales comentarios recibidos durante el examen final de los gobiernos. A la luz de sus observaciones y peticiones, los autores principales terminaron el documento técnico. La Mesa expresó su satisfacción porque se habían seguido los procedimientos convenidos y autorizó la distribución del documento al OSACT y su difusión pública posterior.

Tenemos una gran deuda de gratitud con los autores principales que aportaron con toda generosidad su tiempo y terminaron el documento en un período muy breve y con arreglo a lo programado. Damos las gracias a los Copresidentes del Grupo de Trabajo I del IPCC, John Houghton y Gylvan Meira Filho, que supervisaron tan ardua labor, al personal del estudio de gráficos de la Oficina Meteorológica del Reino Unido, que preparó las figuras para publicarlas, y en particular a David Griggs, Kathy Maskell y Anne Murrill, del Servicio de Apoyo Técnico del Grupo de Trabajo I del IPCC, por su insistencia en el respeto de la calidad y de los plazos.

B. Bolin
Presidente del IPCC

N. Sundararaman
Secretario del IPCC

Estabilización de los gases atmosféricos de efecto invernadero: implicaciones físicas, biológicas y socioeconómicas

Documento preparado bajo los auspicios del Grupo de Trabajo I del IPCC.

Autores principales:

David Schimel, Michael Grubb, Fortunat Joos, Robert Kaufmann, Richard Moss, Wandera Ogana, Richard Richels, Tom Wigley

Contribuciones:

Regina Cannon, James Edmonds, Erik Haites, Danny Harvey, Atul Jain, Rik Leemans, Kathleen Miller, Robert Parkin, Elizabeth Sulzman, Richard van Tol, Jan de Wolde

Modeladores:

Michele Bruno, Fortunat Joos, Tom Wigley

RESUMEN

Introducción

Comprender los factores que limitan la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero es fundamental para poder formular políticas en relación con los objetivos de la Convención Marco sobre el Cambio Climático y con su puesta en práctica. En este Documento Técnico se ofrece:

- una introducción a los conceptos de estabilización de gases de efecto invernadero, estimación del forzamiento radiativo¹, y “CO₂ equivalente” (concentración de CO₂ que conduce a un forzamiento radiativo medio mundial concordante con los aumentos proyectados de todos los gases, para una serie de gases determinada);
- un conjunto básico de perfiles de estabilización de CO₂ que conducen, siguiendo dos tipos de recorrido diferentes, a una estabilización entre 350 y 750 ppmv, con uno solo de los perfiles estabilizándose a 1000 ppmv (Figura 1);
- las emisiones deducidas para los perfiles de estabilización de la concentración anteriormente señalados;
- un estudio de la estabilización de los agentes de forzamiento radiativo distintos del CO₂;

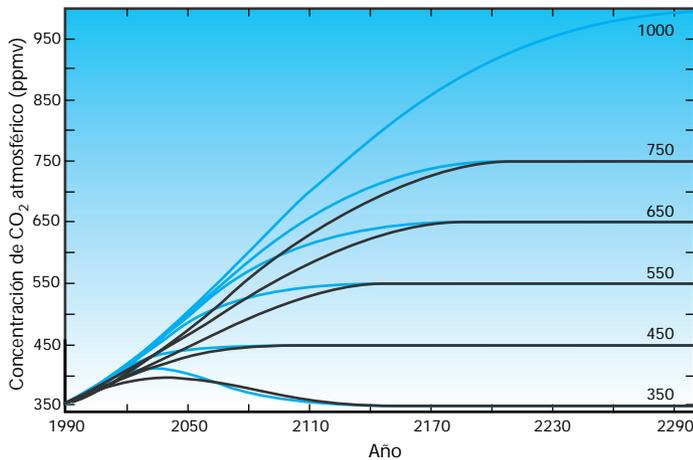


Figura 1. Perfiles de CO₂ que conducirían a la estabilización a concentraciones de entre 350 y 1000 ppmv. A efectos comparativos, la concentración de la era preindustrial estaba próxima a 280 ppmv, mientras que la actual se cifra en torno a 360 ppmv. Se muestran dos rutas conducentes a una estabilización entre 350 y 750 ppmv: los perfiles S (tomados de IPCC94), y los perfiles WRE (Wigley, y otros, 1996), que permiten que las emisiones de CO₂ coincidan con IS92a hasta 2000 o más (según sea el nivel de estabilización). Se define un único perfil para 1000 ppmv. Estos dos conjuntos de perfiles son sólo ejemplos tomados de entre toda una diversidad de posibles rutas hacia la estabilización que sería posible definir.

¹ Para una definición del forzamiento radiativo, véase el Apéndice 2.

- cambios de temperatura media mundial y de nivel del mar correspondientes a los perfiles de CO₂, a partir de diversos supuestos de emisión de CH₄, N₂O y SO₂, y diferentes valores de los parámetros sensibilidad del clima y fusión de hielo para diferentes modelos, a fin de caracterizar los márgenes de incertidumbre;
- una discusión de las consecuencias que para el medio ambiente podrían tener los cambios de temperatura y de nivel del mar que se deducen;
- una discusión de los factores que influyen en la mitigación de los costos; y
- un reexamen de la metodología a seguir para integrar los efectos de los cambios de clima y de nivel del mar con los costos de mitigación, a fin de obtener una panorámica más completa de las consecuencias que tendría el cambio de la composición de la atmósfera.

Conceptos básicos

De entre todos los gases de efecto invernadero, este informe se centra en el CO₂, dado que es el que ha tenido y, según las proyecciones, tendrá un mayor efecto sobre el forzamiento radiativo. Se examinan también los efectos de otros gases de efecto invernadero, y se establece una serie de supuestos sobre las posibles emisiones de éstos en el futuro.

Se examinan asimismo los efectos de los aerosoles, que producen un efecto de enfriamiento sobre el planeta. Los aerosoles troposféricos (partículas microscópicas en suspensión aérea) resultantes de la combustión de combustibles de origen fósil o de biomasa, o de otras fuentes antropógenas, han originado un forzamiento negativo que presenta un alto grado de incertidumbre. Dado que el período de vida de los aerosoles en la atmósfera es corto, su distribución y, por consiguiente, sus efectos radiativos inmediatos son de ámbito marcadamente regional.

Algunas implicaciones vinculadas a la estabilización de los gases de efecto invernadero

Como caso particular entre los diferentes casos estudiados de estabilización del CO₂, las emisiones antropógenas acumuladas entre 1991 y 2010 estarían entre 630 y 1410 GtC para unos niveles de estabilización de entre 450 y 1000 ppmv. A efectos comparativos, las correspondientes emisiones acumuladas para los escenarios de emisión IS92 del IPCC están comprendidas entre 770 y 2190 GtC.

Se expondrán en este trabajo distintos cálculos de emisiones de CO₂ concordantes con diversos niveles y recorridos de estabilización, realizados mediante modelos y datos iniciales existentes y suficientemente aceptados en la fecha del Segundo Informe de

Evaluación del IPCC. Los efectos de retroacción (*feedbacks*) ecosistémicos y oceánicos podrían reducir el almacenamiento de carbono terrestre y oceánico a unos niveles ligeramente inferiores a los supuestos en los modelos simplificados del ciclo de carbono mundial que se utilizan en este texto y en el Segundo Informe de Evaluación. Las incertidumbres que generaría la omisión de procesos oceánicos y biosféricos potencialmente críticos durante un cambio climático podrían alterar en gran medida las conclusiones a las que se llegue respecto de las emisiones asociadas a la estabilización.

Dentro del margen de incertidumbre existente en cuanto a la “sensibilidad del clima”, el futuro cambio climático antropógeno estará determinado por la suma de todos los forzamientos radiativos posi-

tivos y negativos inducidos por la totalidad de gases de efecto invernadero y aerosoles antropógenos, y no únicamente por el nivel de CO₂. Los escenarios de forzamiento aquí utilizados están basados en la suma de los forzamientos radiativos de todos los gases vestigiales (CO₂, CH₄, O₃, etc.) y aerosoles. El forzamiento total puede considerarse como si estuviera originado por una concentración “equivalente” de CO₂. Se define, pues, la concentración de “CO₂ equivalente” como la concentración de este gas que causaría el mismo forzamiento radiativo medio mundial que la mezcla dada de CO₂, otros gases de efecto invernadero, y aerosoles.

La diferencia entre el nivel de CO₂ equivalente y el nivel de CO₂ verdadero dependerá de los niveles a los que se establezcan las concentraciones de otros gases y aerosoles radiativamente activos. Como los efectos de los gases de efecto invernadero son acumulativos, una estabilización de las concentraciones de CO₂ en cualquier nivel por encima de unas 500 ppmv produciría presumiblemente unos cambios atmosféricos equivalentes, como mínimo, a multiplicar por dos las concentraciones de gases de efecto invernadero anteriores a la era industrial.

Las proyecciones de temperatura y de nivel del mar están en función de la sensibilidad del clima previamente supuesta, del objetivo y el recorrido elegidos para alcanzar la estabilización de la concentración de CO₂, y de los escenarios supuestos para otros tipos de forzamiento por gases de efecto invernadero y aerosoles. Para los casos de estabilización de referencia, en que las emisiones de gases distintos de CO₂ y de SO₂ se mantienen supuestamente constantes en sus niveles de 1990, los aumentos de temperatura media mundial a partir de 1990 se sitúan entre 0.5 y 2.0°C hacia 2100 (Figura 2), aunque estos valores son sensibles a los supuestos que se establezcan respecto de otros gases y aerosoles. Si los aumentos se computan a partir de la era preindustrial, se les deberá añadir entre 0.3 y 0.7°C. La tasa de cambio de la temperatura en los próximos 50 años estará comprendida entre 0.1 y 0.2°C/decenio. Las proyecciones de aumento del nivel del mar desde 1990 hasta 2100 se sitúan entre 25 y 50 cm (Figura 2), y presentan el mismo grado de sensibilidad a los supuestos sobre otros gases y aerosoles.

Aunque este trabajo está expuesto tomando como referencia los cambios de temperatura y de nivel del mar posiblemente vinculados a diferentes niveles de estabilización de los gases de efecto invernadero, sería también factible reelaborarlo para deducir los niveles de estabilización que se requerirían para cumplir determinados objetivos de política, expresados en términos de cambios de temperatura o de nivel del mar, es decir, más directamente relacionados con los impactos del cambio climático.

Impactos del cambio climático

Aunque se tienen amplios conocimientos sobre la sensibilidad y vulnerabilidad que podrían tener determinados sistemas y sectores, y se sabe qué aspectos conllevan riesgos importantes y posibles beneficios, nuestra capacidad para integrar esta información en una evaluación de los impactos que se derivarían de

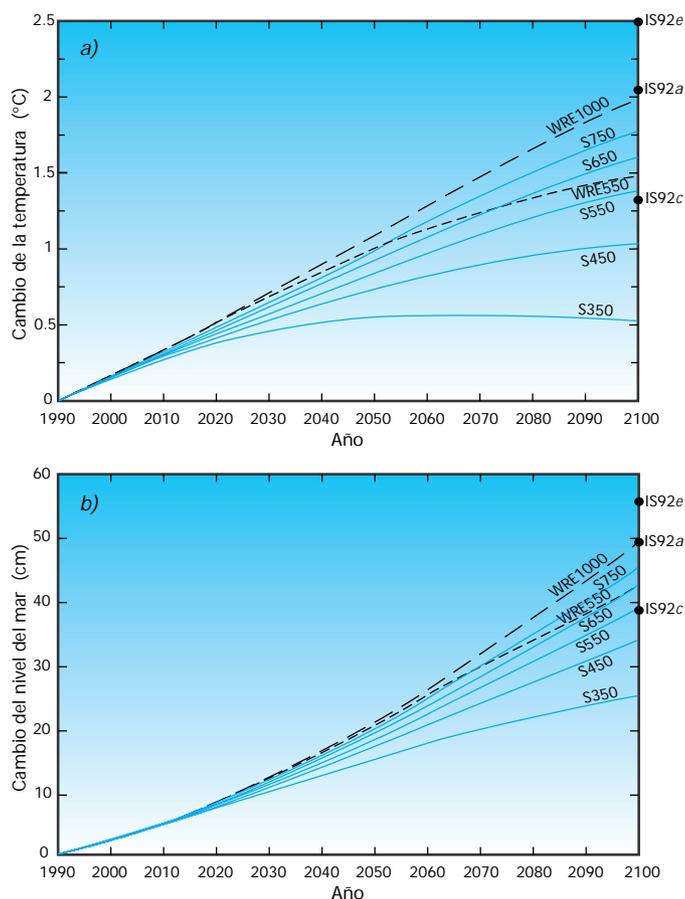


Figura 2. a) proyección de la temperatura media mundial cuando la concentración de CO₂ se estabiliza siguiendo los perfiles S así como WRE550 y 1000. Se ha supuesto que las emisiones de CH₄, N₂O y SO₂ permanecen constantes en sus niveles de 1990 y que los halocarbonos obedecen a un escenario de emisión compatible con el cumplimiento del Protocolo de Montreal. También se ha supuesto para la sensibilidad del clima un valor de orden intermedio: 2.5°C. A título comparativo, se indican los resultados correspondientes a los escenarios de emisiones IS92a, c y e para el año 2100. Estos valores están expresados con relación a 1990; para obtener el cambio antropógeno desde la era preindustrial habrá que añadir entre 0.3 y 0.7°C;

b) igual que en a), pero empleando como parámetros el cambio mundial del nivel del mar y la gama central de valores de fusión de hielo.

diferentes niveles de estabilización o trayectorias de emisión es, por el momento, relativamente limitada.

No se conocen tampoco en detalle las pautas regionales del futuro cambio climático, pero es evidente que la alteración de las pautas de forzamiento radiativo asociada a las emisiones antropógenas modificará a su vez apreciablemente los climas regionales e inducirá efectos diversos sobre las condiciones climáticas en diferentes regiones. Estos cambios locales y regionales pueden consistir en alteraciones en la duración de las estaciones de cultivo o en la disponibilidad de agua, o en una mayor o menor incidencia de regímenes de perturbación (valores extremos de alta temperatura, crecidas, sequías, incendios o plagas), que repercutirán a su vez notablemente en la estructura y función del medio ambiente natural y artificial. Algunos de los sistemas y actividades especialmente sensibles al cambio climático y a los consiguientes cambios de nivel del mar son: los bosques; los ecosistemas montañosos, acuáticos y costeros; la gestión de recursos hidrológicos e hídricos (incluida la criosfera); la producción de alimentos y fibras; la infraestructura humana y la salud humana.

Los impactos no son una función lineal de la magnitud y rapidez del cambio climático. Para algunas especies (y, por consiguiente, para algunos sistemas) pueden existir umbrales de cambio de temperatura, precipitación u otros factores que, una vez rebasados, den lugar a cambios discontinuos de su viabilidad, estructura o función. En el momento actual, no es posible evaluar conjuntamente todos los impactos a escala mundial, debido a: incertidumbres con respecto a los cambios climáticos regionales y a las respuestas a nivel regional; dificultad de valorar los impactos sobre los sistemas naturales y la salud humana; y diversas consideraciones de equidad, tanto entre regiones como entre generaciones.

La concentración final que alcancen los gases de efecto invernadero en la atmósfera y la celeridad con que aumenten las concentraciones influirán probablemente en los impactos, ya que un cambio climático más lento dará a los sistemas más tiempo para adaptarse. Sin embargo, no se sabe aún lo suficiente como para identificar con claridad ni umbrales de celeridad de cambio ni magnitudes de cambio.

Costos de mitigación vinculados a la estabilización de las concentraciones de CO₂

Algunos de los factores que influyen en los costos de mitigación son, para el caso del CO₂:

- a) las emisiones futuras, en ausencia de políticas de intervención (“valores de referencia”);
- b) el objetivo de concentración y la ruta hacia la estabilización, que determinan el balance de carbono disponible para las emisiones;
- c) el comportamiento del ciclo de carbono natural, que influye en el balance de carbono disponible para las emisiones,

sea cual fuere el objetivo de concentración y el recorrido elegidos;

- d) la diferencia de costos entre los combustibles de origen fósil y las alternativas sin carbono, y entre diferentes combustibles de origen fósil;
- e) el progreso tecnológico, y la mayor o menor celeridad con que se adopten tecnologías que emitan menos carbono por unidad de energía producida;
- f) los costos de transición vinculados a la renovación del capital de equipo, que aumentarán si se hace prematuramente;
- g) el grado de cooperación internacional, que determinará en qué medida se implementarán opciones de mitigación de bajo costo en distintas partes del mundo; y
- h) los supuestos sobre la tasa de descuento que se utilicen como base para comparar los costos en distintos momentos cronológicos.

Los costos de reducción de las emisiones dependerán de las emisiones “de referencia”, es decir, de la evolución proyectada de las emisiones en ausencia de políticas de intervención. Cuanto más alto sea el valor de referencia, más carbono habrá que eliminar para cumplir un objetivo de estabilización dado y mayor será, por consiguiente, la necesidad de intervención. El costo de reducción de las emisiones es también sensible al objetivo de estabilización de las concentraciones. En primera aproximación, un objetivo de estabilización define una cantidad de carbono que puede ser emitida entre el momento actual y la fecha en que se aspira a cumplir el objetivo (el denominado “balance de carbono”). La magnitud del “balance de carbono” es uno de los principales determinantes de los costos de mitigación. Unos objetivos de estabilización más bajos requieren unos balances de carbono menores que, a su vez, hacen obligan a un nivel de intervención mayor.

El costo de la estabilización de las concentraciones de CO₂ está también en función del precio de los combustibles de origen fósil comparado con el de las alternativas sin carbono. Una diferencia de precios grande significaría que los consumidores tendrían que gastar mucho más dinero en energía para reducir considerablemente las emisiones sustituyendo los combustibles de origen fósil por alternativas sin carbono. La diferencia de precios entre los combustibles de origen fósil no convencionales y las alternativas sin carbono disminuirá previsiblemente menos que la diferencia entre el petróleo y el gas convencionales y las alternativas sin carbono. Si, a la hora de reducir las emisiones mundiales de CO₂ con arreglo a determinado objetivo de estabilización, el petróleo y el gas siguieran estando entre las fuentes de energía importantes, los costos de transición serían mayores que si su importancia fuera secundaria. Aunque el costo adicional de las alternativas sin carbono será probablemente menor para los niveles de estabilización altos, no nos es posible predecir cómo variará esta diferencia a lo largo del tiempo y, dado que la demanda total de

energía es mayor para esos niveles de estabilización, no está claro cuál será el efecto neto sobre los costos de transición para diferentes niveles de estabilización.

Un objetivo de concentración dado puede alcanzarse a lo largo de diferentes recorridos de emisión. Las emisiones a corto plazo podrían compensarse con las emisiones a largo plazo. Para un nivel de estabilización dado, hay un “balance” de emisiones de carbono acumuladas permisibles, y la elección de un recorrido que conduzca a la estabilización podría consistir en asignar de la mejor manera posible (es decir, con la máxima eficacia económica y los mínimos efectos nocivos) ese balance de carbono a lo largo del tiempo. Las diferencias en cuanto al recorrido de las emisiones para un mismo nivel de estabilización son importantes, ya que los costos difieren según el recorrido que se adopte. Unas emisiones iniciales más altas reducen las posibilidades de ajustar las emisiones posteriormente.

En el sector de la energía, el capital de equipo suele ser de larga duración, y retirarlo antes de tiempo puede resultar costoso. Para evitar esto, una solución consistiría en repartir más uniformemente en el tiempo y en el espacio los costos de mitigación. Para reducir el costo de un objetivo de estabilización, es necesario orientarse a nuevas inversiones y sustituciones cuando finalice el ciclo económico de las plantas y los equipos (es decir, al alcanzar el punto de renovación), siguiendo un proceso de carácter continuo.

El costo de un recorrido de estabilización variará también según la influencia de la tecnología en el costo de aminoración de las emisiones, tanto para un valor cronológico fijo como a lo largo del tiempo. Por lo general, el costo de un recorrido de emisión aumentará si aumenta el volumen de emisiones que se desee aminorar en un momento dado. Los cambios tecnológicos necesarios para rebajar el costo de aminoración de las emisiones requerirán combinar diferentes medidas. Un mayor esfuerzo estatal en I+D, la eliminación de obstáculos de mercado al desarrollo y difusión de tecnologías, un apoyo explícito al mercado, unos incentivos fiscales y unas limitaciones adecuadas de las emisiones probablemente estimularán, si se aplican de manera conjunta, la tecnología necesaria para abaratar los costos de estabilización de la concentración de CO₂ en la atmósfera.

En lo que se refiere a los costos de mitigación, una tasa de descuento positiva disminuye el valor actual de los costos ya ocasionados. Ello se debe a que grava en menor medida las inversiones que se hagan en el futuro. De hecho, cuanto más alejada en el tiempo se encuentre una carga económica (en este caso, las reducciones de las emisiones), menor será el valor actual de los costos. En un contexto más amplio, la existencia de descuentos permite dar menos trascendencia a los impactos medioambientales

futuros en relación con los beneficios de la utilización actual de la energía. Esta posibilidad hace que algunos problemas importantes (por ejemplo, un rápido cambio de una energía a otra en el futuro) parezcan sencillos en términos de dólares actuales, y podría influir en la manera de abordar la equidad intergeneracional.

Integración de la información sobre impactos y costos de mitigación

En este informe se sientan las bases poder para integrar la información sobre los costos, los beneficios y los impactos del cambio climático. Un perfil de estabilización de la concentración que coincida con niveles de emisión exentos de intervención a lo largo de varios decenios no equivale necesariamente a cruzarse de brazos durante ese tiempo. De hecho, los estudios sugieren que, incluso en esos casos, habrá que adoptar medidas durante ese período para que las emisiones disminuyan posteriormente. Más adelante se examinarán las estrategias a seguir para constituir “carteras” de medidas que induzcan reducciones inmediatas o diferidas respecto de los recorridos exentos de intervención.

Existe un gran número de políticas disponibles para facilitar la adaptación al cambio climático, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y para crear tecnologías que reduzcan las emisiones en el futuro. Expresado en términos de CO₂ equivalente o de forzamiento radiativo total, un nivel de estabilización dado puede llegar a alcanzarse combinando o reduciendo de distintas maneras las emisiones de diferentes gases, y mejorando los sumideros de gases de efecto invernadero. Los gobiernos deberán tomar decisiones sobre el volumen de recursos a emplear y sobre la combinación de medidas que consideren más efectiva. Como se señala en el Segundo Informe de Evaluación – Grupo de Trabajo III del IPCC², es posible aplicar medidas “sin pesar” importantes. Dado que las políticas “sin pesar” son actualmente beneficiosas, lo que importa ahora para los gobiernos es cómo poner en práctica todas las medidas “sin pesar”³ y si hay o no que llegar aún más lejos, y, en tal caso, cuándo hacerlo y hasta dónde llegar. La actuación más allá de los niveles “sin pesar” estaría justificada atendiendo al riesgo de impactos netos totales por efecto del cambio climático, a la posibilidad de evitación de riesgos y a la aplicación del principio de cautela.

² En lo sucesivo, SIE GTIII.

³ Las medidas “sin pesar” son aquellas cuyos beneficios, tales como costos de energía reducidos o menores emisiones de contaminantes locales/regionales, igualan o superan a sus costos sociales, sin contar los beneficios de la mitigación del cambio climático.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Finalidades

En este documento técnico se explican, tomando como base la información contenida en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC (Grupos de trabajo I, II y III del IPCC, 1996⁴), las cuestiones científicas y técnicas que se plantean a la hora de interpretar el objetivo de la Convención Marco, de las Naciones Unidas, sobre el Cambio Climático (CMCC), enunciado en su Artículo 2 (Naciones Unidas, 1992):

“El objetivo último de la presente Convención y de todo instrumento jurídico conexas que adopte la Conferencia de las Partes, es lograr, de conformidad con las disposiciones pertinentes de la Convención, la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático. Ese nivel debería lograrse en un plazo suficiente para permitir que los ecosistemas se adapten naturalmente al cambio climático, asegurar que la producción de alimentos no se vea amenazada y permitir que el desarrollo económico prosiga de manera sostenible.”

El cumplimiento de este artículo requiere una estabilización de las concentraciones de los gases de efecto invernadero. Aunque en este trabajo se dedicará más atención al CO₂, se estudiará también el tema en relación con otros gases, de manera que se aprecien las incertidumbres que conllevaría el objetivo más general de estabilización de múltiples gases, y se sepa qué es lo que podemos afirmar con cierto grado de confianza.

Por una parte, la clara relación que en términos históricos vincula las emisiones de CO₂ y las cambiantes concentraciones atmosféricas y, por otra, nuestros considerables conocimientos sobre el ciclo del carbono, implican que, si la producción de combustibles de origen fósil y de cementos y las emisiones de CO₂ que se derivan de la utilización de las tierras continúa a los niveles históricos o actuales, o por encima de éstos, las concentraciones de este gas en la atmósfera irán en aumento. Para entender la evolución de las concentraciones de CO₂ en el futuro será necesario cuantificar, mediante modelos del ciclo del carbono, la relación existente entre las emisiones de CO₂ y la concentración de este gas en la atmósfera.

El presente estudio está basado en información presentada en el SIE-GTI, II y III. En primer lugar, examinaremos los resultados de una serie de cálculos tipificados (presentados en el Informe de 1994 del IPCC⁵ y en el SIE-GTI) que permiten analizar las relaciones entre emisiones y concentraciones para varios niveles de estabilización del CO₂ atmosférico, empleando dos recorridos diferentes para llegar a cada nivel. Seguidamente, estudiaremos los efectos de otros gases de efecto invernadero y aerosoles de sul-

fatos (derivados de emisiones de SO₂), y estimaremos los cambios de temperatura y de nivel del mar asociados a los distintos niveles de estabilización estudiados. Por último, abordaremos en líneas generales los impactos positivos y negativos que podrían derivarse de los cambios de temperatura y de nivel del mar proyectados, y examinaremos los costos de mitigación vinculados a la estabilización de los gases de efecto invernadero.

Para calcular las proyecciones de variación de temperatura y de aumento del nivel del mar, se ha hecho uso de los modelos simplificados utilizados en el SIE-GTI, que han sido calibrados tomando como referencia modelos más complejos. Se ha optado, sin embargo, por no utilizar estos últimos, dado que resultan excesivamente costosos en tiempo y en dinero para el gran número de casos incluidos en este estudio, y que sus resultados, en términos de valores medios mundiales, pueden representarse adecuadamente mediante modelos más simples (véase el Documento Técnico del IPCC *Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC* (IPCC TP SCM, 1997)).

Trabajando con distintos perfiles de concentración alternativos, en SIE-GTI se valoraron las posibles consecuencias climáticas que se derivarían de: *a)* una estabilización de las concentraciones de CO₂ a lo largo de recorridos diferentes; *b)* escenarios verosímiles de emisiones futuras para gases vestigiales distintos del CO₂; *c)* distintos niveles de emisiones futuras de SO₂ (que producirían diferentes niveles de aerosoles). En el contexto del artículo 2 (citado más arriba), es importante investigar distintos perfiles de emisión de gases de efecto invernadero que pudieran conducir a una estabilización de la concentración atmosférica, a fin de poder examinar diversas posibilidades y tipos de impacto. Además, valorando diferentes perfiles se evita hacer juicios sobre la celeridad o magnitud de los cambios e incurrir, de ese modo, en “interferencias peligrosas”. Para poder formular políticas con respecto a los objetivos de la CMCC y a su puesta en práctica, es importante comprender los condicionamientos a que está sujeta la estabilización de los gases de efecto invernadero; teniendo esto presente, se han incluido en este documento técnico, además de unas nociones introductorias, una valoración ampliada de los cálculos de estabilización presentados en IPCC94, SIE-GTI y SIE-GTII.

Específicamente, en este Documento Técnico:

- a)* explicaremos, paso por paso, las nociones básicas sobre estabilización de gases de efecto invernadero, la estimación del forzamiento radiativo, y el concepto de “CO₂ equivalente” (concentración de CO₂ que produce un forzamiento radiativo medio mundial en consonancia con los aumentos proyectados para todos los gases de efecto invernadero, partiendo de una serie de gases diferentes);
- b)* presentaremos un conjunto básico de perfiles de estabilización de CO₂ conducentes, siguiendo dos tipos de

⁴ En lo sucesivo SIE GTI, SIE GTII y SIE GTIII.

⁵ IPCC, publicado en 1995. En lo sucesivo, nos referiremos a este trabajo como a IPCC94.

- recorrido diferentes, a la estabilización entre 350 y 750 ppmv, con un solo perfil estabilizándose a 1000 ppmv;
- c) presentaremos los valores de emisión deducidos para los perfiles de estabilización de concentración anteriormente citados;
 - d) examinaremos la estabilización de los agentes de forzamiento radiativo distintos del CO₂;
 - e) computaremos (empleando un modelo climático simplificado) los cambios medios mundiales de temperatura y de nivel del mar para los perfiles de CO₂ indicados, basándonos en distintos supuestos de emisión de CH₄, N₂O y SO₂ y en diferentes valores de sensibilidad del clima y fusión de hielo de los parámetros de los modelos, con objeto de caracterizar las incertidumbres (véase en IPCC TP SCM, 1997 un estudio de los modelos de clima simples);
 - f) discutiremos las consecuencias que para el medio ambiente podrían derivarse de los cambios de temperatura y de nivel del mar;
 - g) examinaremos los factores que influyen en los costos de mitigación; y
 - h) examinaremos la metodología a seguir para integrar los efectos y los costos de mitigación de los cambios de clima y de nivel del mar, a fin de obtener una panorámica más completa de las consecuencias de un cambio en la composición de la atmósfera.

1.2 Aspectos más importantes

1.2.1 Conceptos básicos sobre los gases de efecto invernadero y los aerosoles troposféricos (véase el SIE-GTI, para más información al respecto)

De entre todos los gases de efecto invernadero, este informe se centra en el CO₂, dado que es el que hasta la fecha tiene y, según las proyecciones, tendrá un mayor efecto sobre el forzamiento radiativo (en 1990, 1.56 W m⁻² para el CO₂, frente a 0.47 W m⁻² para el CH₄, 0.14 W m⁻² para el N₂O, y 0.27 W m⁻² para los halocarbonos). La utilidad del forzamiento radiativo en los estudios sobre el cambio climático se aborda detalladamente en IPCC94 (Capítulo 4) y en IPCC TP SCM (1997). Se examinarán también en este trabajo los efectos derivados de una serie de supuestos sobre posibles emisiones futuras de otros gases de efecto invernadero y de SO₂, que es un precursor básico de aerosoles (los aerosoles pueden producir un efecto de enfriamiento del planeta).

Los aerosoles troposféricos (partículas microscópicas en suspensión en el aire) resultantes de la quema de combustibles de origen fósil o de biomasa, o de otras fuentes antropógenas, han originado un forzamiento directo estimado, con un alto grado de incertidumbre, en -0.5 W m⁻² (entre -0.25 W m⁻² y -1.0 W m⁻²), promediado para todo el planeta durante el último siglo. Existe también posiblemente un forzamiento indirecto negativo —mediado por las modificaciones de las nubes— que sigue siendo

muy difícil de cuantificar (SIE-GTI: Capítulo 2). Dado que el período de vida de los aerosoles en la atmósfera es corto, su distribución y, por consiguiente, sus efectos radiativos inmediatos son de ámbito marcadamente regional. Localmente, el forzamiento por aerosoles puede ser suficientemente intenso como para compensar sobradamente el forzamiento positivo causado por los gases de efecto invernadero. No obstante, aunque el forzamiento negativo es más intenso en determinadas regiones y áreas subcontinentales, influye en el clima a una escala entre continental y hemisférica, por efecto de acoplamientos mediados por la circulación atmosférica.

1.2.2 Estabilización de las concentraciones de CO₂ (véase el SIE-GTI, para más información al respecto)

Como caso particular entre los diferentes casos de estabilización estudiados, las emisiones antropógenas acumuladas entre 1991 y 2100 se situarían entre 630 y 1410 GtC para unos niveles de estabilización de entre 450 y 1000 ppmv. A efectos comparativos, las correspondientes emisiones acumuladas para los escenarios IS92 del IPCC están comprendidas entre 770 y 2190 GtC.

Para cada nivel de estabilización comprendido entre 350 y 750 ppmv, se examinarán dos recorridos diferentes: el recorrido “S”, que diverge inmediatamente de IS92a, y el “WRE”, que coincide inicialmente con IS92a. Se examina también un único recorrido que se estabiliza a 1000 ppmv. Los recorridos WRE implican unos niveles de emisión más altos a corto plazo, pero la disminución es después más rápida, y los niveles de emisión son posteriormente más bajos.

Los ecosistemas y los efectos de retroacción oceánicos podrían reducir el almacenamiento de carbono terrestre y oceánico hasta niveles ligeramente inferiores a los supuestos tanto en los modelos simplificados mundiales del ciclo de carbono, aquí utilizados, como en el Segundo Informe de Evaluación. Si durante un cambio climático transitorio se omitiesen procesos oceánicos y biosféricos potencialmente críticos, las incertidumbres resultantes podrían modificar considerablemente las conclusiones con respecto a las emisiones asociadas a la estabilización.

1.2.3 Incorporación de los efectos climáticos de otros gases de efecto invernadero y aerosoles: concepto de CO₂ equivalente

Dentro del margen de incertidumbre existente en cuanto a la “sensibilidad del clima” (véase más adelante), el futuro cambio climático antropógeno estará determinado por la suma de todos los forzamientos positivos y negativos vinculados a la totalidad de gases de efecto invernadero y aerosoles antropógenos, y no únicamente por el nivel de CO₂. Los escenarios de forzamiento utilizados en muchas de nuestras computaciones mediante modelos son la suma de los forzamientos radiativos de todos los gases vestigiales (CO₂, CH₄, O₃, etc.) y aerosoles, y se puede considerar que el forzamiento total es atribuible a una concentración

“equivalente” de CO₂. Se define, pues, la concentración de “CO₂ equivalente” como la concentración de ese gas que causaría el mismo forzamiento radiativo medio mundial que la mezcla dada de CO₂ con otros gases de efecto invernadero y aerosoles.

La diferencia entre el nivel de CO₂ equivalente y el nivel de CO₂ verdadero dependerá de los niveles a los que se establezcan las concentraciones de otros gases y aerosoles radiativamente activos. Los niveles de estabilización elegidos para CH₄, N₂O y SO₂ pueden afectar de manera considerable al valor del CO₂ equivalente. Si las emisiones de estos gases se mantuviesen inalterables en los niveles actuales, el CO₂ equivalente se estabilizaría entre 26 ppmv (S350) y 74 ppmv (WRE1000) ppmv por encima del nivel correspondiente al de CO₂ como único gas. Como los efectos de los gases de efecto invernadero son acumulativos, una estabilización de las concentraciones de CO₂ en cualquier nivel por encima de unas 500 ppmv produciría presumiblemente unos cambios atmosféricos equivalentes como mínimo a multiplicar por dos las concentraciones de gases de efecto invernadero anteriores a la era industrial.

1.2.4 *Implicaciones de una estabilización de gases de efecto invernadero a efectos de la temperatura mundial y del nivel del mar*

Se considerarán en este informe dos índices de cambio climático simples: la temperatura media mundial y el aumento del nivel del mar. El cambio de la temperatura media mundial es el principal factor determinante del aumento de nivel del mar, y un útil indicador del cambio climático global. Con todo, es importante tener en cuenta que el cambio climático no se producirá uniformemente en todo el planeta; los cambios de temperatura y de otras variables climáticas (por ejemplo, precipitación, nubosidad, o frecuencia de sucesos extremos) variarán grandemente de una región a otra. Para poder valorar las consecuencias del cambio climático, hay que tener en cuenta la variabilidad espacial de todos los factores: el forzamiento climático, la respuesta del clima y la vulnerabilidad de los sistemas de recursos humanos y naturales a escala regional. En cualquier caso, el estudio de los pormenores a nivel regional excede del alcance del presente informe.

Las pautas espaciales de algunos agentes de forzamiento radiativo, especialmente de los aerosoles, son muy heterogéneas, lo cual acentúa la variabilidad espacial del cambio climático. En este estudio, el forzamiento por aerosoles está descrito en términos de promedios mundiales, de manera que transmita la idea de lo que podría ser su magnitud global, su efecto sobre el promedio mundial de temperatura y su efecto sobre el aumento de nivel del mar. A pequeña escala, en cambio, el efecto del forzamiento por aerosoles sobre el cambio climático será probablemente muy diferente del que produciría un forzamiento medio mundial de magnitud similar que hubiera sido causado por gases de efecto invernadero. Por esta razón, en términos de cambio climático e impactos a escala regional no deberá entenderse que el forzamiento negativo o el enfriamiento vinculado al forzamiento por aerosoles se limitan a compensar el producido por los gases de efecto invernadero.

Las proyecciones de temperatura y de nivel del mar están en función de la sensibilidad del clima previamente supuesta, del objetivo y el recorrido elegidos para alcanzar la estabilización de la concentración de CO₂, y de los escenarios supuestos para otros tipos de forzamiento por gases de efecto invernadero y aerosoles. La importancia relativa de estos factores dependerá del intervalo de tiempo utilizado para la comparación. Hasta el año 2050, la diferencia entre los distintos recorridos que seguiría la concentración de CO₂ es, sea cual fuere el objetivo de estabilización, tan importante como la elección del objetivo; a escalas de tiempo mayores, sin embargo, la elección del objetivo es (necesariamente) más importante. Pero, por encima de todos estos factores, está la sensibilidad del clima, y las incertidumbres acerca de este factor se imponen sobre las incertidumbres inherentes a todas las proyecciones.

1.2.5 *Impactos*

Aunque se tienen amplios conocimientos sobre la sensibilidad y vulnerabilidad que podrían tener determinados sistemas y sectores, y se sabe qué aspectos conllevan riesgos importantes y posibles beneficios, nuestra capacidad para integrar esta información en una evaluación de los impactos que se derivarían de diferentes niveles de estabilización o trayectorias de emisión es, por el momento, relativamente limitada.

Aunque se conoce apenas la configuración que un futuro cambio climático podría tener a escala regional, está claro que la alteración de las pautas de forzamiento radiativo asociadas a las emisiones antropógenas alterarán a su vez considerablemente los climas regionales, y que influirán de manera diferente en las condiciones climáticas según las regiones. Estos cambios locales y regionales conllevarán necesariamente cambios en la duración de las estaciones de cultivo, en la disponibilidad de agua, y en la incidencia de regímenes de perturbación (valores extremos de alta temperatura, crecidas, sequías, incendios y plagas) que, a su vez, repercutirán notablemente en la estructura y función de los entornos naturales y artificiales. Algunos de los sistemas y actividades especialmente sensibles al cambio climático y a los consiguientes cambios de nivel del mar son: los bosques; los ecosistemas montañosos, acuáticos y costeros; la gestión de recursos hidrológicos e hídricos (incluida la criosfera); la producción de alimentos y fibras; la infraestructura humana y la salud humana. Los estudios de impacto existentes son, en su mayoría, análisis de los efectos que conllevaría un cambio climático en equilibrio si los niveles de CO₂ aumentasen al doble; son pocos los estudios que han contemplado la adopción progresiva de medidas de respuesta frente a unas condiciones más realistas que conlleven un aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero.

La magnitud de los impactos no está en relación proporcional con el nivel y con la rapidez de cambio del clima. Para algunas especies (y, por ende, para algunos sistemas), podrían existir umbrales de cambio de temperatura, de precipitación o de otros factores que, una vez rebasados, indujesen cambios discontinuos en su viabilidad, en su estructura o en su función.

La evaluación conjunta de los impactos a escala mundial es hoy una tarea imposible, por varias razones: no se conocen suficientemente ni los cambios climáticos ni las respuestas a éstos a escala regional, resulta difícil valorar las repercusiones sobre los sistemas naturales y la salud humana, y hay que atender a consideraciones de equidad, tanto entre regiones como entre generaciones.

La concentración final que alcancen los gases de efecto invernadero en la atmósfera y la celeridad con que aumenten las concentraciones influirán probablemente en los impactos, ya que un cambio climático más lento dará a los sistemas más tiempo para adaptarse. Sin embargo, no se sabe aún lo suficiente como para identificar con claridad umbrales de celeridad de cambio, ni la magnitud de los cambios.

1.2.6 Costos de mitigación vinculados a la estabilización de las concentraciones de CO₂

Algunos de los factores que influyen en los costos de mitigación son, para el caso del CO₂:

- las emisiones futuras, en ausencia de políticas de intervención (“valores de referencia”);
- el objetivo de concentración y la ruta hacia la estabilización, que determinan el balance de carbono disponible para las emisiones;
- el comportamiento del ciclo de carbono natural, que influye en el balance de carbono disponible para las emisiones, sea cual fuere el objetivo de concentración y el recorrido elegidos;
- la diferencia de costos entre los combustibles de origen fósil y las alternativas sin carbono, y entre diferentes combustibles de origen fósil;
- el progreso tecnológico, y la mayor o menor celeridad con que se adopten tecnologías que emitan menos carbono por unidad de energía producida;
- los costos de transición vinculados a la renovación del capital de equipo, que aumentarán si se hace prematuramente;
- el grado de cooperación internacional, que determinará en qué medida se implementarán opciones de mitigación de bajo costo en distintas partes del mundo; y
- los supuestos sobre la tasa de descuento que se utilicen como base para comparar los costos en distintos momentos cronológicos.

1.2.7 Integración de la información sobre los impactos y de los costos de mitigación

En este informe se sientan las bases poder para integrar la información sobre los costos, los beneficios y los impactos del cambio climático. Hay que advertir, antes que nada, que los perfiles de esta-

bilización de concentraciones que reflejan una pauta de emisiones “exenta de intervención” durante períodos de hasta varios decenios no deberán entenderse como una sugerencia de que no es necesario actuar durante esos períodos. De hecho, los estudios sugieren que, incluso si las emisiones se mantienen a niveles “sin intervención” durante períodos prolongados, será necesario hacer algo para que las emisiones disminuyan posteriormente. Más adelante examinaremos las estrategias a seguir para desarrollar conjuntos de medidas que reduzcan, inmediatamente o a la larga, las emisiones por debajo de los niveles “sin intervención”.

Nos proponemos, en este trabajo, explicar la manera de reunir información sobre los costos, impactos y beneficios que conllevaría una estabilización de los gases de efecto invernadero de la atmósfera. Para ello, al igual que se hace en muchos casos para la toma de decisiones, se trabaja en dos vertientes. En la primera (“impactos”) se reúne información empezando por los cambios de concentración supuestos para, a continuación, evaluar el cambio climático potencial y sus consecuencias. En la segunda (“mitigación”), se compila información sobre las emisiones y los costos de mitigación vinculados a distintos recorridos y niveles de estabilización. Combinando estas dos líneas de trabajo, se obtiene una valoración integrada del cambio climático y de la estabilización (Figura 3).

Expresado en términos de CO₂ equivalente o de forzamiento radiativo total, un nivel de estabilización dado puede ser alcanzado reduciendo en distintas combinaciones las emisiones de diversos gases, y mejorando cualitativamente los sumideros de gases de efecto invernadero. Si se tienen en cuenta todas esas opciones y se eligen las menos costosas, sin por ello dejar de lado las diferentes fuentes y sumideros, será posible abaratar los costos de la mitigación. Para determinar una combinación óptima es necesario conocer las implicaciones de las diferentes estrategias de emisión en términos de concentración y de clima, los costos de mitigación y otras características de las distintas opciones, y ciertas decisiones sobre las escalas de tiempo apropiadas y los índices de impacto (climático y no climático) a utilizar para la comparación de los diferentes gases. Dado el elevado nivel de incertidumbre, será

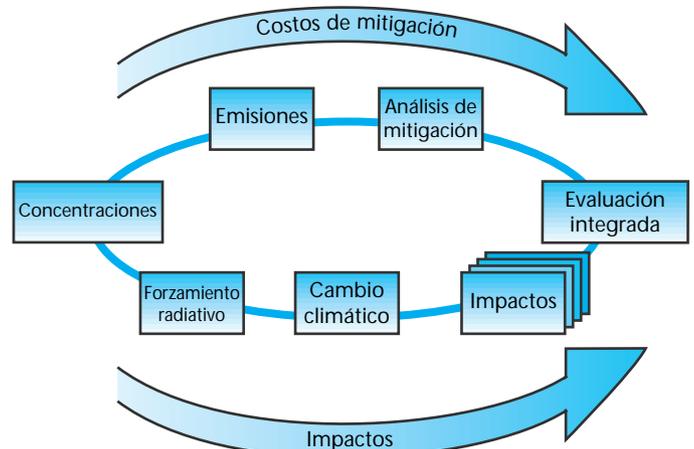


Figura 3. Esquema general de la estructura y lógica del presente Documento Técnico.

necesario reevaluar y modificar estas combinaciones de opciones de una manera evolutiva.

Para constituir una cartera de medidas que hagan frente al cambio climático, los gobiernos deberán decidir tanto el volumen de los recursos que destinarán a este fin como la diversidad de medidas que consideren más efectivas. Puesto que las políticas “sin pesar” son actualmente beneficiosas, la cuestión que se plantea a los gobiernos es cómo llevar a efecto todas estas medidas y si procede hacerlo, y, en tal caso, en qué momento y hasta qué punto habría que llegar más allá de las opciones estrictamente “sin pesar”. La actuación más allá de los niveles sin pesar está justificada, teniendo en cuenta el riesgo de impactos netos totales por efecto del cambio climático, la posibilidad de evitación de riesgos y la aplicación del principio de cautela (SIE-GTIII).

Hay numerosas medidas de política a las que es posible recurrir para facilitar la adaptación al cambio climático, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y para crear tecnologías que reduzcan las emisiones en el futuro. Algunas de ellas son: reducción inmediata de emisiones para frenar el cambio climático; investigación y desarrollo sobre nuevas tecnologías de suministro y de conservación, para reducir en el futuro los costos de aminoración; investigación continua para reducir incertidumbres científicas de importancia crítica; e inversión en actuaciones que ayuden a los sistemas humanos y naturales a adaptarse al cambio climático mediante la mitigación de los impactos negativos y el aprovechamiento de los beneficios que reporte el aumento de CO₂ (por ejemplo, una utilización más eficiente del agua o de los nutrientes en algunos cultivos, gracias al aumento del CO₂). No hay que plantear esto en términos de “o una solución o la otra”, sino tratar de encontrar la combinación adecuada de opciones (es decir, la “cartera”) a emplear, tanto de manera conjunta como secuencialmente. En todo momento, esa combinación de opciones variará en función del objetivo de concentración que se determine, y que, a su vez, podrá ser ajustado a medida que progrese la base de conocimientos científicos y económicos. La cartera adecuada variará también según los países, y dependerá de los mercados de energía, de consideraciones de índole económica, de las estructuras políticas y de la receptividad social.

1.3 Explicación descriptiva del presente informe

1.3.1 Estrategia seguida en este informe

Este informe está organizado como se muestra en la Figura 1. Dicha estructura tiene por objeto reunir toda la información importante que pueda interesar a muy diversos responsables de políticas en relación con el cumplimiento de la CMCC. La información se divide en dos grandes categorías necesarias para comprender los costos y beneficios asociados a la estabilización atmosférica. En la primera categoría (o “rama”) se incluye información sobre el cambio climático y sobre sus consecuencias, mientras que en la otra se agrupa información sobre las emisiones y los costos de mitigación. Esta clasificación estructura la información del

SIE-GTI, GTII y GTIII en lo referente a la estabilización de los gases de efecto invernadero, de manera que sea posible utilizarla en un análisis más integrado.

La estrategia elegida proviene del SIE-GTI, en que se utiliza una serie de perfiles de concentración como punto de partida para deducir, aunque en forma simplificada, unos valores de emisiones antropógenas compatibles con la física y la biología de los ecosistemas oceánicos y terrestres (véase la Sección 2.2.1.3, en lo referente a las incertidumbres). A partir de los perfiles de concentración, calculamos, mediante modelos de clima simplificados obtenidos del SIE-GTI (Sección 6.3), las consecuencias de dichos perfiles de concentración de CO₂ en cuanto a la temperatura media mundial y al nivel del mar. Efectuamos también análisis de sensibilidad que permiten apreciar los efectos de otros gases y aerosoles sobre estos análisis clave basados en el CO₂. Estos cambios de la temperatura media mundial y del nivel del mar sirven de contexto para examinar las consecuencias en cuanto a recursos naturales, infraestructura, salud humana y otros sectores afectados por el clima (véase la Sección 3.1). Con ello concluye la “rama de impactos” del análisis (véase la Figura 1). Obsérvese que las consecuencias inferidas de este análisis tienen únicamente un valor simplificado como media estadística mundial. Si se desea una panorámica más completa, hay que tomar también en consideración los cambios climáticos regionales y las vulnerabilidades de los sistemas (véanse en el SIE-GTI: Capítulo 6 y en el SIE-GTII sendas discusiones sobre estos dos temas).

La “rama de costos de mitigación” de este análisis comienza también con los perfiles de concentración (véase la Figura 3). Seguidamente se computan, a partir de los perfiles de concentraciones y de los modelos de ciclo del carbono (véanse el SIE-GTI: Sección 2.1, y el IPCC94: Sección 1.5), las emisiones antropógenas compatibles con los modelos de ciclo del carbono (examinados en la Sección 2.2.1). Estos valores de emisión deducidos pueden utilizarse en los modelos económicos para, basándose en los supuestos apropiados, estimar los costos de “mitigación” vinculados al perfil de estabilización, y no a la trayectoria “sin intervención” (examinada en la Sección 3.2). Esta computación puede aplicarse a muy diversos perfiles de estabilización y modelos económicos, a fin de formarse una idea de los posibles costos de mitigación en función de los objetivos y recorridos de estabilización que se elijan. Obsérvese que en todos estos análisis se contemplan los costos de mitigación vinculados a determinados perfiles de concentración específicos. Así pues, ni se trata de trayectorias “óptimas” ni de recomendaciones de política. Se trata de análisis ilustrativos de las relaciones entre las concentraciones y las emisiones y, por consiguiente, de los costos de mitigación correspondientes.

Conceptualmente, estas dos ramas confluyen en la sección relativa a la integración de información sobre impactos y sobre costos de mitigación (véase la Sección 3.3). Ninguna de las dos sienta adecuadamente las bases para la adopción de decisiones. Este tipo general de problema sirve de base para muy diversos esquemas de adopción de decisiones, que pueden integrar esta información de muy distintas maneras (véase el SIE-GTIII: Capítulo 4).

1.3.2 Marcos para la adopción de decisiones

Aunque es importante reunir información sobre los costos y beneficios asociados a la estabilización atmosférica, no es lo mismo reunir y ensamblar información que recomendar un simple análisis de costo-beneficio. El paradigma del costo-beneficio es la aplicación más conocida, en el ámbito de la toma de decisiones, de la economía de igualación de costos y beneficios, aunque no es el único planteamiento existente. Otras técnicas son, por ejemplo, el análisis de efectividad en términos de costos, el análisis multicriterios y el análisis de decisiones (SIE-GTIII, página 151). Todo marco para la toma de decisiones debe incluir la incertidumbre respecto de los cambios de concentración proyectados, respecto de los consiguientes efectos sobre el clima y respecto de sus consecuencias en los sistemas humanos y naturales. Existen también muy diversos paradigmas para abordar esta incertidumbre; aparecen resumidos en el SIE-GTIII.

El análisis de las incertidumbres biofísicas y económicas expuesto en el presente informe constituye sólo un breve resumen de cues-

tion. Aunque en el SIE-GTI, GTII y GTIII se examina más a fondo este tema, las dimensiones reales de la incertidumbre en los análisis que vinculan, en último extremo, las concentraciones a los costos y a las consecuencias siguen siendo una activa esfera de investigación. Con independencia del método que finalmente se utilice en el proceso de toma de decisiones, la información sobre los costos y beneficios de la mitigación de las emisiones puede servir para mejorar la calidad de las decisiones de política.

En el presente documento no se intenta enjuiciar las cuestiones prácticas que plantea la implementación de estrategias de mitigación de las emisiones, y tampoco se abordan las preocupaciones que en cuanto a igualdad de trato y a equidad se desprenden de dichas deliberaciones. La perspectiva mundial aquí empleada responde a fines metodológicos y pedagógicos: con ella, no se quiere dar a entender que las cuestiones regionales son menos importantes; es evidente que la política sobre el clima debe establecerse en un contexto de profusas consideraciones de política internacional. Este tipo de temas enriquece aún más la complejidad de los asuntos que los responsables de políticas deben afrontar.

2. IMPLICACIONES GEOFÍSICAS DE LA ESTABILIZACIÓN DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO

2.1 Principios generales de la estabilización: la estabilización del anhídrido carbónico y de otros gases

Ha habido cierta confusión con respecto a los aspectos científicos de la estabilización de la concentración del CO₂ en la atmósfera frente a la de los demás gases, especialmente con respecto al concepto de “período de vida”. Los procesos que controlan los períodos de vida de los gases más importantes han sido extensamente tratados en el SIE-GTI (Capítulo 2) y en el IPCC94, que contienen material de referencia esencial para este breve repaso.

La mayoría de los depósitos de carbono *intercambian* CO₂ con la atmósfera, tanto absorbiéndolo (océanos) o asimilándolo (ecosistemas) como liberándolo (océanos) o respirándolo (ecosistemas). Lo más importante en estos casos es que el carbono antropógeno emitido a la atmósfera *no es destruido*, sino que *viene a añadirse* y *es redistribuido* entre los depósitos de carbono. Los depósitos intercambian carbono entre sí a escalas temporales muy diversas, con arreglo a sus períodos de renovación. Estos períodos pueden ser del orden de años a decenios (renovación del carbono en las plantas vivas) o milenios (renovación del carbono en las profundidades del mar y en alojamientos del suelo de larga duración). Estas escalas temporales suelen ser mucho mayores que el tiempo promedio de permanencia de una molécula de CO₂ en la atmósfera, que es de unos 4 años. La amplia diversidad de los períodos de renovación tiene otra consecuencia importante: el relajamiento de una concentración atmosférica perturbada de CO₂ hasta alcanzar un nuevo equilibrio no puede describirse mediante una sola constante temporal. Por ello, todo intento de caracterizar mediante una única constante temporal (por ejemplo, 100 años) la eliminación de CO₂ antropógeno de la atmósfera deberá ser interpretado únicamente en sentido cualitativo. Las evaluaciones cuantitativas basadas en un solo período de vida son erróneas.

Al contrario de lo que ocurre con el CO₂, los aerosoles y los demás gases de efecto invernadero como, por ejemplo, los halocarbonos, el metano y el N₂O, son destruidos (por ejemplo, mediante oxidación, descomposición fotoquímica o, en el caso de los aerosoles, deposición sobre el suelo). El tiempo que una de estas moléculas (o partículas) permanece, en promedio, en la atmósfera (es decir, su tiempo de renovación) es igual o aproximadamente igual al tiempo de ajuste.

El metano es emitido a la atmósfera desde muy diversas fuentes (véase el SIE-GTI), y es destruido principalmente mediante oxidación por el radical hidroxilo (OH), en la atmósfera, y por microorganismos en el suelo. El tiempo de ajuste de una perturbación del metano atmosférico está controlado por su oxidación (que produce CO₂ y vapor de agua), y no por intercambio con otros depósitos, que podría ir seguido de una reemisión de metano a la atmósfera. El período de vida del metano se complica por la existencia de procesos de reali-

mentación entre metano y OH, de tal modo que al aumentar la concentración de aquél su tasa de eliminación varía entre -0.17 y +0.35% por cada 1% de incremento de metano (SIE-GTI: Sección 2.2.3.1). Influyen también en el período de vida de este gas muchos otros procesos de realimentación del sistema CH₄-CO-O₃-OH-NO_x-UV. El metano puede llegar a estabilizarse a la escala temporal de su período de vida atmosférico, es decir, en decenios o períodos menores.

El óxido nitroso tiene un período de vida largo, entre 100 y 150 años. El N₂O es eliminado de la troposfera (donde actúa como gas de efecto invernadero) mediante intercambio con la estratosfera, donde es destruido lentamente por descomposición fotoquímica. Al igual que en el caso del metano, su período de vida está controlado por su rapidez de destrucción y, al igual que aquél, es destruido y no intercambiado con otros depósitos de N₂O. Para que la concentración de N₂O pueda estabilizarse es necesario que se reduzcan sus fuentes y durante largos períodos, para poder influir en las concentraciones, dado que el período de vida de este gas es de ~120 años. Por otra parte, las concentraciones de aerosoles atmosféricos se ajustan, en un plazo de días a semanas, a un cambio de las emisiones de aerosoles y de gases precursores de aerosoles.

2.2 Descripción de perfiles de concentración, otros escenarios de gases vestigiales, y computación de CO₂ equivalente

2.2.1 Consecuencias de la estabilización desde el punto de vista de las emisiones

2.2.1.1 Perfiles de concentración que conducen a una estabilización

En este Documento Técnico se evalúan los 11 perfiles ilustrativos de concentración de CO₂ (estabilizados a entre 350 y 1000 ppmv, que corresponden a los perfiles “S” y WRE”), tal como se expone en el SIE-GTI. Estos perfiles describen recorridos de concentración a lo largo del tiempo que conducen gradualmente a una estabilización en el nivel prescrito (Figura 2). Los perfiles WRE prescriben incrementos de concentración de CO₂ mayores y más tempranos que los perfiles S, pero conducen a los mismos niveles de estabilización (Wigley y otros, 1996). Se pueden utilizar también estos perfiles de concentración como datos de entrada para computar diversos tipos de emisiones permisibles a lo largo del tiempo. Las emisiones así deducidas pueden utilizarse a su vez en modelos econométricos, como datos de entrada, para computar los costos de mitigación que conllevaría la reducción de emisiones con arreglo a un perfil de concentración especificado. Cabe señalar que esta línea de trabajo no permite calcular los recorridos óptimos de las emisiones, ni presupone nada al respecto.

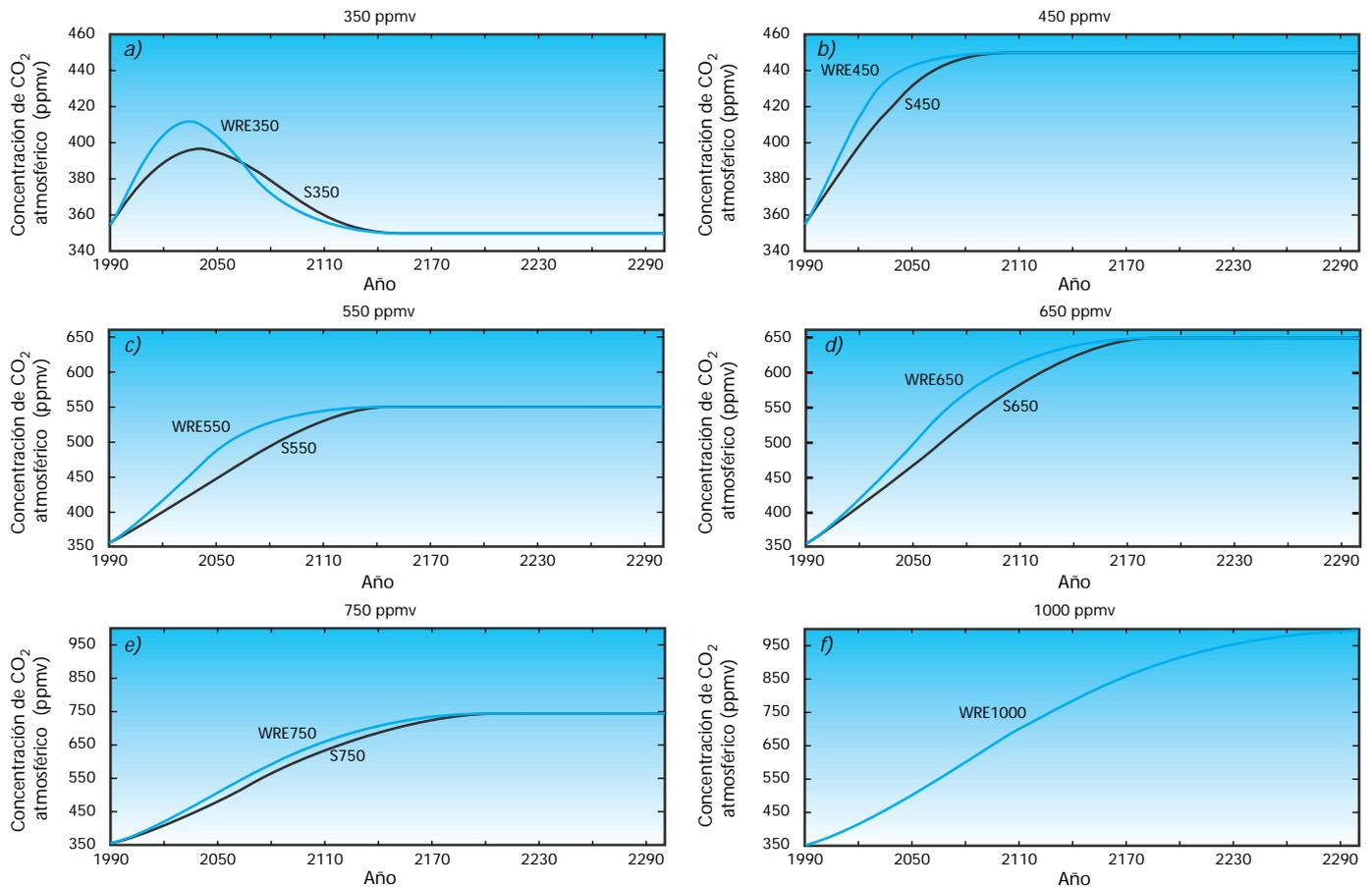


Figura 4. Perfiles de CO_2 que conducirían a la estabilización a concentraciones de entre 350 y 1000 ppmv. A efectos comparativos, la concentración de la era preindustrial estaba próxima a 280 ppmv, mientras que la actual se cifra en torno a 360 ppmv. Se muestran dos rutas conducentes a una estabilización entre 350 y 750 ppmv: los perfiles S (tomados de IPCC94), y los perfiles WRE (Wigley, *et al.*, 1996), que permiten que las emisiones de CO_2 coincidan con IS92a hasta 2000 o más (según sea el nivel de estabilización). Se define un único perfil para 1000 ppmv. Estos dos conjuntos de perfiles son sólo ejemplos tomados de entre toda una diversidad de posibles rutas hacia la estabilización que sería posible definir.

2.2.1.2 Implicaciones de la estabilización de las concentraciones de CO_2 desde el punto de vista de las emisiones

En este análisis se examinan de nuevo los perfiles S350-750 y los perfiles WRE 350-1000 descritos en el IPCC94 (Capítulo 1) y en el SIE-GTI (Sección 2.1), aunque en términos más completos de lo que fue posible que en dichos documentos. En primer lugar, mostraremos diversas representaciones gráficas de concentraciones de CO_2 en función del tiempo (Figura 4) y de la evolución en el tiempo de las emisiones correspondientes para los 11 perfiles y, con fines comparativos, para las emisiones correspondientes a los escenarios IS92a, c y e (Figura 5). Obsérvese que las emisiones de CO_2 vinculadas a los escenarios IS92a y e son mayores en 2050 que las correspondientes a todos los perfiles S y WRE (excepto WRE1000, que fue construido para reproducir las concentraciones de IS92a hasta 2050). El escenario IS92c sugiere unos niveles de emisiones inferiores para 2050 que con los niveles de estabilización de S550, WRE550 y superiores, para cualquiera de los dos recorridos.

Para más amplia información sobre los supuestos en que se basan estos resultados y sobre las diferencias entre modelos, véase Enting *et al.* (1994). Para los perfiles de estabilización dados, un período de emisiones en aumento suele ir seguido de una rápida disminución hasta alcanzar un nivel estabilizado. Insistimos en que esta pauta no es aplicable a los perfiles S350 y WRE350, y en que éstos implican unas emisiones negativas durante algún tiempo en estos casos, dado que 350 ppmv es un valor inferior al de la concentración atmosférica. Como puede verse en la Figura 5 de la página 15, los perfiles WRE permiten inicialmente unas emisiones más elevadas, pero implican una transición más rápida de niveles de emisión crecientes a decrecientes y unas emisiones menores posteriormente, antes de que las emisiones para los perfiles S y WRE converjan. En este estudio no nos ocuparemos del concepto de recorrido de emisiones óptimo, sino que nos limitaremos a exponer las consecuencias, desde el punto de vista de las emisiones, de diversos recorridos prescritos que conducirían a una estabilización de la concentración.

En la Figura 6 de la página 16 se representa la acumulación de emisiones de CO_2 a lo largo del tiempo para alcanzar una

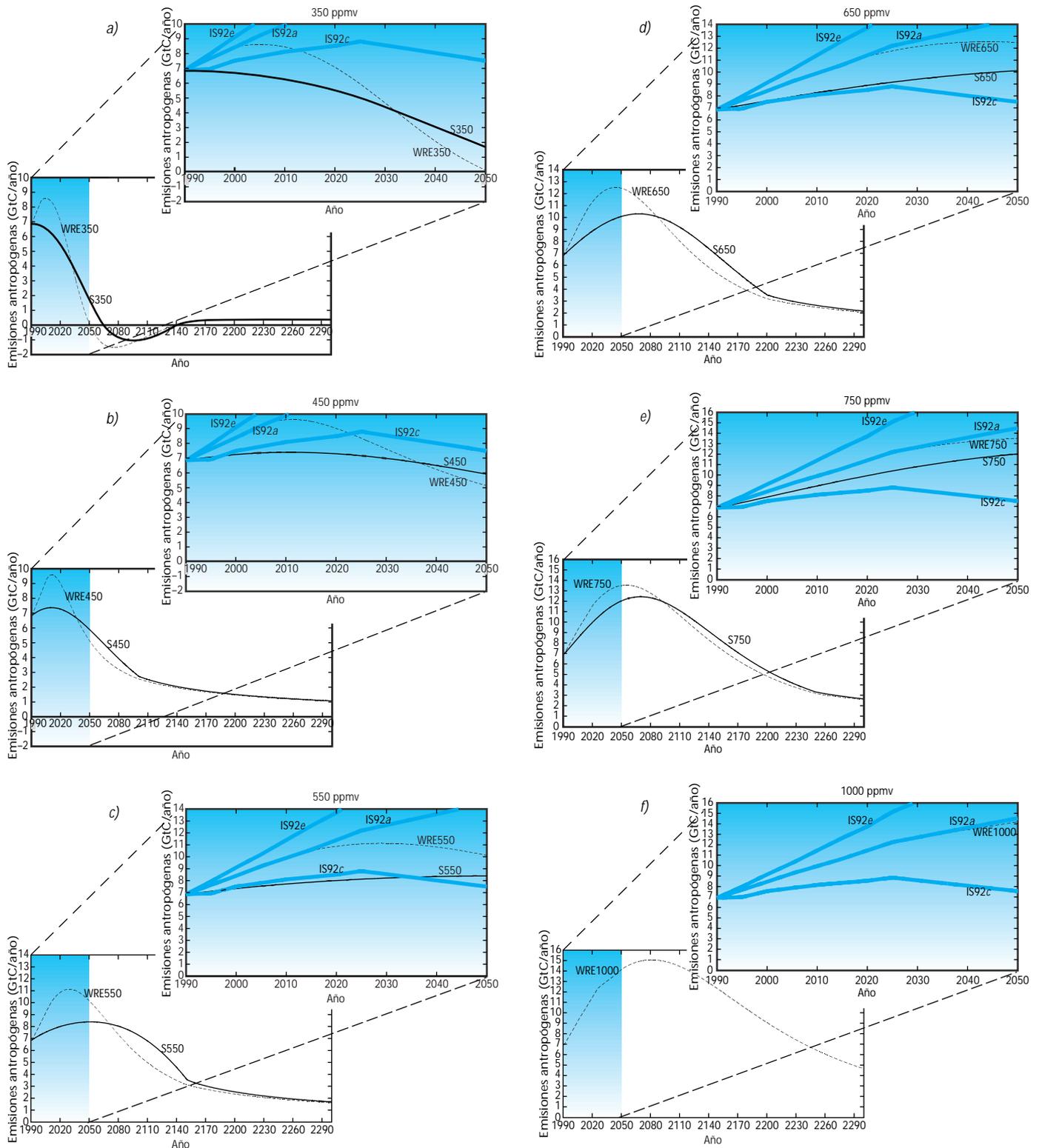


Figura 5. Emisiones antropógenas deducidas (combustibles de origen fósil, cementos y utilización de las tierras) de CO₂ entre 1990 y 2300 que permitirían lograr concentraciones estables de CO₂ ateniéndose a los perfiles de la Figura 4, computados mediante el modelo de ciclo de carbono de Bern. El período 1990-2050 figura con mayor detalle en el recuadro ampliado, junto con las emisiones de CO₂ de IP92a, c y e, con fines comparativos. Los resultados de WRE, que permiten que las emisiones de CO₂ coincidan inicialmente con IP92a, arrojan unas emisiones máximas más elevadas que los resultados correspondientes a los perfiles S, pero con una transición más rápida y más temprana entre emisiones en aumento y en disminución. Los análisis del IPCC (1994) y del SIE-GTI (Sección 2.1) muestran que los resultados de otros modelos podrían diferir de estos resultados ($\pm 15\%$). La incertidumbre aumenta si se tiene en cuenta nuestra inadecuada comprensión del problema, y por el hecho de excluir, de los modelos del ciclo de carbono utilizados en el SIE-GTI (Sección 2.1), los procesos biosféricos cruciales y sus respuestas al cambio climático (véase la Sección 2.2.1.3).

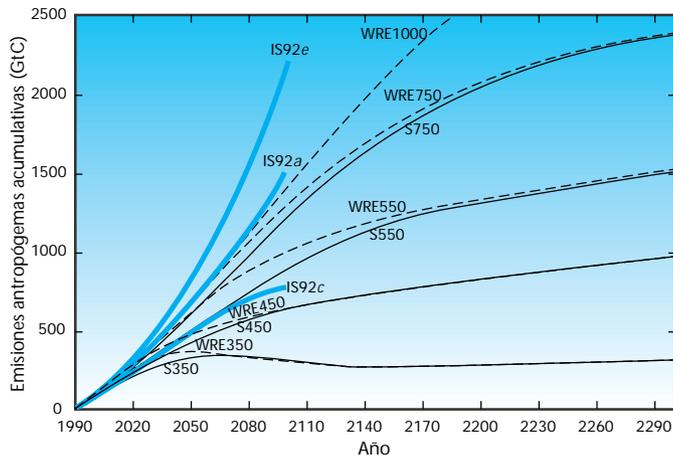


Figura 6. Emisiones antropogénicas de CO₂ acumuladas a lo largo del tiempo a partir de 1990. Inicialmente, las emisiones acumuladas son inferiores para los perfiles S que para los perfiles WRE pero, a medida que las emisiones se acumulan en períodos de tiempo cada vez más largos, los resultados de los dos perfiles convergen sea cual fuere el nivel de estabilización. Obsérvese que, cuanto más alto es el nivel de estabilización al que se llega, mayores serán las emisiones acumuladas (denominadas, en el texto, balance de carbono), y más tarde convergen los dos perfiles. Estos resultados se obtuvieron mediante el modelo de ciclo del carbono de Bern. Véanse la Sección 2.3.3 y la leyenda de la Figura 5, en las que se analizan las incertidumbres.

estabilización a 350, 450, 550, 750 y 1000 ppmv, así como las correspondientes emisiones asociadas a los escenarios IS92a, e y c. Como puede verse claramente en la Figura 6, en 2100 las emisiones acumuladas asociadas a los escenarios IS92a y e son mayores que para los perfiles S y WRE. Al igual que en la Figura 5, se aprecia claramente en la Figura 6 que los perfiles WRE permiten unas emisiones mucho más elevadas a corto plazo aunque, a más largo plazo, las emisiones acumuladas de los perfiles WRE son muy parecidas al valor total de los perfiles S. Ello se debe a que, para un nivel de estabilización dado, las emisiones acumuladas a largo plazo son relativamente insensibles al recorrido seguido hasta alcanzar al estabilización.

Las emisiones deducidas para un perfil de concentración dado conducente a una estabilización definen el “balance de carbono” disponible para las emisiones antropogénicas procedentes del quemado de combustible de origen fósil, de la fabricación de cementos, de la conversión de usos de la tierra y de otras actividades. Cuanto mayores son las emisiones acumuladas (es decir, para niveles de estabilización más altos), mayor será el balance de carbono disponible para las actividades antropogénicas (véase la Sección 3.2). La magnitud del balance de carbono es también sensible, especialmente en una primera etapa, al recorrido elegido (como reflejan las diferencias entre los perfiles S y WRE de la Figura 6).

2.2.1.3 Incertidumbres críticas con respecto al ciclo del carbono

Para calcular niveles de emisión compatibles con toda una gama de niveles y recorridos de estabilización, se utilizaron en el

SIE-GTI (Sección 2.1) modelos y datos de entrada disponibles y de aceptación general en aquel momento. En este Documento Técnico se examinará y sintetizará material tomado del SIE, es decir, se utilizarán los modelos tal y como se describen en dicho documento. Sin embargo, estudios examinados en el SIE-GTI (Sección 2.1, y Capítulos 9 y 10), sugerían que los mecanismos no incluidos en los modelos simplificados del ciclo de carbono mundial podrían afectar considerablemente a los resultados. Las incertidumbres que aparecerían si omitiéramos algunos procesos oceánicos y biosféricos potencialmente críticos, y la respuesta de éstos durante cambios climáticos transitorios, podrían tener un efecto considerable en las conclusiones que se obtengan con respecto a los impactos.

Los modelos del ciclo de carbono utilizados en el SIE-GTI y, como punto de partida, en el presente Documento incluyen la fertilización mediante CO₂ del crecimiento vegetal como única interacción entre las condiciones medioambientales y el carbono terrestre. Tal como se ha expuesto en el SIE-GTI (Sección 2.1 y Capítulo 9), este supuesto podría presentar fallos en diversos aspectos. En primer lugar, los efectos de realimentación de los ecosistemas podrían modular la sensibilidad de los almacenamientos de carbono terrestres hasta alcanzar niveles ligeramente inferiores a los supuestos en los modelos simplificados de carbono mundial utilizados en el SIE-GTI. Esta incertidumbre se analiza en las figuras que se muestran en el SIE-GTI (Sección 2.1) y en el IPCC94 (Capítulo 1). En segundo lugar, la sensibilidad al CO₂ podría cambiar por aclimatación, debilitando también posiblemente el efecto a lo largo del tiempo. Otros procesos vegetales podrían actuar en sentido contrario, y no se sabe cuál podría ser el balance en términos de insumo de carbono (SIE-GTI: Capítulo 9). Por último, otros procesos adicionales podrían afectar, ahora y en el futuro, al almacenamiento de carbono terrestre. Entre ellos: fertilización por deposición de nitrógeno; cambio climático (Dai y Fung, 1993); y cambios en la utilización de la tierra (SIE-GTI; Sección 2.1 y Capítulo 9). Algunos de estos mecanismos, por ejemplo la deposición de nitrógeno, podrían “saturarse” en sus efectos y llegar a causar incluso la extinción de bosques en un futuro. Aunque se ha explorado la sensibilidad a estas interacciones (por ejemplo, VEMAP, 1995), no hay aún consenso sobre la mejor manera de incorporarlas en modelos simplificados. Sintetizando los resultados del SIE-GTI (Sección 2.1 y Capítulo 9) y del IPCC94 (Capítulo 1), el intercambio biosférico podría modificar las emisiones acumuladas provenientes de combustibles de origen fósil durante la estabilización en ± 100 GtC respecto de los casos examinados. El impacto de este efecto en los costos de mitigación se examinará en la Sección 3.2.

Además, al calcular las emisiones a partir de las concentraciones mediante los modelos del ciclo del carbono no se ha supuesto la existencia de efectos de retroacción del clima sobre la circulación y la biogeoquímica de los océanos, o sobre los ecosistemas terrestres. Hay evidencias teóricas (Townsend y otros, 1992; IPCC94: Capítulo 1) y observacionales en apoyo de una notable sensibilidad de las emisiones de CO₂ biosférico a la temperatura (Keeling y otros, 1995). Pero, si existe esta sensibilidad, probablemente varía con la geografía (IPCC94: Capítulo 1), por lo que sus

efectos globales serán sensibles a los cambios climáticos regionales, y no a los cambios de la media mundial (véase la Sección 3.1). El calentamiento y los cambios de precipitación podrían causar a corto plazo eflujos de carbono de los ecosistemas (Smith y Shugart, 1993; Townsend *y otros*, 1992; Schimel *y otros*, 1994; Keeling *y otros*, 1995; SIE-GTI: Capítulo 9), pero también una acumulación a largo plazo (VEMAP, 1995).

Las retroacciones del clima podrían también afectar notablemente al ciclo de carbono oceánico. En el IPCC94 (Capítulo 1) se estimó un margen de incertidumbre a largo plazo de entre -120 ppmv y +170 ppmv para el insumo futuro en el océano, basándose en ciertos supuestos sobre el papel desempeñado por los procesos biológicos en los hipotéticos océanos futuros para dos tipos de océano en estado estacionario. No se han examinado todavía, sin embargo, los impactos resultantes de un cambio de circulación oceánica durante una transición climática (Manabe y Stouffer, 1994). Los efectos potenciales de los cambios del ciclo de carbono oceánico podrían modificar apreciablemente las emisiones fósiles compatibles con una estabilización, y los análisis que se hagan en el futuro deberán tomar en cuenta estos factores.

2.2.2 Estabilización de CH_4 , N_2O y otros gases

En la Sección 2.2.4 se describen las consecuencias que podrían derivarse de los distintos perfiles de estabilización de la concentración de CO_2 , tanto para la temperatura media mundial como para el nivel del mar. Para realizar estos cálculos es necesario establecer supuestos sobre la manera en que las emisiones o concentraciones de otros gases podrían cambiar en el futuro, dado que el CO_2 no es el único factor antropógeno de forzamiento climático. Aunque en el Artículo 2 de la CMCC se señala como objetivo, en términos generales, la estabilización de los gases de efecto invernadero, no se especifican ni los niveles de estabilización ni los recorridos conducentes a dicha estabilización. Además, la CMCC no hace referencia al SO_2 , uno de los principales precursores de aerosoles, ni a otros aerosoles o precursores de aerosoles. Estudiaremos aquí, por consiguiente, toda una gama de cambios posibles de otros gases vestigiales en el futuro.

Los gases de efecto invernadero distintos del CO_2 que hay que considerar son los señalados en el SIE-GTI más el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O), los halocarbonos y el ozono troposférico. El vapor de agua, que es también un gas de efecto invernadero, figura en nuestro análisis como parte integrante de la retroacción del clima (véase IPCC TP SCM, 1997). El metano influye directamente en el clima, y también mediante sus efectos en la química atmosférica (generando ozono troposférico) y por efecto de su oxidación. La oxidación del metano afecta a la concentración de OH troposférico, influyendo con ello en la capacidad de oxidación de la atmósfera y, por ende, en las concentraciones de otros gases vestigiales, al tiempo que agrega vapor de agua a la estratosfera. Hay que tener también en cuenta las consecuencias climáticas del agotamiento de ozono inducido por halocarbonos en la estratosfera inferior (véase el SIE-GTI: Sección 2.4, y el IPCC TP SCM,

1997). Por último, las emisiones de SO_2 (que se convierten mediante oxidación en especies de sulfatos) dan origen a la producción de aerosoles, que, al reflejar la luz solar, producen un enfriamiento del clima (SIE-GTI). Los aerosoles de sulfatos pueden también actuar como núcleos de condensación, en cuyo caso alteran las propiedades radiativas de algunas nubes.

En términos generales, las implicaciones del Artículo 2, que conllevaría la estabilización de todos los gases de efecto invernadero (es decir, no sólo del CO_2), resultan difíciles de evaluar, ya que carecemos de unos intervalos de valores claramente definidos con respecto a las probables emisiones futuras de metano, N_2O , SO_2 y otros gases. En una situación así sería posible construir, combinando diferentes factores, un número prácticamente infinito de escenarios para los distintos gases. Para que pueda apreciarse hasta qué punto el forzamiento radiativo y las respuestas climáticas podrían ser sensibles a distintas combinaciones de gases y aerosoles, hemos elegido algunas combinaciones ilustrativas de esa dependencia. Hemos procurado no "acotar" el problema, dado que no existe unanimidad con respecto a las posibles gamas de valores de las emisiones futuras de metano y de N_2O , como consecuencia de la falta de certidumbre sobre la biogeoquímica y la sensibilidad de las emisiones de estos gases al clima. Tampoco hay consenso con respecto a las gamas de emisiones futuras de SO_2 , que dependerán de las tecnologías elegidas, de la actividad económica y del grado en que las políticas de "aire limpio" se extiendan por todo el planeta.

Los efectos de los aerosoles de sulfatos son especialmente difíciles de evaluar a este respecto. Los efectos de los aerosoles han sido, hasta la fecha, importantes (véase, por ejemplo, el SIE-GTI: Capítulo 8; Penner *y otros*, 1994; Mitchell *y otros*, 1995), por lo que es obligatorio incluirlos siempre que se utilice un modelo para calcular cambios climáticos futuros, dado que la magnitud de estos cambios dependerá de los datos que se utilicen como supuesto sobre el forzamiento radiativo en el pasado. Los márgenes de incertidumbre con respecto a los aerosoles son bastante importantes a la hora de obtener proyecciones de cambios climáticos futuros. Estas incertidumbres responden a dos razones: la relación incierta entre las emisiones de SO_2 y el forzamiento radiativo; y la falta de certidumbre con respecto a las emisiones de SO_2 en el futuro. Estas dos incertidumbres se examinarán en el presente texto (véase más adelante), dado que figuran también en la bibliografía indicada en el SIE-GTI: Raper *y otros* (1996) estudian la primera de ellas (partiendo de diferentes valores de forzamiento por aerosoles para 1990), mientras que Wigley *y otros* (1996) se ocupan de la segunda (evaluando escenarios futuros basados en emisiones de SO_2 crecientes y constantes).

Los cálculos de estabilización expuestos en el SIE-GTI (Sección 6.3) están basados en escenarios muy específicos, aunque arbitrarios, para estos otros gases (emisiones constantes de SO_2 , concentraciones constantes de gases de efecto invernadero distintos del CO_2 a partir de 1990). En los cálculos de clima basados en los escenarios de emisiones de IS92, el SIE-GTI aborda un mayor número de posibles escenarios futuros para aerosoles y para gases de efecto invernadero distintos del CO_2 . En el caso particular de los

| Escenario | CO ₂ (W m ⁻²) | CH ₄ (W m ⁻²) (%) | N ₂ O (W m ⁻²) (%) | Halocarbonos (W m ⁻²) (%) | Aerosoles de SO ₄ (W m ⁻²) bajo (medio) alto (%) |
|-----------|--------------------------------------|---|--|--|--|
| IS92a | 4.35 | 0.78 (18%) | 0.37 (9%) | 0.28 (6%) | -0.38 (-0.65) -0.93 9% (15%) 21% |
| IS92c | 1.82 | 0.16 (9%) | 0.28 (15%) | 0.28 (15%) | +0.13 (+0.24) +0.34 7% (13%) 19% |
| IS92e | 6.22 | 1.02 (16%) | 0.42 (7%) | 0.28 (4%) | -0.75 (-1.29) -1.82 12% (21%) 29% |

Cuadro 1. Contribuciones relativas al cambio mundial total de forzamiento radiativo en el período 1990-2100 para diferentes gases, con arreglo a los escenarios de emisiones IS92a, c y e. Estos valores de forzamiento son los utilizados en el SIE-GTI (Sección 6.3). Los valores bajo, medio y alto de forzamiento por aerosoles de sulfatos están basados en los valores de forzamiento de 1990, a saber: forzamiento directo por aerosoles, -0.2, -0.3, -0.4 W m⁻²; forzamiento indirecto por aerosoles, -0.4, -0.8, -1.2 W m⁻². (El margen total de incertidumbre del forzamiento por aerosoles excede de estos valores; véase el SIE-GTI, págs. 113-115.) En el SIE-GTI (Sección 6.3) se han utilizado solamente los valores medios de forzamiento por aerosoles. Los valores de forzamiento por CO₂ están expresados en W m⁻², mientras que otros valores relativos a gases están expresados como porcentajes del valor correspondiente al CO₂. El forzamiento por CH₄ incluye los efectos de los cambios originados por el ozono troposférico y por el vapor de agua estratosférico. El forzamiento por halocarbonos incluye los efectos de los cambios originados por el ozono estratosférico.

aerosoles de sulfatos, el SIE-GTI contempla tanto la posibilidad de emisiones cambiantes de SO₂ (según prescriben los escenarios de IS92) como de emisiones constantes de SO₂ a partir de 1990.

Nuestra línea de estudio está orientada a conseguir una estimación de la sensibilidad, tanto en términos globales como para los distintos gases. Para ello, nos hemos basado en datos proporcionados por el SIE-GTI sobre concentraciones futuras de gases de efecto invernadero distintos del CO₂ y sobre los modelos utilizados para calcular dichas concentraciones, y en el modelo de clima simplificado aplicado en el SIE-GTI (Sección 6.3), que (al igual que en el presente estudio) utiliza como información entrante primaria datos sobre forzamiento individualizados para los distintos gases.

De la importancia de los gases distintos del CO₂ nos pueden dar una idea las contribuciones relativas de los distintos gases al forzamiento, en los escenarios de IS92 (véase el Cuadro 1). Estas proporciones muestran que, para buen número de escenarios de "actuales políticas", CO₂ es, notoriamente, el gas dominante. En términos acumulativos, sin embargo, los efectos de los gases de efecto invernadero distintos del CO₂ pueden ser bastante apreciables: en el período 1990-2100, su contribución se sitúa entre 0.7 W m⁻² (IS92c) y 1.8 W m⁻² (IS92f, no incluido en el Cuadro 1). Como porcentaje del forzamiento por CO₂, el forzamiento originado por gases de efecto invernadero distintos del CO₂ se sitúa entre 28% (IS92e) y 40% (IS92c). Esta contribución queda apreciablemente contrarrestada por un forzamiento de aerosoles negativo en IS92a, b, e y f; en IS92c y d, por el contrario, los cambios del forzamiento por aerosoles vienen a añadirse al forzamiento debido a otros gases, dado que las emisiones de SO₂ en 2100 resultan inferiores a las de 1990. Considerados conjuntamente, los forzamientos por

aerosoles y por gases de efecto invernadero distintos del CO₂ se sitúan, para el período 1990-2100 en los escenarios de IS92, entre un total de 0.4 W m⁻² (IS92e) y 1.0 W m⁻² (IS92c y f). Como porcentajes del forzamiento por CO₂, los valores correspondientes a los gases distintos del CO₂ se sitúan entre 9% (IS92e) y 53% (IS92c).

Las cifras aquí indicadas son las que se utilizan en el SIE-GTI (Sección 6.3). Para los aerosoles, se utiliza en dicha sección únicamente un valor estimativo central de la relación entre las emisiones de SO₂ y el forzamiento por aerosoles (que, para los aerosoles de sulfatos, contribuye un total de -1.1 W m⁻² hasta 1990, frente a un total de 2.6 W m⁻² imputable a los gases de efecto invernadero). Modificando el forzamiento por aerosoles se podría aumentar o disminuir su importancia relativa, pero ello no quitaría nada a la importancia que claramente tienen los gases de efecto invernadero distintos del CO₂.

Hay que señalar que las incertidumbres sobre el forzamiento por aerosoles resultan exacerbadas por las incertidumbres en las emisiones futuras de SO₂ y por las inciertas influencias de otros aerosoles (provenientes del quemado de biomasa, de polvo de minerales, de nitratos, etc.) Con respecto a las emisiones futuras, estudios recientes (IIASA/WEC, 1995) sugieren que las emisiones de SO₂ podrían ser en el futuro inferiores a lo supuesto en los escenarios IS92a y e. En tal caso, podría sobreestimarse el efecto compensador a escala mundial descrito en el Cuadro 1, aunque en el SIE-GTI se ha tenido presente esta posibilidad incorporando casos en los que las emisiones de SO₂ futuras se mantendrían constantes al nivel de 1990 (véase el SIE-GTI: Sección 6.3). Las emisiones futuras de SO₂ son objeto de controversia: en este documento, se defiende decididamente que cabrá esperar emisiones tanto crecientes como decrecientes.

2.2.3 Escenarios de estabilización de referencia

Dado el amplio margen de incertidumbre que existe sobre el papel desempeñado por los gases distintos del CO₂ en comparación con el CO₂ en el supuesto de "actuales políticas", y dado que no se han realizado estudios de alcance global para examinar los respectivos papeles en el supuesto de estabilización de la concentración, únicamente podemos abordar este tema en el contexto de un estudio de sensibilidad. Comenzaremos pues con un conjunto de casos de referencia en los que las emisiones de CO₂ siguen diversos recorridos de estabilización, las emisiones de CH₄, N₂O y SO₂ se mantienen supuestamente constantes en sus niveles de 1990, y los halocarbonos evolucionan según el escenario del Protocolo de Montreal utilizado en los cálculos de temperatura media mundial y de nivel del mar del SIE-GTI (Sección 6.3).

Con respecto a los halocarbonos, supondremos en los escenarios de referencia que el Protocolo de Montreal se aplicará estrictamente (véase el SIE-GTI: Capítulos 2 y 6), de modo que haya sólo un escenario futuro para estos gases. Como quiera que el forzamiento total debido a estos gases durante 1990-2100 (teniendo en cuenta los efectos de los cambios en el ozono estratosférico) es relativamente pequeño (0.3 W m⁻²), las incertidumbres que se derivarían de un cumplimiento incompleto del Protocolo de Montreal y/o de emisiones futuras de gases sustitutos (HFC) o no controlados podrían ser aún menores. Así pues, en un contexto de cambio climático mundial, y en vista de que en el SIE-GTI no se han tenido en cuenta, hemos optado por no incluir esas incertidumbres. No obstante, si se deseara adoptar un marco de estabilización extensivo (de múltiples gases) para un país específico, sería necesario efectuar una evaluación más detallada, gas por gas, del forzamiento por halocarbonos.

Puesto que los cálculos aquí indicados llegan hasta más allá de 2100, habrá que establecer algunos supuestos sobre las emisiones de halocarbonos después de esa fecha. Si este tipo de emisiones permaneciera constante en su nivel de 2100, el nivel de forzamiento se mantendría en torno a 0.3 W m⁻². Con ello, las concentraciones de halocarbonos (principalmente los HFCs) se estabilizarían en niveles relativamente altos. En los casos de referencia, hemos supuesto que las emisiones de halocarbonos se mantendrán constantes en sus niveles de 2100. Finalmente, las concentraciones permanecerán constantes, en conformidad con el Artículo 2. Hay que señalar, sin embargo, que basándose en dicho supuesto de emisiones constantes en los niveles de 2100 el forzamiento medio mundial a partir de 2100 podría llegar a sobreestimarse en hasta 0.4 W m⁻².

Por lo que respecta al ozono troposférico, sobre el que se carece de proyecciones, y guiándonos también en este caso por el SIE-GTI (Sección 6.3), supondremos que los únicos cambios de forzamiento se deberán al ozono producido por los cambios que el metano induzca en la química troposférica. Este término se cifra en torno a 0.15 W m⁻² para 2100 en los términos de IS92a, aunque es mucho menor en el caso de referencia de emisiones de CH₄ constantes. Este supuesto podría ser irreal si, como

| Escenario | CH ₄ (Tg(CH ₄)) | N ₂ O (Tg(N)) | SO ₂ (% del nivel de 1990) |
|----------------------|---|-----------------------------|--|
| IS92a | 410 | 4.1 | +95% |
| IS92c | 40 | 0.8 | -28% |
| IS92e | 566 | 6.2 | +208% |
| Caso perturbación | ±100 | ±2 | ±50% |

Cuadro 2. Cambios en las emisiones durante 1990-2100 para CH₄, N₂O y SO₂ con arreglo a IS92a, c y e comparados con los valores de perturbación utilizados en este estudio. (Unidades: CH₄, Tg(CH₄)/año; N₂O, Tg(N)/año; SO₂, porcentaje del nivel de 75 TgS/año correspondiente a 1990).

consecuencia de un incremento de la contaminación antropógena, aumentasen las concentraciones de nitrógeno, de hidrocarburos o de otros precursores del ozono asociados a éste.

Que conste que no estamos sugiriendo que los casos de referencia reflejen en modo alguno predicciones con respecto al futuro, especialmente de las emisiones futuras de SO₂, ni que deban ser adoptados como políticas a seguir. El interés de estos casos radica en que ayudan a evaluar la importancia relativa de las emisiones de CH₄, N₂O y SO₂ a la hora de determinar la temperatura media mundial y el cambio del nivel del mar en el futuro.

Para cuantificar la sensibilidad del CO₂ equivalente con respecto a otros gases, consideraremos perturbaciones a partir de distintos casos de referencia en los que: las emisiones de CH₄ aumentarán o disminuirán linealmente durante 1990-2100 en ±100 Tg(CH₄)/año (es decir, ±75 TgC) con relación a 1990 y se mantendrán constantes en lo sucesivo; las emisiones anuales de N₂O aumentarán o disminuirán linealmente entre 1990 y 2100 en un total de ±2 Tg(N) con relación a 1990, y se mantendrán constantes en lo sucesivo; y las emisiones de SO₂ aumentarán o disminuirán linealmente durante 1990-2100 en ±50% (es decir, 37.5 TgS) con relación a su nivel de 1990 y se mantendrán constantes en lo sucesivo. Para los tres gases, estos escenarios conducen a una estabilización de la concentración que se hará efectiva instantáneamente en el caso del SO₂, en el plazo de varios decenios para el CH₄, y a lo largo de algunos siglos para el N₂O. Para situar estas perturbaciones en un contexto más amplio, se comparan en el Cuadro 2 con IS92a, c y e. Téngase en cuenta que en modo alguno deben interpretarse estas perturbaciones como resultados posibles o como objetivos de políticas.

2.2.4 Estabilización de la concentración de CO₂ equivalente

La estabilización de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, uno de los objetivos explícitos del Artículo 2, no redundaría necesariamente en una estabilización de la pertur-

bación del forzamiento radiativo causada por los seres humanos. La razón de ello es que los aerosoles, que no se mencionan explícitamente en el Artículo 2, producen también efectos radiativos. Si se estabilizaran las concentraciones tanto de los gases de efecto invernadero como de los aerosoles, se estabilizaría la perturbación de origen humano en el forzamiento radiativo medio mundial⁶. Obsérvese también que, dado que los aerosoles no son gases uniformemente mezclados, la distribución geográfica de las emisiones de los aerosoles y de sus precursores puede tener efectos importantes sobre el clima regional. Estabilizar la perturbación humana del forzamiento radiativo medio mundial es claramente diferente de estabilizar la concentración de CO₂ únicamente. Así, mientras los esfuerzos de mitigación podrían orientarse a determinados gases de un conjunto dado de gases de efecto invernadero, los estudios de impacto deberán considerar los climas como influidos por más de un gas y más de un aerosol. La técnica "del CO₂ equivalente" se orienta a considerar múltiples componentes de forzamiento radiativo en el conjunto total.

En los cálculos de cambio de temperatura media mundial y de nivel del mar que figuran en el SIE-GTI (Capítulos 6 y 7), los modelos operaban en base al forzamiento radiativo total, obtenido sumando los forzamientos causados por el conjunto de gases vestigiales antropógenos (véase el Cuadro 1). En términos de media mundial, este forzamiento total puede considerarse como si proviniese únicamente de los cambios de CO₂; es decir, de una "concentración de CO₂ equivalente". Así pues, la concentración de CO₂ equivalente, C_{eq} , puede definirse a partir de la relación entre la concentración existente de CO₂ y el forzamiento radiativo. En el SIE-GTI, la relación utilizada era la del Primer Informe de Evaluación del IPCC (IPCC, 1990). La incertidumbre en esta relación podría cifrarse en torno a $\pm 20\%$ (véase IPCC TP SCM, 1990).

Aunque el concepto de CO₂ equivalente es pedagógicamente útil y permite comparar los efectos del CO₂ con los de otros gases, presenta algunas desventajas. Una de ellas se debe a que entre el forzamiento radiativo y la concentración de CO₂ existe una relación no lineal. Este tipo de relación significa que, a niveles de CO₂ más elevados, la concentración de este gas deberá aumentar más, para que el forzamiento radiativo se incremente en la misma cuantía. Se pueden, pues, sumar los cambios del forzamiento radiativo, pero no el CO₂ equivalente. Por esta razón, hemos preferido utilizar el forzamiento radiativo como variable primaria.

Otra desventaja más del concepto de CO₂ equivalente es que, en el contexto de las evaluaciones de impacto, únicamente es útil en relación con el cambio climático. Hay otros impactos del aumento de CO₂ (por ejemplo, fertilización), de los aerosoles de sulfatos (acidificación) y del ozono que podrían ser también importantes. Además, con el concepto de CO₂ equivalente, al igual que con el de forzamiento radiativo, un valor totalizado a nivel mundial engloba información sobre aspectos regionales del cambio climático que resultan esenciales para evaluar los impactos. Así,

por ejemplo, sería posible imponer al sistema climático un patrón de forzamiento cuya media a escala mundial fuese nula, pero que indujera cambios importantes del clima a escala regional.

Indicamos a continuación los resultados de CO₂ equivalente para diferentes niveles de estabilización de la concentración. Utilizaremos como casos de referencia S350, S450, S550, S650, S750 y WRE1000, más los casos de referencia de emisiones constantes a niveles de 1990 correspondientes a CH₄, N₂O y SO₂, y las emisiones de halocarbonos tras el Protocolo de Montreal (véase la Sección 2.2.2). A fin de ilustrar la dependencia del nivel de CO₂ equivalente respecto del recorrido seguido hasta la estabilización del CO₂, examinaremos también el caso WRE550. Los resultados aparecen en la Figura 7, en que se muestran los valores de forzamiento con relación a 1990 (en torno a 1.3 W m^{-2} por encima del nivel previo a la era industrial). En el año 2500, cerca del punto de estabilización del CO₂ equivalente, las concentraciones de CO₂ equivalente varían entre 26 ppmv (S350) y 74 ppmv (WRE1000) por encima del nivel real. La diferencia en forzamiento atribuible a gases distintos del CO₂ es, en todos los casos, la misma: 0.66 W m^{-2} entre 1990 y 2500. Como ya se ha señalado, dado que la relación entre el CO₂ equivalente y el forzamiento radiativo es no lineal, esto equivale a tener cantidades distintas de CO₂ para niveles de concentración diferentes.

Obsérvese que en este caso el CO₂ equivalente se situaría, a mediados de 1990, en 342 ppmv, es decir, ligeramente por debajo del nivel real de CO₂ (354 ppmv). Ello se debe a que en 1990 el forzamiento negativo imputable a los aerosoles contrarresta con creces el forzamiento positivo causado por los gases de efecto invernadero distintos del CO₂. Este valor es, no obstante, bastante incierto, debido principalmente a la incertidumbre en la magnitud del forzamiento por aerosoles. Para valores de esta última de $\pm 0.5 \text{ W m}^{-2}$ en 1990, el nivel de CO₂ equivalente para 1990 varía entre 316 y 370 ppmv.

En la Figura 8 se muestra, para S450 y S650, la sensibilidad global a los supuestos de emisión de gases distintos del CO₂. Se muestran también esos mismos casos de referencia (Figura 7) juntamente con otros basados en las emisiones de IS92a para CH₄, N₂O y SO₂ hasta 2100, con emisiones constantes a partir de esa fecha. En este segundo caso, el incremento final de forzamiento a partir de 1990 por efecto de los gases distintos del CO₂ es de 1.13 W m^{-2} (frente a 0.66 W m^{-2} para el caso de referencia). Los niveles de CO₂ equivalente en 2100 serían de 491 ppmv (S450) y 627 ppmv (S650), frente a 473 ppmv (S450) y 604 ppmv (S650) para los casos de referencia. En la Figura 8 se muestra también el forzamiento debido exclusivamente a CO₂.

Los resultados expuestos en las Figuras 7 y 8 aparecen caracterizados y resumidos en el Cuadro 3 de la página 22. Se muestran en dicho cuadro los cambios de forzamiento radiativo a partir de 1765 y los niveles de CO₂ equivalente para unos niveles de estabilización de CO₂ de entre 350 ppmv y 1000 ppmv, a partir de tres supuestos diferentes con respecto a los efectos de forzamiento de otros gases: ningún efecto producido por otros gases (es decir, cambios debidos al CO₂ exclusivamente), el caso de referencia (emisiones de CH₄, N₂O y SO₂ constantes), y el caso

⁶ Con ello no se eliminaría la variabilidad climática, ya que el sistema climático exhibe una variabilidad natural considerable, que escapa a las influencias antropógenas.

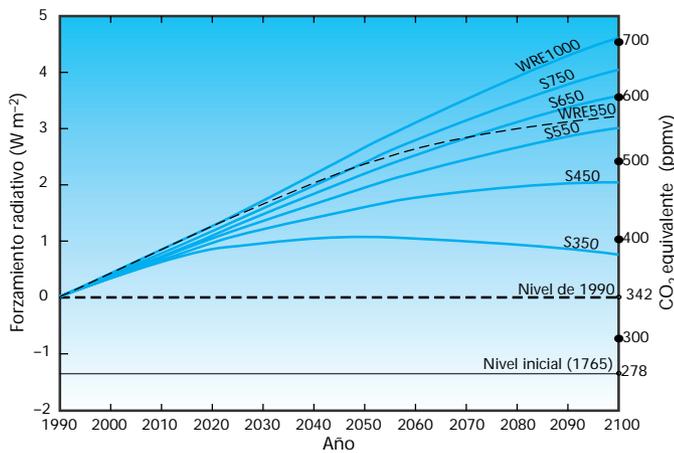


Figura 7. Forzamiento radiativo entre 1990 y 2100 (tomando 1990 como referencia) para concentraciones de CO_2 coincidentes con los perfiles S350, S450, S550, WRE550, S650, S750 y WRE1000 (véase la Figura 4) y para emisiones de CH_4 , N_2O y SO_2 constantes a los niveles de 1990. Para los halocarbonos, se ha supuesto un único escenario de emisiones compatible con el cumplimiento del Protocolo de Montreal. Tanto en el texto como en las leyendas subsiguientes, estos supuestos figuran indicados como caso de referencia. En el eje de la derecha se indican, mediante puntos, los niveles de CO_2 equivalente. Para el perfil S450 (S650), por ejemplo, la concentración de CO_2 en 2100 es de 450 (575) ppmv (según la Figura 4), pero el efecto adicional de otros gases de efecto invernadero y SO_2 arroja una concentración de CO_2 equivalente de 473 (604) ppmv. Estos resultados se obtuvieron mediante el modelo de clima simple de Wigley (véase IPCC TP SCM (1997)) y las relaciones forzamiento radiativo/concentración indicadas en IPCC (1990) y en actualizaciones posteriores.

IS92a ampliado. Los resultados indicados corresponden a la fecha de estabilización del CO_2 (que varía según el nivel de estabilización).

Estos cálculos dan una idea de la importancia de los otros gases a la hora de determinar el nivel de CO_2 equivalente, así como del margen total de incertidumbre que se obtiene al determinar su contribución. Ninguno de los casos estudiados (CO_2 únicamente, emisiones estables en los niveles de 1990, o emisiones de CH_4 , N_2O y SO_2 basadas en IS92a) deberá considerarse como un escenario futuro probable ni como una recomendación de política. Los resultados muestran que los niveles de estabilización de la concentración elegidos para CH_4 , N_2O y SO_2 podrían influir notablemente en los cambios futuros del CO_2 equivalente y en el nivel de estabilización de esta magnitud. Las distintas sensibilidades se abordan en la sección siguiente.

Para concluir esta sección, señalemos que en nuestros ejemplos los niveles de CO_2 equivalente no llegan a estabilizarse ni siquiera hacia 2500. El forzamiento sigue experimentando cambios, pequeños pero apreciables (del orden de 0.1 a 0.3 W m^{-2}), una vez alcanzado el punto de estabilización de CO_2 (es decir, en 2100 para S450 y en 2200 para S650), a causa principalmente del largo período de vida del N_2O , que da lugar a cambios apreciables en la concentración de este gas después de 2100, en que las emisiones se

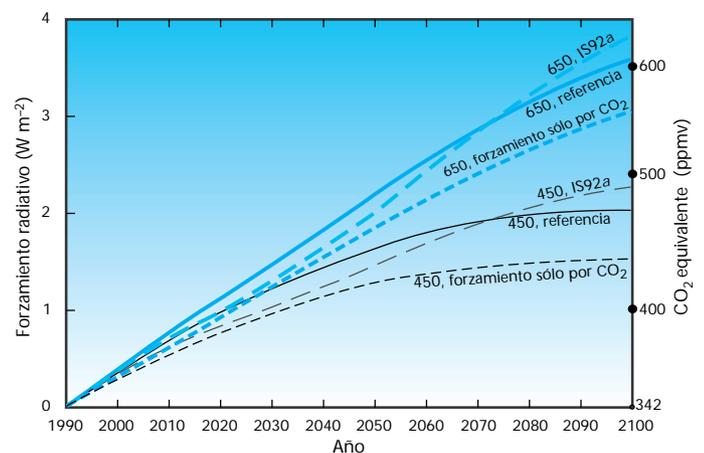


Figura 8. Efecto de los diferentes perfiles de emisión de gases distintos del CO_2 sobre el forzamiento radiativo (y sobre el CO_2 equivalente) para los perfiles de concentración S450 y S650 (véase la Figura 4). Las líneas de trazos cortos indican los resultados de CO_2 únicamente; las líneas continuas indican el caso de referencia (véase la Figura 7), y las de trazo largo, los resultados obtenidos cuando las emisiones de CH_4 , N_2O y SO_2 aumentan según IS92a hasta 2100 para estabilizarse a continuación (caso IS92a). Obsérvese que, inicialmente, el forzamiento radiativo correspondiente al caso de referencia es inferior que para el caso IS92a. Esto se debe al efecto de forzamiento negativo de los aerosoles. Obsérvese también que, para los casos de CO_2 únicamente, los niveles de CO_2 equivalente son más bajos que los niveles reales de CO_2 , debido a las diferencias entre sus niveles para 1990.

hallarían estabilizadas. A partir de 2500, sin embargo, los cambios son muy pequeños.

2.2.5 Sensibilidades del CO_2 equivalente

En la Sección 2.2.4 se presentan estimaciones del nivel de CO_2 equivalente que incluyen los efectos colectivos de CH_4 , N_2O y SO_2 , más los halocarbonos. Examinaremos aquí por separado las influencias del CH_4 , del N_2O y del SO_2 . Para ello, introduciremos perturbaciones de las emisiones en torno a los casos de referencia de emisiones constantes en los niveles de 1990.

Para el CH_4 (Figura 9a), una perturbación de las emisiones anuales de $\pm 75 \text{ TgC/año}$ ($\pm 100 \text{ Tg}(\text{CH}_4)/\text{año}$) en el período 1990-2100 altera el forzamiento radiativo en aproximadamente $\pm 0.20 \text{ W m}^{-2}$ cuando la concentración se estabiliza. Esto se traduce en unas diferencias de CO_2 equivalente de aproximadamente $\pm 15 \text{ ppmv}$ para S450 y de $\pm 22 \text{ ppmv}$ para S650. Para las emisiones anuales de N_2O , una perturbación de $\pm 2 \text{ Tg}(\text{N})/\text{año}$ entre 1990 y 2100 altera el forzamiento en $\pm 0.16 \text{ W m}^{-2}$ cuando la concentración se ha estabilizado, lo cual arroja unas diferencias de concentración de $\pm 12 \text{ ppmv}$ para S450 y de $\pm 18 \text{ ppmv}$ para S650 (véase la Figura 9b).

| Nivel de estabilización de CO ₂ (año) | Forzamiento radiativo (W m ⁻²) CO ₂ equivalente (ppmv) | CO ₂ sólo | CO ₂ más el efecto de otros aerosoles y gases de efecto invernadero | |
|--|---|----------------------|--|---|
| | | | Referencia | IS92 hasta 2100, después emisiones constantes |
| 350 | ΔF (W m ⁻²) | 1.25 | 1.82 | 2.19 |
| (2050) | CO ₂ equiv. | 339 | 371 | 394 |
| 450 | ΔF (W m ⁻²) | 2.83 | 3.35 | 3.59 |
| (2100) | CO ₂ equiv. | 436 | 473 | 492 |
| 550 | ΔF (W m ⁻²) | 4.09 | 4.67 | 5.04 |
| (2150) | CO ₂ equiv. | 532 | 583 | 619 |
| 650 | ΔF (W m ⁻²) | 5.15 | 5.75 | 6.16 |
| (2200) | CO ₂ equiv. | 629 | 692 | 739 |
| 750 | ΔF (W m ⁻²) | 6.05 | 6.67 | 7.10 |
| (2250) | CO ₂ equiv. | 726 | 801 | 858 |
| 1000 | ΔF (W m ⁻²) | 7.86 | 8.50 | 8.97 |
| (2375) | CO ₂ equiv. | 968 | 1 072 | 1 154 |

Cuadro 3. CO₂ equivalente (ppmv) y forzamiento radiativo (desde 1765) (ΔF) en el punto de estabilización de CO₂, para varios supuestos sobre aerosoles y gases de efecto invernadero distintos del CO₂. Para el caso de referencia se han supuesto unas emisiones constantes de SO₂, N₂O y CH₄ a partir de 1990. En la columna "CO₂ sólo" se ha supuesto que los cambios posteriores a 1990 son de CO₂ únicamente (como en el SIE-GTI). Obsérvese que, en el nivel de estabilización de CO₂, el nivel de CO₂ equivalente difiere en estos casos del nivel de estabilización de CO₂, en razón de las diferencias entre los niveles de CO₂ y CO₂ equivalente en 1990.

Las sensibilidades del SO₂ se manifiestan en dos sentidos. En primer lugar, existe una sensibilidad básica a las incertidumbres de emisión (Figura 10a). Con la concentración estabilizada, perturbaciones de $\pm 50\%$ en las emisiones de SO₂ (es decir, de ± 37.5 TgS/año) con respecto a 1990 dan lugar a diferencias de forzamiento de $-0.37/+0.45$ W m⁻², que se traducen en diferencias de concentración de CO₂ equivalente de $-27/+36$ ppmv para S450, y de $-40/+52$ ppmv para S650 (obsérvese que las diferencias de forzamiento o de concentración son de signo contrario a la perturbación de las emisiones).

Además de la influencia que ejercen las incertidumbres de las emisiones, el efecto del SO₂ en las concentraciones de CO₂ equivalente es sensible al elevado margen de incertidumbre de las relaciones entre las emisiones de SO₂ y el forzamiento radiativo. Los aerosoles de sulfatos derivados del SO₂ afectan al forzamiento radiativo tanto de manera directa, en situaciones de cielo despejado, como indirecta, mediante alteraciones del albedo de las nubes. La estimación central del forzamiento directo por aerosoles de sulfatos calculada en el SIE-GTI para 1990 arroja un valor de -0.4 W m⁻², mientras que el forzamiento indirecto se estimaba en la Sección 6.3 del SIE-GTI en -0.8 W m⁻², lo cual arroja un forzamiento total por aerosoles de sulfatos de 1.1 W m⁻². Para evaluar la

sensibilidad a las incertidumbres de esta cantidad, hemos utilizado una gama de valores de ± 0.1 W m⁻² para el forzamiento directo y de ± 0.4 W m⁻² para el indirecto (lo que genera un forzamiento total por aerosoles de sulfatos (más hollín) de -1.1 ± 0.5 W m⁻²).

En nuestros cálculos, esta incertidumbre sobre emisiones/forzamiento se manifiesta inicialmente en el nivel de CO₂ equivalente correspondiente a 1990. Como ya se ha señalado, el valor más plausible de C_{eq} (1990) es 342 ppmv, mientras que la gama de concentraciones que corresponde a ± 0.5 W m⁻² en el nivel de forzamiento por aerosoles es de 316-370 ppmv. Si para el forzamiento futuro nos basamos en el caso de referencia de emisiones de SO₂ invariables, entonces la incertidumbre en cuanto a emisiones/forzamiento no ejerce ninguna influencia: una variación nula de las emisiones significa un forzamiento nulo, sea cual fuere la relación emisiones/forzamiento. Simplemente, la incertidumbre con respecto al forzamiento para 1990 se propaga "tal cual" hacia el futuro (Figura 10b).

Sin embargo, si las emisiones futuras de SO₂ aumentan o disminuyen con respecto a su nivel de 1990 (como en los casos de perturbaciones de las emisiones, examinados en la Figura 10a), entonces la incertidumbre sobre emisiones/forzamiento sí afecta al

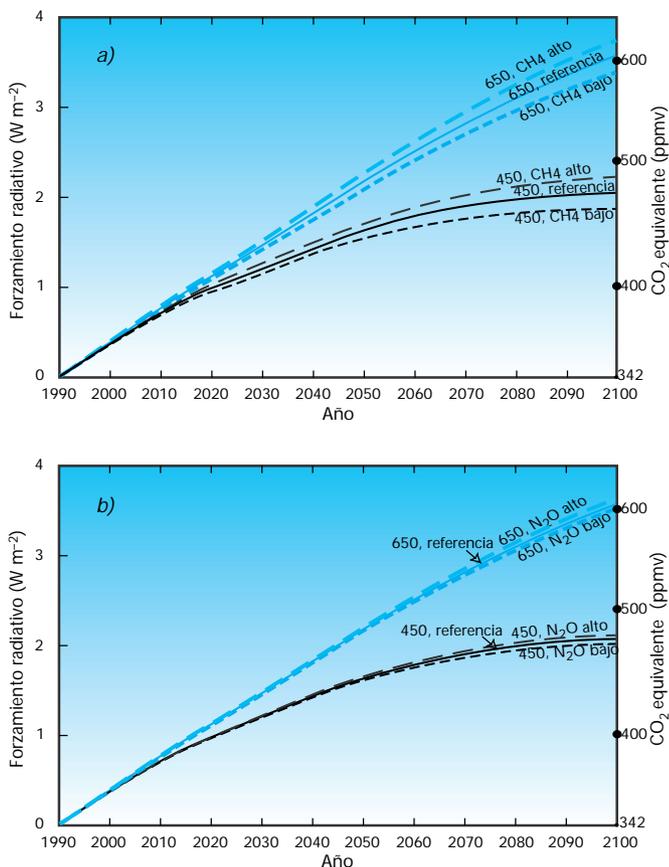


Figura 9. a) Sensibilidad del forzamiento radiativo (y de la concentración de CO₂ equivalente) a las emisiones de CH₄ para los perfiles de concentración S450 y S650 (véase la Figura 4). Las curvas CH₄ bajo/CH₄ alto presuponen que las emisiones de CH₄ disminuyan/aumenten linealmente en 100 Tg(CH₄)/año entre 1990 y 2100 (véase el Cuadro 4). b) Sensibilidad del forzamiento radiativo (y de la concentración de CO₂ equivalente) a las emisiones de N₂O para los perfiles de concentración S450 y S650 (véase la Figura 4). Las curvas N₂O bajo/N₂O alto presuponen una disminución/aumento lineal de las emisiones de N₂O en 2 Tg(N)/año entre 1990 y 2100 (véase el Cuadro 4).

forzamiento futuro por aerosoles. Esto puede verse en la Figura 10c en la que (para el caso S650 sólo) se ha representado la incertidumbre asociada a las emisiones y el forzamiento conjuntamente. La curva de trazo grueso que aparece en el centro representa el caso de las emisiones de SO₂ de referencia (ninguna variación a partir de 1990), para el que no hay margen de incertidumbre de emisiones/forzamiento. Las tres curvas de la parte superior corresponden al caso de emisiones de SO₂ decrecientes (en un 50% durante 1990-2100), y representan los valores bajo, medio y alto obtenidos para el nivel de forzamiento por aerosoles de sulfatos en 1990 (-1.1 ± 0.5 W m⁻²). Un valor elevado de forzamiento para 1990 da lugar a cambios de forzamiento elevados a partir de 1990. Las tres curvas de la parte inferior corresponden al caso en que las emisiones de SO₂ disminuyen en un 50% durante 1990-2100. Aquí, el caso de forzamiento elevado para 1990 se traduce en un nivel de forzamiento inferior a partir de 1990, dado que el forzamiento por aerosoles con posterioridad a 1990 es negativo.

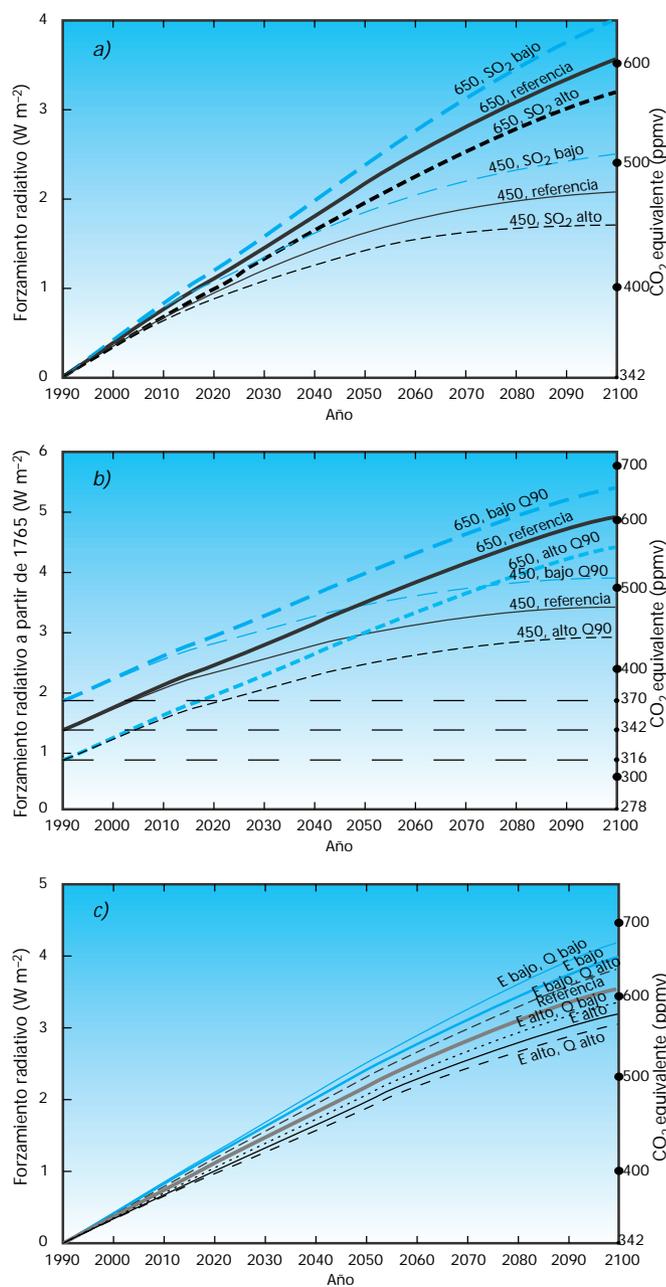


Figura 10. a) Sensibilidad del forzamiento radiativo (y de la concentración de CO₂ equivalente) a las emisiones de SO₂ para los perfiles S450 y S650. Las líneas de trazo continuo indican los casos de referencia; las líneas de trazo discontinuo corto/largo muestran casos de “SO₂ alto/bajo” en los cuales las emisiones aumentan/disminuyen de ± 50 % hasta 1990-2100; b) Sensibilidad del forzamiento radiativo (y de la concentración de CO₂ equivalente) al forzamiento por aerosoles de sulfatos en 1990 (relativo a épocas preindustriales) de -0.6, -1.1 y -1.6 W m⁻², respectivamente. Nótese que los valores del forzamiento radiativo en esta figura son relativos a épocas preindustriales, c) los efectos combinados en el forzamiento radiativo (y en la concentración de CO₂ equivalente) de la sensibilidad a las emisiones de SO₂ y al forzamiento por aerosoles en 1990, para el perfil de concentración S650 solamente. E alto/E bajo indica el aumento/disminución de las emisiones de SO₂ de 1990 a 2100 (las mismas que en las curvas correspondientes de la Figura 10a); Q alto/Q bajo indica un forzamiento por aerosoles en 1990 alto/bajo (los mismos que en las curvas correspondientes de la Figura 10b).

2.3 Consecuencias de la estabilización de las concentraciones de CO₂ en cuanto a la temperatura y al nivel del mar

2.3.1 Análisis de la temperatura y del nivel del mar: metodología

Los perfiles de estabilización de la concentración de CO₂ precedentemente descritos, junto con los escenarios introducidos para otros gases, se han utilizado como material de base en modelos de clima simplificados para evaluar las consecuencias de dichos perfiles en la temperatura media mundial y en el nivel del mar. Se trata sólo de un primer paso para poder analizar en su totalidad las implicaciones de la estabilización en lo que se refiere al clima. Un análisis exhaustivo requeriría, como mínimo, tener en cuenta los cambios de la temperatura y del nivel del mar a escala regional y los cambios de otras variables climáticas (como la precipitación, o la humedad del suelo). Los modelos climáticos, sin embargo, no son aún lo suficientemente precisos como para predecir con fiabilidad ese tipo de influencias regionales, que responden a muchas variables.

Para el presente análisis se han tenido en cuenta, además del CO₂, diversas combinaciones de efectos de otros gases, como puede verse en el Cuadro 4. El propósito perseguido era arrojar luz sobre

las sensibilidades de la temperatura y del nivel del mar frente a los supuestos elegidos con respecto a las emisiones futuras de gases de efecto invernadero y de SO₂. No se pretendía abarcar la totalidad de las posibilidades. Para cada combinación, hemos computado seis variables:

- Forzamiento radiativo (W m⁻²);
- Concentración de CO₂ equivalente asociada a la combinación de otros gases elegida;
- Cambios de la media mundial de temperatura;
- Cambios de la media mundial del nivel del mar.

Los resultados de *a)* y *b)* están indicados en la Sección 2.2; en esta sección se estudian las implicaciones desde el punto de vista de la temperatura y del nivel del mar en media mundial. Las tasas de cambio pueden estimarse gráficamente a partir de los resultados proporcionados.

Necesitamos también tener en cuenta las incertidumbres de la respuesta del sistema climático al forzamiento externo, que son, en gran medida, consecuencia de las incertidumbres de la sensibili-

| Constituyente | Concentración/casos de emisión considerados |
|-----------------------------|---|
| CO ₂ | S350, 450, 550, 650, 750 WRE550, 1000 |
| CH ₄ | Referencia: emisiones constantes a partir de 1990 al nivel de 1990* Baja Disminución lineal en 100 Tg(CH ₄) entre 1990–2100, emisiones constantes después 2100 Alta Aumentación lineal en 100 Tg(CH ₄) entre 1990–2100, emisiones constantes después 2100 |
| N ₂ O | Referencia: emisiones constantes a partir de 1990 al nivel de 1990* Baja Disminución lineal en 2 Tg(N) entre 1990–2100, emisiones constantes después 2100 Alta Aumentación lineal en 2 Tg(N) entre 1990–2100, emisiones constantes después 2100 |
| SO ₂ | Referencia: emisiones constantes a partir de 1990 al nivel de 1990† Baja Disminución lineal en 50 por ciento entre 1990–2100, emisiones constantes después 2100 Alta Aumentación lineal en 50 por ciento entre 1990–2100, emisiones constantes después 2100 |
| Halocarbonos | SIE GTI a 2100*, emisiones constantes después 2100 |
| O ₃ Troposférico | Como en el SIE GTI: no cambios directos después de 1990. CH ₄ – cambios inducidos incluidos CH ₄ |

* Con emisiones ajustadas para que correspondan al presupuesto de 1990, como en el SIE GTI, Capítulo 6.
† 75 TgC/año como en los escenarios IS92.
• Tal como la síntesis de emisiones en el Capítulo 2 del SIE GTI, con otros elementos adicionales en el Capítulo 6. Los efectos del ozono estratosférico son reflejados como en el Capítulo 6.

Cuadro 4. Casos de emisión considerados en los estudios de sensibilidad.

dad del clima (siguiendo al SIE-GTI (Sección 6.3), examinaremos tres casos: $\Delta T_{2x} = 1.5, 2.5$ y 4.5°C) y de incertidumbres sobre el aumento del nivel del mar que responden, a su vez, a incertidumbres en la modelización de la fusión del hielo (SIE-GTI: Capítulo 7). Hemos resumido estas últimas en tres casos diferentes, que corresponden a elevaciones del nivel del mar bajas ($\Delta T_{2x} = 1.5^\circ\text{C}$, con un nivel bajo de fusión de hielo), medias (2.5°C , nivel de fusión medio) y altas (4.5°C , nivel de fusión alto). Se obtienen así tres conjuntos de resultados clima/nivel del mar para cada caso de forzamiento. Los resultados indicados están basados en los modelos de Wigley y Raper (1992) (véase también Raper y otros, 1996), tal y como fueron aplicados en el SIE-GTI (Sección 6.3). En el SIE-GTI se utilizó un modelo de clima desarrollado por de Wolde y varios colegas (por ejemplo, de Wolde y otros, 1995) pero, dado que tiene una sensibilidad fija para un cambio de temperatura de 2.2°C ($\Delta T_{2x} = 2.2$) para un nivel de CO_2 aumentado al doble, no nos fue posible aplicarlo en este contexto. Para informarse sobre la estructura del modelo y las diferencias entre modelos, véase IPCC TP SCM (1997).

Dado el gran número de simulaciones de modelos y el número de variables de respuesta existentes, presentamos tan sólo un subconjunto de los resultados, como ejemplo ilustrativo de las posibles consecuencias. [En vista del interés que podrían suscitar los resultados en forma detallada, se ofrecerán por World Wide Web (o, alternativamente, en diskette) los resultados completos de todos los cálculos de los modelos del ciclo del carbono y del clima.]

2.3.2 Implicaciones de la estabilización de los gases de efecto invernadero en la temperatura y en el nivel del mar

Los resultados que aquí se exponen permiten abordar las cuestiones planteadas por la estabilización desde un punto de vista más unificado que en cualquiera de los capítulos del SIE-GTI. La mayor parte de estos resultados corresponde a una sensibilidad del clima (ΔT_{2x}) de 2.5°C , que es un valor intermedio. Si el valor verdadero fuera menor o mayor, los resultados se convertirían a la escala adecuada, como se expone más adelante. Hay que señalar también que los resultados están promediados a escala mundial: tanto los impactos como las actuaciones de mitigación son sensibles a las pautas regionales del cambio de clima y de nivel del mar, ya que las oportunidades y vulnerabilidades de ámbito regional son muy variables.

Los resultados de temperatura y nivel del mar aquí expuestos han sido computados mediante modelos relativamente simples. Como se señala en IPCC TP SCM (1997), estos modelos están diseñados para reproducir, con una fidelidad razonable, el comportamiento de otros modelos complejos en valores promedios a escala mundial. Sus resultados se han comparado también con observaciones históricas y/o actuales. Al igual que otros modelos más complejos, éstos no incorporan todas las posibles interacciones y retroacciones del clima, pero reflejan el estado actual de nuestros conocimientos.

Los cálculos primarios están basados en un caso de referencia que contempla emisiones de CH_4 , N_2O y SO_2 constantes al nivel de

1990 (véase el Cuadro 4). Este planteamiento facilita la comparación entre diferentes niveles y recorridos de estabilización de CO_2 , y es compatible con los resultados de CO_2 equivalente indicados anteriormente. Las emisiones de estos gases en los escenarios IS92 difieren notablemente del caso de referencia (véanse los Cuadros 1 y 2). Además de los casos de referencia, hemos evaluado la sensibilidad de los resultados sobre temperatura y nivel del mar respecto de los niveles de emisiones de CH_4 , N_2O y SO_2 , considerando diferentes casos de emisiones para dichos gases.

Ya hemos indicado que las trayectorias de emisiones futuras de los gases vestigiales distintos del CO_2 (CH_4 , N_2O y SO_2) pueden afectar notablemente al forzamiento total asociado a cualquiera de los perfiles de estabilización de CO_2 . Esto quiere decir que, si la concentración real de CO_2 fuese a estabilizarse en 450 ppmv y las emisiones de metano siguiesen aumentando, el forzamiento radiativo sería considerablemente mayor que el asociado al CO_2 como único gas. Como se indica a continuación, habría que esperar también cambios mayores de la temperatura y del nivel del mar.

Los cambios de temperatura media mundial y de nivel del mar obtenidos para 1990-2100 se muestran en las Figuras 11 a 15 (para los resultados hasta 2300, véase el Apéndice 1). Estos cambios se miden únicamente con respecto al momento actual (nominalmente, desde 1990). Para obtener el cambio antropógeno de la temperatura media mundial desde 1880, basándose en la estimación central de forzamiento histórico utilizada en el SIE-GTI, habría que añadir entre 0.2 y 0.5°C . Para obtener el cambio desde la era preindustrial, habría que añadir además entre 0.1 y 0.2°C .

Cabe señalar que las cantidades medias mundiales son sólo indicadores de la magnitud global del posible cambio climático futuro: los cambios de las temperaturas regionales podrían diferir mucho de la media mundial, y los cambios de otras variables como, por ejemplo, la precipitación, no guardan una relación simple ni directa con el cambio de la temperatura media mundial (véase el SIE-GTI: Capítulo 6). Los cambios regionales del nivel del mar pueden también diferir de la media mundial si se producen movimientos del suelo, y/o por efecto de la circulación oceánica (véase el SIE-GTI: Capítulo 7).

En las Figuras 11a y b se representan los cambios de temperatura y de nivel del mar respecto del presente, para niveles de estabilización de CO_2 de 350, 450, 550, 650, 750 y 1000 ppmv, tomando como base el supuesto de referencia precedentemente aplicado para otros gases (emisiones constantes de CH_4 , N_2O y SO_2 a los niveles de 1990). Para realizar estos cálculos, encaminados a representar las variaciones de la temperatura y del nivel del mar en función del nivel de estabilización elegido, se ha supuesto una sensibilidad climática de 2.5°C , y unos valores paramétricos de fusión de hielo intermedios (véanse los Capítulos 6 y 7 del SIE-GTI). Para el caso de 550 ppmv, se han indicado tanto los resultados "S" como los "WRE" a fin de ilustrar la sensibilidad de los cambios respecto del recorrido elegido hacia la estabilización. Hasta 2050 aproximadamente, los resultados de WRE550 arrojan un calentamiento y un aumento del nivel del mar mayores que en el caso S750 (aunque no el caso de 1000 ppmv, ya que éste estaba

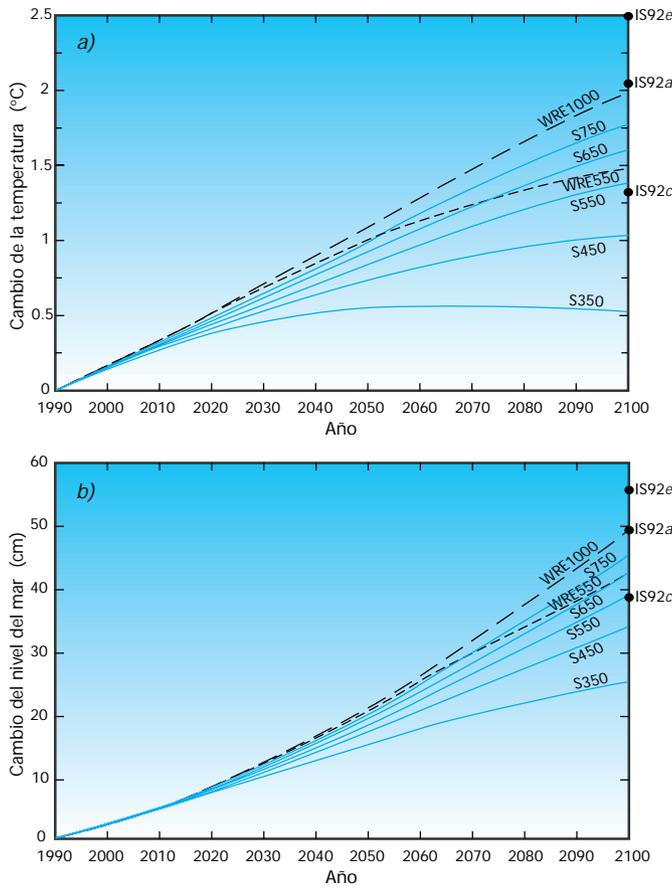


Figura 11. a) Proyección de la temperatura media mundial cuando la concentración de CO₂ se estabiliza siguiendo los perfiles S y WRE550 y 1000 indicados en la Figura 4. Se ha supuesto que las emisiones de CH₄, N₂O y SO₂ permanecen constantes en sus niveles de 1990 y que los halocarbonos obedecen a un escenario de emisión compatible con el cumplimiento del Protocolo de Montreal (es decir, el caso de referencia). El forzamiento radiativo (y el CO₂ equivalente) del que se han obtenido las temperaturas mundiales se han indicado en la Figura 7. Se ha supuesto para la sensibilidad del clima un valor de orden intermedio: 2.5°C. A título comparativo, se indican los resultados correspondientes a los escenarios de emisiones IS92a, c y e para el año 2100. Para obtener el cambio antropógeno de la temperatura media mundial desde 1880, en base a la estimación central de forzamiento histórico que se utiliza en el SEI-GTI, habrá que añadir entre 0.2 y 0.5°C. Para obtener el cambio antropógeno desde la era preindustrial habrá que añadir entre 0.1 y 0.2°C. b) Igual que en a), pero utilizando como parámetros el cambio mundial del nivel del mar y la gama central de valores de fusión de hielo. Todos los resultados han sido obtenidos mediante el modelo simple clima/nivel del mar de Wigley (véase IPCC TP SCM (1997)).

condicionado a mantener una concentración de CO₂ igual o superior a la de WRE550). Las velocidades de cambio pueden obtenerse de las Figuras 11a y b en los próximos cincuenta años, las tasas de variación de la temperatura se situarán entre 0.1 y 0.2°C/decenio.

Las Figuras 12a y b ilustran la influencia de las emisiones de gases distintos del CO₂ en el cambio medio mundial de temperatura y de

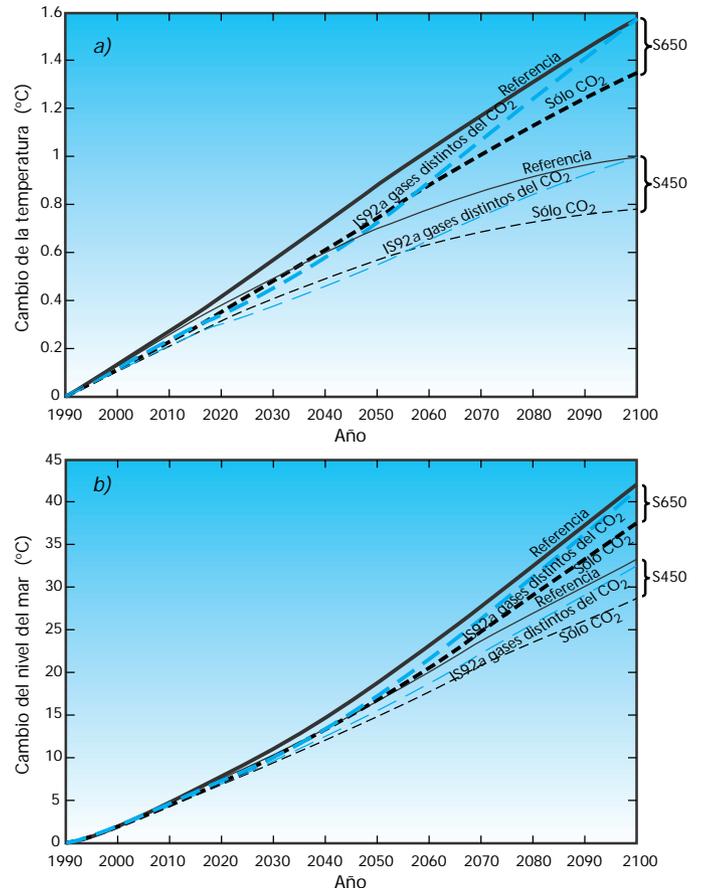


Figura 12. a) Efecto de diferentes perfiles de emisión de gases distintos del CO₂ sobre el cambio de temperatura mundial para los perfiles de concentración S450 y S650 (véase la Figura 4). Las líneas de trazo continuo indican los resultados de referencia; las líneas de trazo corto representan los resultados para CO₂ únicamente, y las de trazo largo indican los resultados en que las emisiones de CH₄, N₂O y SO₂ aumentan como IS92a hasta 2100 (el denominado caso IS92a). Se ha supuesto para la sensibilidad del clima el valor intermedio 2.5°C. b) Igual que a), pero relativo al cambio del nivel del mar mundial. Se ha supuesto que los parámetros de fusión de hielo adoptarán valores centrales.

nivel del mar (para unos niveles de estabilización de CO₂ de 450 ppmv y 650 ppmv). Los casos indicados son los siguientes: el caso utilizado como referencia en la Figura 12; el caso en que todas las emisiones (exceptuadas las de CO₂) coinciden con las de IS92a hasta 2100; y el caso en que sólo se consideran los cambios de CO₂ a partir de 1990, es decir, en que los forzamientos radiativos asociados a todos los demás gases se mantienen en sus niveles de 1990. En el SIE-GTI se consideró solamente el último de estos casos (véanse

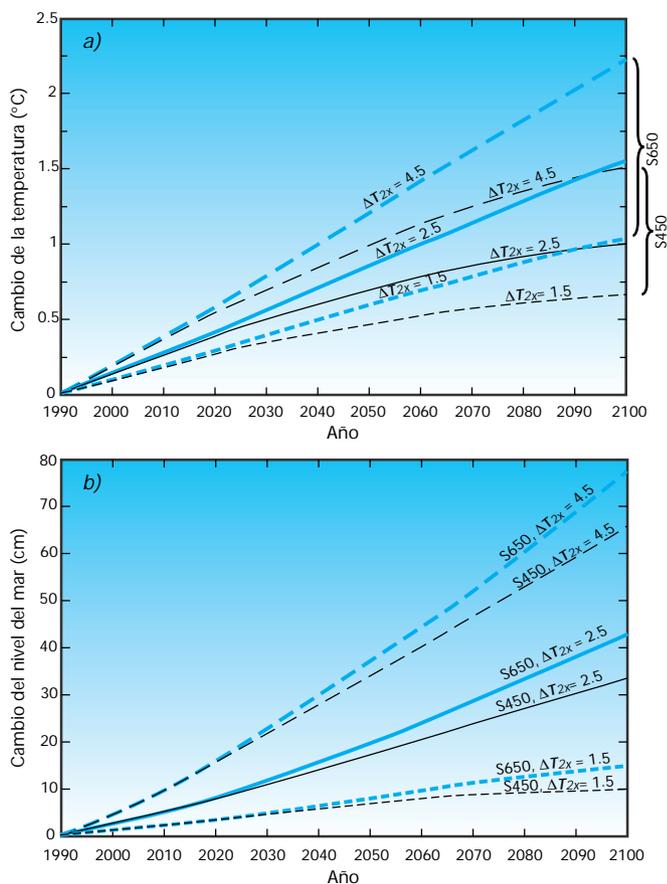


Figura 13. a) Efecto de las incertidumbres en cuanto a la sensibilidad del clima sobre la media mundial de temperaturas para los perfiles de concentración de CO₂ S450 y S650, suponiendo para los gases distintos del CO₂ el caso de referencia. La gama de sensibilidades del clima (ΔT_{2x}) va de 1.5 a 4.5°C, con un valor intermedio de 2.5°C. Para esa misma gama de valores de sensibilidad del clima, el cambio de la temperatura media mundial entre 1990 y 2100 es, para el escenario de emisión IS92a, de entre 1.4 y 2.9°C, con un valor intermedio de 2.0°C. b) Igual que en a), pero relativo al cambio del nivel del mar medio mundial. Los valores bajos, medios y altos de la sensibilidad climática están combinados con unos parámetros de fusión de hielo bajos, medios y altos, respectivamente para gamas extremas. Para esa misma gama de valores de sensibilidad del clima y parámetros de fusión del hielo, el aumento medio mundial del nivel del mar de 1990 a 2100, para el escenario de emisiones IS92a, se sitúa entre 19 y 86 cm, con un valor de gama-media de 49 cm.

las Figuras 6.26 y 7.12). La importancia de los demás gases se aprecia claramente en esta Figura. Las diferencias entre el caso de referencia y el caso de emisiones IS92a para otros gases son superiores a las diferencias entre S450 y S650 hasta 2050 aproximadamente. Los resultados de IS92a son (hasta 2050 aproximadamente) más bajos que los otros, debido al efecto compensador que, en media mundial, produce el aumento de las emisiones de CO₂ en este escenario: esta diferencia, sin embargo, oculta importantes detalles a nivel regional, y no implica necesariamente que los cambios climáticos asociados a este caso (desde el punto de vista de sus impactos) sean menos acentuados.

Los resultados de las Figuras 11 y 12 corresponden solamente a los parámetros de modelo de clima y de fusión de hielo “más conjeturables”. En la Figura 13 se muestran los resultados para 450 ppmv y 650 ppmv, para diferentes sensibilidades del clima (1.5, 2.5 y 4.5°C), acoplados (en lo que respecta al aumento del nivel del mar) con parámetros bajos, medios y altos del modelo de fusión de hielo, respectivamente. Para cualquier nivel de estabilización dado, las incertidumbres vinculadas a las incertidumbres en los parámetros son mucho mayores que las diferencias entre los resultados obtenidos para los niveles de estabilización de 450 ppmv y 650 ppmv, particularmente en cuanto a los niveles del mar. A efectos de planificación, sería indudablemente ventajosa una menor incertidumbre en los parámetros del modelo. Pero estos aspectos del sistema clima/nivel del mar son incontrolables, en tanto que el nivel de estabilización es, potencialmente, controlable. Por consiguiente, la comparación de la Figura 13 ilustra gráficamente hasta qué punto resultaría posible controlar las incertidumbres globales en las proyecciones del clima y del nivel del mar.

En las Figuras 14 y 15 de la página siguiente se representa la sensibilidad de los resultados correspondientes a 450 ppmv y 650 ppmv a las incertidumbres de las emisiones futuras para distintos gases específicos: un cambio de ± 100 Tg(CH₄) en el período 1990-2100 respecto de las emisiones de referencia de CH₄ de la Figura 14, y un cambio de $\pm 50\%$ (es decir, de 37.5 TgS) en el mismo período respecto de las emisiones de referencia de SO₂ de la Figura 15. (Estos fueron los mismos casos que se consideraron en la Sección 2.3.1 para evaluar las incertidumbres del forzamiento y del CO₂ equivalente.) No se ha indicado la sensibilidad para el N₂O puesto que, para las perturbaciones de ± 2 Tg(N) examinadas anteriormente, es apreciablemente menor a corto plazo que para el CH₄, debido al largo período de vida del N₂O en comparación con el CH₄ (compárense las Figuras 9a y 9b).

En el contexto de este análisis de sensibilidad, los efectos a largo plazo del CH₄ y del SO₂ para las perturbaciones elegidas son relativamente pequeños si se comparan con las diferencias entre los resultados obtenidos para diferentes niveles de estabilización (véanse las Figuras A4 y A5 del Apéndice 1). A corto plazo, sin embargo, los efectos son relativamente mucho mayores (compárense con las Figuras 10 y A2). Ello se debe a que, para los aerosoles derivados de CH₄ o de SO₂, los tiempos de respuesta son mucho menores que en el caso del CO₂. Por ello, los efectos diferenciales sobre el clima vinculados a distintos objetivos de estabilización de CO₂ tardan en manifestarse mucho más que las respuestas a los cambios en las emisiones de CH₄ y SO₂, que son mucho más rápidas.

Aunque no podemos aún caracterizar las diferencias entre los niveles y los recorridos de estabilización en términos del grado de riesgo que entrañan, es patente, tal como se indica en el SIE-GTI (Sección 6.3) y en Wigley y otros (1996) que la elección tanto del nivel de estabilización como del recorrido a seguir afectan a la magnitud y celeridad del cambio futuro de clima y de nivel del mar. Las emisiones futuras de otros gases de efecto invernadero influyen también apreciablemente en el clima y el nivel del mar futuros, y conllevan, por lo general, cambios mayores que los que

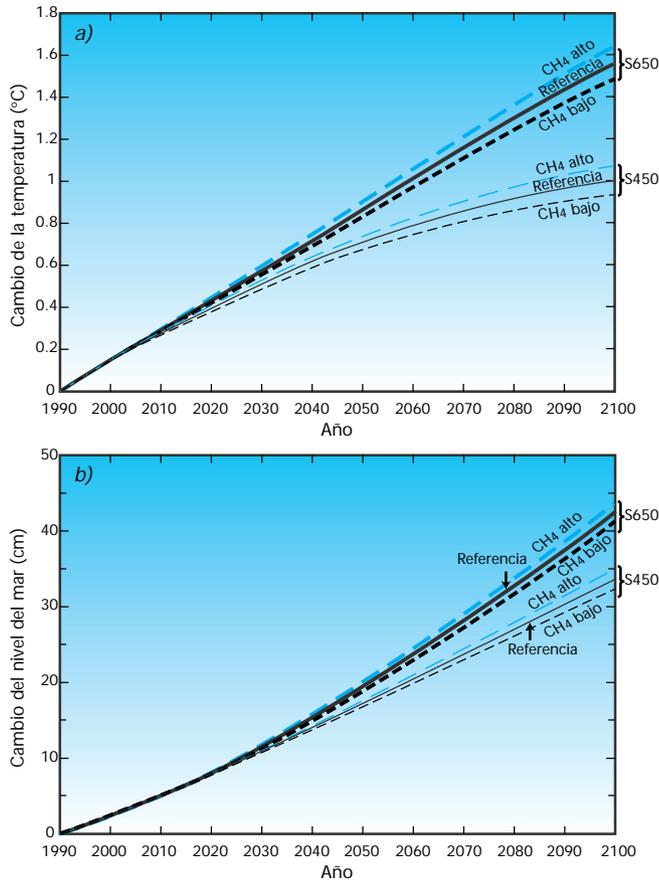


Figura 14. a) Sensibilidad del cambio de temperatura media mundial a las emisiones de CH₄ para los perfiles de concentración S450 y S650 (véase la Figura 4). Las líneas de trazo continuo indican los resultados de referencia; las curvas CH₄ bajo/CH₄ alto presuponen que las emisiones anuales de CH₄ disminuyan/aumenten linealmente en 100 Tg(CH₄) entre 1990 y 2100 (véase el Cuadro 4). El forzamiento radiativo (y el CO₂ equivalente) del cual se obtuvieron las temperaturas mundiales se indicaba en la Figura 9a.
 b) Igual que en a), pero relativo al cambio del nivel del mar mundial. Se ha supuesto que los parámetros de fusión de hielo adoptarán valores centrales.

produciría el CO₂ por sí solo. De este modo, la mitigación de estas emisiones es un componente valioso de un programa concebido para evitar interferencias peligrosas en el sistema climático. A largo plazo (más allá de 2100), las incertidumbres en cuanto a las emisiones futuras de CH₄, N₂O y SO₂ producen unos efectos por lo general inferiores a los que se derivarían de las diferencias entre distintos niveles de estabilización de CO₂. Sin embargo (hasta 2050 aproximadamente), a corto plazo, la importancia de las emisiones de otros gases es relativamente mucho mayor. Las incertidumbres en cuanto a las emisiones futuras de CH₄ y SO₂

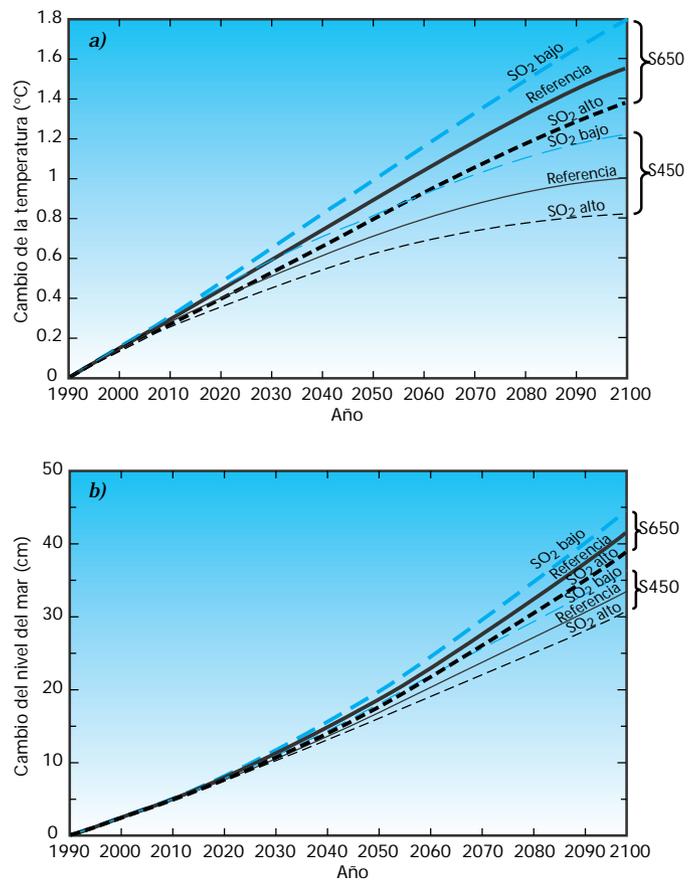


Figura 15. a) Sensibilidad del cambio de temperatura media mundial a las emisiones de SO₂ para los perfiles de concentración S450 y S650 (véase la Figura 4). Al igual que en la Figura 10a, las líneas de trazo continuo señalan los casos de referencia; las líneas de trazos cortos representan los casos SO₂ alto, en que las emisiones aumentan linealmente desde 75 TgS/año en 1990 hasta 112.5 TgS/año en 2100, mientras que las líneas de trazos largos señalan los casos “SO₂ bajo”, en que las emisiones disminuyen linealmente hasta las 37.5 TgS/año en 2100. El forzamiento radiativo (y el CO₂ equivalente) del cual se obtuvieron las temperaturas mundiales se indicaba en la Figura 10a.
 b) Igual que en a), pero relativo al cambio del nivel del mar mundial. Se ha supuesto que los parámetros de fusión de hielo adoptarán valores centrales.

conllevan incertidumbres con respecto al cambio de clima que exceden de las obtenidas para los diferentes perfiles de concentración de CO₂.

Con respecto a las emisiones de SO₂, la situación es más compleja que para las emisiones de gases de efecto invernadero, debido a su extrema heterogeneidad espacial. No se puede considerar que el efecto de enfriamiento de las emisiones de SO₂ compensará, sin más, el efecto de calentamiento producido por las emisiones de gases de efecto invernadero.

3. IMPACTOS Y COSTOS DE MITIGACIÓN ASOCIADOS A LA ESTABILIZACIÓN DE LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO

3.1 Impactos asociados a diferentes trayectorias de emisiones

En el Artículo 2 de la CMCC (véase la Sección 1.1) se reconoce explícitamente la importancia de los ecosistemas naturales, de la producción de alimentos y de un desarrollo económico sostenible a la hora de determinar si existe una “interferencia antropógena peligrosa en el sistema climático”. Basándose en la información contenida en el SIE-GTI y en el SIE-GTII, las tasas y niveles de cambio climático posiblemente asociados a las trayectorias de emisión señaladas en la Sección 2 de este documento podrían influir considerablemente en los sistemas de recursos naturales de distintas regiones. Es mucho lo que se conoce sobre la respuesta de ciertos sistemas en determinadas ubicaciones, y resulta posible identificar tanto los riesgos sustanciales como los beneficios posibles que conllevan. En la actualidad no es posible integrar toda esta información para obtener una evaluación de los impactos mundiales asociados a diferentes niveles de estabilización o trayectorias de emisiones, dado que: las proyecciones de cambio climático a escala regional tienen un margen de incertidumbre; nuestros conocimientos sobre muchos de los procesos críticos son, en la actualidad, inadecuados; los sistemas están sujetos a múltiples coerciones (*stresses*) climáticas y no climáticas; y hay muy pocos estudios que hayan abordado las respuestas dinámicas a un aumento ininterrumpido de las concentraciones de gases de efecto invernadero, o las consecuencias que se derivarían de aumentos superiores a una concentración doble de CO₂ equivalente en la atmósfera. Además, las simples proyecciones de modelos climáticos no son suficientes para generar escenarios utilizables en los estudios de impacto, puesto que producen solamente cantidades promediadas globalmente. Las proyecciones de temperatura media mundial y nivel del mar, expuestas en la Sección 2, son sólo índices del cambio climático.

3.1.1 Importancia de los impactos para adoptar decisiones sobre la estabilización

En el SIE-GTIII (Capítulos 5 y 6) se examinan posibles formas de actuación que permitan incorporar, en las decisiones sobre los objetivos de estabilización, información acerca de los posibles impactos del cambio climático. En la mayoría de estos planteamientos, el valor neto de los impactos se define como la diferencia, en términos de bienestar, entre un futuro con cambio climático antropógeno y un futuro sin él. En uno de ellos, que suele denominarse “de análisis costo/beneficio”, se establece una comparación entre los posibles impactos negativos, los beneficios y los costos de adaptación, por un lado, y los posibles costos de mitigación, por otro; se pretende así maximizar los beneficios netos (es decir, los beneficios de un cambio climático reducido menos los costos de la reducción de las emisiones). La mitigación está justificada hasta el punto en que sus costos previstos no sean superiores a los beneficios esperados (es decir, el valor de los posi-

bles impactos negativos evitados, más el valor de los “beneficios secundarios” que podrían derivarse de la mitigación).

En otro de estos planteamientos, el denominado “planteamiento de sostenibilidad”, es absolutamente prioritario evitar determinado nivel de coerción sobre sistemas, actividades o regiones clave. Para ello, la sociedad identifica un nivel alcanzable de cambio, por ejemplo una magnitud absoluta de cambio de temperatura o una celeridad decenal de cambio que acarrearían riesgos inaceptables en el futuro; seguidamente, se definen unos valores de forzamiento radiativo y de estabilización atmosférica deseables que impidan alcanzar un nivel de cambio inaceptable. En ambos planteamientos se han desarrollado mecanismos para abordar diversos aspectos esenciales, por ejemplo riesgo, incertidumbre, irreversibilidad, valoración económica de impactos no de mercado, comparación de costos presentes y futuros, y equidad (SIE-GTIII: Sección 6.1.2).

Tanto en el planteamiento de sostenibilidad como en el de costo/beneficio se requiere información detallada sobre los impactos, aunque el tipo de información requerida es diferente en uno u otro caso. Con el planteamiento de costo/beneficio es necesario reducir una diversidad de impactos, que afectan a situaciones y sistemas diferentes, a una métrica común (con frecuencia, expresada en términos monetarios). Algunas aplicaciones de este planteamiento comparan las ganancias y pérdidas en diferentes sistemas sin tipificarlas mediante una unidad de análisis común. En teoría, la monetarización permite comparar las ganancias y las pérdidas en diferentes sectores y regiones. Por desgracia, las evaluaciones globales monetarizadas de los impactos y de los beneficios de la mitigación adolecen de un gran margen de incertidumbre, incluso para los estudios nacionales o sectoriales, y no digamos ya los de escala mundial. Además, hay muy pocas, por no decir ninguna, estimaciones de la “curva de beneficios”, y la mayoría de las existentes son poco más que estimaciones puntuales (SIE-GTIII: Sección 5.4.1). Por esta y otras razones, el planteamiento de costo/beneficio no permite identificar con un grado de certidumbre aceptable el nivel de mitigación apropiado. El planteamiento de sostenibilidad no reduce los impactos a una métrica común, por lo que no permite comparar los efectos entre distintos sistemas físicos y circunstancias socioeconómicas. Además, resulta difícil incluir los costos de la mitigación. El planteamiento de sostenibilidad, sin embargo, sí permite analizar los impactos físicos por separado.

Dado que el nivel de los impactos varía enormemente de un lugar a otro y de una época a otra, y dado que algunos países (por lo general, países en desarrollo) obtienen una parte mucho mayor de sus ingresos nacionales en sectores sensibles al clima (por ejemplo, en cultivos de subsistencia) y cuentan con unos recursos mucho más limitados para poder adaptarse, la aceptabilidad relativa de un objetivo de estabilización o trayectoria de emisiones dados será muy difícil de determinar en cualquiera de los dos planteamientos, especialmente porque una comparación así conlleva numerosas cuestiones éticas y políticas.

3.1.2 Evaluación de los posibles impactos biofísicos en el SIE-GTIII

Se tiene gran cantidad de información sobre la sensibilidad y vulnerabilidad potencial de determinados ecosistemas terrestres y acuáticos, sistemas de gestión hídrica, agricultura, infraestructura humana y salud humana. La información científica y técnica actualmente existente aparece resumida en el SIE-GTII (Capítulos 1 a 18), aunque en el momento actual es difícil relacionarla con escenarios futuros concretos relacionados con el clima.

Una muestra representativa, aunque necesariamente incompleta, de los impactos potenciales indicados en el SIE-GTII incluye:

- a) *Bosques*: los cambios de temperatura y de disponibilidad de agua proyectados por modelos de cambio mundial en equilibrio para valores doblados de CO₂ equivalente sugieren que una parte sustancial (un tercio, en términos de promedio mundial, variando según las regiones entre un séptimo y dos tercios) de la superficie boscosa del planeta experimentará cambios importantes en cuanto al tipo genérico de su vegetación; los cambios serán más notables en latitudes altas, y menos en los trópicos. Se espera que el cambio climático sea más rápido que los procesos de crecimiento, reproducción y restablecimiento de las especies boscosas (SIE-GTII: Resumen para responsables de políticas (SPM) (Sección 3.1), y Capítulo 1). La multiplicidad de coerciones ejercidas sobre los bosques, en particular por el ozono y por la acidificación debida al SO₂, así como el cambio de clima y del CO₂, podrían tener consecuencias añadidas importantes;
- b) *Ecosistemas de montaña*: según las proyecciones, la distribución altitudinal de la vegetación se desplazará hacia elevaciones mayores; se extinguirán algunas especies cuyo clima de supervivencia se limite a las cumbres de montaña, bien por la desaparición de su hábitat, bien por unas menores posibilidades de migración (SIE-GTII: SPM, Sección 3.1, y Capítulo 5). El cambio de los ecosistemas de montaña modificará la función reguladora de la vegetación altitudinal, alterando con ello las pautas hidrológicas en numerosas regiones;
- c) *Ecosistemas acuáticos y costeros*: la distribución geográfica de los humedales experimentará probablemente un desplazamiento, por efecto de los cambios de temperatura y de precipitación. Corren peligro especialmente algunos ecosistemas costeros, entre ellos las marismas, los ecosistemas de manglares, los humedales costeros, las playas de arena, las formaciones coralinas, los atolones de coral y los deltas fluviales. Los cambios en esos ecosistemas tendrían un efecto negativo importante en los sectores de turismo, abastecimiento de agua dulce, pesquerías y biodiversidad (SIE-GTII: SPM, Sección 3.1, y Capítulos 6, 9 y 10);
- d) *Hidrología y gestión de recursos hídricos*: las proyecciones de los modelos indican que en los próximos cien años podría desaparecer entre un tercio y la mitad de la masa de los glaciares de montaña, más un área considerable de permafrost. La menor extensión de los glaciares y el menor espesor de las cubiertas de nieve afectaría también a la distribución estacional de los flujos hídricos y de los abastecimientos de agua destinados a la generación de energía hidroeléctrica y a la agricultura. Cambios de temperatura y precipitación relativamente pequeños, sumados a los efectos no lineales sobre la evapotranspiración y la humedad del suelo, pueden generar cambios relativamente notables en la escorrentía, especialmente en regiones semiáridas. La cantidad y calidad del abastecimiento de agua constituye ya un serio problema en numerosas regiones, y particularmente en ciertas áreas costeras bajas, deltas e islas pequeñas, lo cual hace que esas regiones sean especialmente vulnerables a ulteriores reducciones del suministro de agua autóctono (SIE-GTII SPM, Sección 3.2, y Capítulos 7, 10 y 14);
- e) *Alimentos y fibras*: estudios realizados revelan que, ante el cambio climático proyectado, la producción agrícola mundial podría, en conjunto, mantenerse con relación a la producción de referencia para un valor doble del CO₂ equivalente y en condiciones de equilibrio. A esta conclusión se ha llegado teniendo en cuenta los efectos beneficiosos de la fertilización por anhídrido carbónico, aunque sin incluir los cambios que puedan experimentar las plagas agrícolas ni los posibles efectos de una variabilidad climática alterada. Con todo, en algunos lugares podría aumentar el riesgo de hambre y hambrunas; el mayor riesgo recae sobre una gran parte de la población más pobre del mundo (particularmente la que vive en áreas subtropicales y tropicales, y depende de sistemas agrícolas aislados en regiones semiáridas) (SIE-GTII: SPM, Sección 3.3, y Capítulos 13 y 16);
- f) *Infraestructura humana*: claramente, el cambio climático acentuará la vulnerabilidad de algunas poblaciones costeras frente a las crecidas y frente a la pérdida de suelos por erosión. Algunos países insulares pequeños, entre otros, serán más vulnerables, dado que sus sistemas de defensa marina y costera están menos consolidados. Serán más vulnerables los países con densidades de población elevadas. Las mareas de tempestad y las crecidas podrían amenazar a culturas enteras. Para esos países, el aumento del nivel del mar podría forzar migraciones internas o internacionales (SIE-GTII: SPM, Sección 3.4, y Capítulos 9, 11, 12 y 17);
- g) *Salud humana*: el cambio climático causará probablemente impactos de amplio alcance y, la mayor parte de las veces, adversos sobre la salud humana, y ocasionará importantes pérdidas de vidas humanas. Uno de sus efectos directos sobre la salud será el aumento de la mortalidad y de las enfermedades (sobre todo, cardiorrespiratorias) si, como se prevé, aumenta la intensidad y duración de las olas de calor. Los aumentos de temperatura en las regiones más frías causarán un menor número de muertes por frío. Entre los efectos indirectos del cambio climático, que serán probablemente predominantes, se contarán una mayor transmisibilidad de las enfermedades infecciosas mediadas por vectores (por

ejemplo, paludismo, dengue, fiebre amarilla y algunas encefalitis víricas), dado que la extensión geográfica de los vectores será mayor, y las estaciones favorables, más largas. Tendrán también consecuencias sobre la salud humana las limitaciones de abastecimiento de agua dulce y de alimentos nutritivos, así como la agravación de la contaminación del aire (SIE-GTII: SPM, Sección 3.5, y Capítulo 18).

3.1.3 Evaluación económica de los impactos

Las evaluaciones económicas de los impactos producidos por el cambio climático son parte integrante de los estudios de costo/beneficio y de otros esquemas de adopción de decisiones empleados para comparar los posibles costos y beneficios que se derivarían de diversas maneras de proceder. Estos estudios han sido evaluados en el SIE-GTIII (Capítulo 6), que sirve de punto de partida para la presente sección.

Se han efectuado estimaciones monetarias de los impactos que se producirían si el CO₂ aumentase al doble, para diversos sectores de la economía de mercado. Hay acuerdo general en que los valores de medida habituales (por ejemplo, las consecuencias en el PNB por habitante) son inadecuados para calibrar las posibles consecuencias de un cambio climático, dado que, aunque algunos efectos son susceptibles de evaluación monetaria, otros no lo son tanto. En algunas estimaciones de impactos no de mercado, no existe ningún método aceptado que permita cuantificar los impactos en términos monetarios (por ejemplo, el valor de una vida humana, la pérdida de especies o la aparición de especies nuevas), y lo mismo ocurre con los efectos conjuntos de mercado y no de mercado en algunos sectores (por ejemplo, pérdidas de bosques en términos de madera y de utilidad pública). Entre los impactos netos del cambio climático se incluyen, en la medida en que sea posible cuantificarlos, los impactos de mercado y no de mercado, y, en algunos casos, los costos de adaptación. Los impactos están expresados en términos netos, dado que algunos de los efectos del cambio climático podrían ser beneficiosos, aunque con ello se podrían desdibujar algunas cuestiones de equidad distributiva. Al evaluar globalmente las implicaciones del cambio climático desde el punto de vista del bienestar, habrá que tener en cuenta la naturaleza incompleta de las estimaciones de impacto aquí expuestas.

Los estudios examinados en el SIE-GTII contienen unas estimaciones de las pérdidas económicas vinculadas a un calentamiento mundial de 2.5°C (estimaciones intermedias del aumento mundial de la temperatura de equilibrio por efecto de un doblamiento de las concentraciones de CO₂ equivalente) en unas condiciones mundiales similares a las actuales (es decir, características demográficas, estructuras sociales, condiciones económicas, etc. similares) que arrojan los resultados siguientes:

- a) impacto en países desarrollados: entre el 1 y el 1.5% del PIB anualmente;
- b) impacto en países en desarrollo: entre el 2 y el 9% del PIB anualmente.

En los estudios examinados por el GTIII se totalizan estas estimaciones en proporción al PIB, arrojando un total de 1.5-2% del PIB. Estas bandas de costos totalizados están basadas en un gran número de supuestos simplificadores y controvertidos. Representan las estimaciones centrales más conjeturables obtenidas a partir de estudios relativamente limitados en los que se ha tratado de incluir los impactos de mercado y no de mercado más, en algunos casos, los costos de adaptación, y no abarcan la totalidad del (amplio) margen de incertidumbre. Son, además, imperfectas, ya que el PIB no mide con precisión el bienestar de las personas ni de la sociedad. La idea de totalizar los resultados tropieza con numerosas dificultades (SIE-GTIII: Capítulos 3 y 6), y fue objeto de serias reservas en el Resumen para los responsables de políticas del SIE-GTIII.

Las estimaciones actuales son rudimentarias, y ello por varias razones. Además de los numerosos problemas que, como ya se señalaba en el SIE-GTII, afectan a las evaluaciones de impacto para los distintos sectores, existen otras incertidumbres en relación con:

- a) las estimaciones se refieren mayoritariamente a los Estados Unidos y otros países de la OCDE, y muchas de las estimaciones regionales y mundiales están basadas en extrapolaciones de esos resultados. La información disponible con respecto a los demás países es escasa, aunque cada vez mayor. Los conocimientos actuales sobre los impactos a escala regional y mundial son, por consiguiente, limitados;
- b) las estimaciones monetarizadas de los impactos para escenarios de concentración doblada de CO₂ equivalente suelen estar basadas en la situación económica actual, y expresadas como porcentaje del PIB. Una simple proyección de las pérdidas porcentuales es una aproximación más bien poco satisfactoria, dado que los impactos futuros dependerán de la evolución de la economía, de la demografía y del medio ambiente, que derivarán hacia una situación muy diferente de la actual. Algunos de los efectos del cambio climático se incrementarán proporcionalmente más que el PIB (por ejemplo, el valor económico de las mercancías no comerciales), mientras que otros (por ejemplo, la agricultura) aumentarán proporcionalmente menos);
- c) existen dificultades para medir el valor económico de los impactos, aun en el caso de que éstos sean conocidos. Tal es el caso de los impactos no de mercado, y de los impactos en los países en desarrollo. Hay quienes consideran que una valoración monetaria de esos impactos es esencial para poder adoptar decisiones fundamentadas, mientras que otros rechazan la valoración de ciertos impactos (por ejemplo, la pérdida de vidas humanas o de biodiversidad) por razones éticas;
- d) el cálculo totalizado de los impactos a escala mundial plantea cuestiones difíciles de equidad con respecto a los países, especialmente si se tienen en cuenta las diferencias de ingresos y otras diferencias de orden social. Si se calculan sin más las estimaciones globales del PIB, se estará dando una gran preponderancia a la producción económica de cada país, y se estará valorando diferentemente, para países distintos,

impactos que en realidad son equivalentes. Los problemas éticos que suscita un cálculo de esa índole plantean dificultades de coherencia que no han sido abordadas explícitamente en los estudios existentes (SIE-GTIII, Capítulos 3 y 6);

- e) resulta difícil determinar las tasas de descuento, que son los instrumentos analíticos utilizados por los economistas para comparar efectos económicos ocurridos en fechas diferentes. Esta consideración es importante, ya que es probable que los impactos del cambio climático resulten gravosos para las generaciones futuras.

Resulta difícil aplicar en la práctica estas estimaciones para la toma de decisiones sobre el cambio climático, y no sólo por la incertidumbre de las propias estimaciones, sino también por la naturaleza mundial e intergeneracional del problema. En algunas regiones, algunos sistemas podrían beneficiarse del cambio climático durante cierto tiempo, mientras que otros acusarán efectos adversos; en otras palabras: los impactos se repartirán de manera desigual. El cambio climático afectará a una enorme diversidad de sociedades humanas, algunas de las cuales, con menos capacidad de adaptación que las demás, resultarán más afectadas. Toda evaluación conlleva una serie de ajustes compensatorios entre tipos de impactos, regiones, países, generaciones e individuos. Pero, aunque existen diversas técnicas para explicitar y realizar dichos ajustes, la decisión que determine los impactos más costosos será, en fin de cuentas, una decisión política. En los sistemas institucionales/económicos/políticos desarrollados existen mecanismos de ajuste y de compensación para los más desfavorecidos. A nivel internacional e intertemporal, los mecanismos existentes son mucho menos efectivos. En el momento actual, el conocimiento de los impactos del cambio climático no está suficientemente desarrollado como para poner en claro los mecanismos de ajuste.

3.1.4 Incertidumbres en la proyección de impactos de trayectorias diferentes

En los dos extremos de la escala, cabe esperar que unos valores más altos de las concentraciones a alcanzar y unos cambios más rápidos del forzamiento radiativo repercutan en los sistemas naturales y humanos con mayor intensidad que las trayectorias basadas en una más lenta acumulación del forzamiento y en un valor más bajo de las concentraciones de estabilización. En la actualidad, sin embargo, no es posible determinar hasta qué punto los impactos posiblemente asociados a un objetivo de estabilización o a una trayectoria de emisiones podrían diferir de los asociados a otro objetivo o trayectoria. Por muy distintas razones, no existe una relación simple entre las emisiones y las concentraciones en la atmósfera de los gases y aerosoles de efecto invernadero, por una parte, y los posibles impactos, por otra. Algunas de esas razones son:

- a) una alteración de las pautas de forzamiento radiativo y de los valores medios mundiales del cambio del clima influirán de manera diferente en las condiciones climáticas de las distintas regiones. Estas condiciones locales y regionales, y en particular el cambio de la duración de las estaciones de cultivo, la

disponibilidad de agua o la incidencia de regímenes de perturbación (valores extremos de alta temperatura, crecidas, sequías, incendios, o plagas) repercuten de manera importante en la estructura y función tanto del medio natural como del creado por los seres humanos;

- b) algunos sistemas son más vulnerables que otros a los cambios del clima regional. Así, por ejemplo, los sistemas humanos son más adaptables y, por lo tanto, menos vulnerables en promedio que los sistemas naturales; los sistemas aforestados necesitan períodos más largos para establecerse que los sistemas herbáceos y es, por consiguiente, menos probable que puedan migrar a ubicaciones más adecuadas a medida que varían las pautas de temperatura y de precipitación;
- c) la vulnerabilidad relativa de cada región variará previsiblemente. Los sistemas típicamente más vulnerables se hallan en los países en desarrollo, en que las circunstancias económicas e institucionales son menos favorables que en los países desarrollados. Los habitantes de regiones semiáridas o elevadas, áreas costeras bajas, áreas con escasez de agua o propensas a las crecidas, o islas pequeñas son especialmente vulnerables al cambio climático. Ciertas áreas sensibles como, por ejemplo, las planicies inundables y las llanuras costeras son ahora más vulnerables a las tormentas, crecidas y sequías, debido a su mayor densidad de población y al aumento de su actividad económica;
- d) los impactos no son directamente proporcionales a la intensidad o a la celeridad del cambio: para algunas especies (y, por lo tanto, para algunos sistemas), podrían existir determinados umbrales de cambio de temperatura, de precipitación o de otros factores que, una vez rebasados, den lugar a cambios discontinuos de su viabilidad, de su estructura o de su función. Esto sugiere que un cambio pequeño en un clima local podría producir un impacto desproporcionadamente grande;
- e) los estudios existentes se limitan, en su mayoría, a analizar los impactos derivados de un doblamiento del CO₂ equivalente en condiciones de equilibrio; son muy pocos los que han considerado las respuestas dinámicas a un aumento progresivo de las concentraciones de gases de efecto invernadero o a escenarios de estabilización, y menos aún los que han abordado las consecuencias de un aumento superior al doble de las concentraciones de CO₂ equivalente en la atmósfera. En casos muy raros, se han evaluado las implicaciones de una multiplicidad de factores coercitivos como serían, por ejemplo, el O₃, el SO₂, la acidificación, u otros agentes coercitivos contaminantes en presencia de un cambio de clima y del CO₂.

En conclusión, la concentración que los gases de efecto invernadero alcancen finalmente en la atmósfera, así como la celeridad a la que aumenten las concentraciones, influirán probablemente en los impactos experimentados, ya que un cambio climático más lento dará a los sistemas más tiempo para adaptarse. Con todo, nuestros conocimientos no son aún suficientes para determinar un umbral claro en cuanto a la celeridad y a la magnitud del cambio.

3.2 Costos de mitigación en la estabilización de las concentraciones de CO₂

En anteriores secciones de este Documento Técnico se exploran ciertos aspectos físicos de diversos niveles de estabilización, y se consideran sus impactos sobre el clima. Nos ocuparemos ahora de los costos asociados a la estabilización de las concentraciones de los gases de efecto invernadero. Estos costos dependen en gran medida del nivel de estabilización y del recorrido seguido hasta alcanzar ésta. Nos centraremos en el CO₂ (el que más influye en el forzamiento radiativo y el que cuenta, notablemente, con una bibliografía más extensa) proveniente del quemado de combustibles de origen fósil, que es su fuente antropógena más importante.

Entre los factores que influyen en los costos de mitigación del CO₂ se encuentran los siguientes:

a) las emisiones futuras en ausencia de políticas de intervención (niveles “de referencia”);

- b) el objetivo de concentración, y ruta seguida hasta la estabilización, que determinan el balance de carbono disponible para las emisiones;
- c) el comportamiento del ciclo natural del carbono, que influye en el balance de emisiones de carbono disponible para un objetivo y un recorrido de concentración dados;
- d) la diferencia de precio entre los combustibles de origen fósil y las alternativas sin carbono, y entre diferentes combustibles de origen fósil;
- e) el progreso tecnológico, y la celeridad con que se adopten tecnologías que emitan menos carbono por unidad de energía producida;
- f) los costos de transición asociados a la renovación del capital de equipo, que aumentarán si se hace prematuramente;
- g) el grado de cooperación internacional, que determinará el grado en que se implementan opciones de mitigación de bajo costo en diversas partes de mundo; y
- h) los supuestos sobre el tipo de descuento utilizados para comparar costos en fechas diferentes.

Influirán también en los costos: el tipo de políticas y de medidas que se adopten para reducir las emisiones; el grado de flexibilidad en la reasignación de las responsabilidades de control entre distintas fuentes/países; los esfuerzos de investigación y desarrollo; los esfuerzos de transferencia de tecnología; los tipos de inversiones en infraestructura que hagan las sociedades (por ejemplo, si es en transporte público o en ampliación de las autopistas); y nivel de concentración elegido para la estabilización.

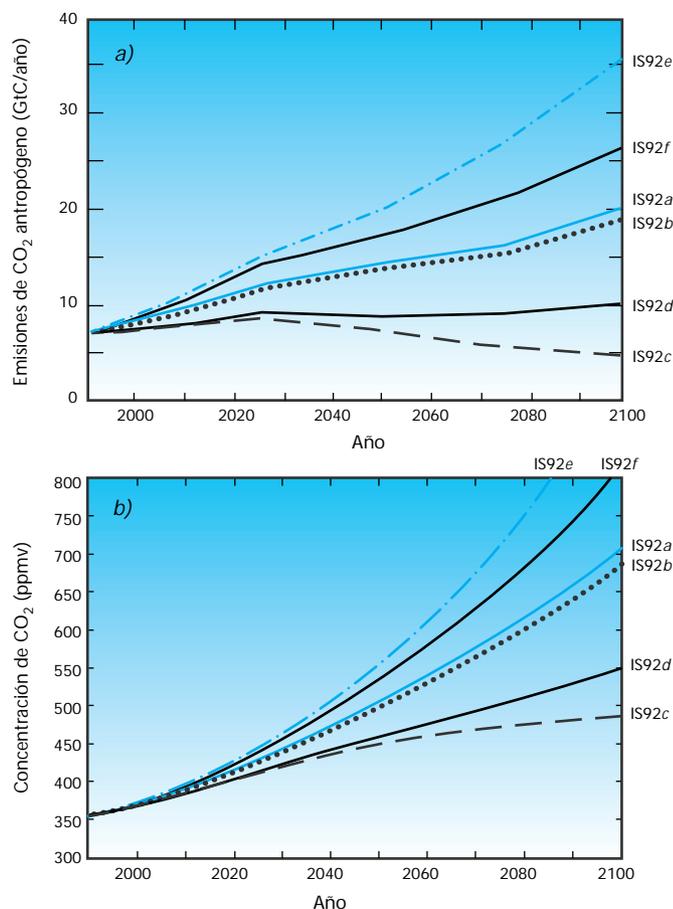


Figura 16. a) Emisiones antropógenas totales de CO₂ según los escenarios de emisiones IS92. b) Concentraciones atmosféricas deducidas para los escenarios de emisión IS92 calculadas mediante el modelo de ciclo de carbono de Bern. (véase el SIE-GTI (Sección 2.1)). (Tomado del Resumen técnico del SIE-GTI).

3.2.1 Consideraciones económicas vinculadas a los niveles de estabilización de CO₂

3.2.1.1 La cantidad de carbono a eliminar

Los costos vinculados a la limitación del carbono se dan en función de las emisiones “de referencia”, es decir, de la manera en que se desarrolle el aumento proyectado de las emisiones en ausencia de políticas de intervención. Cuanto más alto sea el nivel de referencia, más carbono habrá que eliminar para alcanzar determinado objetivo de estabilización y, por consiguiente, más necesario será intervenir. En la Figura 16a se muestran los seis escenarios de referencia IS92. Las diferencias en las emisiones responden a supuestos diferentes en lo que se refiere a la población, el crecimiento económico, el costo y la disponibilidad de alternativas de oferta o de demanda de energía, y otros factores.

En todos los escenarios de IS92, excepto uno, las emisiones van en aumento. Estos resultados están en consonancia con la inmensa mayoría de los estudios recientemente examinados en el SIE-GTIII. De las varias docenas de estudios realizados, práctica-

| Escenarios IS92 | Emisiones acumuladas de CO ₂ de 1991 a 2100 (GtC) | Estabilización a | Perfiles de concentración "S"* | Perfiles de concentración "WRE" † |
|-----------------|--|------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| c | 770 | 450 ppmv | 630 | 650 |
| d | 980 | 550 ppmv | 870 | 990 |
| b | 1430 | 650 ppmv | 1030 | 1190 |
| a | 1500 | 750 ppmv | 1200 | 1300 |
| f | 1830 | 1000 ppmv | - | 1410 |
| e | 2190 | | | |

* Según el IPCC94 (Capítulo 1)
† Perfiles para una continuación de emisiones IS92a por lo menos hasta el año 2000

Cuadro 5. Emisiones antropógenas totales de CO₂ acumuladas desde 1991 hasta 2100 (GtC). Todos los valores fueron calculados usando el balance de carbono para la década de 1980 (IPCC94: Capítulo 1) y el modelo de Bern del ciclo de carbono.

mente todos arrojan unas emisiones de referencia en aumento. Este aumento se debe a que, según los estudios, el crecimiento económico incrementa las emisiones más aprisa de lo que las reducen las disminuciones de la intensidad de energía y la transición a fuentes menos intensivas en carbono.

El aumento del nivel de referencia no quiere decir que no haya alternativas económicamente interesantes a los combustibles de origen fósil, tanto desde el punto de vista de la oferta como de la demanda de energía. Es habitual incluir un buen número de ese tipo de opciones en los análisis económicos. Un aumento del nivel de referencia significa únicamente que dichas opciones no se implementan a un ritmo suficientemente rápido como para frenar el crecimiento de las emisiones de carbono. Ello puede deberse a una oferta insuficiente de opciones sin pesar.

En la Figura 16b se expresan los escenarios de emisión en términos de concentraciones de CO₂. Ninguno de los seis escenarios representados conduce a concentraciones estables antes de 2100, aunque IS92c arroja un crecimiento muy lento de la concentración de CO₂ a partir de 2050. Los escenarios IS92a, b, e y f prevén una duplicación de los niveles de concentración preindustriales de CO₂ antes de 2070.

3.2.1.2 El objetivo de estabilización

Los costos vinculados a una limitación del carbono son también sensibles al objetivo de estabilización de la concentración. En primera aproximación, un objetivo de estabilización define una cantidad de carbono que podría ser emitida entre el momento actual y la fecha en que se espera alcanzar el objetivo (el denominado "balance de carbono"). En el Cuadro 5 se representan los "balances de carbono" asociados a los perfiles de estabilización de 450, 550, 650, 750 y 1000 ppmv hasta el año 2100 (véanse en la Figura 6 las emisiones acumulativas de las que se han obtenido los

balances de carbono). Cuanto menor sea el objetivo de estabilización, menor será el balance de carbono (es decir, menor será el volumen de emisiones acumulativas).

La magnitud del "balance de carbono" es uno de los principales determinantes de los costos de mitigación. Unos objetivos de estabilización más bajos requieren unos balances de carbono menores que, a su vez, obligan a un nivel de intervención mayor. En el Cuadro 5 se compara el balance de carbono correspondiente al nivel de estabilización y a los trayectos de las Figuras 5 y 6 con las emisiones antropógenas de CO₂ acumuladas en los escenarios de emisiones IS92.

3.2.1.3 Diferencia de precios entre las alternativas basadas en combustibles de origen fósil y las alternativas sin carbono

El costo de la estabilización de las concentraciones de CO₂ estará también en función del precio de los combustibles de origen fósil, comparado con el de las alternativas sin carbono. Para una demanda de energía dada, el costo que acarreará la reducción de emisiones de CO₂ en el sector energético dependerá de la diferencia de costos que exista, en el momento en que se reduzcan las emisiones de CO₂ a escala mundial, entre los combustibles de origen fósil disponibles y las alternativas sin carbono.

La diferencia de precios entre los combustibles de origen fósil convencionales (por ejemplo, petróleo crudo convencional, gas natural y carbón) y las alternativas sin carbono disminuirá previsiblemente, aunque nadie sabe muy bien en qué medida. Durante los próximos cien años, el precio de los combustibles de origen fósil convencionales irá en aumento a medida que se avance en su explotación y se terminen de explotar los depósitos de carbón más baratos y accesibles. Al mismo tiempo, los adelantos en ciencias básicas e ingeniería y las medidas que se adopten a nivel institu-

cional deberían reducir el precio de las tecnologías sin carbono (y de los combustibles de origen fósil no convencionales).

El grado en que las emisiones acumulativas exceden de los recursos de petróleo crudo y gas natural convencionales permite hacerse una idea de la medida en que estos combustibles contribuyen al consumo de energía total (véanse, en el Cuadro 9 del Documento Técnico del IPCC sobre tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático (IPCC TP P&M, 1997), diversas estimaciones de las reservas y recursos mundiales de energía⁷). Si las emisiones acumulativas asociadas a un objetivo de estabilización fueran iguales o inferiores a las emisiones acumulativas que resultarían de la combustión de recursos convencionales de petróleo y gas, estos combustibles serían probablemente un componente importante de la oferta total de energía durante el período de transición a las alternativas sin carbono. Por otra parte, si las emisiones acumulativas asociadas a determinado objetivo de estabilización fueran muy superiores a las que resultarían de la combustión de recursos de petróleo crudo y gas natural convencionales, estos recursos representarían probablemente una pequeña parte de la oferta total de energía durante el período de transición. La diferencia de costos entre los combustibles de origen fósil y las alternativas sin carbono será menor en este último caso. Aunque, en el caso de las alternativas sin carbono, la diferencia de costos sería probablemente menor para niveles de estabilización mayores, la demanda total de energía sería mayor, con lo cual el efecto neto sobre los costos de transición no queda claro.

Sin embargo, no podemos hacernos una idea de cómo evolucionará con el tiempo la diferencia absoluta de precios entre los combustibles de origen fósil no convencionales y las alternativas sin carbono. La evolución de la técnica reducirá probablemente el costo de los combustibles de origen fósil no convencionales y de las alternativas sin carbono, pero es difícil determinar la rapidez con que ello ocurrirá. Los avances técnicos que disminuyen el costo de los combustibles de origen fósil no convencionales en comparación con las alternativas sin carbono encarecerán el proceso de transición, ya que aumentarán la diferencia de precios entre los combustibles de origen fósil y las alternativas sin carbono; por el contrario, los cambios técnicos que reducen el costo de las tecnologías sin carbono producirán el efecto opuesto.

Las diferencias entre los costos de los combustibles de origen fósil actualmente disponibles afectan de manera análoga a los costos de transición.

3.2.1.4 El recorrido de las emisiones

Como ya se ha visto en la Figura 5 y en la Sección 2.2.1.2, un mismo objetivo de concentración (véase la Figura 4) puede alcanzarse mediante recorridos de emisión diferentes. Las emisiones de corto plazo pueden ser compensadas con las de largo plazo. Por otra

parte, unas emisiones más elevadas y más tempranas disminuyen las posibilidades de ajustar las emisiones posteriormente. En la Figura 5, las líneas de trazos (los perfiles WRE) indican unos niveles de emisión mayores en los primeros años, pero una transición más rápida entre el aumento y la disminución de las emisiones. El recorrido asociado a las líneas continuas (los perfiles S) permite unos niveles de emisiones mayores posteriormente, pero a costa de unas emisiones menores en los primeros años. De ese modo, como se explica en la Sección 2.2.1.2, para un nivel de estabilización dado hay un “balance” de emisiones de carbono acumuladas permisibles, y la elección de un recorrido que conduzca a la estabilización podría consistir en asignar de la mejor manera posible (es decir, con la máxima eficacia económica y los mínimos efectos nocivos) ese balance de carbono a lo largo del tiempo.

Las diferencias en cuanto al recorrido de las emisiones para un mismo nivel de estabilización son importantes, ya que los costos difieren según el recorrido que se adopte. En el SIE-GTIII se identifican los siguientes factores que influyen en los costos de los recorridos alternativos: *a*) el tratamiento dado al capital de equipo, tanto actual como futuro; *b*) las perspectivas de progreso técnico; *c*) la tasa de descuento; *d*) el balance de carbono.

Capital de equipo, renovación del capital de equipo y nuevas inversiones

Los costos de mitigación están en función del período de vida de las plantas y del equipamiento actualmente instalados. El período de vida del capital de equipo destinado a la producción y utilización de energía (por ejemplo, plantas eléctricas, vivienda o transporte) no está predeterminado. Influyen en él factores tales como los costos de mantenimiento y la fiabilidad, que tienden a cambiar a lo largo del tiempo. En el sector de la energía, sin embargo, este capital suele ser de larga duración, y retirarlo antes de tiempo puede resultar costoso. Para evitar esto, una solución consistiría en repartir más uniformemente en el tiempo y en el espacio los costos de mitigación. Para reducir el costo de un objetivo de estabilización, como se señala en el SIE-GTIII, es necesario orientarse a nuevas inversiones y sustituciones cuando finalice el ciclo económico de las plantas y los equipos (es decir, al alcanzar el punto de renovación del capital de equipo).

Orientar el interés a nuevas inversiones no quiere decir “cruzarse de brazos”. Si se actúa con demasiada lentitud (es decir, si no se emprenden siquiera medidas de bajo costo), los costos de un recorrido de estabilización podrían encarecerse, ya que obligarían a actuar más rápidamente en fechas posteriores. Ello significaría, por ejemplo, retirar antes de tiempo el capital de equipo acumulado en ese período. Por poner un ejemplo, retardando en dos decenios la mitigación se permitiría aumentar considerablemente las emisiones mundiales de combustibles de origen fósil (como en IS92a y en otros escenarios). Pero para estabilizar las concentraciones por debajo de 450 ppmv habría que rebajar las emisiones a los niveles de 1990 para el año 2040, y aún más posteriormente. Ello obligaría a la sociedad a sustituir buena parte del equipo

⁷ El interés por los recursos estriba en que representan las cantidades, tanto conocidas como desconocidas, que quedan por quemar.

acumulado en ese período, y estos costos deberían contabilizarse frente a los beneficios económicos reportados por el aplazamiento.

La celeridad óptima con que se sustituye el capital de equipo refleja cuestiones más generales sobre la inercia de los sistemas de energía. Inversiones diferentes, por ejemplo, tienen implicaciones distintas a lo largo del tiempo. La construcción de una infraestructura nueva, de muy larga duración y con utilización intensiva de carbono podría encarecer la limitación de las emisiones dentro de varios decenios. Desincentivar inversiones tales como edificios ineficientes, u otras infraestructuras urbanas que pudieran fomentar una mayor diversidad de actividades con utilización intensiva de carbono, podría ser útil en este momento para disminuir a largo plazo los costos de estabilización de las concentraciones atmosféricas, incluso para niveles más altos. De todos modos, no se conoce suficientemente el tema de la inercia, ni en qué medida afecta a inversiones de diferentes tipos.

Como se indica en la Figura 5, un límite de 450 ppmv obligaría a iniciar muy tempranamente la reducción de las emisiones mundiales, mientras que unos límites más elevados aplazarían la necesidad de restricciones. Aunque los aumentos de las emisiones en algunos países pueden compensarse durante un cierto tiempo con las disminuciones en otros, el crecimiento de las emisiones deberá terminar por reducirse en todas las regiones para no rebasar el límite.

Progreso técnico

El costo de un recorrido de estabilización variará también según la influencia de la tecnología en el costo de aminoración de las emisiones, tanto para un valor cronológico fijo como a lo largo del tiempo. Por lo general, el costo de un recorrido de emisión aumentará si aumenta el volumen de emisiones que se desee aminorar en un momento dado. En todo caso, los cambios tecnológicos deberían reducir el costo unitario por unidad de reducción a lo largo del tiempo.

Sea cual sea el momento elegido, los costos de aminoración aumentarán con la cantidad de emisiones aminorada en ese momento. La sucesión de tecnologías de aminoración que se describe en el SIE-GTII define, desde cierto punto de vista, una “curva de oferta”. Manifiestamente, lo menos costoso es adoptar primero las medidas menos caras e ir desarrollando la “curva de oferta” mediante la aplicación de medidas más costosas, conforme sea necesario para alcanzar el objetivo.

Los cambios técnicos reducirán previsiblemente los costos de aminoración a lo largo del tiempo. La celeridad de esta reducción puede depender del nivel de estabilización y del recorrido de emisión. Unos niveles de estabilización y recorridos de emisión que impliquen unas reducciones más inmediatas podrían estimular el desarrollo de tecnologías nuevas de bajos niveles de carbono: es decir, un desarrollo de tecnologías “inducido”. Con ello aumentaría la flexibilidad a largo plazo y disminuirían, también a largo plazo, los costos vinculados a una limitación del carbono aunque,

a plazo medio, todo ello tendría un costo. Según este argumento, una limitación temprana de las emisiones (sin esperar a que el desarrollo de la tecnología reduzca los futuros costos de mitigación) induciría al sector privado a emprender las actividades de I+D apropiadas, y en particular a reorientar las inversiones de I+D, abandonando la exploración y el desarrollo de recursos y tecnologías de utilización intensiva de carbono.

El cambio técnico inducido (endógeno) dependerá del estímulo a la innovación mediante señales de precios, que probablemente serán más acusadas en los mercados que se desenvuelven bien. En las fases más tempranas del desarrollo tecnológico es difícil determinar la propiedad de los resultados de investigación; a causa de ello, el sector privado se resiste frecuentemente a invertir en I+D adecuada. No es fácil que las perspectivas de mercados futuros resuelvan este problema completamente. Este fallo del mercado es conocido, y se utiliza con frecuencia para justificar la iniciativa gubernamental en I+D, que puede ser muy importante si fomenta el desarrollo de tecnologías en una fase temprana.

La I+D estatal y las limitaciones de las emisiones no son los únicos instrumentos de que disponen los responsables de políticas para influir en el ritmo de desarrollo, difusión y extensión de la tecnología. También los incentivos fiscales y el apoyo a los mercados “protegidos” (por ejemplo, otorgando primas por energías renovables) podrían alentar al sector privado a invertir en energía sin carbono y fomentar el desarrollo de industrias afines. La difusión y extensión de la tecnología podría resultar afectada por los fallos del mercado, en cuyo caso serían necesarias políticas específicas para superar la situación.

En realidad, es probable que una combinación de todas estas medidas —una inversión mucho mayor del estado en I+D, apoyos explícitos al mercado y unas adecuadas limitaciones de las emisiones— estimule la tecnología en la medida necesaria para reducir los costos de estabilización de la concentración de CO₂ en la atmósfera. En la bibliografía examinada en el SIE-GTIII no se indican claramente ni la combinación de políticas adecuada ni las implicaciones en lo que respecta a los recorridos de emisión.

Cooperación internacional

Las opciones de mitigación menos costosas suelen estar asociadas a nuevas inversiones. Para beneficiarse de estas oportunidades con un máximo aprovechamiento en términos de costos, habría que adoptar medidas de mitigación de bajo costo cada vez que se hagan nuevas inversiones en todo el mundo. El comercio de emisiones, o la implementación conjunta, son mecanismos que permitirían llevar a efecto esta estrategia de una manera que facilite la distribución de los costos de mitigación entre los países fomentando, al mismo tiempo, el aprovechamiento eficaz de los costos. La efectividad de este planteamiento, conocido habitualmente como “flexibilidad en el espacio”, se debe a que los beneficios climáticos derivados de la reducción de las emisiones de CO₂ no dependen del lugar en que se aplique.

Tasa de descuento

En lo que se refiere a los costos de mitigación (que constituye el tema de la presente sección), una tasa de descuento positiva disminuye el valor actual de los costos ya ocasionados. Ello se debe a que grava en menor medida las inversiones que se hagan en el futuro. De hecho, cuanto más alejada en el tiempo se encuentre una carga económica (en este caso, las reducciones de las emisiones), menor será el valor actual de los costos. En un contexto más amplio, la existencia de descuentos permite dar menos trascendencia a los impactos medioambientales futuros en relación con los beneficios de la utilización actual de la energía. Esta posibilidad hace que algunos problemas importantes (por ejemplo, un rápido cambio de una energía a otra en el futuro) parezcan sencillos en términos de dólares actuales, y podría influir en la manera de abordar la equidad intergeneracional.

Balance del carbono

Las emisiones de carbono pueden seguir recorridos diferentes para alcanzar un cierto objetivo de estabilización (como puede verse en las Figuras 5 y 6). Si no se produce ninguna alteración importante de los procesos que rigen el insumo de CO₂ por el océano y la biosfera terrestre, las emisiones acumulativas totales para un recorrido de estabilización dado son, a largo plazo, independientes del recorrido seguido para alcanzar un objetivo de estabilización (véanse la Figura 6 y la Sección 2.2.1.4). No obstante, la asignación de las emisiones a lo largo del tiempo dependerá del recorrido seguido. En los próximos decenios, las emisiones pueden ser notablemente más altas para los recorridos que coinciden inicialmente con IS92a (véanse las Figuras 6 y 7). De este modo, se reduce a corto plazo la necesidad de alternativas sin carbono más costosas y se dejan para el futuro las reducciones más drásticas de las emisiones.

De cualquier forma, los recorridos de emisión que coinciden inicialmente con IS92a conllevan riesgos. Unas emisiones más cuantiosas y más tempranas, sumadas a las mayores concentraciones y el más rápido aumento de la concentración que aquellas conllevan, podrían alterar los procesos físicos y biogeoquímicos que rigen el flujo de carbono. Esto podría significar que las emisiones deberán ser menores de lo esperado si se desea alcanzar determinado objetivo de estabilización. Además, unas emisiones más cuantiosas y más tempranas inducirían cambios más rápidos en el clima, que podrían resultar costosos. Unos recorridos que impliquen inicialmente unas emisiones más cuantiosas podrían pasar más rápidamente de la fase de aumento a la fase de disminución de las emisiones, con lo cual los costos de mitigación tenderían a ser mayores.

3.2.2 Modelización de los costos vinculados a la estabilización de las concentraciones de CO₂

Modelizar los costos de mitigación constituye una tarea impresionante. Resulta difícil prever la evolución del sistema de economía energética durante el próximo decenio. Las proyecciones que abar-

quen un siglo o más deberán ser tratadas con bastante precaución. A pesar de todo, constituyen ejercicios que pueden proporcionar información útil. Pero su valor estriba, más que en los resultados concretos, en los de carácter general, que son de utilidad para la definición de políticas.

3.2.2.1 Estudios disponibles cuando se realizó el SIE-GTIII

Hasta hace poco, las propuestas para hacer frente al cambio climático se centraban más en las emisiones que en las concentraciones: se aspiraba, por ejemplo, a restablecer las emisiones en los niveles de 1990 para el año 2000, o a reducirlas en un 20% antes de 2005. Por ello, eran pocos los análisis que se habían ocupado de la economía de la estabilización cuando se realizó el SIE-GTIII. Estos análisis, que se examinan en los Capítulos 9 y 10 del SIE-GTIII, aparecen descritos más adelante. (Posteriormente, se han realizado otros estudios que no abordaremos en este trabajo, de conformidad con las directrices sobre la preparación de los Documentos Técnicos.)

Varios autores han explorado la relación costo-efectividad de un objetivo de concentración de CO₂ dado. Nordhaus (1979), y Manne y Richels (1995), por ejemplo, han descrito estrategias de mitigación de costo mínimo para toda una serie de objetivos de concentración alternativos. Concluyeron que el recorrido de mitigación de costo mínimo conlleva, inicialmente, un volumen modesto de reducción con relación a las emisiones de referencia. Para objetivos de concentración más elevados, las emisiones pueden coincidir con el valor de referencia durante períodos más prolongados.

Richels y Edmonds (1995), y Kosobud y otros (1994), han examinado recorridos de emisión alternativos hacia la estabilización de las concentraciones atmosféricas. Sus resultados indican que los recorridos que conllevan una reducción modesta en los primeros años, seguida luego de reducciones más acentuadas, son menos costosos (en términos de costos de mitigación) que los que imponen reducciones importantes a corto plazo, habida cuenta de los supuestos establecidos con respecto al cambio técnico, a la renovación del capital de equipo, a la tasa de descuento y a los efectos sobre el balance de carbono. La determinación de las reducciones de las emisiones a lo largo del tiempo se denomina “flexibilidad en el tiempo”.

Unos objetivos de estabilización más elevados permiten una mayor flexibilidad en cuanto a la rapidez con que se divergerá el valor de referencia. Pero, independientemente de la rapidez de alejamiento respecto de dicho valor, un recorrido de estabilización no es una estrategia de “brazos caídos” o de “sentarse a esperar”. En primer lugar, cada trayecto de concentración requiere que el equipamiento futuro haga una utilización menos intensiva del carbono que en un escenario en que no se impongan límites al carbono. Dado el largo período de vida de los equipos de producción y utilización de energía, esta consideración cuenta a la hora de decidir las inversiones actuales. En segundo lugar, las nuevas modalidades de la oferta tardan habitualmente muchos años en

asentarse en el mercado. Para poder disponer en el futuro de productos sustitutivos de bajo costo y bajo contenido de carbono en cantidad suficiente, se necesitaría hoy un compromiso continuado de investigación, desarrollo y demostración. En tercer lugar, hay que suponer la adopción inmediata de todas las medidas “sin pesar” a las que se pueda recurrir para reducir las emisiones, lo que implicaría la actuación de los gobiernos.

3.2.2.2 Limitaciones de los estudios existentes

Hay dos aspectos de estos estudios que suscitan considerable debate: el objetivo, y la utilización de modelos muy simplificados del sistema de economía energética. Con respecto al primero, los autores señalan que se han centrado en los costos de mitigación, y especialmente en el recorrido de costo mínimo que conduzca a un objetivo de estabilización determinado. Insisten en que es también importante examinar las consecuencias medioambientales que se derivarían de elegir uno u otro trayecto de emisión. Trayectos de emisión diferentes implican no sólo costos de mitigación diferentes, sino también diversos beneficios en términos de impactos medioambientales evitados, y la introducción de un tema medioambiental nuevo, como podría llegar a suceder si el combustible de biomasa adquiriera mayor importancia.

Los análisis se ven también limitados por la manera en que abordan la incertidumbre. La incertidumbre en cuanto al objetivo último persistirá previsiblemente durante un cierto tiempo. En tales circunstancias, los responsables de políticas tienen que definir una estrategia de corto plazo prudente y dotada de mecanismos de protección, que equilibre los riesgos de una actuación demasiado lenta frente a los costos de una actuación demasiado impetuosa. Aunque en varios de los estudios citados en el SIE-GTIII se intenta evaluar hasta qué punto es consistente la decisión de controlar a corto plazo el objetivo de concentración de largo plazo, no se entra a analizar explícitamente los efectos de la incertidumbre.

Algunas voces críticas refutan también las metodologías en que se basan estos estudios. Lo que se cuestiona es hasta qué punto los modelos, que necesariamente han de simplificar el sistema de economía energética, dan cuenta de toda la complejidad que implican el capital de equipo, sus vínculos internos y otras fuentes de inercia del sistema. Así, por ejemplo, los modelos existentes no simulan los vínculos entre inversiones. Algunas inversiones actuales, como las redes viarias, tienen una larga duración y crean todo un entramado de inversiones interconectadas (por ejemplo, la distribución espacial de las instalaciones industriales y de las viviendas) que podrían afectar al costo de limitación de las emisiones durante períodos comprendidos entre años y siglos.

Estos modelos simplifican también el proceso de cambio tecnológico. Están basados, entre otros, en el supuesto de que la rapidez del cambio tecnológico es independiente de la rapidez del control de las emisiones a corto plazo. Como ya se ha indicado, si la limitación de las emisiones da lugar a innovaciones tecnológicas, la rapidez de control óptima a corto plazo puede ser mayor. El concepto de cambio tecnológico endógeno es importante, y

merece más atención de la que ha recibido. Hay que señalar, sin embargo, que la magnitud de sus efectos no está nada clara.

3.2.3 Otras consideraciones clave

La elección del objetivo de concentración y de la ruta a seguir hacia la estabilización constituyen una decisión muy compleja. Subsiste un nivel de incertidumbre considerable con respecto a la proporción del balance de carbono que conduce a la estabilización. Como se indica en la Sección 2.2.1.3, la generación de modelos empleada en el SIE-GTI simplificaba las representaciones del insumo biosférico más el oceánico, e ignoraba la posibilidad de que el cambio climático influya en la tasa de insumo terrestre y marino. Dado que los costos de mitigación dependen de la diferencia existente entre las emisiones compatibles con un objetivo de estabilización dado y un cierto nivel de referencia, el hecho de ignorar los efectos de retroacción ecológicos o marinos podría aumentar o disminuir las emisiones y los costos de mitigación asociados a un nivel de estabilización. Dadas las incertidumbres científicas existentes en los modelos del carbono, la incertidumbre imputable a los procesos de retroacción del sistema oceánico y terreno podría ascender a ± 100 GtC o más.

En la práctica, al no conocer el nivel de estabilización apropiado, resulta más complejo decidir la estrategia adecuada. Unas políticas de I+D más energéticas, que serían relativamente baratas en comparación con los costos que podría conllevar una reducción rápida de las emisiones, parecerían ser una buena inversión para una gran diversidad de resultados. Además, una mitigación temprana, particularmente en el momento de la nueva inversión, atenuaría la exposición de la economía a los costos, posiblemente muy elevados, que entrañaría el descubrir que hay que alcanzar un objetivo de estabilización más bajo que el inicialmente esperado. Una aplicación más exhaustiva de medidas “sin pesar” y de bajo costo ayudaría no sólo a reducir los impactos, sino también a preparar las economías para la estabilización.

3.3 Integración de la información sobre los impactos y sobre los costos de mitigación

3.3.1 Introducción

Equilibrar los costos, impactos y riesgos asociados a la estabilización para diferentes niveles y mediante recorridos diferentes es una tarea extremadamente compleja que, en última instancia, obligará a hacer valoraciones políticas de los niveles de riesgo aceptables, de los distintos tipos de riesgos y de la importancia que se dará a diferentes tipos de impactos (causados tanto por la mitigación como por el cambio climático) que recaerían sobre poblaciones distintas, en países distintos y en épocas diferentes.

Como ya se ha señalado, para definir una política sensata sobre los gases de efecto invernadero los decisores deben tener en cuenta, además de los costos y otras implicaciones que se derivarían de las medidas de política sobre el cambio climático, lo que se podría

obtener de dichas políticas en el sentido de reducir las consecuencias indeseables de un cambio climático mundial. En la Sección 3.1 hemos abordado el tema de los impactos, así como la manera de reducir éstos adoptando un objetivo de estabilización más bajo. En la Sección 3.2 hemos examinado los costos de mitigación que conllevaría el limitar las emisiones antropógenas de CO₂ para alcanzar unas concentraciones atmosféricas estables. En esta sección analizaremos posibles ideas que podría suscitar la integración de esta y otras informaciones de interés contenidas en el presente trabajo.

3.3.2 Necesidad de coherencia y de una perspectiva amplia

Es importante que las ideas expuestas, particularmente, en las Secciones 3.1 y 3.2 se apliquen de manera coherente tanto a los costos de mitigación como a los impactos climatológicos. Algunos ejemplos importantes son:

Inercia. El concepto de inercia, aplicado al sistema climático, significa que las emisiones actuales pueden generar impactos durante muchos años —o, en el caso del aumento del nivel del mar, posiblemente siglos—. Los gases de efecto invernadero tienen un período de vida en la atmósfera largo, y ni siquiera unos cambios drásticos en las emisiones afectarían a las emisiones más que lentamente. Desde el punto de vista del capital de equipo que emite gases de efecto invernadero, la inercia haría además muy costoso reducir las emisiones con gran rapidez. Estos dos tipos de inercia ponen de relieve la necesidad de pensar, analizar y actuar con anticipación, en términos de trayectorias hacia objetivos a largo plazo, para reducir al mínimo las conmociones que pueda experimentar el sistema.

El *desarrollo tecnológico* y otras formas de innovación y adaptación tienen implicaciones tanto en los costos de mitigación como en los impactos. La I+D orientada a la mitigación y a la adaptación puede producir beneficios muy importantes. Retrasando la mitigación se dispondría tal vez de más tiempo para desarrollar tecnologías de mitigación menos costosas, pero el tiempo para adaptarse a los impactos correspondientes sería menor.

Las *preferencias de tiempo* son otro de los factores importantes. El retardo entre las emisiones y los impactos consiguientes significa que una tasa de descuento positiva tiende a reducir la importancia actual de los impactos con relación a los costos de aminoración y favorece, por consiguiente, un nivel de mitigación menor en términos globales.

Sorpresas del clima. El cambio climático podría revelar aspectos sorprendentes, y los sistemas físicos, biológicos o socioeconómicos podrían tener también umbrales que se rebasaran; de no adoptar medidas prontamente, este tipo de situaciones será más difícil de resolver.

Impactos externos no relacionados con el clima. Tenemos que tener también en cuenta la sinergia entre las estrategias de mitigación de gases de efecto invernadero y la mitigación de otros

aspectos medioambientales externos, como la contaminación local del aire, la congestión urbana, o la degradación de la tierra y de los recursos naturales. Se ampliaría con ello el número de opciones de mitigación que cabría considerar como medidas “sin pesar” o como medidas que conlleven unos costos netos bajos.

Otros gases y fuentes de efecto invernadero. Un análisis integrado deberá dar cuenta también de otros gases de efecto invernadero distintos del CO₂ proveniente de combustibles de origen fósil:

- a) la deforestación podría ser responsable de hasta un 20% de las emisiones actuales de combustibles de origen fósil (aunque se espera que su aportación relativa vaya en disminución), y la reforestación podría ayudar considerablemente a absorber CO₂;
- b) un análisis indica que el metano, en particular, podría ser un gas de efecto invernadero importante, en relación con el cual se podría disponer de opciones de mitigación baratas; y
- c) hay que tener también presentes el óxido nitroso y los halocarbonos, particularmente teniendo en cuenta el largo período de vida de estos gases.

Dada la gran complejidad de estos temas —particularmente en lo que se refiere a los impactos, y en las numerosas incertidumbres sobre las maneras de cuantificar éstos—, la economía no puede, por sí sola, dar respuestas únicas sobre el equilibrio correcto en los recorridos de emisión. Por esas y otras razones, tampoco es posible llegar a unas conclusiones claramente cuantificadas sobre los niveles de estabilización “óptimos”.

3.3.3 Análisis de cartera

Existen numerosas medidas de política destinadas a reducir los riesgos de las generaciones futuras frente al cambio climático. Entre ellas se cuentan las siguientes: a) reducciones de las emisiones para frenar el cambio climático; b) investigación y desarrollo sobre nuevas tecnologías de suministro y de conservación que disminuyan los costos de aminoración futuros; c) investigación continuada para reducir incertidumbres científicas esenciales; d) inversión en actuaciones que ayuden a los sistemas humano y natural a adaptarse al cambio climático. No se trata de optar entre una posibilidad u otra, sino de hallar la combinación (cartera) adecuada de opciones. En algún momento, los responsables de políticas deberán decidir: el volumen de esfuerzo y de apoyo financiero que se destinará a la mitigación; qué parte de éstos se destinará a I+D pública e incentivos de mercado para fomentar el desarrollo tecnológico; qué parte se destinará a reducir incertidumbres en relación con el clima; y qué parte a ayudar a las sociedades a adaptarse al cambio climático. Estas y otras opciones reseñadas en el SIE-GTIII se resumen en el cuadro que figura más adelante.

Para poder elegir una cartera óptima, es esencial entender la manera en que interactúan las distintas opciones. Es especialmente importante la relación entre las inversiones en I+D y los costos de

CARTERA DE ACTUACIONES

“... que los responsables de políticas podrían considerar... a fin de aplicar medidas de bajo costo y/o efectivas en términos de costos”

(Fuente: SIE-GTIII: Resumen para responsables de políticas.)

- aplicar medidas de eficiencia energética y, en particular, eliminar obstáculos institucionales a las mejoras de la eficiencia energética;
- eliminar gradualmente políticas y prácticas actuales distorsionantes que aumenten las emisiones de gases de efecto invernadero, por ejemplo algunas subvenciones y reglamentaciones, la no internalización de los costos medioambientales, y las distorsiones en la determinación de los precios de los transportes;
- aplicar medidas eficaces en términos de costos para utilizar menos, y no más, combustibles de aprovechamiento intensivo de carbono y para pasar a utilizar combustibles sin carbono, por ejemplo de tipo renovable;
- aplicar medidas que potencien los sumideros o los depósitos de gases de efecto invernadero; por ejemplo, mejorando la gestión forestal o las prácticas de utilización de los suelos;
- aplicar medidas y desarrollar nuevas técnicas que reduzcan las emisiones de metano, óxido nitroso y otros gases de efecto invernadero;
- fomentar la cooperación internacional para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero, por ejemplo creando gravámenes coordinados sobre el carbono/la energía, realizando actividades conjuntamente, o fijando contingentes negociables;
- fomentar el desarrollo y aplicación de normas nacionales e internacionales de eficiencia energética;
- planificar y aplicar medidas de adaptación a las consecuencias del cambio climático;
- emprender investigaciones que permitan comprender mejor las causas e impactos del cambio climático y facilitar una adaptación más efectiva a dicho cambio;
- realizar investigaciones tecnológicas para reducir al mínimo las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de un uso continuado de combustibles de origen fósil, y desarrollar fuentes de energía comerciales no de origen fósil;
- desarrollar mecanismos institucionales mejorados (por ejemplo, mejorando los seguros) para compartir los riesgos de los daños causados por el cambio climático;
- fomentar actuaciones voluntarias que reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero;
- fomentar la educación y la formación, aplicar medidas de información y asesoramiento orientadas a conseguir un desarrollo sostenible y unas pautas de consumo que faciliten la mitigación y adaptación al cambio climático.

mitigación. En términos generales, las inversiones en I+D reducen los costos de mitigación futuros. Un ejemplo expuesto en el SIE-GTIII sugiere que desarrollando a fondo alternativas a los combustibles de origen fósil económicamente competitivas los costos de mitigación podrían reducirse, para una reducción del 20% en las emisiones de CO₂ (por debajo de los niveles de 1990), en aproximadamente dos tercios. Este ahorro podría liberar recursos necesarios para hacer frente a la amenaza de un cambio climático, o para atender a otras necesidades sociales. Recíprocamente, en todos los escenarios de IS92 se confía en un progreso técnico, tanto en la vertiente de la oferta como de la demanda del sistema energético. Estos avances no se producirán a menos que se mantengan unos programas de I+D en diversos frentes, tanto en el sector público como en el privado.

Al reducir la incertidumbre científica, los costos también disminuyen. En el momento actual no se tiene todavía claro qué se

entiende por “interferencia peligrosa” en el sistema climático. Puesto que equivocarse —tanto para bien como para mal— resultaría muy costoso, el valor de la información sobre el cambio climático será probablemente grande. La bibliografía indica que es extremadamente valiosa la información sobre la sensibilidad del clima a los gases y aerosoles de efecto invernadero, sobre las funciones de impacto del cambio climático, y sobre variables tales como los determinantes del crecimiento económico y la rapidez de las mejoras en la eficacia de aprovechamiento de la energía.

La adopción de una cartera de medidas es también aplicable a las distintas categorías. Así, por ejemplo, los costos de mitigación son menos caros para unas fuentes de gases de efecto invernadero que para otras. En el SIE-GTIII se sugiere que podrían haber muchas opciones relativamente baratas para controlar las fuentes industriales de metano y compuestos halogenados, aunque con mayor dificultad para las fuentes agrícolas de metano y NO₂. Si se recurre

primero a las opciones menos caras para reducir las emisiones, los costos totales de mitigación son menores. Por otra parte, las posibilidades de reducir las emisiones de CO₂ frenando la deforestación y absorbiendo CO₂ por reforestación brindan también oportunidades para rebajar los costos de reducción de las concentraciones de CO₂.

La cartera adecuada de medidas de política varía de un país a otro. Los países seleccionarán una cartera que refleje sus propios objetivos y limitaciones. Cada país estará interesado en los impactos de la cartera elegida sobre diferentes grupos económicos, en la competitividad internacional, en equidad internacional y en la equidad intergeneracional. En cualquier caso, es necesaria una coordinación entre los países. Varios investigadores han comparado los costos que conlleva actuar unilateralmente frente a los que conlleva cooperar internacionalmente, y han encontrado que esta última modalidad ofrece grandes beneficios económicos.

3.3.4 Toma secuencial de decisiones

Con demasiada frecuencia, el tema del clima se aborda en términos de “actuar ya” o de “sentarse a esperar”. Esta formulación es incorrecta y puede inducir a error, ya que oscurece las posibilidades de elección que hay que evaluar y su interacción a lo largo del tiempo. Tanto el cambio climático como la adquisición de nuevos conocimientos son procesos continuos y, por ello, es necesario ajustar continuamente las actuaciones en relación con el cambio climático, a tenor de la nueva información obtenida.

En la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) se reconoce la naturaleza dinámica del proceso de toma de deci-

siones. Sus autores concibieron la política climática como un proceso continuado, y no como algo que se lleva a cabo “de una vez por todas”. La CMCC pide que se efectúen reexámenes periódicos a la vista de la mejor información científica disponible sobre el cambio climático y sus impactos, y de la información técnica social y económica pertinente. En base a esos reexámenes habrá que emprender las acciones apropiadas, y en particular la modificación de los compromisos existentes.

Este proceso de toma de decisiones secuencial tiene por objeto definir estrategias a corto plazo a la vista de la incertidumbre a largo plazo. En los próximos decenios habrá numerosas oportunidades de aprender y de corregir sobre la marcha. La cuestión no es “cuál es el proceder más adecuado para los próximos 100 años”, sino “cuál es el proceder más adecuado para los próximos años, dado un objetivo a largo plazo”. De lo que se trata es, pues, de seleccionar una cartera acertada de actuaciones en relación con el cambio climático, y de ajustarla con el paso del tiempo a la vista de la mejor información de que se dispondrá.

Para hacer efectiva una cartera de medidas ante el cambio climático, los gobiernos deberán tomar decisiones tanto sobre la magnitud de los recursos que destinarán a este fin como de la combinación de medidas que consideran más efectivas. En el primer caso, se trata de ir más allá de las opciones estrictamente “sin pesar”. Como se señala en el SIE-GTIII, el riesgo de un daño neto total como consecuencia del cambio climático, la atención a la evitación de riesgos y la aplicación del principio de precaución justifican una actuación más allá de los niveles “sin pesar”. La decisión sobre hasta dónde llegar en la práctica dependerá de lo que esté en juego, de los imponderables y de los costos de las medidas de política. La prima de riesgo —la cantidad que una sociedad está dispuesta a pagar para reducir el riesgo— es, en última instancia, una decisión política que diferirá de un país a otro.

REFERENCIAS

- Dai, A. y I. Y. Fung, 1993: Can climate variability contribute to the “missing” CO₂ sink? *Global Biogeochemical Cycles*, 7, 599-609.
- de Wolde, J. R., R. Bintanja y J. Oerlemans, 1995: On thermal expansion over the last 100 years. *Journal of Climate*, 8, 2881-2891.
- Enting, I. G., T. M. L. Wigley y M. Heimann, 1994: Future emissions and concentrations of carbon dioxide: Key ocean/atmosphere/land analyses. CSIRO Division of Atmospheric Research Technical Paper No. 31.
- IIASA/WEC (International Institute for Applied Systems Analysis/World Energy Council), 1995: *Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond*, World Energy Council, London.
- IPCC, 1990: *Climate Change: The IPCC Scientific Assessment*, J. T. Houghton, G. J. Jenkins y J. J. Ephraums (eds). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido.
- IPCC, 1995: *Climate Change 1994 Radiative Forcing of Climate Change and an Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*. J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, J. Bruce, H. Lee, B. A. Callander, E. Haites, N. Harris y K. Maskell (eds). Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido. págs. 339.
- IPCC WGI, 1996: *Climate Change 1995 — the Science of Climate Change. Contribution of WGI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J. T. Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg y K. Maskell (eds). Cambridge University Press, Reino Unido. págs. 572.
- IPCC WGII, 1996: *Climate Change 1995 — Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of WGII to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. R. T. Watson, M. C. Zinyowera y R. H. Moss (eds). Cambridge University Press, Reino Unido. págs. 878.
- IPCC WGIII, 1996: *Climate Change 1995 — Economic and Social Dimensions of Climate Change. Contribution of WGIII to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. J. Bruce, H. Lee y E. Haites (eds). Cambridge University Press, Reino Unido. págs. 448.
- IPCC TP P&M, 1997: *Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático*. R. Acosta Moreno, R. Baron, P. Bohn, W. Chandler, V. Cole, O. Davidson, G. Dutt, E. Haites, H. Ishitani, D. Krugar, M. Levine, L. Zhong, L. Michaelis, W. Moomaw, J.R. Moreira, A. Mosier, R. Moss, N. Nakicenovic, L. Price, N. H. Ravindranath, H. H. Rogner, J. Sathaye, P. Shukla, L. Van Wie McGrory, T. Williams. Documento técnico I del IPCC, Ginebra, Suiza.
- IPCC TP SCM, 1997: *Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC*. L. D. Harvey, J. Gregory, M. Hoffert, A. Jain, M. Lal, R. Leemans, S. Raper, T. Wigley y J. de Wolde. Documento Técnico II del IPCC, Ginebra, Suiza.
- Keeling, C. D., T. P. Whorf, M. Wahlen y J. van der Plicht, 1995: Interannual extremes in the rate of rise of atmospheric carbon dioxide since 1980. *Nature*, 375, 666-670.
- Kosobud, R., T. Daly, D. South y K. Quinn, 1994: Tradable cumulative CO₂ permits and global warming control. *The Energy Journal*, 15, 213-232.
- Manabe, S. y R. J. Stouffer, 1994: Multiple century response of a coupled ocean-atmosphere model to an increase of atmospheric carbon dioxide. *Journal of Climate*, 7, 5-23.
- Manne, A. y R. Richels, 1995: *The Greenhouse Debate—Economic Efficiency, Burden Sharing and Hedging Strategies*. Working Paper, Stanford University.
- Mitchell, J. F. B., T. C. Johns, J. M. Gregory y S. F. B. Tett, 1995: Transient climate response to increasing sulphate aerosols and greenhouse gases. *Nature*, 376, 501-504.
- Naciones Unidas, 1992: *La Convención sobre el Cambio Climático de la Cumbre para la Tierra*, 3-14 de junio de 1992. United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, Brasil, 21.
- Nordhaus, W. D., 1979: *The Efficient Use of Energy Resources*. Yale University Press, New Haven, CT.
- Penner, J. E., R. J. Charlson, J. M. Hales, N. S. Laulainen, R. Leifer, T. Novakov, J. Ogren, L. F. Radke, S. E. Schwartz y L. Travis, 1994: Quantifying and minimizing uncertainty of climate forcing by anthropogenic aerosols. *Bull. Am. Met. Soc.*, 75, 375-400.
- Raper, S.C.B., T.M.L. Wigley y R.A. Warrick, 1996: Global sea level rise: past and future. In: *Sea level Rise and Coastal Subsidence: Causes, Consequences and Strategies*, J. D. Milliman y B. U. Haq (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Países Bajos, págs. 11-45.
- Richels, R. y J. Edmonds, 1995: The economics of stabilizing atmospheric CO₂ concentrations. *Energy Policy*, 23, 373-379.
- Schimel, D. S., B. H. Braswell Jr., E. A. Holland, R. McKeown, D. S. Ojima, T. H. Painter, W. J. Parton y A. R. Townsend, 1994: Climatic, edaphic, and biotic controls over carbon and turnover of carbon in soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 8, 279-293.

- Smith, T. M. y H. H. Shugart, 1993: The transient response of terrestrial carbon storage to a perturbed climate. *Nature*, 361, 523-526.
- Townsend, A. R., P. M. Vitousek and E. A. Holland, 1992: Tropical soils could dominate the short-term carbon cycle feedbacks to increased global temperatures. *Climatic Change*, 22, 293-303.
- VEMAP Participants, 1995: Vegetation/Ecosystem modelling and analysis project (VEMAP): Comparing biogeography and biogeochemistry models in a continental-scale study of terrestrial ecosystem responses to climate change and CO₂ doubling. *Global Biogeochemical Cycles*, 9, 407-438.
- Wigley, T.M.L. and S.C.B. Raper, 1992: Implications for climate and sea level of revized IPCC emissions scenarios. *Nature*, 357, 293-300.
- Wigley, T. M. L., R. Richels and J. A. Edmonds, 1996: Economic and environmental choices in the stabilization of atmospheric CO₂ concentrations. *Nature*, 379, 242-245.
-

Apéndice 1

Consecuencias de la estabilización de las concentraciones de CO₂ entre 1990 y 2300, desde el punto de vista de la temperatura y del nivel del mar

La Sección 2.3 trata de las implicaciones de la estabilización de los gases de efecto invernadero en cuanto a la temperatura y al nivel del mar, centrándose en el período 1900 a 2100. Para brindar una perspectiva de largo plazo, los resultados sobre la

temperatura y el nivel del mar expuestos en las Figuras 11 a 15 (y analizadas en la Sección 2.3) son presentadas en este Apéndice realizando una extensión hasta el año 2300 (Figuras A1 a A5).

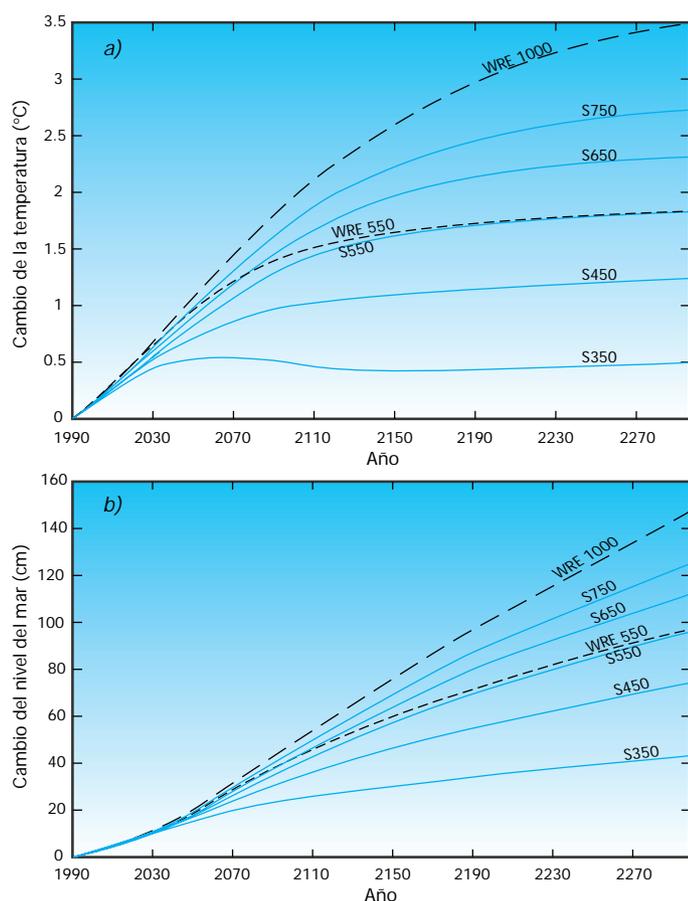


Figura A1. a) proyección de la temperatura media mundial cuando la concentración de CO₂ se estabiliza tras evolucionar con arreglo a los perfiles S y a los perfiles WRE550 y 1000 de la Figura 4. Se ha supuesto que las emisiones de CH₄, N₂O y SO₂ permanecen constantes en sus niveles de 1990 y que los halocarbonos obedecen a un escenario de emisiones compatible con el cumplimiento del Protocolo de Montreal (es decir, el caso de referencia) hasta 2100, y se mantienen constantes posteriormente. b) Igual que en a), pero empleando como parámetros el cambio mundial del nivel del mar y la banda central de valores de fusión de hielo. Todos los resultados se obtuvieron mediante el modelo simple de clima/nivel del mar de Wigley (véase IPCC TP SCM (1997)). Véanse en la Figura 11 los resultados de 1990 a 2100.

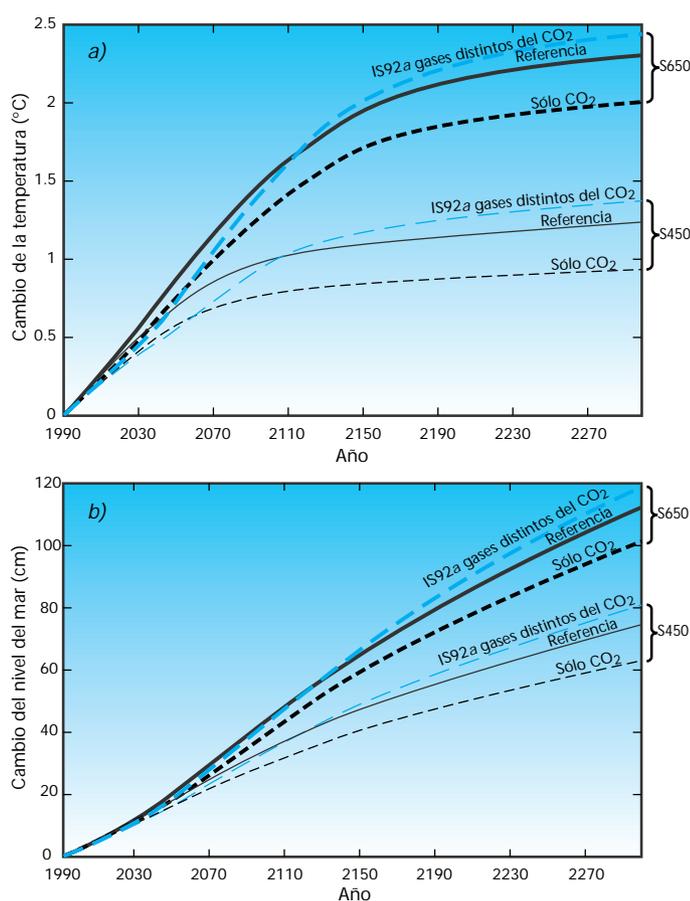


Figura A2. a) Efecto de diferentes perfiles de emisiones de gases distintos del CO₂ sobre el cambio de temperatura mundial para los perfiles de concentración S450 y S650 (véase la Figura 2). Las líneas continuas indican los resultados de referencia; las líneas de trazo corto representan los resultados para CO₂ únicamente, y las de trazo largo indican los resultados en que las emisiones de CH₄, N₂O y SO₂ aumentan como IS92a hasta 2100 para a continuación estabilizarse (el denominado caso IS92a). Se ha supuesto para la sensibilidad del clima el valor intermedio 2.5°C. b) Igual que en a), pero relativo al cambio del nivel del mar mundial. Se ha supuesto que los parámetros de fusión de hielo adoptarán valores centrales. Véanse en la Figura 12 los resultados entre 1990 y 2100.

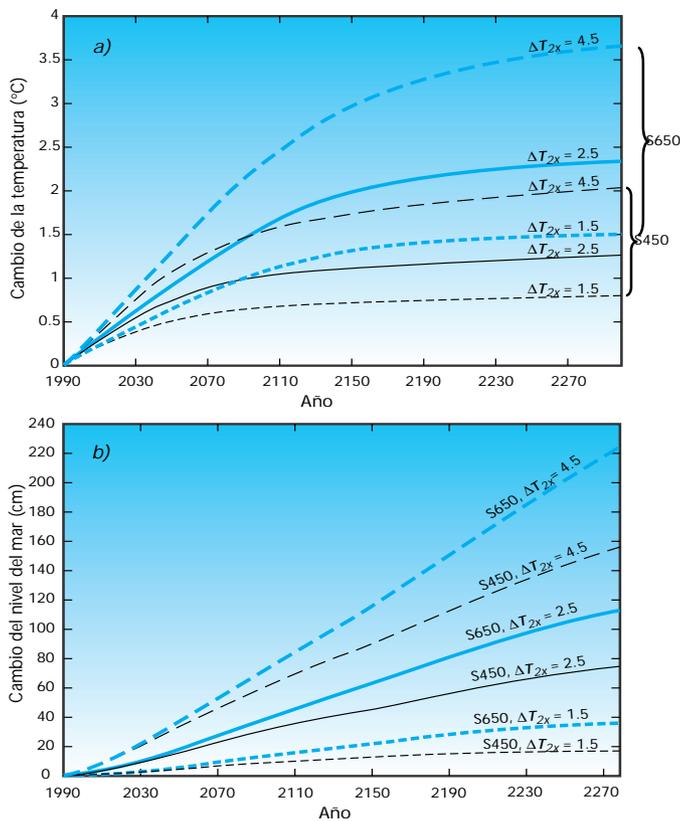


Figura A3. a) Efecto de las incertidumbres en cuanto a la sensibilidad del clima sobre la media mundial de temperatura para los perfiles de concentración de CO₂, S450 y S650, y en el caso de referencia para gases distintos del CO₂. La gama de sensibilidades del clima (ΔT_{2x}) va de 1.5 a 4.5°C, con un valor intermedio de 2.5°C.
 b) Igual que en a), pero relativo al cambio del nivel del mar mundial. Se ha supuesto que los parámetros de fusión de hielo adoptarán valores centrales. Los valores bajos, medios y altos de la sensibilidad climática están combinados con unos parámetros de fusión de hielo bajos, medios y altos, respectivamente. Véanse en la Figura 13 los resultados entre 1990 y 2100.

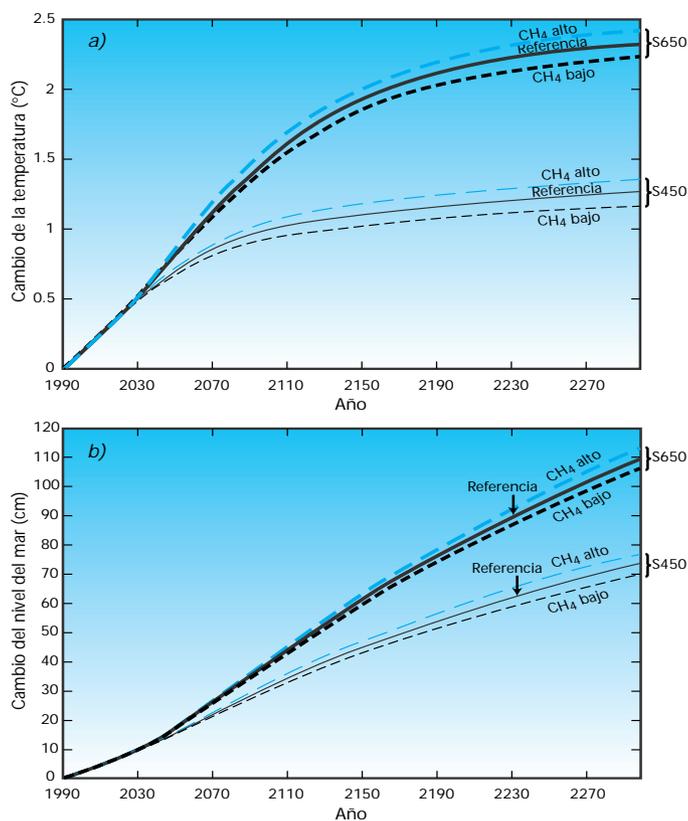


Figura A4. a) Sensibilidad del cambio de temperatura media mundial a las emisiones de CH₄, para los perfiles de concentración S450 y S650 (véase la Figura 4). Las líneas de trazo continuo indican los resultados de referencia; las curvas CH₄ bajo/CH₄ alto presuponen un aumento/disminución lineal de las emisiones anuales de CH₄ en 100 Tg(CH₄) entre 1990 y 2100, para a continuación permanecer constantes (véase el Cuadro 4).
 b) Igual que en a), pero relativo al cambio del nivel del mar mundial. Se ha supuesto que los parámetros de fusión de hielo adoptarán valores centrales. Véanse en la Figura 14 los resultados entre 1990 y 2100.

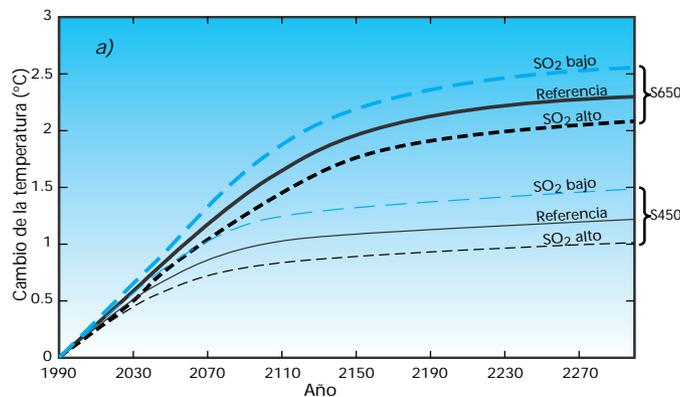


Figura A5. a) Sensibilidad del cambio de temperatura media mundial a las emisiones de SO₂ para los perfiles de concentración S450 y S650 (véase la Figura 4). Al igual que en la Figura 10a, las líneas de trazo continuo señalan los casos de referencia; las líneas de trazos cortos representan los casos SO₂ alto, en que las emisiones aumentan linealmente desde 75 TgS/año en 1990 hasta 112.5 TgS/año en 2100, mientras que las líneas de trazos largos señalan los casos SO₂ bajo, en que las emisiones disminuyen linealmente hasta las 37.5 TgS/año en 2100 y luego se mantienen constantes.
 b) Igual que en a), pero relativo al cambio del nivel del mar mundial. Se ha supuesto que los parámetros de fusión de hielo adoptarán valores centrales. Véanse en la Figura 15 los resultados entre 1990 y 2100.

Apéndice 2

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Aerosol

Conjunto de partículas en suspensión en el aire. Se ha asociado este término incorrectamente al propelente utilizado en los “vaporizadores de aerosol”.

Aerosol(es) carbonáceo(s)

Aerosol(es) que contienen carbono. (Véase también "aerosol")

Ajuste de flujo

Para evitar que un modelo de circulación general atmósfera/océano acoplado derive hacia un estado del clima irreal (por ejemplo, con temperaturas excesivamente cálidas en la parte tropical del Océano Pacífico), una solución consistiría en aplicar ciertos términos de ajuste a los flujos de calor y precipitación (y, a veces, a las coerciones superficiales resultantes del efecto del viento sobre la superficie del océano) antes de imponerlos al océano del modelo. Este proceso se conoce como “ajuste de flujo”.

Amortiguación radiativa

Un forzamiento radiativo positivo impuesto al sistema Tierra-atmósfera (por ejemplo, mediante la adición de gases de efecto invernadero) representa un excedente de energía. Cuando esto ocurre, la temperatura de la superficie y de la atmósfera inferior aumenta e incrementa, a su vez, la cantidad de radiación infrarroja que se emite al espacio, con lo que se establece un nuevo balance de energía. El aumento de las emisiones de radiación infrarroja al espacio para un aumento de temperatura dado se denomina amortiguación radiativa. (Véase también "forzamiento radiativo")

Análisis de cartera

Combinación de actuaciones de que disponen los responsables de políticas para reducir las emisiones o adaptarse al cambio climático.

Bioma

Comunidad de flora y fauna presente espontáneamente en la naturaleza (o bien, región ocupada por esa comunidad), adaptada a las condiciones específicas en que se desenvuelve (por ejemplo, una tundra).

Biomasa

Peso o volumen total de organismos presentes en un área o volumen dados.

Biosfera marina

Término colectivo con que se designa al conjunto de organismos marinos vivos.

Biosfera terrestre

Término que designa colectivamente a todos los organismos en tierra.

Cambio climático (según el IPCC)

El cambio del clima, tal como se entiende en relación con las observaciones efectuadas, se debe a cambios internos del sistema climático o de la interacción entre sus componentes, o a cambios del forzamiento externo debidos a causas naturales o a actividades humanas. En general, no es posible determinar claramente en qué medida influye cada una de esas causas. En las proyecciones de cambio climático del IPCC se suele tener en cuenta únicamente la influencia ejercida sobre el clima por los aumentos antropógenos de los gases de efecto invernadero y por otros factores relacionados con los seres humanos.

Cambio climático (según la CMCC)

Cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial, y que viene a añadirse a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables.

Capital de equipo

Acumulación de máquinas y estructuras de que dispone una economía en un momento cualquiera para producir bienes o prestar servicios. Por lo general, estas actividades requieren una cantidad de energía determinada, en gran medida, por el grado de utilización de la máquina o estructura.

Ciclo de carbono

Término utilizado para describir el intercambio de carbono (en formas diversas; por ejemplo, como dióxido de carbono) entre la atmósfera, el océano, la biosfera terrestre y los depósitos geológicos.

Circulación termohalina

Circulación de los océanos en gran escala determinada por la densidad, y causada por diferencias de temperatura y de salinidad.

Clima

Se suele definir el clima como el "promedio del estado del tiempo" o, más rigurosamente, como una descripción estadística del tiempo en términos de valores medios y de variabilidad de las cantidades de interés durante períodos de varios decenios (normalmente, tres decenios, según la definición de la OMM). Dichas cantidades son casi siempre variables de superficie (por ejemplo, temperatura, precipitación o viento), aunque en un sentido más amplio el "clima" es una descripción del estado del sistema climático.

CO₂ equivalente

Concentración de CO₂ que daría lugar al mismo nivel de forzamiento radiativo que la mezcla dada de CO₂ y otros gases de efecto invernadero.

Compuestos orgánicos volátiles (COV)

Cualquiera de los compuestos orgánicos liberados a la atmósfera por las plantas o por vaporización de productos del petróleo, que son químicamente reactivos y que participan en la química de la producción del ozono troposférico. Aunque el metano está incluido, estrictamente hablando, en la definición de COV, se suele considerar como un compuesto aparte.

Costo marginal

Costo de una unidad adicional de esfuerzo. En términos de reducción de las emisiones, representa el costo de reducir éstas en más de una unidad.

Criosfera

Conjunto de nieve, hielo y permafrost de todo el planeta.

Daños de mercado

Valor de los daños ocasionados por el cambio climático (o por algún otro cambio medioambiental), calculado tomando como base información disponible y utilizable por un mercado competitivo.

Daños no de mercado

Daños ocasionados por el cambio climático (o por algún otro cambio medioambiental), cuyo valor no puede determinar un mercado competitivo por falta de información y/o por la imposibilidad de actuar en base a esa información.

Deposición húmeda/seca

Detracción de una sustancia de la atmósfera, bien por lavado junto con la precipitación (deposición húmeda), bien por deposición directa sobre una superficie (deposición seca).

Desarrollo sostenible

Desarrollo que cubre las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras para atender a sus propias necesidades.

Escalas espaciales

continental: 10 - 100 millones de kilómetros cuadrados (km²)
regional: 100 millares - 10 millones de km².
local: menos de 100 millares de km².

Escenario LESS (GTII)

Escenarios desarrollados para el SIE (GTII) con el fin de evaluar los sistemas de suministro de bajas emisiones de CO₂ en todo el mundo. Se hace referencia a ellos como sistemas LESS, o sistemas de suministro de bajas emisiones (*Low-Emissions Supply Systems*).

Estratosfera

Región muy estratificada y estable de la atmósfera situada por encima de la troposfera y que se extiende entre los 10 y los 15 km, aproximadamente (Véase también "troposfera").

Evaluación integrada

Método de análisis que integra en un marco coherente los resultados y modelos de las ciencias físicas, biológicas, económicas y sociales, y las interacciones entre estos componentes, a fin de proyectar las consecuencias del cambio climático y las respuestas de política a dicho cambio.

Fertilización por CO₂

Intensificación del crecimiento de las plantas por efecto de una mayor concentración de CO₂ en la atmósfera.

Fertilización por nitrógeno

Mejora del crecimiento vegetal por deposición de compuestos de nitrógeno. En los informes del IPCC, este concepto se refiere generalmente a la fertilización causada por fuentes de nitrógeno antropógenas; por ejemplo, los fertilizantes artificiales y los óxidos de nitrógeno liberados por el quemado de combustibles de origen fósil.

Flexibilidad "en el tiempo" y "en el espacio"

Posibilidad de elegir el momento o el lugar de una opción de mitigación o de un plan de adaptación, a fin de reducir los costos vinculados al cambio climático.

Forzamiento radiativo

Mide en términos simples la importancia de un posible mecanismo de cambio climático. El forzamiento radiativo es una perturbación del balance de energía del sistema Tierra-atmósfera (en W m⁻²) que se produce, por ejemplo, a raíz de un cambio en la concentración de dióxido de carbono o en la energía emitida por el Sol; el sistema climático responde al forzamiento radiativo de manera que se restablezca el balance de energía. Un forzamiento radiativo tiende, si es positivo, a calentar la superficie y, si es negativo, a enfriarla. El forzamiento radiativo suele expresarse como un valor medio mundial y anual. Una definición más precisa del forzamiento radiativo, tal como se emplea en los informes del IPCC, es la perturbación del balance de energía del sistema superficie-troposfera, dejando un margen para que la estratosfera se reajuste a un estado de equilibrio radiativo medio mundial (véase el Capítulo 4 de IPCC (1994)). Se denomina también "forzamiento del clima".

Fotosíntesis

Proceso metabólico en virtud del cual las plantas toman CO₂ del aire (o del agua) para constituir material vegetal, liberando O₂.

Función de costo marginal de mitigación

Relación entre la cantidad total de emisiones reducidas y el costo marginal de la última unidad reducida. En términos generales, el costo marginal de la mitigación aumenta con la cantidad total de emisiones reducidas.

Función de daño

Relación entre los cambios del clima y las reducciones experimentadas por la actividad económica respecto de lo que sería posible en un clima inalterado.

Gas de efecto invernadero, gas de invernadero

Gas que absorbe radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación (radiación infrarroja) emitido por la superficie de la Tierra y por las nubes. El gas, a su vez, emite radiación infrarroja desde un nivel en que la temperatura es más baja que en la superficie. El efecto neto consiste en que parte de la energía absorbida resulta atrapada localmente, y la superficie del planeta tiende a calentarse. En la atmósfera de la Tierra, los gases de efecto invernadero son, básicamente: vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y ozono (O₃).

Halocarbonos

Compuestos que contienen cloro, bromo o flúor y carbono. Estos compuestos pueden actuar como potentes gases de efecto invernadero en la atmósfera. Los halocarbonos que contienen cloro y bromo están también relacionados con el agotamiento de la capa de ozono. (Véase también "gases de efecto invernadero")

Humedad del suelo

Agua almacenada en o sobre la superficie continental, y disponible para evaporación. En los modelos climáticos del IPCC (1990) se utilizaba un solo almacén (o "cubeta"). En los modelos actuales, que incorporan procesos del dosel y del suelo, la humedad se entiende como la cantidad albergada por encima del "punto de marchitamiento".

Impactos externos/externalidades

Impactos generados por el cambio climático (o algún otro tipo de cambio medioambiental) que un mercado competitivo no puede evaluar, por falta de información y/o por la imposibilidad de actuar en base a esa información.

Intervalo de temperaturas diurnal

Diferencia entre las temperaturas máxima y mínima a lo largo de un período de 24 horas.

Luminosidad solar

Mide la luminosidad (es decir, la cantidad de radiación solar emitida) del Sol. (Véase también "radiación solar").

Mezclado por remolinos

Mezclado causado por procesos turbulentos de pequeña escala (remolinos). Ni siquiera los actuales modelos de circulación general atmósfera/océano de mayor resolución pueden resolver explícitamente este tipo de procesos, razón por la cual hay que vincular sus efectos a las condiciones de mayor escala.

Núcleos de condensación de nubes

Partículas en suspensión en el aire sobre las que se produce la condensación de agua en forma líquida, y que pueden conducir a la formación de las gotitas de las nubes.

Opciones de mitigación "sin pesar"

Son aquellas opciones de mitigación cuyos beneficios (por ejemplo, costos de energía reducidos, o menores emisiones de contaminantes locales/regionales) igualan o superan a sus

costos sociales, sin contar los beneficios que reportaría la mitigación del cambio climático. Se alude también a ellas como "medidas siempre aceptables".

Parametrización

En la modelización del clima, técnica empleada para representar aquellos procesos que no es posible resolver a la resolución del modelo (procesos a escala subreticular) mediante las relaciones entre el efecto de dichos procesos promediado en área y el flujo a mayor escala.

Período de vida

En términos generales, el período de vida es el promedio de tiempo que un átomo o molécula permanece en un depósito dado (por ejemplo, la atmósfera, o los océanos). Conviene no confundir con el tiempo de respuesta de una perturbación de la concentración. El CO₂ no tiene período de vida único.

PIB

Producto interior bruto. Valor de todos los bienes y servicios producidos (o consumidos) dentro de las fronteras de un país.

Principio precautorio

Evitación de una solución irreversible por haber sido incorrectos los supuestos en que estaba basada, en favor de otra solución a primera vista peor pero reversible.

Radiación infrarroja

Radiación emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Es conocida también como radiación terrestre o radiación de onda larga. La radiación infrarroja tiene un espectro (es decir, una gama de longitudes de onda) distintivo, determinado por la temperatura del sistema Tierra-atmósfera. El espectro de la radiación infrarroja es, en la práctica, diferente al de la radiación solar o de onda corta, debido a la diferencia de temperaturas entre el Sol y el sistema Tierra-atmósfera. (Véase también "radiación solar")

Radiación solar

Radiación emitida por el Sol. Se denomina también radiación de onda corta. La radiación solar tiene un espectro (es decir, una gama de longitudes de onda) característico, determinado por la temperatura del Sol. El espectro de radiación solar es en la práctica distinto del de la radiación infrarroja o terrestre, a causa de la diferencia de temperaturas entre el Sol y el sistema Tierra-atmósfera.

Recursos de combustible de origen fósil

Cantidad de combustible de origen fósil que supuestamente existe y que sería recuperable basándose en un escenario explícito de condiciones económicas y de capacidades de operación futuras.

Regla de refutabilidad

La ciencia actual reconoce que no es posible demostrar la verdad absoluta de una hipótesis o modelo, ya que siempre existe

la posibilidad de que una explicación distinta dé cuenta de las mismas observaciones. En este sentido, incluso las leyes físicas más firmemente asentadas son “condicionales”. Por lo tanto, empleando la metodología científica nunca se puede demostrar concluyentemente que determinada hipótesis es cierta; únicamente podría llegar a demostrarse que es falsa.

Reservas de combustible de origen fósil

Cantidad de un combustible de origen fósil cuya existencia se ha conocido basándose en pruebas geológicas y de ingeniería, y que es posible recuperar en las condiciones económicas actuales y con las capacidades operativas actuales.

Respiración

Proceso metabólico en virtud del cual los organismos cubren sus necesidades internas de energía y liberan CO₂.

Respuesta de equilibrio

Respuesta, en estado estacionario, del sistema climático (o de un modelo climático) a un forzamiento radiativo impuesto.

Respuesta climática transitoria

Respuesta del sistema climático (o de un modelo del clima) en función del tiempo, a raíz de un cambio de forzamiento variable con el tiempo.

Retroacción (feedback)

Se produce cuando una variable de un sistema desencadena cambios en otra variable que, a su vez, afectará en última instancia a la variable original; un efecto de retroacción positivo intensifica los efectos, y uno negativo los reduce.

Sensibilidad del clima

En los informes del IPCC, la sensibilidad del clima suele hacer referencia al cambio a largo plazo (en condiciones de equilibrio) de la temperatura media de la superficie mundial a raíz de una duplicación de la concentración de CO₂ (o de CO₂ equivalente) en la atmósfera. En términos más generales, hace referencia al cambio, en condiciones de equilibrio, de la temperatura del aire en la superficie cuando el forzamiento radiativo varía en una unidad (°C/W m⁻²).

Spin-up

“Spin-up” es una técnica utilizada para inicializar un modelo de clima mundial atmósfera/océano (MCMAO). Actualmente no

es posible diagnosticar con exactitud el estado del sistema atmósfera/océano y, por lo tanto, no es posible prescribir las condiciones iniciales observadas para un experimento con un MCMAO. En lugar de ello, se hace funcionar por separado los componentes atmósfera y océano del modelo, forzados mediante unas condiciones de contorno “observadas”, agregando posiblemente a continuación otro período de “spin-up” en que la atmósfera y el océano están acoplados entre sí, hasta que el modelo se halla próximo a un estado estacionario.

Tasa de control óptima

Tasa de intervención para la cual el valor actual neto de los costos marginales de la intervención es igual al valor actual neto de los beneficios marginales de la intervención.

Tasa de descuento

Tasa anual para la cual el efecto de los sucesos futuros se reduce hasta el punto de ser equiparable al efecto de los sucesos actuales.

Termoclina

Región del océano mundial, normalmente hasta una profundidad de 1 km, en que la temperatura desciende rápidamente con la profundidad y que señala la frontera entre la superficie y las aguas profundas del océano.

Tiempo de renovación

Relación entre la masa de un depósito (por ejemplo, la masa de N₂O en la atmósfera) y la rapidez de vaciado de dicho depósito (por ejemplo, en el caso del N₂O, la velocidad de destrucción por efecto de la luz solar en la estratosfera) (véase también “estratosfera”).

Tropopausa

Frontera entre la troposfera y la estratosfera (véanse también estos dos términos).

Troposfera

Parte inferior de la atmósfera, comprendida entre la superficie y unos 10 km de altitud en latitudes medias (variando, en promedio, entre 9 km en latitudes altas y 16 km en el trópico), en que se encuentran las nubes y se producen los fenómenos “meteorológicos”. Se define la troposfera como la región en que las temperaturas suelen disminuir con la altitud.

Apéndice 3

ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

| | |
|---------------|---|
| CFC | Clorofluorocarbonos |
| CP-2 | Segunda Conferencia de las Partes de la CMCC |
| CMCC | Convención Marco, de las Naciones Unidas, sobre el Cambio Climático |
| CME | Consejo Mundial de Energía |
| COV | Compuestos Orgánicos Volátiles |
| DT | Documento Técnico del IPCC |
| GFDL | Laboratorio Geofísico de dinámica de fluidos (<i>Geographical Fluid Dynamics Laboratory</i>) |
| GTI, II y III | Grupos de Trabajo I, II y III del IPCC |
| HCFC | Hidroclorofluorocarbonos |
| HFC | Hidrofluorocarbonos |
| IPCC | Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático |
| IS92 | Escenario de emisiones definido en el informe IPCC (1992) |
| IyD | Investigación y Desarrollo |
| MCGA | Modelos de la Circulación General Atmosféricos |
| MCGAO | Modelos de la Circulación General Atmosféricos y Oceánicos |
| MCGO | Modelos de la Circulación General Oceánicos |
| MCS | Modelo Climático Simple |
| MEI | Modelo de Evaluación Integrada |
| NU | Naciones Unidas |
| OCDE | Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos |
| OMM | Organización Meteorológica Mundial |
| Perfiles WRE | Perfiles de Concentración del CO ₂ , que llevan a la estabilización, definidos por Wigley, y otros. (1996) |
| PIB | Producto Interior Bruto |
| RRP | Resumen para Responsables de Políticas |
| SIE | Segundo Informe de Evaluación del IPCC |
| UV | Ultravioleta |
| VEMAP | Proyecto de modelización y análisis de la vegetación/ecosistema |

Símbolos químicos

| | |
|-------------------------------|--|
| Br | Bromo |
| CFC-11 | CFCl ₃ , o su equivalente CCl ₃ F (triclorofluorometano) |
| CFC-12 | CF ₂ Cl ₂ , o su equivalente CCl ₂ F ₂ (diclorodifluorometano) |
| CH ₄ | Metano |
| Cl | Cloro |
| CO | Monóxido de carbono |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| HCFC-134a | CH ₂ FCF ₃ |
| HCFC-22 | CF ₂ HCl (clorodifluorometano) |
| N ₂ O | Óxido nitroso |
| NO _x | La suma de NO y NO ₂ |
| O ₃ | Ozono |
| OH | Hidroxil |
| S | Azufre |
| SO ₂ | Dióxido de azufre |
| SO ₄ ²⁻ | Ion sulfato |

Apéndice 4

UNIDADES

Unidades del SI (Sistema Internacional)

| Cantidad física | Nombre de la Unidad | Símbolo |
|---------------------------|---------------------|---------|
| longitud | metro | m |
| masa | kilogramo | kg |
| tiempo | segundo | s |
| temperatura termodinámica | kelvin | K |
| cantidad de sustancia | mol | mol |

| Fracción | Prefijo | Símbolo | Múltiplo | Prefijo | Símbolo |
|-------------------|---------|---------|------------------|---------|---------|
| 10 ⁻¹ | deci | d | 10 | deca | da |
| 10 ⁻² | centi | c | 10 ² | hecto | h |
| 10 ⁻³ | milli | m | 10 ³ | kilo | k |
| 10 ⁻⁶ | micro | μ | 10 ⁶ | mega | M |
| 10 ⁻⁹ | nano | n | 10 ⁹ | giga | G |
| 10 ⁻¹² | pico | p | 10 ¹² | tera | T |
| 10 ⁻¹⁵ | femto | f | 10 ¹⁵ | peta | P |
| 10 ⁻¹⁸ | atto | a | | | |

Nombre y símbolos especiales para ciertas unidades derivadas del SI

| Cantidad física | Nombre de la unidad del SI | Símbolo de la unidad del SI | Definición de la unidad |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|--|
| fuerza | newton | N | kg m s ⁻² |
| presión | pascal | Pa | kg m ⁻¹ s ⁻² (=N m ⁻²) |
| energía | julio | J | kg m ² s ⁻² |
| potencia | vatio | W | kg m ² s ⁻³ (= Js ⁻¹) |
| frecuencia | hertz | Hz | s ⁻¹ (ciclos por segundo) |

Fracciones decimales y múltiplos de unidades del SI con denominaciones especiales

| Cantidad física | Nombre de la unidad del SI | Símbolo de la unidad del SI | Definición de la unidad |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|--|
| longitud | ångstrom | Å | 10 ⁻¹⁰ m = 10 ⁻⁸ cm |
| longitud | micrón | μm | 10 ⁻⁶ m |
| área | hectárea | ha | 10 ⁴ m ² |
| fuerza | dyne | dyn | 10 ⁵ N |
| presión | bar | bar | 10 ⁵ N m ⁻² = 10 ⁵ Pa |
| presión | milibar | mb | 10 ² N m ⁻² = 1 Pa |
| peso | tonelada | t | 10 ³ kg |

Otras unidades

| | | |
|------|---|--|
| °C | grados Celsius (0°C = ~273 K) también se indican en °C (=K) las diferencias de temperatura, en vez de en la forma más correcta de "grados Celsius" | Las unidades de masa adoptadas en este informe son generalmente aquellas que forman parte del uso común y, deliberadamente no han sido armonizadas |
| ppmv | partes por millón (10 ⁶) en volumen | kt kilotoneladas |
| ppbv | partes por mil millones (10 ⁹) en volumen | GtC gigatoneladas de carbono (1 GtC = 3.7 Gt dióxido de carbono) |
| pptv | partes por billón (10 ¹²) en volumen | PgC petagramos de carbono (1PgC = 1 GtC) |
| bp | (años) antes de hoy | MtN megatoneladas de nitrógeno |
| kpb | miles de años antes | TgC teragramos de carbono (1TgC = 1 MtC) |
| mbp | millones de años antes | TgN teragramos de nitrógeno |
| | | TgS teragramos de azufre |

Apéndice 5

AFILIACIÓN DE LOS AUTORES PRINCIPALES

| | | |
|------------------|---|-------------|
| David Schimel | Centro Nacional de Investigación Atmosférica | EE.UU. |
| Michael Grubb | Instituto Real de Asuntos Internacionales | Reino Unido |
| Fortunat Joos | Universidad de Berna | Suiza |
| Robert Kaufmann | Universidad de Boston | EE.UU. |
| Richard H. Moss | Unidad de Apoyo Técnico del GTII del IPCC | EE.UU. |
| Wandera Ogana | Colegio de Ciencias Biológicas y Físicas | Kenya |
| Richard Richels | <i>Electric Power Research Institute (EPRI)</i> | EE.UU. |
| Tom M. L. Wigley | Centro Nacional de Investigación Atmosférica | EE.UU. |

AFILIACIÓN DE COLABORADORES

| | | |
|--------------------|--|--------------|
| Michele Bruno | Universidad de Berna | Suiza |
| Regina Cannon | Centro Nacional de Investigación Atmosférica | EE.UU. |
| James Edmonds | Laboratorios <i>Battelle Pacific Northwest (DOE)</i> | EE.UU. |
| Erik F. Haites | Unidad de Apoyo Técnico del GTIII del IPCC | Canadá |
| L. D. Danny Harvey | Universidad de Toronto | Canadá |
| Martin Hoffert | Universidad de Nueva York | EE.UU. |
| Atul K. Jain | Universidad de Illinois | EE.UU. |
| Rik Leemans | RIVM | Países Bajos |
| Kathleen A. Miller | Centro Nacional de Investigación Atmosférica | EE.UU. |
| Robert Parkin | Centro Nacional de Investigación Atmosférica | EE.UU. |
| Sarah C. B. Raper | Unidad de Investigaciones Climáticas (UEA) | Reino Unido |
| Elizabeth Sulzman | Centro Nacional de Investigación Atmosférica | EE.UU. |
| Richard van Tol | Instituto de Estudios Medioambientales, <i>Free University</i> | Países Bajos |
| Jan de Wolde | Universidad de Utrecht | Países Bajos |

AFILIACIÓN DE LOS MODELADORES

| | | |
|------------------|--|--------|
| Michele Bruno | Universidad de Berna | Suiza |
| Fortunat Joos | Universidad de Berna | Suiza |
| Tom M. L. Wigley | Centro Nacional de Investigación Atmosférica | EE.UU. |

Lista de publicaciones del IPCC

I. PRIMER INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC (1990)

- a) **CAMBIO CLIMÁTICO — Evaluación científica del IPCC.** Informe de 1990 del Grupo de trabajo sobre la Evaluación Científica del IPCC (*también en chino, francés, inglés y ruso*).
- b) **CAMBIO CLIMÁTICO — Evaluación de los impactos del IPCC.** Informe de 1990 del Grupo de trabajo sobre Evaluación de los impactos (*también en chino, francés, inglés y ruso*).
- c) **CAMBIO CLIMÁTICO — Estrategias de respuesta del IPCC.** Informe de 1990 del Grupo de trabajo sobre Estrategias de Respuesta del IPCC (*también en chino, francés, inglés y ruso*).
- d) **Resúmenes para responsables de políticas, 1990.**

Escenarios de la emisiones (preparado por el Grupo de trabajo sobre Estrategias de Respuesta del IPCC), 1990.

Evaluación de la vulnerabilidad de las zonas costeras a la elevación del nivel del mar — metodología común, 1991.

II. SUPLEMENTO DEL IPCC (1992)

- a) **CAMBIO CLIMÁTICO 1992 — Informe suplementario a la evaluación científica del IPCC.** Informe de 1992 del Grupo de trabajo sobre Evaluación Científica del IPCC.
- b) **CAMBIO CLIMÁTICO 1992 — Informe suplementario a la evaluación de los impactos del IPCC.** Informe de 1990 del Grupo de trabajo sobre Evaluación de los impactos.

CAMBIO CLIMÁTICO: evaluaciones de 1990 y 1992 del IPCC— Primer informe de evaluación del IPCC – Resumen general y resúmenes para responsables de políticas y suplemento del IPCC de 1992 (*también en chino, francés, inglés y ruso*).

El cambio climático global y el creciente desafío del mar. Subgrupo de trabajo sobre gestión de las zonas costeras del Grupo de trabajo sobre Estrategias de Respuesta del IPCC, 1992.

Informe del Cursillo de Estudios Nacionales del IPCC, 1992.

Directrices preliminares para evaluar los impactos del cambio climático, 1992.

III. INFORME ESPECIAL DEL IPCC, 1994

- a) **Directrices de inventarios nacionales de gases de efecto invernadero** (3 volúmenes), 1994 (*también en chino, francés, inglés y ruso*).

- b) **Directrices técnicas del IPCC para evaluar los impactos del cambio climático y las estrategias de adaptación**, 1994 (*también en chino, francés, inglés y ruso*).

- c) **CAMBIO CLIMÁTICO 1994 — Forzamiento radiativo del cambio climático y evaluación de los escenarios de emisiones IS92 del IPCC.**

IV. SEGUNDO INFORME DE EVALUACIÓN DEL IPCC, 1995

- a) **CAMBIO CLIMÁTICO 1995 — La ciencia del cambio climático** (incluido el Resumen para responsables de políticas). Informe del Grupo de trabajo I del IPCC, 1995.
- b) **CAMBIO CLIMÁTICO 1995 — Análisis científicos y técnicos de impactos, adaptaciones y mitigación del cambio climático.** (incluido el Resumen para responsables de políticas). Informe del Grupo de trabajo II del IPCC, 1995.
- c) **CAMBIO CLIMÁTICO 1995 — Las dimensiones económicas y sociales del cambio climático.** (incluido el Resumen para responsables de políticas). Informe del Grupo de trabajo III del IPCC, 1995.
- d) **Síntesis del Segundo informe de evaluación del IPCC sobre la información científica y técnica pertinente para interpretar el artículo 2 de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático**, 1995.

(Nota: la síntesis del IPCC y los tres resúmenes para responsables de políticas se han publicado en un solo volumen y existen también en árabe, chino, francés, inglés y ruso).

IV. DOCUMENTOS TÉCNICOS DEL IPCC

Tecnologías, políticas y medidas para mitigar el cambio climático — Documento Técnico I del IPCC (*también en francés e inglés*).

Introducción a los modelos climáticos simples utilizados en el Segundo Informe de Evaluación del IPCC — Documento Técnico II del IPCC (*también en francés e inglés*).

Estabilización de los gases atmosféricos de efecto invernadero: implicaciones físicas, biológicas y socioeconómicas — Documento Técnico III del IPCC (*también en francés e inglés*).

Procedimientos del IPCC para la preparación, examen y publicación de sus documentos técnicos

En su undécima reunión (Roma, 11-15 de diciembre de 1995), el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático adoptó por consenso los siguientes procedimientos para la preparación de documentos técnicos.

Los documentos técnicos del IPCC se preparan sobre temas en que se considera esencial una perspectiva científico/técnica internacional independiente.

- a) Se basan en material que se encuentra ya en informes de evaluación e informes especiales del IPPCC;
- b) se inician: i) atendiendo una petición formal de la Conferencia de las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático o sus órganos subsidiarios y aceptada por la Mesa del IPCC; o ii) por decisión del Grupo;
- c) se preparan por un equipo de autores, que comprenden un autor principal coordinador, elegido por la Mesa del IPCC de conformidad con las directrices de la selección de autores principales contenidas en los procedimientos del IPCC;*
- d) se someten en forma de proyecto para el examen simultáneo por expertos y gobiernos, al menos cuatro semanas antes de la recepción de los comentarios;
- e) son revisados por los autores principales sobre la base de los comentarios examinados en la fase anterior;
- f) se someten a los gobiernos para el examen final al menos cuatro semanas antes de la recepción de los comentarios;
- g) son ultimados por los autores principales, en consulta con la Mesa del IPCC que cumple la función de comité de redacción, sobre la base de los comentarios recibidos; y

- h) en caso necesario, según determine la Mesa del IPCC, se incluirán en un anexo opiniones, basadas en comentarios hechos durante el examen final de los gobiernos, no reflejadas debidamente en el documento.

Los documentos técnicos se ponen a disposición de la Conferencia de las Partes o de su órgano subsidiario, en respuesta a su petición, y luego se difunden. Cuando los documentos técnicos corresponden a una iniciativa del grupo se publican con carácter general. En ambos casos, en los documentos técnicos del IPCC se resalta al comienzo:

“Este es un documento técnico del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático preparado en respuesta a una [petición de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático]/ [decisión del Grupo]. El material que contiene ha sido examinado por expertos y gobiernos, pero no considerado por el Grupo para su posible aceptación o aprobación.”

-
- * La preparación del primer proyecto de informe deben realizarla autores principales designados por la Mesa del Grupo de trabajo pertinente entre los expertos citados en las listas proporcionadas por todos los países y organizaciones participantes, teniendo debidamente en cuenta los conocidos por sus publicaciones o su obra. En la medida de lo posible, la composición del Grupo de autores principales para una sección de un informe reflejará un justo equilibrio entre diferentes puntos de vista que la Mesa del Grupo de trabajo pueda esperar razonablemente, y en él deberá figurar al menos un experto de un país en desarrollo.