

EL CAMBIO CLIMÁTICO INDUCIDO POR ACTIVIDADES HUMANAS

El clima de La Tierra es un clima cambiante. A lo largo de su historia han existido muchos cambios climáticos naturales en todas las escalas de tiempo. En la actualidad utilizamos el término "cambio climático" de forma restringida, entendiendo que nos referimos a un cambio singular que tiene su origen en la modificación de la composición natural de la atmósfera. El aumento de emisiones de gases de efecto de invernadero desde la segunda mitad del siglo XVIII, se debe a las actividades humanas de quema de combustibles fósiles para obtener energía, y a las actividades industriales, agrícolas y ganaderas necesarias para el desarrollo de un mundo que ha duplicado su población entre 1960 y 2000, hasta superar los 6.000 millones de habitantes. En particular, las concentraciones de dióxido de carbono -CO₂- han aumentado un 34%. Los escenarios futuros de emisiones más recientes (SRES, 2000) propuestos por el IPCC basados en hipótesis sobre la evolución de la población, el consumo de energía y el modelo de desarrollo mundial, se agrupan en cuatro familias A1, A2, B1 y B2. La respuesta de una gama de modelos climáticos a estos escenarios es un aumento de la temperatura mundial media del aire en superficie entre 1,4°C y 5,8°C hasta 2100 y un aumento del nivel medio del mar comprendido entre los 9cm y los 88cm respectivamente. Los cambios en los patrones de precipitación muestran que sería superior a la actual en latitudes altas y medias e inferior en latitudes subtropicales, con excepciones muy dependientes del modelo utilizado.

Los fundamentos del cambio climático al que hoy nos referimos con cierto abuso de lenguaje, no son consecuencia de la variabilidad natural del clima, sino que se encuentran en la intensificación potencial del efecto de invernadero natural.

Esta intensificación se debe al incremento continuo y creciente, desde el final de la época preindustrial hasta nuestros días, de las concentraciones de gases de efecto de invernadero diferentes del vapor de agua. El dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), el ozono troposférico (O₃) y otros gases procedentes del desarrollo socioeconómico mundial, tanto industrial como agrícola, contribuyen directa o indirectamente a incrementar el desequilibrio del balance de energía planetario y suponen un experimento involuntario de la humanidad con un mecanismo capaz de generar cambios bruscos en el clima.



Luis Balairón Ruiz

Instituto Nacional de Meteorología
(INM-M^o de Medio Ambiente)
Miembro del IPCC (Intergovernmental
Panel on Climate Change)

En los últimos 250 años, las concentraciones correspondientes a los gases CO₂, CH₄ y N₂O han crecido hasta alcanzar en 1990, aumentos de un 30%, un 145% y un 15% respectivamente, en relación con los valores preindustriales (1750-1800). Actualmente emitimos a la atmósfera más de 7.000 millones de toneladas de carbono al año, procedentes de la quema de combustibles fósiles, la producción de cemento y el uso de suelos.

CLIMA Y SISTEMA CLIMÁTICO

Para el propósito de estudiar los cambios de clima, conviene alejarse de las definiciones operativas más comunes de clima, cuya validez está deliberadamente limitada a algunos decenios. Escala de tiempo apropiada para la duración de una vida humana, pero poco adecuada para el estudio de cambios climáticos a más largo plazo.

The climate of The Earth is a changing climate. Along their history many natural climate changes have existed in all time scales. At the present time we use the term "climate change" in a restricted way, understanding that we have refering to a singular change that has their origin in the modification of the natural composition of the atmosphere. The increase of greenhouse gases from the second half the XVIII century, is due to the human activities of fossil fuels burning to obtain energy and to industrial and agricultural activities needing for the development of a world wich population has been duplicated between 1960 and 2000, until overcoming the 6,000 million inhabitants. In particular, the concentrations of carbon dioxide - CO₂ - have increased in a 34%. The more recent emission scenarios proposed by the IPCC (SRES, 2000) are based on hypothesis about the population evolution, the energy consumption and the world patterns of development, wich are grouped in four families denominated as A1, A2, B1 and B2. The answer for these scenarios from a range of climate models results in an increase of the world average surface atmospheric temperature between 1,4°C and 5,8°C and a corresponding sea level rise understood between 9cm and 88cm. The changes in the precipitation patterns show us that could be above to the current one in high and media latitudes and below in subtropical latitudes, with exceptions highly dependings of the model used.

El clima conceptualmente debe considerarse como el resultado de la interacción de los subsistemas que componen el sistema climático: Atmósfera, hidrosfera, criosfera, biosfera y litosfera. Para una simulación ideal del clima correspondiente a períodos comprendidos entre 10² y 10³ años, deberíamos considerar los subsistemas atmósfera-océano-criosfera-biosfera-suelo de forma simultánea y las interacciones entre ellos. En la actualidad se consideran de forma acoplada los dos o los tres primeros, que por otra parte determinan la marcha general del clima en esta escala, y separadamente se considera la influencia parcial de los subsistemas restantes. Esta limitación es una fuente de incertidumbre en cuanto a las posibles "sorpresas" climáticas que podrían afectar al ritmo del cambio climático, a su distribución regional y a la evaluación de los impactos en ecosistemas naturales.

BALANCE RADIATIVO Y FORZAMIENTOS RADIATIVOS

La energía entrante a la Tierra constituye la casi totalidad de su energía disponible y procede del Sol. El planeta considerado en su conjunto, para mantenerse en equilibrio térmico con el espacio exterior, debe emitir hacia el espacio una cantidad de energía igual a la entrante.

Actualmente, nuestro planeta globalmente intercepta y absorbe una energía neta de unos 240 W/m^2 (energía incidente menos energía reflejada) y considerando que el sistema Tierra-atmósfera se comporta como un perfecto emisor en equilibrio debe emitir una cantidad igual de energía, que viene dada por la ley de Stefan-Boltzman:

$$\sigma T_e^4 \quad (\sigma = .567 \times 10^{-7} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4).$$

La temperatura efectiva de radiación T_e que se obtiene de esta forma es de 255 K , que equivalen a -18°C y que es la temperatura que existiría en una Tierra sin atmósfera o con una atmósfera totalmente transparente a todas las radiaciones de diferentes longitudes de onda. Sin embargo la temperatura T_s anual media mundial observada en superficie es de unos 15°C . Esta diferencia aproximada de 33°C se debe a la existencia de gases radiativamente activos que son transparentes para la mayor parte de las radiaciones procedentes del Sol y son absorbentes para las radiaciones de longitudes de onda infrarrojas emitidas por La Tierra. La absorción de energía saliente por parte de estos gases y su posterior reemisión en todas las direcciones produce un calentamiento neto de las capas bajas de la atmósfera, a través de un proceso que conocemos como "efecto de invernadero" por similitud parcial con el comportamiento de esos recintos acristalados que dificultan la salida de la radiación infrarroja elevando así la temperatura en su interior.

En consecuencia debe comprenderse que en capas más altas de la atmósfera, como la cima de la troposfera o tropopausa (a unos 12 km de altura media) las temperaturas deben ser inferiores a los -18°C para compensar la temperatura en superficie y lograr que el estrato en su conjunto se mantenga a dicha temperatura de equilibrio T_e . Y así ocurre y se comprueba con las observaciones satelitarias disponibles de los 50 años últimos. Las temperaturas en la tropopausa son del orden de los -60°C y se observa un enfriamiento de la misma totalmente acoplado al calentamiento que se observa de la tem-

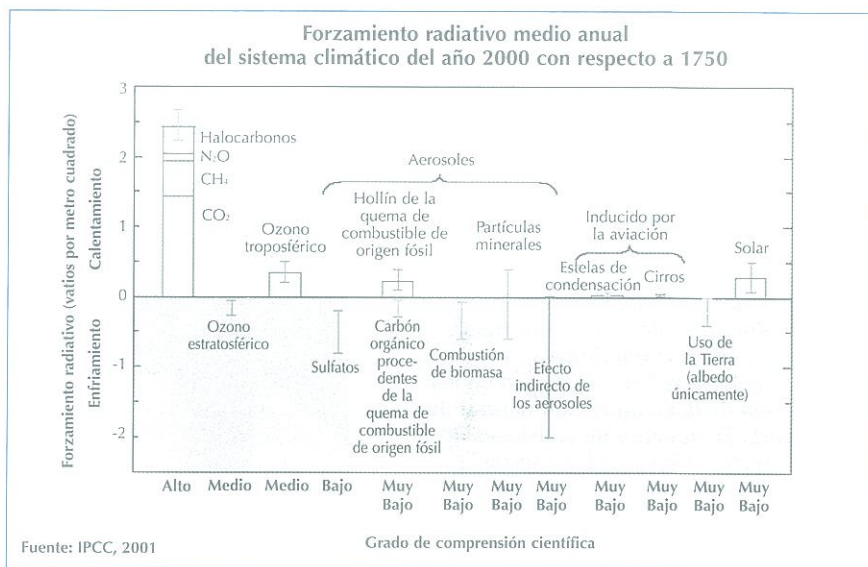


Figura 1. Comparación entre diversos forzamientos radiativos desde la época preindustrial hasta el presente (IPCC, 2001).

peratura en superficie. Es la adaptación termodinámica básica planetaria para que se cumpla el principio de conservación de la energía y para que nuestro planeta, visto por un observador exterior, siga emitiendo a la temperatura de -18°C .

El proceso descrito brevemente es uno de los muchos que puede alterar el balance de radiación en alguna de sus partes. En este caso altera un proceso que afecta a la energía saliente y si se evalúa desde la época preindustrial hasta nuestros días ha alterado el balance de radiación evitando que unos $2,5 \text{ W/m}^2$ escapen al espacio. Este desequilibrio introducido por la intensificación del efecto de invernadero alcanzaría los 4 W/m^2 en el caso de una duplicación de las concentraciones actuales de dióxido de carbono respecto a los valores preindustriales de 270 ppmv (partes por millón en volumen) en 1750.

Cualquier otro proceso que perturbe el balance de radiación, y que afecte a la cantidad de energía entrante o a la saliente, se conoce como "forzamiento radiativo" y es el concepto más esencial para una comprensión adecuada de las causas iniciales de los cambios de clima en cualquiera de sus escalas de tiempo.

En resumen, son fundamentales las dos ideas siguientes:

a) Las causas más importantes de cambios de clima hasta las escalas de milenios, tienen su fundamento en las alteraciones del balance radiativo y en los procesos externos o internos al sistema que puedan experimentar las ra-

diaciones incidentes en él o emitidas por él.

b) Las perturbaciones o cambios impuestos al sistema climático que alteran el balance radiativo se conocen como "forzamientos" radiativos. Generalmente, se consideran y denominan "forzamientos externos" a las alteraciones del balance de radiación cuya causa se origina en el espacio exterior a la troposfera (12 km) y se conocen como "forzamientos internos" a aquellos cuyas causas tienen su origen en el seno de la propia troposfera. Técnicamente se expresan, en W/m^2 , como cambios en el flujo radiativo descendente neto medido en la tropopausa.

Lo anterior tiene implicaciones inmediatas. En primer lugar, permite comparar la importancia de procesos diferentes entre sí y su influencia final en la temperatura efectiva T_e como primer paso para evaluar su incidencia en la temperatura planetaria.

De esta forma se pueden comparar perturbaciones naturales como las erupciones volcánicas y las variaciones de la energía solar recibida por razones astronómicas o aleatorias, con otras debidas a la acción humana sobre los albedos, a la presencia de aerosoles sulfurosos producto de la contaminación o a la modificación de las concentraciones de gases de efecto de invernadero.

La figura 1 nos muestra la evaluación más reciente del IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático de Naciones Unidas, 2001) de los forzamientos acumulados desde la época preindustrial hasta nuestros

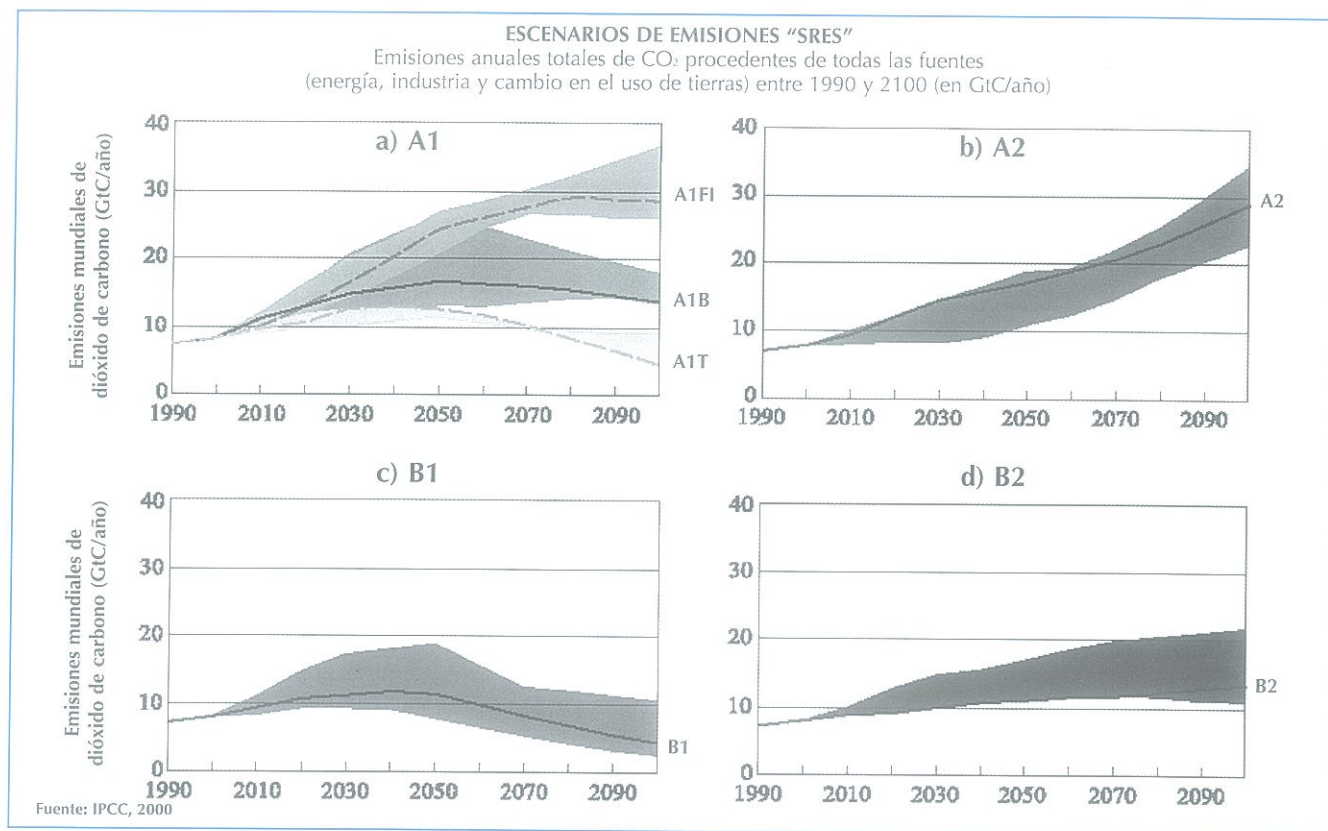


Figura 2. Ilustración esquemática de los escenarios SRES ("Special Report on Emission Scenarios").

días. Las proyecciones futuras de estos forzamientos presentan forzamientos cada vez mayores en los gases de invernadero antropogénicos, frente a forzamientos acotados o básicamente estabilizados del resto de forzamientos, si bien es cierto que algunos de esos forzamientos, como los debidos a aerosoles están evaluados con un alto grado de incertidumbre en sus efectos radiativos.

En el caso de los gases de invernadero el cálculo de los forzamientos se realiza mediante funciones del tipo $F=F(C_0, C)$ en las que los valores fundamentales son las concentraciones inicial C_0 y final C de cada gas considerado. Así el valor del forzamiento radiativo del dióxido de carbono entre dos años dados se expresa como $\langle \ln(C/C_0) \rangle$ con la constante $k=5,8$ (podemos encontrar otros valores según autores y reevaluaciones realizadas mediante medidas de satélite). Un cálculo inmediato para la duplicación arroja el valor de unos 4 W/m^2 ya citado.

Un análisis de la evolución (desde 1790 hasta ahora) de la magnitud relativa decenal del forzamiento asociado al aumento de gases de efecto de invernadero frente al debido a las variaciones de la radiación solar, muestra que hasta la primera mitad del siglo pasado eran comparables. En general,

durante las décadas anteriores el primero era inferior al segundo. En la actualidad, el forzamiento debido a intensificación del efecto de invernadero es cinco veces el que corresponde a variaciones solares ($2,5 \text{ W/m}^2$ frente a $0,5 \text{ W/m}^2$).

Estos hechos constituyen el origen de la preocupación de la comunidad científica ante un mecanismo causal de cambio climático muy potente. Complementariamente observamos el calentamiento mundial de la atmósfera en superficie, como un indicador de si las teorías formuladas se cumplen o no, con la contrapartida de ser un indicador que integra otras causas naturales de cambio de clima que enmascaran a la del aumento de concentraciones de gases de invernadero.

RETROALIMENTACIONES Y SENSIBILIDAD CLIMÁTICA

El significado exacto del cambio del forzamiento debido a una duplicación hipotética del CO₂, cuyo valor sería superior a los 4 W/m^2 , es el de reducir la radiación emitida de 240 a 236 W/m^2 . En el modelo más sencillo que imaginamos, el planeta se calienta en sus capas bajas y se enfría en las altas hasta restaurar el equilibrio perdido.

En este modelo simplificado el calentamiento global tendría un valor de $1,2^\circ\text{C}$ si la temperatura fuera la única variable que respondiera al cambio de forzamiento para restablecer el balance de radiación. Sin embargo, el propio cambio de la distribución de temperaturas ocasiona otras interacciones, a través de procesos que conocemos como de "retroalimentación", positiva y negativa, que modifican ese valor de equilibrio inicial. Estos procesos amplifican o reducen el calentamiento inicial y considerados conjuntamente producen una gama de respuestas en el aumento de la temperatura media mundial que va desde $1,5^\circ\text{C}$ hasta $4,5^\circ\text{C}$ según la complejidad de los modelos utilizados. Ejemplos de este tipo de procesos son la evaporación y la formación de nubes, la formación y destrucción de las cubiertas de hielo y nieve, el crecimiento de las vegetación, los ciclos biogeoquímicos del carbono o del nitrógeno o la circulación oceánica termohalina.

Algunos de estos procesos son de respuesta rápida, como la evaporación, y otros de respuesta muy lenta como la circulación termohalina y todos ellos son no lineales, en mayor o menor grado, lo que confiere a su tratamiento una dificultad intrínseca, que lleva a que la modelización dinámica

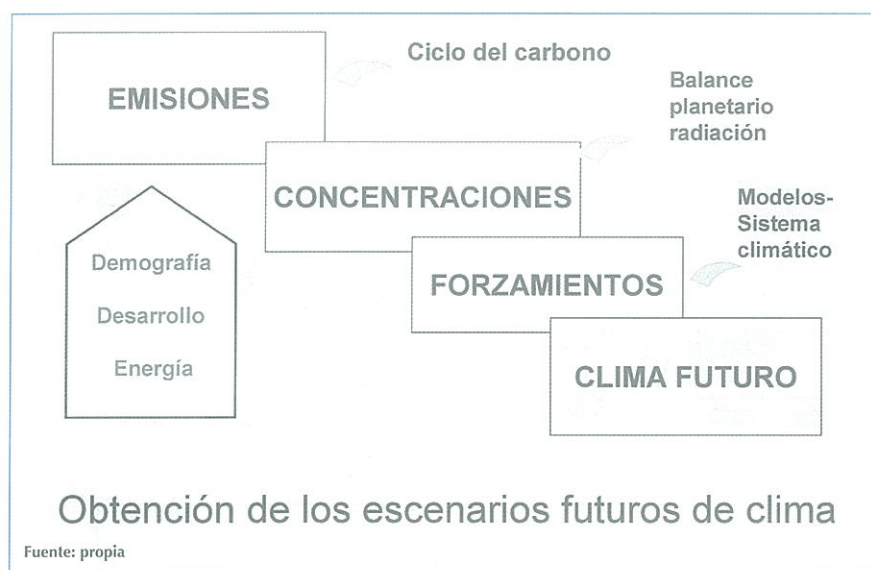


Figura 3. Enfoque comprehensivo para la obtención de escenarios y para la determinación de incertidumbres.

del sistema es nuestra principal herramienta de construcción de escenarios de clima futuro, como respuesta a conjuntos de hipótesis de cambio en los forzamientos, ya sean naturales o debidas a la actividad humana.

Para simplificar este conjunto de conocimientos se asigna a cada modelo un parámetro conocido como "sensibilidad climática" que expresa, en su versión más simplificada, la respuesta del modelo en grados centígrados ante la duplicación de las concentraciones de dióxido de carbono "equivalente" en relación a su valor preindustrial.

La idea de dióxido de carbono equivalente considera el forzamiento debido al CO₂ real y añade una cantidad ficticia de CO₂ que sería la necesaria para producir el mismo forzamiento acumulado que otros gases reales de invernadero, como el metano o el óxido nítrico, ejercen sobre el balance radiativo en el período de cálculo.

La gama de modelos existentes, con sus sensibilidades asociadas es la forma actual de abordar el problema de la incertidumbre y de establecer "la mejor evaluación disponible" junto a evaluaciones extremas. Este hecho no debe hacernos olvidar que todas las respuestas modelizadas y observadas en el pasado responden con un calentamiento global y sólo presentan enfriamientos locales o transitorios como efecto de las retroalimentaciones.

ESCENARIOS DE EMISIONES "SRES" DEL IPCC PARA EL TERCER INFORME DE EVALUACIÓN

En mayo de 2000 el IPCC de Naciones Unidas aprobó una nueva genera-

ción de referencia, de escenarios de emisiones de dióxido de carbono, y de otros gases de invernadero y de aerosoles, elaborados en 1998 por el grupo de estrategias de respuesta (Grupo de Trabajo III) con el fin de disponer de una base común para las conclusiones del Tercer Informe de Evaluación (IPCC, 2001).

Estos escenarios se conocen normalmente como SRES en atención a las siglas del informe original, en inglés, en que se describen ("Special Report on Emission Scenarios") y en la bibliografía en español también aparecen como IEEE por análoga razón. Al igual que los escenarios utilizados en sus evaluaciones de 1990 (A,B,C y D) y de 1995 (escenarios IS92), los nuevos escenarios SRES se basan en hipótesis acerca de las futuras evoluciones de tres fuerzas directoras (driving forces) determinantes: *La demografía, el desarrollo económico y las modelos de producción y consumo de energía.*

En esta nueva generación de escenarios de emisiones se ha aumentado la complejidad y la variedad de las hipótesis y en total, seis equipos de modelizadores han desarrollado 40 escenarios que se agrupan en cuatro familias A1, A2, B1 y B2, elaboradas a partir de cuatro "líneas evolutivas". Todos ellos son igualmente válidos, y no tienen asignadas probabilidades preferentes asignadas de hacerse realidad. Para una presentación simplificada, el conjunto de cuarenta escenarios se ha agrupado en seis grupos: Tres de ellos corresponden a variaciones en la familia A1 y los otros tres se corresponden con las respectivas familias.

Los tres grupos de la familia A1, se formulan a partir de tres formas de

concebir el futuro de la energía en el mundo. Los A1FI suponen que la utilización intensiva de combustibles fósiles se mantiene como forma dominante de producción de energía. Los A1T suponen que la producción de energía se realiza mediante tecnologías de sustitución de los combustibles fósiles, y los escenarios A1B son escenarios de "balance", en los que todas las opciones energéticas se utilizan sin que ninguna predomine sobre las otras.

En el informe del grupo que elaboró los escenarios (IPCC, 2000) se describen las líneas evolutivas para cada familia de escenarios. Para los escenarios A1 se describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y disminuye posteriormente, y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Sus características distintivas más importantes son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales, acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales en cuanto a ingresos por habitante.

La familia de líneas evolutivas y escenarios A2 describen un mundo muy heterogéneo, cuyas características más distintivas son la auto-suficiencia y la conservación de las identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen muy lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, y el crecimiento económico por habitante así como el cambio tecnológico están más fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.

La familia de líneas evolutivas y escenarios B1 describen un mundo convergente con una misma población mundial que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1, pero con rápidos cambios de las estructuras económicas orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y de la introducción de tecnologías limpias con un aprovechamiento eficaz de los recursos. En ella se da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales en relación con el clima.

Por último, la familia de líneas evolutivas y escenarios B2 describen un mundo en el que predominan las

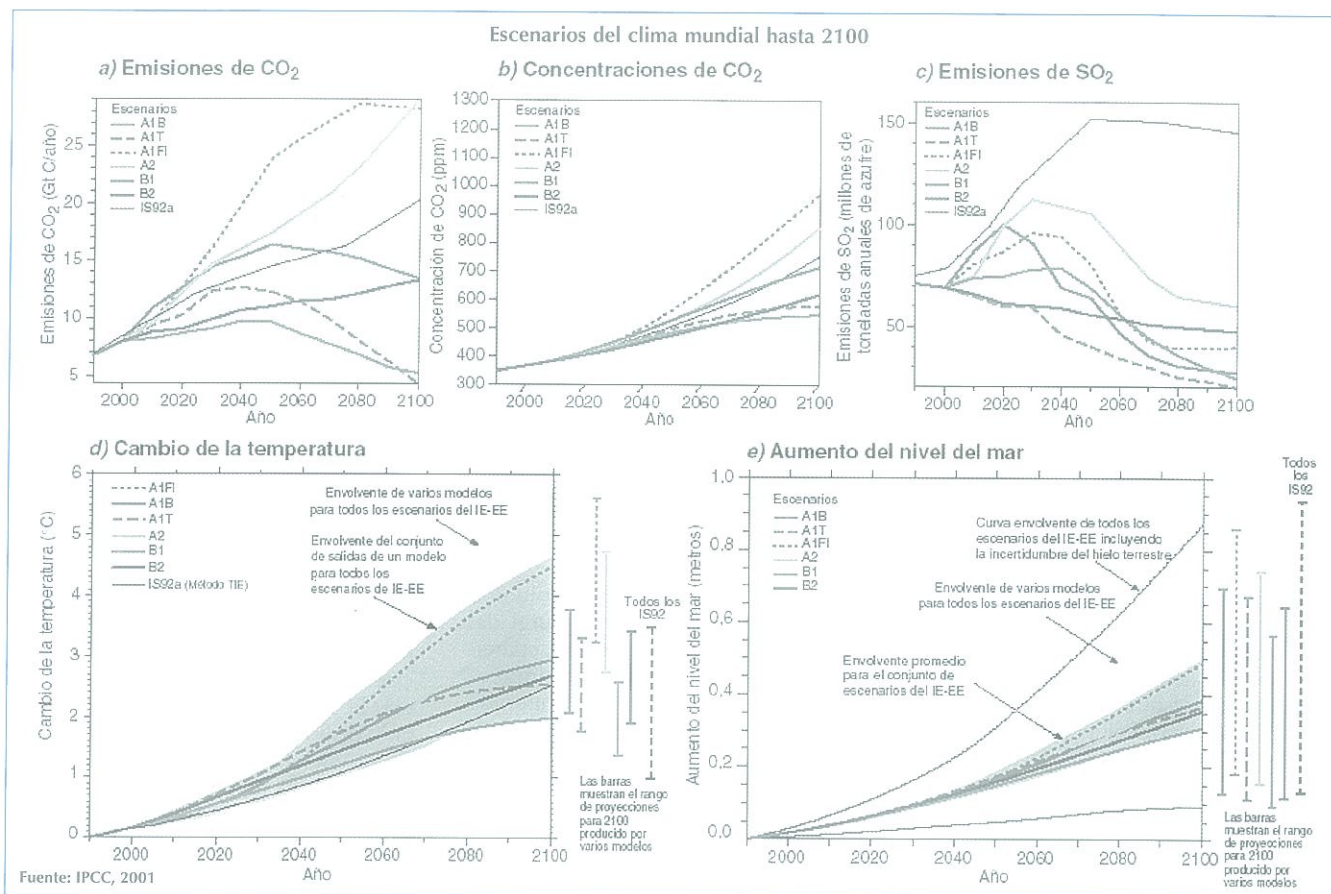


Figura 4. Escenarios de emisiones, concentraciones y de respuesta del clima hasta 2100.

soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta progresivamente a un ritmo menor que

en A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios, y con un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las restantes opciones.

EL RETO CIENTÍFICO Y LA RESPUESTA ACTUAL: CONCLUSIONES

En la actualidad, la ciencia ha acelerado su respuesta a través de una actividad tan diversa como la de cualquier otra área científica con retos importantes para la sociedad. El IPCC sirve fundamentalmente de catalizador e impulsor de una investigación que pueda ser "comparable" entre sí y de un intento riguroso a la hora de formular las preguntas científicamente "bien hechas".

Para conseguir lo primero, el enfoque comprensivo actual parte de una cadena conceptual para llegar a disponer de escenarios de cambio climático, que no deben entenderse como "predicciones" y mucho menos como predicciones deterministas.

Los escenarios de clima futuro son las respuestas más probables del sistema climático para cada uno de los escenarios de emisiones posibles. Cada escenario posible de emisiones es un escenario que expresa una opción socioeconómica y cultural a escala mundial. Cada escenario de emisiones depende de cómo evolucionará el número de habitantes planetario, de cómo será realmente el desarrollo económico y social en el mundo y de qué

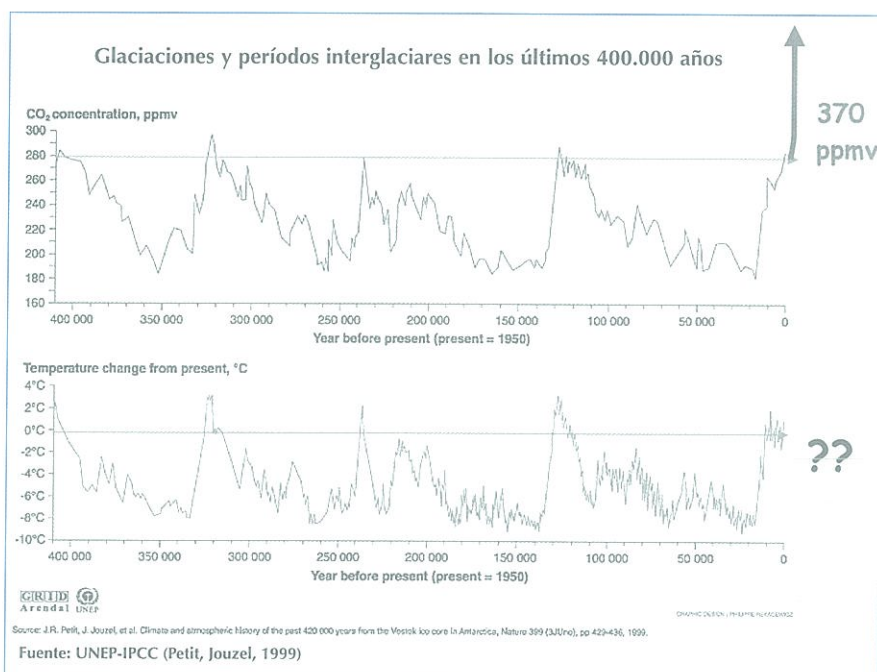


Figura 5. Evolución de las concentraciones de dióxido de carbono y de la variación de la temperatura media anual en superficie en los períodos glaciares e interglaciares de los últimos 420.000 años.

fuentes de energía utilizaremos en el futuro y con qué pautas de consumo y eficiencia.

La dificultad de conocer con seguridad esos escenarios de emisiones es la mayor fuente de incertidumbre en la elaboración de escenarios. La forma de reducir la incertidumbre es acotarla dentro de pautas verosímiles. Desde los escenarios de emisiones hasta los escenarios climáticos propiamente dichos, tenemos que elaborar los escenarios intermedios que los conectan. Así, la segunda gama de escenarios son los de concentraciones de gases de invernadero, cuya presencia en la atmósfera es la causa física de la intensificación del efecto de invernadero. Las incertidumbres en este paso, se asocian a las lagunas de conocimiento que subsisten en el comportamiento de los ciclos biogeoquímicos del carbono o del nitrógeno, en situaciones no estables como la actual. No obstante el conocimiento es suficientemente bueno para realizar proyecciones de tipo global y para variables como la temperatura y son muy *modelo-dependientes* en el caso de las distribuciones regionales del cambio estimado, en especial en el caso de la precipitación.

A partir de las concentraciones se elaboran los escenarios de forzamientos. Este paso apenas añade incertidumbres en el caso del CO₂. Sin embargo introduce incertidumbres en el caso de los escenarios de otros gases como el metano en la cuantificación de sus efectos indirectos.

Los resultados de la generación de escenarios SRES se han utilizado por la mayor parte de los grupos de modelización, para obtener la respuesta climática a los forzamientos que generan. En el caso de la *temperatura mundial media anual en superficie*, la respuesta obtenida mediante un conjunto de siete modelos con sensibilidades diferentes, produce aumentos para 2100 comprendidos entre 1,4°C y 5,8°. Los aumentos en el nivel del mar correspondientes a esos calentamientos atmosféricos en superficie, van de los 9cm a los 88cm.

Esa dispersión de valores no reflejan que nuestra incertidumbre en cuanto al calentamiento se encuentre en esa horquilla de valores (1,4 a 58) sino que la respuesta de la temperatura para escenarios de emisiones bajas es del orden de 1,4°C y para escenarios de emisiones muy altas la respuesta puede alcanzar los 5,8° o superarlos. En el caso de los aumentos del nivel del mar, la incertidumbre es grande para cada escenario de emisiones, debido a que cien años es un período corto para valorar la respuesta oceánica, dominada

por la inercia térmica y por procesos de respuesta con una no linealidad muy acusada.

Finalmente para restaurar el rigor histórico y para realizar una pregunta "bien hecha", conviene aclarar que el proceso científico que realmente ha tenido lugar para el surgimiento de las teorías sobre cambio climático, no nace de la magnitud del calentamiento observado de la baja atmósfera. Nace de la observación del crecimiento de las concentraciones de CO₂ y del conocimiento del mecanismo radiativo que rige el efecto de invernadero y crece con el conocimiento de que la tendencia de ese crecimiento, lleva a la duplicación de las mismas a mediados del siglo XXI o antes de forma casi inevitable.

La comparación de esta evolución reciente con la evolución natural del dióxido de carbono durante el cuaternario (1.200.000 años aproximadamente), muestra que hemos superado en pocas décadas el valor máximo de unas 280 ppmv (partes por millón en volumen), con casi absoluta certeza en los últimos 400.000 años y con una alta probabilidad en los últimos 20 millones de años.

La pregunta que nos plantea el conocimiento de estos hechos es ¿cuál será la reacción de nuestro planeta ante una evolución del dióxido de carbono equivalente tan abrupta?, ¿cómo funcionarán las realimentaciones rápidas y las lentas en un período tan corto de tiempo?

Tenemos un conocimiento adicional de la existencia de cambios abruptos de la temperatura en las transiciones del último período glacial hasta la situación actual, con cambios del orden de los 6 a 10 grados en unas pocas décadas. Es el caso del inicio y de la finalización del evento conocido como Young Dryas (período de enfriamiento brusco que dura más de dos mil años en algunas zonas y casi mil años menos en la Antártida) y que se inicia y finaliza de forma tan rápida, que demuestra la capacidad del sistema climático para responder a procesos no lineales. Es la forma de adaptarse del sistema y desmiente la idea de que la adaptación tenga que ser lenta o que el planeta busque por alguna razón desconocida la forma de "no cambiar". Por el contrario, el planeta como entidad física intenta responder al principio de conservación de la energía y a los equilibrios dinámicos y químicos de los subsistemas que lo componen.

El análisis de la relación entre escenarios de emisiones y las respuestas del clima a esos escenarios, muestra que algunos de los más verosímiles como

el A1B nos lleva a aumentos de unos 3°C para 2100 y a unos 40cm de elevación del nivel del mar. Otros como los A1T, en los que el esfuerzo de sustitución se lleva al límite conducen sin embargo a un escenario climático cercano al anterior para 2100, con un calentamiento de 2,5°C. La diferencia entre estas dos respuestas, en los modelos y muy probablemente en la realidad es apreciable en periodos posteriores, en los que la temperatura queda casi estabilizada un poco por encima de 2,5°C para A1T y sigue creciendo para A1B más allá de 2100.

Esta diferencia es mucho más acusada en los aumentos del nivel del mar, que alcanzan la respuesta al forzamiento varios siglos después, debido a que los períodos de respuesta del sistema oceánico son del orden de 10²-10³ años. Lo esencial es apreciar que la demora en la respuesta conduce a situaciones cada vez más irreversibles. Por ello la utilización de todas las tecnologías disponibles y la continua mejora de su eficiencia, junto a una racionalización de la demanda son la base de las estrategias necesarias para que los escenarios de emisiones se orienten hacia A1B-A1T o hacia B2 y se alejen de A2 lo más posible.

Existen limitaciones en nuestros conocimientos científicos para simular la complejidad del sistema terrestre, pero conocemos bien los principios y leyes universales que rigen el comportamiento global planetario. Son estos principios los que obligan a cambios de clima, como formas de adaptación del sistema a las modificaciones del balance de energía, tanto si las causas son humanas como si son naturales.

BIBLIOGRAFÍA

IPCC, 1994: Climate Change 1994. Cambridge Un. Press.

IPCC, 1995: The Climate Change. The Second Assessment Report of IPCC. Ed. J.T. Houghton et al. Ed. Cambridge Un. Press.

IPCC, 2000 (W.Group III): "Special Report on Emission Scenarios". Ed. IPCC.

IPCC, 2001: The Climate Change. The Third Assessment Report of IPCC. Cambridge Un. Press.

Balairón, L, 2000, Coord: El cambio climático. Monografía de la Revista El Campo, ed. Servicio de Estudios del BBVA. Madrid.

Henderson-Sellers, A. & K. McGuffie, 1987: A Climate Modelling Primer. Ed. J. Wiley & Sons Ltd. (Versión en español: Ed. Omega. Barcelona. 1990).

Petit, J.R., J. Jouzel et al, 1999: 2 Climate and atmospheric history of the past 420.000 years from the Vostok ice core in Antarctica". Nature 399 429-436.