

# FUNDAMENTOS CIENTÍFICOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO

**Luis Balairón Ruiz**

Director del Programa de Análisis del Cambio Climático  
Agencia Estatal de Meteorología \*

*El clima de la Tierra depende del estado de equilibrio entre la energía que recibe del Sol y la energía que es capaz de devolver al espacio exterior. Las actividades humanas asociadas al desarrollo económico y al crecimiento demográfico han modificado la composición natural pre-industrial de la atmósfera, al producir gases que intensifican el efecto de invernadero. El Cambio Climático potencial inducido por esta razón es un condicionante clave para los sistemas humanos y naturales en el siglo XXI.*

## INTRODUCCIÓN

El efecto de invernadero es un mecanismo natural, presente en algunos planetas del Sistema Solar (Venus, La Tierra, Marte), que eleva las temperaturas en superficie de sus atmósferas.

Este calentamiento en superficie se debe a la presencia de gases transparentes a la radiación solar entrante, que tienen la propiedad de absorber parte de la radiación radiación saliente infrarroja, emitida por el propio planeta. “Gases radiativamente activos” que conocemos más habitualmente como gases de efecto de invernadero.

Este proceso es muy eficaz y eleva en la temperatura actual de la atmósfera junto a la superficie terrestre en unos 33 grados; desde los  $-18^{\circ}\text{C}$  que tiene la atmósfera en su conjunto, y que es la temperatura que existiría si no existiese atmósfera o no existiese efecto de invernadero, hasta los  $15^{\circ}\text{C}$  observados en promedio.

La historia del clima de La Tierra es la historia de sus cambios de clima sucesivos. De forma natural, y en plazo de algunos miles de años, nuestro planeta debería volver

\* El contenido de este artículo es de la exclusiva responsabilidad del autor.

a una nueva glaciación guiada por los factores astronómicos que modulan la energía solar efectiva recibida. Este sería el cambio climático natural esperable a largo plazo.

Durante las últimas décadas se ha afianzado la denominación genérica de cambio climático para referirse a un "Cambio Climático" no natural, inducido por el aumento acumulativo de las concentraciones de algunos gases de efecto invernadero originados por la actividad humana desde el inicio de la revolución industrial.

En los años 70 se llevaron a cabo simulaciones del clima futuro estableciendo como referencia el cambio que se produciría si se duplicase la concentración preindustrial del dióxido de carbono. El cambio entre el nuevo clima de "equilibrio" y el preindustrial es lo que definía el "problema" del cambio climático. Su consecuencia fundamental era un calentamiento de la atmósfera en superficie y un enfriamiento en altura, capaces de compensar y mantener la temperatura media de la atmósfera en su conjunto en  $-18^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, es esencial no confundir los términos "calentamiento global" observado y "cambio climático" futuro.

Los avances en la investigación y en la observación del clima permiten en la actualidad describir varios cambios climáticos futuros "posibles", que dependerán de la totalidad de las concentraciones de gases de invernadero, no sólo del dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). No son predicciones sino "escenarios", porque tendrán lugar, o no, según sean las emisiones reales conjuntas a lo largo del siglo XXI.

## **ANTECEDENTES**

En abril de 1896, el científico sueco Svante Arrhenius, preocupado por la posibilidad de intensificación del efecto invernadero, publicó un artículo fundamental titulado *"Sobre la influencia del ácido carbónico en el aire sobre la temperatura de la superficie"*. Otros antes que él, Fourier en 1827, Pouillet en 1838 y Langley entre 1884 y 1890, habían planteado de forma cualitativa el problema; pero la suya fue la primera cuantificación rigurosa de las consecuencias del aumento de las concentraciones atmosféricas del  $\text{CO}_2$  sobre la temperatura del aire en superficie.

Los resultados obtenidos por Arrhenius, premio Nobel de Química en 1903, por sus aportaciones a la teoría de las disociaciones electrolíticas, han resultado ser sorprendentemente realistas, dentro de sus limitaciones y señalan el nacimiento de un campo de la ciencia cuyo pleno desarrollo, no obstante, no se ha iniciado hasta el último tercio del siglo XX. En la conmemoración en Suecia del centenario del documento se subrayó que *"a la luz de las preocupaciones actuales sobre el cambio climático inducido por la humanidad, el artículo de Arrhenius debería ser considerado como un verdadero hito en la historia de las geociencias"*.

Estas palabras de los coordinadores del encuentro conmemorativo del centenario del documento citado, organizado por la Real Academia Sueca de las Ciencias y el Instituto Meteorológico Internacional en Estocolmo en abril de 1996, reflejan fielmente

el nacimiento de un campo de la investigación científica cuyo pleno desarrollo no se ha alcanzado hasta el último tercio del siglo XX.

La estimación de Arrhenius en 1896 fue la de un aumento del 50% de  $\text{CO}_2$ , debido a la quema de carbón, a lo largo de unos 3000 años. Los incrementos que se han producido realmente, han sido mucho mayores y mucho más rápidos que los previstos por él. Sus estimaciones de calentamiento para una duplicación de la concentración preindustrial del  $\text{CO}_2$  fueron de unos 4,5° C en las zonas ecuatoriales y de unos 6° C en el Ártico.

El aumento real del  $\text{CO}_2$  ha sido de más de un 30% en un siglo y se ha debido no sólo a la quema de carbón, sino a la quema de otros combustibles fósiles. Hoy consideramos, además, los aumentos de concentraciones de otros gases, como el metano o el óxido nitroso que también tienen la propiedad de absorber parte de la radiación infrarroja terrestre que se irradia hacia el espacio y de reirradiarla de nuevo, calentando las capas más bajas de la atmósfera. El vapor de agua, el más potente de todos los gases con efecto de invernadero, no aumenta sus concentraciones, de forma notable, como consecuencia de las actividades humanas industriales o agrícolas, o como consecuencia directa de la explosión demográfica. Sus modificaciones no son preocupantes en cuanto a que no suponen un forzamiento acumulativo, y afectan únicamente, de forma moderada, al ciclo hidrológico.

El efecto de invernadero característico de ciertos gases, fue establecido conceptualmente por los científicos franceses Fourier y Pouillet, en 1827 y 1938 y, de forma más rigurosa, por el científico irlandés John Tyndall en la década de 1860. Tyndall aportó una visión amplia cercana al concepto actual de forzamiento radiativo y comprendió que los gases más importantes para el efecto de invernadero eran el vapor de agua y el dióxido de carbono. Otro antecedente inmediato de Arrhenius fue Samuel Langley, que hacia 1884 presentó resultados experimentales que demostraban la existencia del efecto de invernadero natural.

## LOS GASES DE EFECTO DE INVERNADERO

Nuestro planeta es habitable debido a la presencia natural en la atmósfera de gases de *efecto de invernadero*: Los principales son el vapor de agua y el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Gracias a este efecto, el promedio de la temperatura en superficie es de unos 15°C, lo que supone 33°C por encima de los -18°C que existirían en una Tierra sin atmósfera o sin la presencia de los gases citados y algunos otros como el metano ( $\text{CH}_4$ ) o el óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

Durante los últimos doscientos años, la humanidad ha llevado a cabo un experimento involuntario sobre el Clima de la Tierra, al aumentar progresivamente las emisiones de gases de invernadero diferentes del vapor de agua. Las concentraciones correspondientes a los gases  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y  $\text{N}_2\text{O}$  han crecido hasta alcanzar aumentos de

un 37%, un 157% y un 19% respectivamente, para 1990, 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 los cambios en el uso del suelo. Por añadidura, a lo largo del siglo XX hemos introducido gases nuevos que no formaban parte de la composición natural de la atmósfera, como los halocarbonos y los compuestos perfluorados, muy escasos, pero a veces miles de veces más activos que el CO<sub>2</sub> como gases de invernadero.

**Tabla 1** – Balance anual promedio de perturbaciones del CO<sub>2</sub> en dos décadas recientes. Valores en GtC –gigatoneladas de carbono-.  
(Fuente: IPCC, 1995 y 2001)

FUENTES Y SUMIDEROS DE CO <sub>2</sub>	1980-1989	1989-1998
1) Emisiones por quema de combustibles fósiles y producción de cemento	5,5 ± 0,5	6,3 ± 0,6
2) Almacenamiento en la atmósfera	3,3 ± 0,2	3,3 ± 0,2
3) Absorción oceánica	2,0 ± 0,8	2,3 ± 0,8
4) Absorción neta terrestre = (1)- [(2)+(3)]	0,2 ± 1,0	0,7 ± 1,0
5) Emisiones por cambios de uso del suelo	1,7 ± 0,8	1,6 ± 0,8
6) Absorción terrestre residual = (4)+(5)	1,9 ± 1,3	2,3 ± 1,3

El carbón circula entre la atmósfera, los océanos y la biosfera terrestre.

Los intercambios naturales mayores se producen entre la atmósfera y la biota terrestre, y entre la atmósfera y las aguas oceánicas superficiales. Los mayores almacenamientos son los océanos, la vegetación y los suelos. Los océanos almacenan 50 veces más carbono que la atmósfera. Los suelos contienen unas tres veces y media tanto carbono como la atmósfera.

La tabla muestra cambios entre los balances de las dos últimas décadas del siglo XX. El incremento en las emisiones (1) es de unos 0,8 GtC anual y crece de forma estable. Se ha reducido ligeramente la emisión por cambios en el uso del suelo. Ha aumentado la absorción oceánica y también ha aumentado la absorción neta terrestre (4) y la oceánica.

## EL SISTEMA CLIMÁTICO

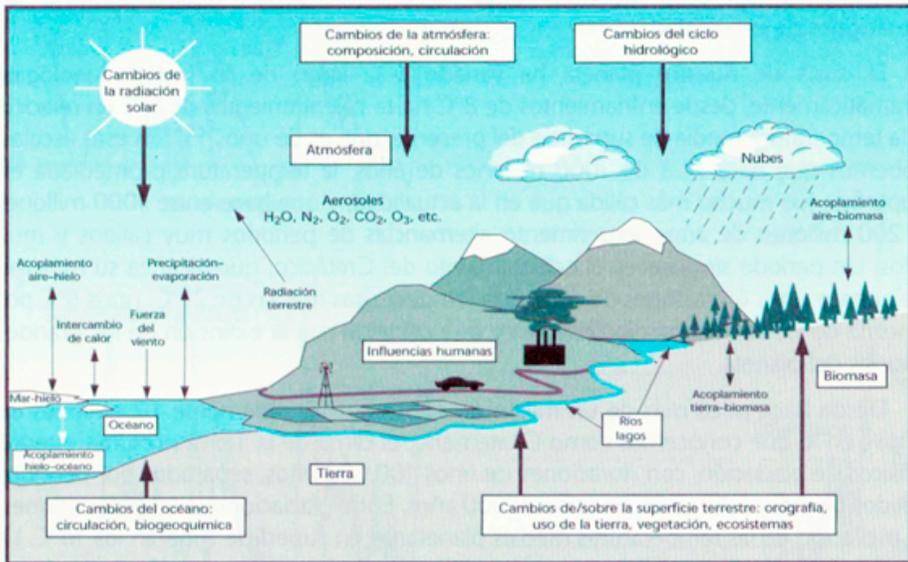
En la actualidad, entendemos el Clima (o los Climas), como manifestación de los estados de equilibrio y desequilibrio del *Sistema Climático*. *El sistema climático* está constituido por la *atmósfera*; la *hidrosfera*, compuesta por los océanos y las aguas dulces continentales; la *criosfera*, formada por hielos y nieves; la *biosfera* y la *litosfera*.

El sistema climático es un sistema dinámico muy complejo, debido a la gran cantidad de interacciones lineales y no lineales y a la naturaleza de las ecuaciones que rigen estas interacciones. Es matemáticamente hablando un sistema caótico, que

tiene la posibilidad de alcanzar varias soluciones de equilibrio. De hecho este es el mayor riesgo del cambio climático inducido por nuestra actividad: alterar la situación de equilibrio actual y forzar al sistema a que encuentre un equilibrio nuevo.

La alteración actual aún es muy leve y en sentido estricto no deberíamos denominarla aún cambio climático. Si el cambio climático se ha convertido en un problema grave para nuestro futuro es porque queremos evitar una modificación "excesiva" del equilibrio natural. La Convención Marco sobre Cambio Climático se elaboró para abordar esta eventualidad y el Grupo Intergubernamental de expertos sobre Cambio Climático tiene la función de identificar y definir qué es excesivo, es decir perjudicial para la supervivencia de los ecosistemas y para las condiciones de vida de los seres humanos.

**Fig 1** – El Sistema Climático: Componentes, procesos e interacciones. (Fuente: IPCC, 1997 /IT-II)



## EL CLIMA DEL PASADO

Durante el siglo XX los avances en las técnicas de obtención de datos del pasado han permitido reconstruir una historia fascinante del clima. El conocimiento del clima del pasado, procede en lo fundamental de datos indirectos, denominados *proxy*.

Las dataciones con *isótopos* de estratos de sedimentos lacustres; el análisis del aire fósil atrapado en burbujas de *testigos* de hielo y la composición isotópica del hielo mismo; la *dendrocronología*, que obtiene datos a partir de los anillos de los árboles; las reconstrucciones históricas y las medidas instrumentales más recientes, lo han hecho posible.

Esta información permite conocer comportamientos relativos y absolutos, en algunos casos, de la temperatura, de la precipitación o de los contenidos en gases de invernadero, durante épocas remotas: de cientos, de miles y de millones de años atrás. Quizás convenga señalar, que la disponibilidad de esta información es muy reciente, que procede de una colaboración entre saberes y disciplinas científicas alejadas entre sí hasta hace pocas décadas y que consituyen el resultado de los programas nacionales e internacionales de observación y vigilancia del clima y del sistema Tierra.

La intercomparación de resultados confirma que el clima cambia permanentemente en todas las escalas de tiempo; que las transiciones bruscas no son infrecuentes y que las causas periódicas de cambios se combinan con otras aleatorias para producir comportamientos "sorprendentes" poco predecibles y tan naturales como las situaciones de estabilidad.

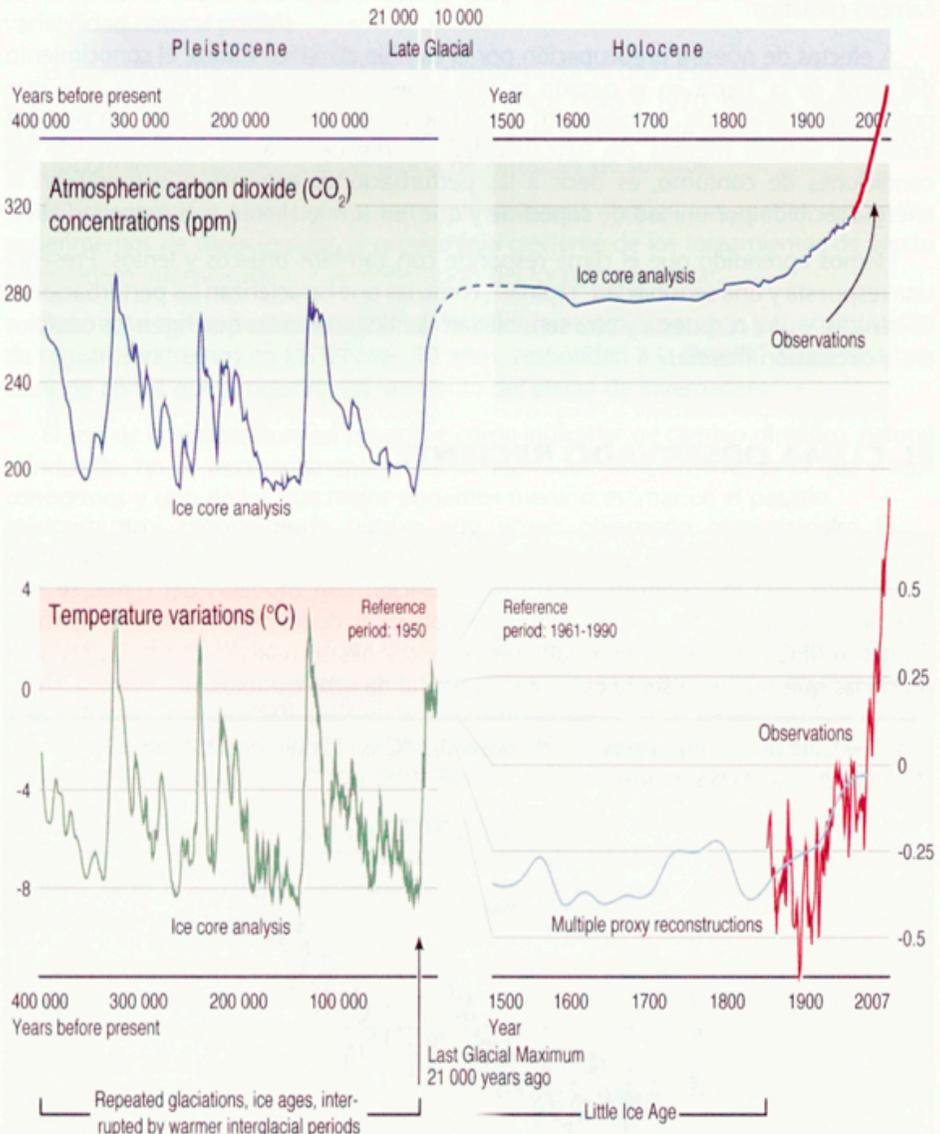
El clima de nuestro planeta ha variado a la largo de su historia geológica dramáticamente, desde enfriamientos de 8°C hasta calentamientos de 5°C en relación a la temperatura media de superficie del presente, que es de unos 15°. En esas escalas, sabemos que hace más de 1000 millones de años, la temperatura promediada en superficie fue mucho más cálida que en la actualidad, y que hace entre 1000 millones y 200 millones de años, experimentó alternancias de periodos muy cálidos y muy fríos. Un período singular es el calentamiento del Cretácico, que alcanza su máximo valor hace unos 65 millones de años, con temperaturas medias de 21°C; unos 6°C por encima de los valores medios actuales y que coincide con la extinción de los grandes saurios del planeta.

Desde hace poco más de un millón de años –aproximadamente 1,2 millones de años-, en lo que conocemos como Cuaternario, el clima de la Tierra presenta estados básicos de glaciación, con duraciones de unos 100.000 años, separados por periodos cálidos de menor duración, de unos 10.000 años. Entre glaciaciones e interglaciaciones, la oscilación de las temperaturas medias planetarias en superficie superan los 10°C. La temperatura media mundial en superficie llega a experimentar enfriamientos de hasta 8°C y calentamientos de más de 2°C., respecto a los valores actuales de referencia. (Convencionalmente consideramos como referencia actual el período 1961-90).

La teoría de Milankovich actualizada, explica las glaciaciones e interglaciaciones del Cuaternario como consecuencia de las características de los movimientos orbitales de la Tierra respecto al Sol. La excentricidad, la inclinación y la precesión tienen periodos del orden de los 100.000, 40.000 y 20.000 años, con amplitudes variables, pero regulares, cuya superposición justifica una gran parte de la variabilidad observada en esas escalas de las decenas de miles de años. Pero no existe unanimidad o sólo disponemos de explicaciones parciales, para explicar otros cambios observados de periodos menores,

que han tenido lugar en el marco de cada glaciación e interglaciación. Lo mismo ocurre con las variaciones de millones de años, justificadas por otros factores, que comprendemos en grados diferentes.

**Fig 2 –** Glaciaciones e interglaciaciones: Teoría de Milankovitch  
(Fuente: IPCC)



Desde los años 80 se han elaborado teorías provisionales que explican episodios climáticos complejos y cambios bruscos, como el inicio y final del período de enfriamiento conocido como “Younger Dryas”, hace 11.600 años. El final de este enfriamiento, marcó el inicio del calentamiento posterior que llega hasta nuestros días. Es un caso de gran interés porque sabemos que en realidad es un “retroceso” en el proceso general de calentamiento propio de la transición glacial-interglacial que se inició hace 18.000 años. Nos enseña mucho acerca de las escalas de tiempo de un cambio climático

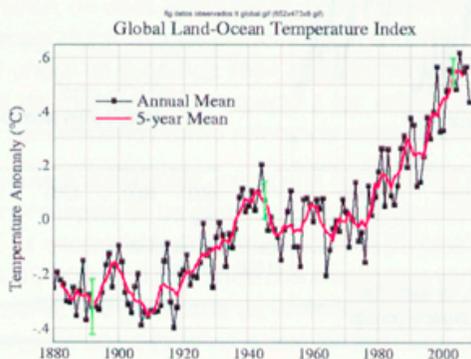
A efectos de nuestra preocupación por el cambio climático futuro, el conocimiento del clima de la Tierra en el pasado es una especie de banco de pruebas real, que nos indica el grado de “sensibilidad” del clima. La sensibilidad del clima, en primera instancia, es una medida de su capacidad de respuesta a las variaciones de las condiciones de contorno, es decir a las perturbaciones externas que modifican la energía recibida por unidad de superficie y que, en suma, alteran el balance radiativo.

Hemos aprendido que el clima responde con cambios bruscos y lentos. Presenta una respuesta y una sensibilidad “rápidas”, como las que caracterizan las perturbaciones volcánicas, y otra respuesta y otra sensibilidad “lentas”, como las que rigen los cambios en la circulación marina.

## **EL CLIMA OBSERVADO RECIENTE**

El calentamiento observado desde que existen observaciones instrumentales normalizadas, hacia 1860 y otras alteraciones observadas en el sistema climático, consistentes con los conocimientos y la simulación con modelos del clima, se han evaluado por parte del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) con el fin de establecer las relaciones su relación con las actividades humanas que pudieran ser la causa fundamental de esos cambios.

**Fig 3** – Calentamiento observado de unos 0,7 °C en los últimos 150 años  
(Fuente: NASA-GISS, Hansen)



En realidad, la comunidad científica ha reformulado el reto de conocer si el "clima ha cambiado" en las pasadas décadas, porque la naturaleza propia del clima es ser cambiante como corresponde a un sistema en el que intervienen muchos procesos simultáneos y no es el "cambio" en sí lo que resulta significativo, sino su brusquedad y sus posibles causas.

En el período de observaciones reciente, de los últimos 150 años aproximadamente, se observa un calentamiento anómalo, pero en su mayor parte dentro de una variabilidad natural posible.

El calentamiento anterior a 1940, se interpreta como una respuesta al forzamiento solar positivo de ese periodo, y la estabilidad entre 1940 y 1970, parece responder a la compensación entre los forzamientos solar y de aumento de gases de invernadero con forzamientos debidos a la presencia de aerosoles de sulfatos.

El calentamiento posterior, hasta el momento actual, responde según los experimentos de modelización al predominio creciente de los forzamientos de efecto invernadero intensificado y a la moderación del forzamiento solar.

Asimismo la distribución geográfica del calentamiento observado y la acumulación de registros extremos en los últimos 20 años, responden a la "huella" estadística que coincide con la que produciría un aumento del efecto de invernadero.

El uso de la temperatura en superficie como indicador de cambio climático, natural e inducido, no es necesariamente el mejor indicador, simplemente es el que mejor conocemos y uno de los que mejor podemos medir o estimar en el pasado.

*Fuente: Informe de Síntesis del Informe de Evaluación del IPC.2007*

*.../...*

*De los doce últimos años (1995-2006), once figuran entre los doce años más cálidos de los registros instrumentales de la temperatura mundial en superficie (desde 1850). La tendencia lineal a cien años (1906-2005), que es de 0,74 frente a 0,56 y 0,92°C, es más acentuada que la indicada en el TIE, que era de 0,6 frente a 0,4 y 0,8°C (1901-2000)*

*Entre 1956 y 2005, el calentamiento lineal (0,13 frente a 0,10 y 0,16°C por decenio) ha sido casi el doble del experimentado en los cien años transcurridos desde 1906 hasta 2005. Este aumento de temperatura está distribuido por todo el planeta, y es mayor en latitudes septentrionales altas*

*En la región ártica, el promedio de las temperaturas ha aumentado a un ritmo que duplica casi el promedio mundial de los últimos cien años. Las regiones terrestres se han calentado más aprisa que los océanos (Figuras 1.2 y 2.5). Las observaciones efectuadas desde 1961 indican que, en promedio, la temperatura del océano mundial ha aumentado hasta en profundidades de 3000 m como mínimo, habiendo absorbido los océanos más del 80% del calor incorporado al sistema climático.*

*Nuevos análisis de las temperaturas observadas desde globos y satélites en la troposfera inferior y media arrojan unas tasas de calentamiento similares a las observadas en la temperatura superficial.*

*Los aumentos del nivel del mar concuerdan con el calentamiento. El promedio mundial del nivel del mar aumentó, en promedio, a una tasa de 1,8 [entre 1,3 y 2,3] mm anuales entre 1961 y 2003, y de 3,1 [entre 2,4 y 3,8] mm anuales entre 1993 y 2003. No se sabe con certeza si la mayor rapidez de este último tramo refleja una variación decenal o un aumento de la tendencia a más largo plazo.*

*Desde 1993, la dilatación térmica de los océanos ha representado aproximadamente un 57% de la suma de las aportaciones estimadas al aumento de nivel del mar, mientras que la disminución de los glaciares y de los casquetes de hielo contribuyó en aproximadamente un 28%, y las pérdidas de los mantos de hielo polares aportaron el resto. Entre 1993 y 2003 la suma de estas contribuciones ha sido, dentro del margen de incertidumbre, coherente con el aumento total del nivel del mar observado directamente.*

*La disminución observada de la extensión de nieves y hielos concuerda también con el calentamiento. Los datos satelitales obtenidos desde 1978 indican que, en promedio anual, la extensión de los hielos marinos árticos ha disminuido en 2,7 [entre 2,1 y 3,3]% por decenio, y en mayor medida en los veranos, en que ascendió a 7,4 [entre 5,0 y 9,8]% por decenio. En promedio, los glaciares de montaña y la cubierta de nieve han disminuido en ambos hemisferios. Desde 1900, la extensión máxima de suelo estacionalmente congelado se ha reducido en torno a un 7% en el Hemisferio Norte, con disminuciones de hasta un 15% durante la primavera. En términos generales, las temperaturas de la capa superior de permafrost han aumentado en la región ártica, desde los años ochenta, en hasta 3°C.*

Sin embargo, otros indicadores son más consistentes y más fiables como descriptores del cambio y en particular los siguientes:

El enfriamiento de las capas altas de la troposfera y de la baja estratosfera (entre 8 y 12 km)

El reducción de la superficie y del volumen de los hielos árticos.

El retroceso de la cubierta helada de Groenlandia en verano.

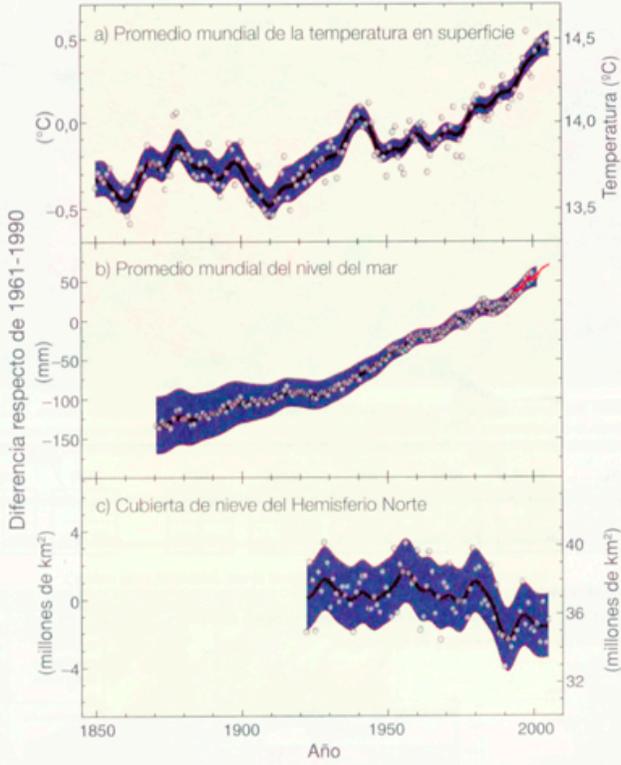
El aumento del nivel del mar

No lo es, por el contrario, la precipitación global ni regional, cuya variabilidad natural es tan alta, que aunque puede utilizarse como indicador, casi siempre resulta muy especulativa.

La figura adjunta resume resultados del último informe del IPCC

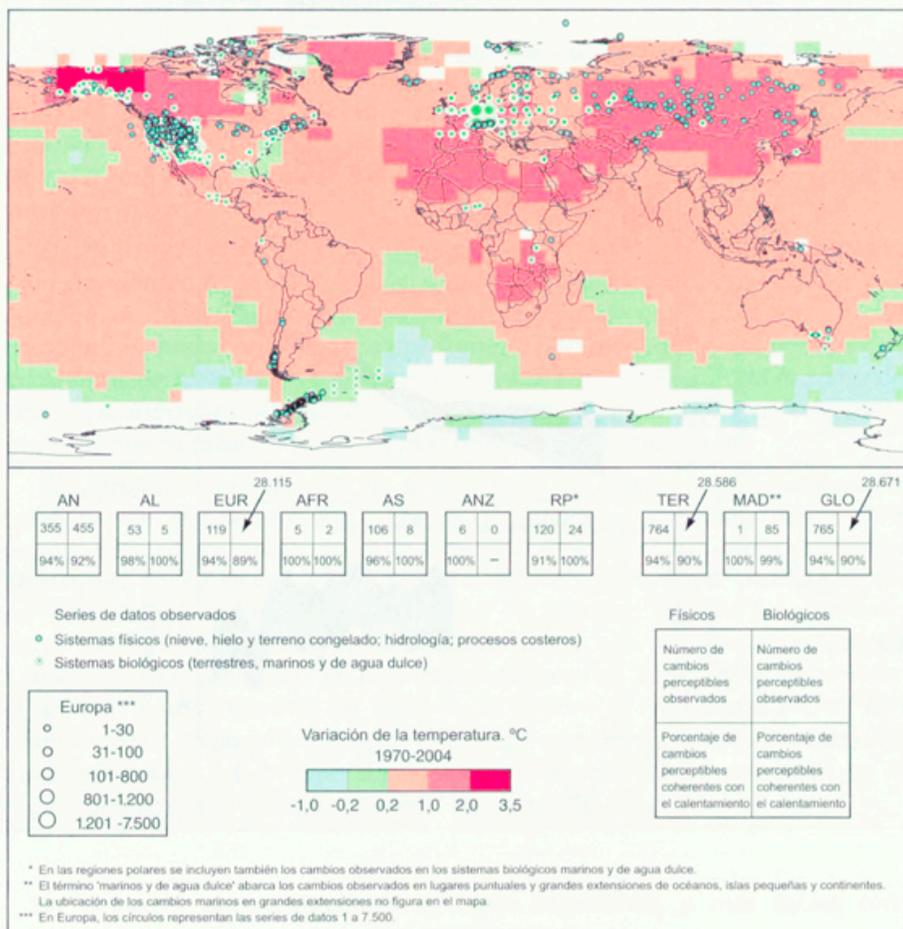
**Fig 4** – Variaciones recientes de temperatura, nivel del mar y cubierta de hielos.

Cambios en la temperatura, en el nivel del mar y en la cubierta de nieve del Hemisferio Norte



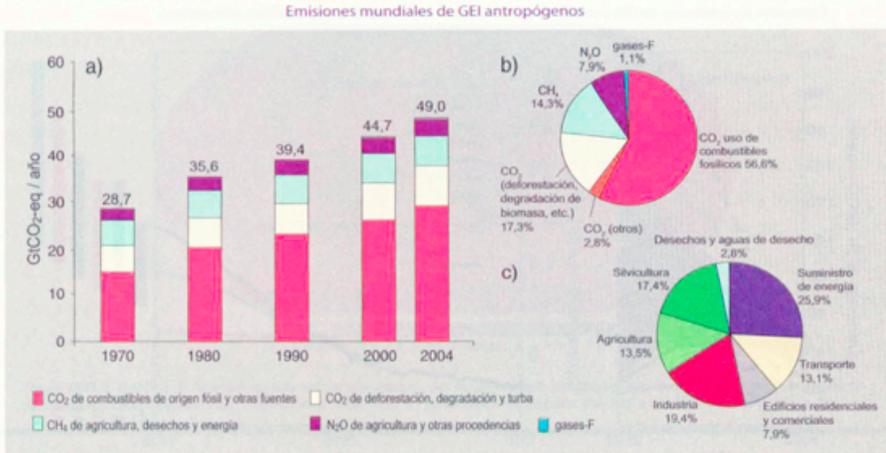
**Fig 4.1**

Cambios experimentados por los sistemas físicos y biológicos y por la temperatura superficial en 1970-2004



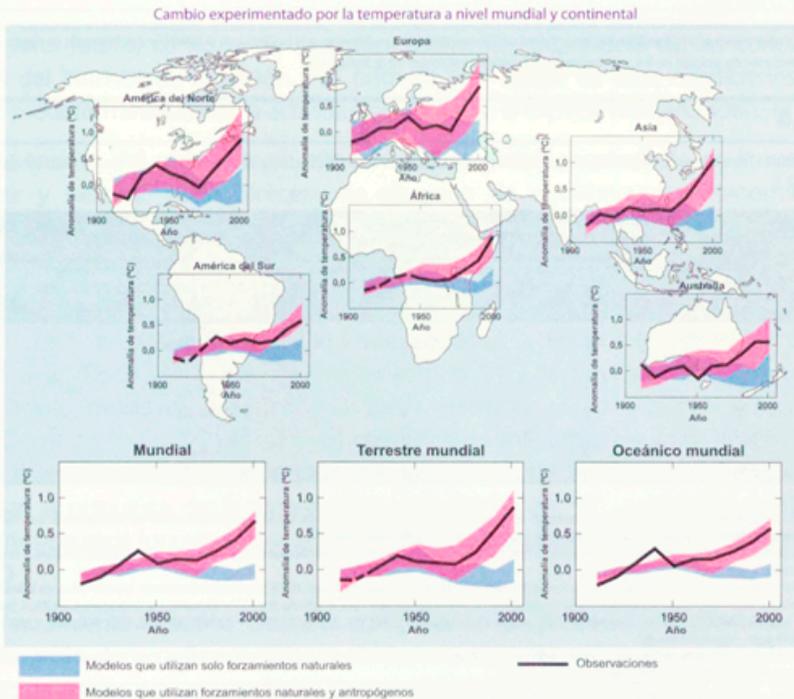
**Figura RRP.2.** Ubicación de los cambios significativos constatados en las series de datos de los sistemas físicos (nieve, hielo y terreno congelado; hidrología; y procesos costeros) y en los sistemas biológicos (sistemas biológicos terrenos, marinos y de agua dulce), y variación de la temperatura del aire en superficie durante el periodo 1970-2004. La gráfica está basada en aproximadamente 29.000 series de datos seleccionadas de un conjunto de 80.000, correspondientes a 577 estudios. La selección responde a los criterios siguientes: 1) abarca hasta 1990 o más adelante; 2) abarca un periodo de 20 años como mínimo; y 3) exhibe un cambio apreciable en alguna dirección, según las evaluaciones de los distintos estudios. Estas series de datos proceden de unos 75 est. e los cuales cerca de 70 son nuevos en el periodo que abarca desde la Tercera Evaluación), y contienen aproximadamente 29.000 series de datos, de las que 28.000 provienen de estudios europeos. Las áreas en blanco no contienen datos climáticos observacionales suficientes para estimar la tendencia de la temperatura. Los recuadros de cuatro celdas indican el número total de series de datos que exhiben cambios significativos (hileras superior) y el porcentaje de ellas que concuerda con el calentamiento (hileras inferior) para: i) regiones continentales: América del Norte (AN), América Latina (LA), Europa (EUR), África (AFR), Asia (AS), Australia y Nueva Zelandia (ANZ), y regiones polares (RP), y ii) a escala mundial: extensiones terrenas (TER), marinas y de agua dulce (MAD), y globales (GLO). El número total de estudios de los siete recuadros regionales (AN, EUR, AFR, AS, ANZ, RP) no coincide con el total global (GLO) ya que, excepto las cifras correspondientes a la región polar, las de las restantes regiones no incluyen los sistemas marinos y de agua dulce (MAD). No se ha incluido en el mapa la ubicación de los cambios registrados en grandes extensiones marinas. (Figura 1.2)

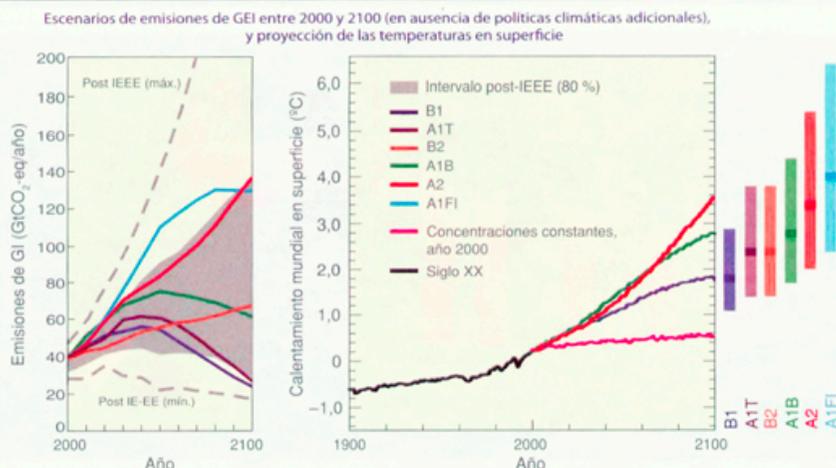
Fig 4.2



**Figura RRP3.** a) Emisiones anuales mundiales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004.<sup>5</sup> b) Parte proporcional que representan diferentes GEI antropógenos respecto de las emisiones totales en 2004, en términos de CO<sub>2</sub> equivalente. c) Parte proporcional que representan diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropógenos en 2004, en términos de CO<sub>2</sub> equivalente. (En el sector silvicultura se incluye la deforestación). [Figura 2.1]

Fig 4.3



**Fig 4.4**


**Figura RRP-5. Gráfica izquierda:** Emisiones mundiales de GEI (CO<sub>2</sub>-eq) en ausencia de políticas climáticas: seis escenarios testimoniales IEEE ilustrativos (líneas de color), junto con el percentilo 80 de escenarios recientes publicados desde el IEEE (post IEEE) (área sombreada en gris). Las líneas de trazos representan la totalidad de los escenarios post IEEE. Las emisiones abarcan los gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y F. **Gráfica derecha:** Las líneas continuas representan promedios mundiales multimodelo del calentamiento en superficie para los escenarios A2, A1B y B1, representados como continuación de las simulaciones del siglo XX. Estas proyecciones reflejan las emisiones de GEI y aerosoles de corta permanencia. La línea rosa no es un escenario, sino que corresponde a simulaciones de MCGAO en que las concentraciones atmosféricas se mantienen constantes en los valores del año 2000. Las barras de la derecha indican la estimación óptima (línea continua dentro de cada barra) y el intervalo probable evaluado para los seis escenarios testimoniales IEEE en el periodo 2090-2099. Todas las temperaturas corresponden al periodo 1980-1999. (Figura 3.1, Figura 3.2)

\* Los escenarios de emisiones IEEE están explicados en el Recuadro 'Escenarios IEEE' del presente Informe. Estos escenarios no contemplan políticas climáticas adicionales a las ya existentes; estudios más recientes difieren con respecto a la inclusión de la CMCC y del Protocolo de Kyoto.

\* Las trayectorias de emisión de los escenarios de mitigación se abordan en la Sección 5.

**Fig 4.5**

**Tabla RRP-1. Proyecciones del promedio mundial del calentamiento en superficie y del aumento del nivel del mar al final del siglo XXI.** (Tabla 3.1)

Caso	Cambio de temperatura (°C en 2090-2099 respecto de 1980-1999) <sup>a, b</sup>		Aumento del nivel del mar (m en 2090-2099 respecto de 1980-1999)
	Estimación óptima	Intervalo probable	Intervalo obtenido a partir de modelos, excluidos los cambios dinámicos rápidos futuros del flujo de hielo
Concentraciones constantes en los niveles del año 2000 <sup>c</sup>	0,6	0,3 – 0,9	No disponible
Escenario B1	1,8	1,1 – 2,9	0,18 – 0,38
Escenario A1T	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,45
Escenario B2	2,4	1,4 – 3,8	0,20 – 0,43
Escenario A1B	2,8	1,7 – 4,4	0,21 – 0,48
Escenario A2	3,4	2,0 – 5,4	0,23 – 0,51
Escenario A1FI	4,0	2,4 – 6,4	0,26 – 0,59

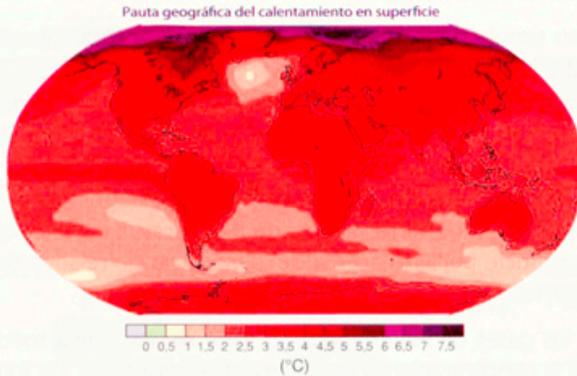
Notas:

- Los valores de temperatura son estimaciones óptimas evaluadas, y los intervalos de incertidumbre probables se han obtenido de una jerarquía de modelos de complejidad variable y de limitaciones observacionales.
- La composición constante en valores del año 2000 se ha obtenido de modelos de circulación general atmósfera-oceano (MCGAO) únicamente.
- Todos los escenarios precedentemente indicados son seis escenarios testimoniales IEEE. Las concentraciones aproximadas de dióxido de carbono equivalente correspondientes al forzamiento radiativo computado por efecto de los GEI y aerosoles antropogénicos en 2100 (véase la pág. 823 del TIE) para los escenarios testimoniales ilustrativos B1, A1T, B2, A1B, A2 y A1FI del IEEE son 600, 700, 800, 850, 1250 y 1550 ppm, respectivamente.
- Los cambios de temperatura están expresados en términos de diferencias respecto del periodo 1980-1999. Para expresar el cambio respecto del periodo 1850-1899 hay que añadir 0,5°C.

<sup>a</sup> Las proyecciones del TIE se referían a 2100, mientras que las proyecciones del presente informe están referidas a 2090-2099. El TIE habría arrojado unos intervalos de valores similares a los de la Tabla RRP 1 si hubiera tratado las incertidumbres de la misma manera.

<sup>b</sup> Con respecto a un más largo plazo, véase más adelante.

Fig 4.6



**Figura RRP. 6.** Cambios de la temperatura superficial proyectados para finales del siglo XXI (2090-2099). Se indica en el mapa la proyección multi-MCGAO promediada para el escenario A1B del IEEA. Todas las temperaturas tienen como referencia el periodo 1980-1999. [Figura 3.2]

## EL CLIMA DEL FUTURO: Forzamientos, realimentaciones y sensibilidad

El clima futuro, como el de cualquier momento, dependerá de las condiciones futuras del balance de radiación. Por primera vez, parte de esas condiciones están siendo predeterminadas por la actividad conjunta de la especie humana sobre la Tierra.

En periodos del orden de un año, el balance global promediado de la radiación entrante y saliente, suele ofrecer una situación de equilibrio, que denominamos "equilibrio radiativo". La radiación neta entrante, es de  $240 \text{ W.m}^{-2}$ , y debe ser reemitida a la atmósfera, aunque en forma de una energía más degradada, como es la infrarroja.

Cualquier proceso que altere o perturbe dicho equilibrio, se denomina "*forzamiento radiativo*" y se mide en la tropopausa, en  $\text{W.m}^{-2}$ , como cambio en el flujo neto descendente. La comunidad científica ha desarrollado este concepto de "forzamiento radiativo" para tratar las perturbaciones como modificaciones finales del balance de radiación global y así cuantificar la influencia de cada proceso en el clima observado. Unido a este concepto ha surgido el de "sensibilidad" climática para expresar la respuesta de la temperatura atmosférica en  $^{\circ}\text{C}$ , a cambios unitarios o arbitrarios de esos forzamientos radiativos, como es la duplicación de la concentración del  $\text{CO}_2$ .

El forzamiento radiativo facilita la comparación de procesos tan diferentes como una alteración de la radiación solar recibida, una erupción volcánica, el debilitamiento de la capa de ozono estratosférica, las variaciones orbitales terrestres que justifican las alternancias glaciación-interglaciación explicadas por Milankovitch, los cambios de

albedo, o los cambios debidos al aumento de gases de efecto invernadero y a la presencia de aerosoles atmosféricos.

Es un concepto simple pero potente, que al comparar forzamientos climáticos de origen diverso entre sí, permite atribuir a cada causa una "capacidad" de modificación del clima. Ayuda a cuantificar la "responsabilidad" de cada proceso, de cada fuente de cambio o de cada escala de perturbación. Termina con algunos debates "cualitativos" a los que hemos asistido en el pasado, y aún hoy, que comparan hechos ciertos no comparables por la diferencia de sus órdenes de magnitud. Es posible, por lo tanto, que tengamos incertidumbres acerca de los efectos que cada causa de cambio climático puede producir, pero no acerca de la importancia relativa de cada causa en relación con las demás.

En el caso de los gases de invernadero, su valor se determina mediante funciones que dependen de la concentraciones final y inicial consideradas, de forma que es nulo si las concentraciones se mantienen constantes. En el caso del dióxido de carbono, su valor entre un año dado y otro de referencia viene dado por

$$\Delta F = k \cdot \ln(C/Co), \text{ con } k \text{ cercano a } 6.$$

Para la duplicación respecto a un año inicial ( $C/Co=2$ ), el aumento de forzamiento sería de  $4,2 \text{ Wm}^{-2}$

La concentración preindustrial del dióxido de carbono era de unas 280 ppmv (partes por millón en volumen). Hace años que hemos rebasado la concentración media de las 300 ppmv. En 2008 hemos superado las 384 ppmv y la tendencia observada y estimada es notablemente creciente. Como referencia más amplia, sabemos que las variaciones a lo largo del cuaternario, durante las alternancias glaciación-interglaciación, han seguido la misma pauta relativa que las temperaturas, pero los valores absolutos están acotados en ese período entre las 200 y las 300 ppmv aproximadamente. En ningún caso se han alcanzado concentraciones cercanas al temido valor de duplicación de 550 o 560 ppmv.

El cuadro adjunto muestra las concentraciones preindustriales de referencia, las tasas de crecimiento, los tiempos de permanencia media en la atmósfera y su capacidad relativa de calentamiento, en comparación con la capacidad de calentamiento del  $\text{CO}_2$ .

**Tabla 2** – Evolución y características de los gases de efecto de invernadero más importantes.

(Fuente: IPCC y CDIAC)

GASES	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	HCFC-23	CF <sub>4</sub>	SF <sub>6</sub>
Nivel preindustrial	-280 ppmv	-700 ppbv	270 ppbv	Cero	40 pptv	Cero
Concentración en 2007-2008	384 ppmv	1857/1735 (HN/HS) Ppbv	321 ppbv	--	--	6,40 (HN) Pptv
Ritmo de cambio *	1,5 ppmv/a 0,4%/a	7 ppbv/a 0,5%/a	0,8 ppbv/a 0,25%/a	0,5 pptv/a	1 pptv/a	0,2 pptv/a
Permanencia en atmósfera (años)	5-200**	12***	114	260	> 50.000	3.200
Potencial de calentamiento a 100 años (+)	1	25	298	11700	23900	22.800
Incremento del forzamiento radiativo desde 1750	1,66	0,48	0,16	--	--	0,0029

## Notas:

El CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono), el CH<sub>4</sub> (metano), el N<sub>2</sub>O (óxido nitroso), el SF<sub>6</sub> (hexafluoruro de azufre) y el CF<sub>4</sub> (perfluorocarbono, o PFC) están cubiertos por el Protocolo de Kyoto. El HCFC-23 (un sustituto del CFC) es también una sustancia que agota el ozono estratosférico y, por ello, está considerado en el Protocolo de Montreal, más que en los acuerdos sobre cambio climático.

1 ppmv = 1 parte por millón en volumen;

1 ppbv = 1 parte por mil millones, por volumen; 1 pptv = 1 parte por billón, en volumen.

\* Ritmos estimados a partir de datos de 1990-1999, salvo el SF<sub>6</sub> que se refiere al periodo 1992-93.

\*\*No puede definirse una duración de vida única para el CO<sub>2</sub>, debido a las diferentes velocidades de absorción por los diversos procesos de sumidero. En realidad, el dióxido de carbono circula entre depósitos y sólo en algunos procesos es absorbido definitivamente. Los tiempos dados indican lo que tardaría la concentración en acomodarse a cambios bruscos de emisiones.

\*\*\* Las permanencias se consideran como "tiempos de ajuste" que tienen en cuenta los efectos indirectos del gas en su propio tiempo de residencia.

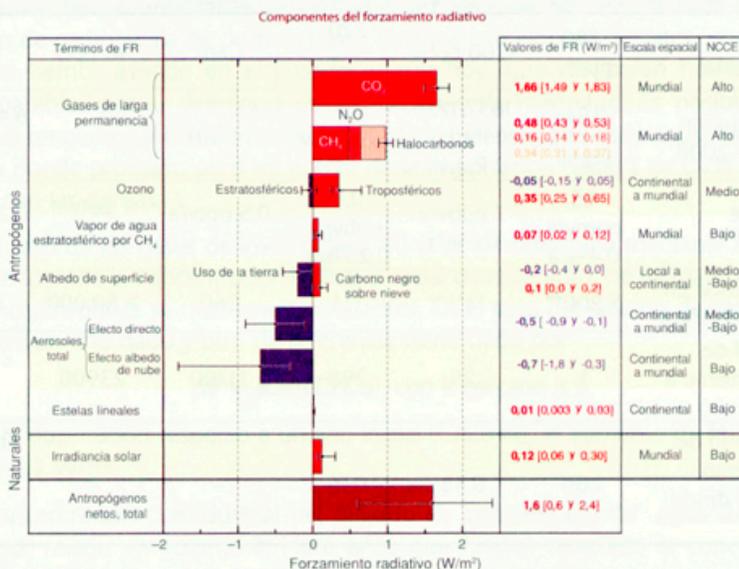
+ Los potenciales de calentamiento mundial para cada gas, indican la capacidad de calentamiento que tiene 1Kg de ese cada gas en relación al CO<sub>2</sub>, tomado como gas de referencia, para un horizonte de tiempo elegido, que aquí es de 100 años. Los kg emitidos reales de un gas, un año dado, multiplicados por su PCG, nos proporcionan la cantidad de kg emitidos de "CO<sub>2</sub> equivalente", es decir, de CO<sub>2</sub> que ejercería un forzamiento radiativo igual que el del gas realmente emitido.

Si se contabilizan los forzamientos radiativos desde la época preindustrial hasta ahora (digamos 1750 a 2000) se observa que lo que era inicialmente un forzamiento radiativo más, se ha convertido en un forzamiento radiativo mayor que el resto. Tiene además un carácter acumulativo, debido a que su influencia no es sólo instantánea, sino que se extiende durante todo el tiempo en el que los gases residen en la atmósfera, hasta su eliminación o absorción por otros subsistemas, muchos años después de su emisión.

En la medida en que los cambios en los forzamientos antropogénicos superan a los forzamientos naturales, que en escalas de tiempo cortas son muy estables, se

convierten en forzamientos dominantes, como parecen serlo ya en las décadas de los años 1980, 1990 y en los años transcurridos hasta 2008.

**Fig 5** – Forzamientos radiativos acumulados desde la época preindustrial hasta nuestros



**Figura 2.4.** Promedio mundial del forzamiento radiativo (FR) en 2005 (estimaciones óptimas y horquilla de incertidumbres del 5 al 95%) respecto de 1750 para CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y otros agentes y mecanismos importantes, extensión geográfica típica (escala espacial) del forzamiento, y nivel de conocimiento científico (NCCE) evaluado. Los aerosoles procedentes de erupciones volcánicas explosivas añaden un término de enfriamiento episódico durante cierto número de años después de una erupción. En el intervalo de valores de las estelas de condensación lineales no se incluyen otros posibles efectos de la aviación sobre la nubosidad. (GTT Figura FRP-2)

Un análisis de la evolución anual de los mismos valores, permitiría apreciar que, hasta muy avanzado el siglo XX, la suma de forzamientos no antropogénicos y antropogénicos estaba muy equilibrada. En consecuencia, es muy verosímil, que el calentamiento y los comportamientos observados de la temperatura desde hace 250 años hayan sido estables y pequeños en promedio, hasta que, en el último tercio del siglo XX, se invierte la tendencia y se aprecia un calentamiento progresivo, que tiene una probabilidad muy alta de ser debido al efecto de invernadero intensificado, moderado por los forzamientos negativos existentes de signo opuesto, como el que genera la presencia de contaminación por aerosoles de sulfato.

El principal factor causal de los cambios climáticos, es por lo tanto el forzamiento radiativo. Para una duplicación brusca del CO<sub>2</sub>, su valor supera los 4 W/m<sup>2</sup>. Quiere esto decir que la radiación emitida por nuestro planeta se reduciría, aproximadamente, de 240 W/m<sup>2</sup> a 236 W/m<sup>2</sup>. Para restaurar el equilibrio perdido se debería producir un calentamiento inicial del planeta dirigido a incrementar la radiación emitida hasta alcanzar un equilibrio nuevo. Este calentamiento global inicial tiene un valor de 1.2°C según la ley de Stefan-Boltzmann, y es el aumento de temperatura necesario, si no existieran otras variables sensibles al proceso, para restablecer el balance de radiación.

En esencia el cambio, en el equilibrio, de la temperatura en superficie promediada mundialmente,  $\Delta T_s$ , viene dado por:

$$\Delta T_s = \lambda \cdot \Delta Q$$

Donde  $\Delta Q$  es la perturbación o forzamiento radiativo aplicado ( $W \cdot m^{-2}$ )  $\lambda$  y es el "parámetro de sensibilidad" climática ( $K \cdot W^{-1} \cdot m^2$ ).

Para los  $4,2 W \cdot m^{-2}$  que corresponden al forzamiento de la duplicación del  $CO_2$ , el calentamiento radiativo sería igual a  $1,2^\circ C$ , si el sistema respondiera como un cuerpo negro perfecto y sin proceso alguno de respuesta posterior.

Sin embargo, en la realidad, ese calentamiento desencadena procesos de evaporación, de modificación de la nubosidad y de la convectividad, y otros muchos procesos de respuesta rápida. También desencadena procesos de respuesta lenta, directos e indirectos, de más largo plazo de respuesta, como los cambios de albedo planetario, los deshielos progresivos o los cambios en la circulación termohalina de los océanos.

Todos ellos amplifican o moderan el cambio inicial y son responsables de parte de las incertidumbres existentes. A estos procesos que modifican ese valor de equilibrio inicial se les conoce como "realimentaciones" del sistema.

Un proceso de realimentación (o de retroalimentación), es aquél que a partir de un cambio inicial en una variable A, produce un cambio en otra variable B que, a su vez, produce cambios en la variable inicial A.

Los que tienden a amplificar el sentido inicial de la variación se consideran positivos y los que reducen el cambio inicial, se consideran negativos. Algunos de los procesos inician realimentaciones de signo opuesto simultáneamente.

Los tiempos característicos de respuesta son muy diferentes y se consideran "lentos", cuando van de decenios a miles de años, y "rápidos" cuando van desde los pocos años hasta la respuesta casi instantánea.

**Cuadro 1:** Procesos importantes de realimentación:

* Aumento de la evaporación	+	Rápido
* Nubosidad	+/-	Rápido
* Cubiertas de hielo y nieve	+	Lento/Rápido
* Vegetación	+/-	Lento
* Ciclo del carbono	+/-	Lento

Estas características de los procesos (o de los modelos que los simulan) que modifican la respuesta inicial y la reducen o amplifican, se engloban bajo el concepto de "sensibilidad" del sistema, y en el caso más simple coincide con el parámetro  $\lambda$  anterior.

Según las mejores estimaciones actuales de los efectos de la nubosidad y de otras fuentes de incertidumbre menores, las realimentaciones amplifican la señal de calentamiento inicial de 1,2°C hasta valores comprendidos entre 1,5°C y 4,5°C

Recientemente se han realizado cálculos con modelos para comprobar si la sensibilidad depende de la forma y magnitud de las distribuciones de los forzamientos, así como para comprobar su relación con la forma de combinarse los gases para producir un forzamiento determinado. Los resultados a escalas de un siglo, indican que puede considerarse constante sin cometer errores superiores al 10% en la estimación de las respuestas a forzamientos. Esto significa que la respuesta de la temperatura media mundial es aproximadamente proporcional al forzamiento medio mundial de efecto de invernadero. Algo más complejo es el problema cuando se consideran efectos regionales o forzamientos globales que incluyen fuentes de forzamiento de distinta naturaleza (como los aerosoles o los del ozono estratosférico).

La complejidad de la simulación del sistema climático, proviene de la gran cantidad de escalas de movimiento simultáneo que se producen en la atmósfera, de las retroalimentaciones de signo y magnitud diferentes que se producen, y de la forma en que crecen muchas de las perturbaciones regionales, con gran rapidez, destruyendo los estados medios, hasta que su acción es contrarrestada por otra retroalimentación de signo opuesto.

Podemos decir, en síntesis, que todo nuestro conocimiento y toda nuestra incertidumbre se refleja en el valor estimado del parámetro de sensibilidad real, que acotamos entre 1,5°C y 4,5°C mediante modelos y que tiene valores similares si utilizamos la sensibilidad real observada en diferentes eventos climáticos conocidos en el pasado.

## **LA OBTENCIÓN DE ESCENARIOS FUTUROS DE EMISIONES**

No predecimos el clima en el mismo sentido determinista que se predice el tiempo. El tiempo que predecimos, con mayor o menor grado de acierto, es el que realmente hará, y está determinado por las condiciones iniciales de la predicción y por las condiciones locales que modifican la circulación general.

En sentido estricto no podemos hablar de predicción del clima, sino de "escenarios" del clima como respuesta a unas condiciones externas, que conocemos como de condiciones contorno. Es un estado promediado en el tiempo. Es el clima más probable asociado a un escenario de emisiones de gases de invernadero o asociado a un forzamiento predefinido cualquiera. Si ese escenario no se produce, no debemos esperar ese clima. Planteado así el problema, lo que buscamos es conocer la respuesta del clima a cada escenario de "humanidad" posible en el siglo XXI y esto último significa, al menos, conocer los escenarios futuros de emisión.

Para tener una visión de conjunto de lo que lleva desde uno a otro escenario, es necesario comprender que existe un “encadenamiento” de escenarios intermedios, que introduce incertidumbres y problemas propios en cada paso:

**Escenarios de cambio de :**

Emisiones → Concentraciones → Forzamientos radiativos →  
Temperatura → Nivel del mar, precipitación,.... → Impactos y riesgos

Los escenarios de *emisiones* se basan en conjuntos de hipótesis sobre crecimiento demográfico, crecimiento de la economía mundial, evolución de las tecnologías y modelo energético de consumo. Basicamente, estamos ante tres variables socioeconómicas: población, desarrollo económico y consumo de energía.

Los escenarios de *concentraciones* se basan en el conocimiento actual y en los modelos asociados de los ciclos del carbono y otros ciclos biogeoquímicos. El paso de las *emisiones a las concentraciones* lo determina el conocimiento y la modelización del ciclo del carbono.

Los escenarios de *forzamientos* tienen su incertidumbre muy acotada. Su calidad depende de la calidad del escenario de emisiones/concentraciones. El paso de *concentraciones a forzamientos* radiativos es un paso relativamente sencillo, basa en relaciones bien establecidas y generalmente lineales, aunque no exento de alguna dificultad en cuanto a sus efectos indirectos.

Finalmente los escenarios de *temperaturas y otras variables climáticas*, se construyen mediante los modelos climáticos y, a partir de sus salidas, se estudia el impacto del cambio de clima en cada sector o en cada sistema de interés. Este último paso, *de escenarios de forzamientos a escenarios climáticos*, se realiza de forma externa a los modelos salvo en los modelos más recientes y complejos, en los que se ha comenzado a obtener directamente a partir de la evolución de las concentraciones de gases y de la carga futura estimada de aerosoles sulfurosos, como parte del modelo mismo.

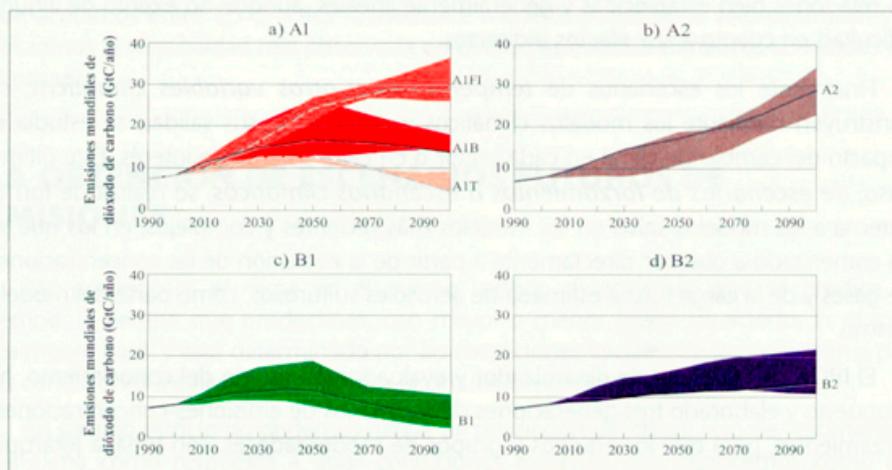
El IPCC, en su papel de dinamizador y evaluador del estado del conocimiento, ha propuesto y elaborado tres generaciones de escenarios de emisiones-concentraciones-forzamientos, para que los equipos y grupos de modelizadores, con toda la jerarquía de modelos disponibles, construyan escenarios climáticos.

Los dos primeros se formularon en 1990 y 1992 y se utilizaron con profusión hasta 2000 como base para los experimentos de modelización. Los cuatro escenarios A,B,C,D de 1990, dieron paso a los seis escenarios IS92 de 1992, singularizados con las letras a,b,c,d,e,f, que a su vez fueron la base de una segunda generación de experimentos climáticos, entre los que destacan los del Centro Hadley conocidos como HadCM2.

En 1996, se inició la elaboración de una nueva generación de escenarios superando defectos de los anteriores, que vieron la luz en 1998. Durante dos años se han probado y en 2000, pasaron a ser la propuesta oficial del IPCC, vigente en la actualidad y contenida en el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones (IE-EE en español y SRES en inglés) y en el Tercer Informe de Evaluación publicado en 2001.

Esta última generación SRES (IE-EE en español) de escenarios de emisiones de gases de invernadero, se han obtenido a partir de conjuntos de hipótesis de población, consumo y desarrollo económico mundial. Existe un escenario para cada uno de los gases de invernadero incluidos en el Protocolo de Kioto y para los principales contaminantes atmosféricos convencionales. En total, se han establecido un conjunto de 40 escenarios estructurados en cuatro grandes familias, A1, A2, B1 y B2, una de las cuales considera a su vez tres subgrupos, A1FI, A1B y A1T, que distinguen, respectivamente, escenarios basados en energías procedentes del uso intensivo de combustibles *fósiles (FI)*; en energías basadas en el desarrollo de *tecnologías (T)* y en soluciones de equilibrio o *balance(B)*, para obtener energías renovables. Esta es la forma de soslayar nuestro desconocimiento de cómo será el mundo al terminar este siglo XXI.

**Fig 6** – Escenarios de emisiones del IPCC: SRES.2000  
(SRES = IE-EE en español: Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones)



**Figura 3:** Emisiones anuales totales de CO<sub>2</sub> provenientes de todas las fuentes (energía, industria y cambio de uso de las tierras) entre 1990 y 2100 (en gigatoneladas de carbono (GtC/año) para las familias y los seis grupos de escenarios. Los 40 escenarios IE-EE aparecen clasificado s en función de las familias (A1, A2, B1 y B2) y de los seis grupos de escenarios: el A1FI, de utilización intensiva de combustibles de origen fósil (que incluye los escenarios de alto nivel de carbón y de alto nivel de petróleo y gas), el A1T, de combustibles predominantemente no de origen fósil, el A1B, equilibrado, de la Figura 3a; el A2 de la Figura 3b; el B1 de la Figura 3c, y el B2 de la Figura 3d. Cada franja de emisiones coloreada indica el repertorio de escenarios armonizados y no armonizados dentro de cada grupo. Se ofrece un escenario ilustrativo para cada uno de los seis grupos de escenarios, incluidos los cuatro de referencia (A1, A2, B1 y B2, en líneas de trazo continuo), y dos escenarios ilustrativos para A1FI y A1T (líneas de trazos).

Los escenarios A1 y B1, tienen en común las evoluciones demográficas, que alcanzan su máximo hacia mediados de siglo, superando los 7.000 millones de habitantes. En A1 se tiende a la disminución de las diferencias regionales y hay una alta convergencia en los modos de vida, consumo y PIB por persona. Los tres subgrupos considerados difieren en las tecnologías energéticas utilizadas. En B1 predominan los criterios ambientales sobre los económicos, e imagina un mundo globalizado donde los valores regionales y locales tienen un gran peso, para que el desarrollo mundial siga pautas de sostenibilidad. Los escenarios A2 describen un mundo heterogéneo, con aumentos de la población hasta alcanzar los 15.000 millones de habitantes. El cambio tecnológico es fragmentado y lento. Se mantienen los hábitos locales y se converge lentamente en los modos de vida. Los escenarios B2 combinan un crecimiento intermedio de la población, hasta alcanzar los 10.000 millones de habitantes, con un alto desarrollo tecnológico de las opciones sostenibles económicas y energéticas. Priman en ellos las soluciones regionales y ambientales.

En todos ellos, no obstante, los valores finales de emisiones son muy altos, aunque facilitan la visión de lo diferente que puede ser nuestro mundo futuro según las decisiones que adoptemos consciente o inconscientemente.

## LOS ESCENARIOS DE CLIMA FUTURO HASTA 2100

Los escenarios de emisiones descritos, han sido la base para la elaboración de los dos últimos Informes de Evaluación del IPCC, de 2001 y 2007.

A partir de un conjunto de modelos simples con sensibilidades diferentes, establecidas a partir de modelos más complejos, los escenarios climáticos obtenidos muestran aumentos de la temperatura atmosférica global de superficie para el 2100, entre 1,4°C y 5,8°C en el informe de 2001 y entre 1,1°C y 6,2°C en el informe de 2007.

Por otra parte, lo más importante es retener, como dato más actualizado, que el intervalo de valores más probable, lo que se denomina "mejor estimación" indica un calentamiento entre 1,8°C y 4,0°C.

En realidad la evaluación ha cambiado muy poco y las variaciones anteriores se deben más bien a que las referencias del cambio no son las mismas: en 2001 la referencia de los cambios para 2100 se establecía en relación a 1990. Ahora se toma como referencia la veintena final de los años 1980-1999 del siglo XX, y se evalúa el cambio para los diez años 2090 a 2099, de finales del siglo XXI.

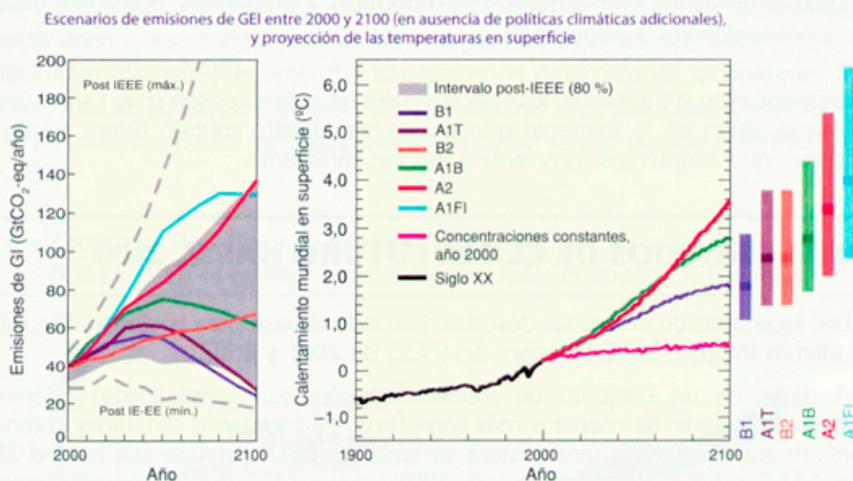
Para el nivel del mar, que en el informe de 2001 estimaba aumentos entre 8 y 90 cm, en el informe de 2007 se han introducido los cambios de referencias antes citados, y además se han excluido los cambios dinámicos rápidos futuros del flujo de hielos. Esto reduce la magnitud aparente de la evaluación de 2007 con respecto a la de 2001, y los valores se sitúan entre 18 cm y 59 cm.

Los resultados finales, que pueden observarse en las figuras, resumen gráficamente la forma en que el IPCC se ha enfrentado al problema de las incertidumbres.

Por una parte la incertidumbre relativa a cómo será realmente nuestro mundo "emisor", a lo largo de las próximas décadas, se trata mediante los escenarios descritos que nacen de suponer las hipótesis más verosímiles. Esta es la incertidumbre que podemos reducir, porque depende de nuestra actuación en energía, economía y población.

Por otra parte la incertidumbre científica propiamente dicha, acerca del valor verdadero que tendrá la sensibilidad final del sistema ante los forzamientos reales, se acota con la utilización de varios modelos climáticos con enfoques diversos. Las respuestas de estos modelos diferentes se representa en el gráfico mediante las barras situadas en el lateral derecho de los escenarios elaborados.

**Fig 7 – Escenarios de aumento de la temperatura para escenarios SRES**



**Figura RRP-5. Gráfica izquierda:** Emisiones mundiales de GEI (CO<sub>2</sub>-eq) en ausencia de políticas climáticas: seis escenarios testimoniales IEEE ilustrativos (líneas de color), junto con el percentilo 80 de escenarios recientes publicados desde el IEEE (post IEEE) (área sombreada en gris). Las líneas de trazos representan la totalidad de los escenarios post IEEE. Las emisiones abarcan los gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y F. **Gráfica derecha:** las líneas continuas representan promedios mundiales multimodelo del calentamiento en superficie para los escenarios A2, A1B y B1, representados como continuación de las simulaciones del siglo XX. Estas proyecciones reflejan también las emisiones de GEI y aerosoles de corta permanencia. La línea rosa no es un escenario, sino que corresponde a simulaciones de MCGAO en que las concentraciones atmosféricas se mantienen constantes en los valores del año 2000. Las barras de la derecha indican la estimación óptima (línea continua dentro de cada barra) y el intervalo probable evaluado para los seis escenarios testimoniales IEEE en el período 2090-2099. Todas las temperaturas corresponden al período 1980-1999. [Figura 3.1, Figura 3.2]

\*Los escenarios de emisiones IEEE están explicados en el Recuadro 'Escenarios IEEE' del presente informe. Estos escenarios no contemplan políticas climáticas adicionales a las ya existentes; estudios más recientes difieren con respecto a la inclusión de la CMCC y del Protocolo de Kyoto.

\*Las trayectorias de emisión de los escenarios de mitigación se abordan en la Sección 5.

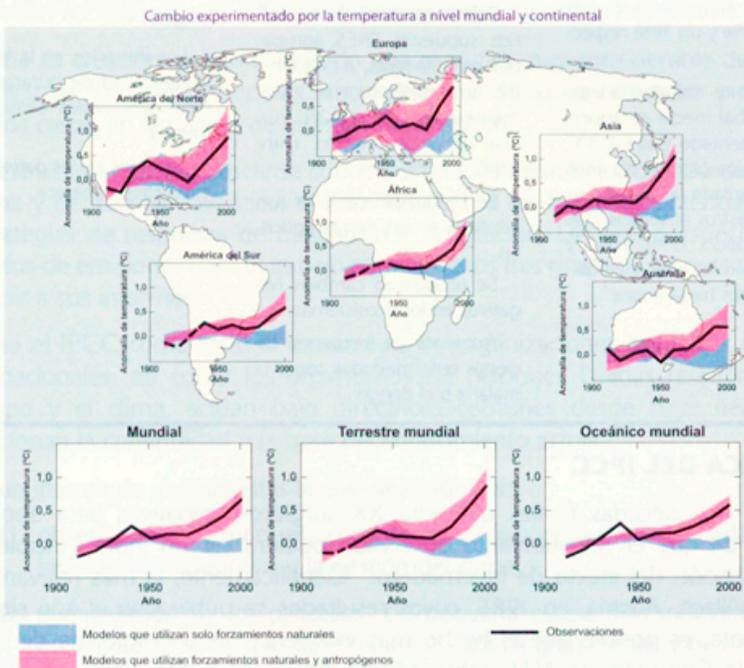
Una de las estrategias de evaluación mediante modelos, ha realizado experimentos separados con forzamientos radiativos naturales (solar y volcánico) y con forzamientos radiativos totales, que incluyen los naturales y los de efecto de invernadero intensificado. La figura 7, resume los resultados globales y regionales, que surgen de estos experimentos y los compara con la temperatura observada hasta 2000.

Se observa en ellos, que hacia los años 60-70, se los forzamientos responsables del calentamiento fueron en lo fundamental solares. Sin embargo, a partir de esa fecha los forzamientos antropogénicos son dominantes.

Estos experimentos justifican tres hechos que a veces se presentan como contrapuestos:

- El Sol ha sido el responsable principal del calentamiento hasta los años 40
- La compensación de forzamientos ha sido la causa de la estabilización del clima entre los años 40 y 70
- La intensificación del efecto invernadero alcanzada en los años 70 y posteriores es la responsable más importante, de más del 70%, del calentamiento reciente observado.

**Fig 8** – Observaciones y escenarios globales y continentales con y sin forzamientos antropogénicos



El cuadro 2, resume algunas de las conclusiones más importantes del IPCC en sus informes, acerca del estado actual del conocimiento relativo al cambio climático.

**Cuadro 2:** El estado del conocimiento del cambio climático (IPCC)

<b>Sabemos que</b>	<b>Es probable que</b>	<b>Conocimientos limitados sobre</b>
<p>Existe un "efecto de invernadero" debido a la presencia de nubes y de gases radiativamente activos, absorbentes de la radiación infrarroja, en la atmósfera. Los más importantes son el vapor de agua, el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso, el ozono y diversas familias de compuestos fluorados.</p>	<p>Las emisiones antropogénicas de gases de invernadero hayan contribuido significativamente a los cambios observados en el último tercio del siglo XX</p>	<p>Los cambios abruptos o de gran escala como los que se han producido en otras épocas de la historia del planeta. Aunque sabemos acerca del desarrollo de estos cambios.</p>
<p>Desde la época preindustrial las concentraciones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O han aumentado en un 37%, un 157% y un 19% respectivamente</p>	<p>Con crecimientos de las emisiones distribuidos según 6 familias de escenarios socioeconómicos y demográficos esperamos que para el año 2100:</p>	<p>Los patrones de los cambios regionales y sus impactos</p>
<p>En los últimos 100 años la temperatura global media en superficie ha aumentado entre 0,3°C y 0,7°C. En los últimos 20 años se han acumulado la mayor parte de los registros absolutos más altos del período. 1998, 2005 y 2007 han sido los años más cálidos registrados hasta ahora.</p>	<p>Para el conjunto de escenarios supuestos, SRES, agrupados en 4 familias, A1,A2,B1 y B2, la temperatura se incrementa entre 1, 1 y 6,2°C con una mejor estimación entre 1,8°C y 4.0°C</p>	<p>Las realimentaciones relacionadas con la formación de nubes y con la humedad atmosférica</p>
	<p>Se produzcan cambios con pérdidas en las tierras agrícolas</p>	<p>Los efectos de las manchas solares</p>
	<p>Se produzcan cambios negativos en los ecosistemas</p>	<p>Los impactos en la frecuencia e intensidad de huracanes y en otros fenómenos climáticos extremos</p>
	<p>Aumente la frecuencia de ciertas enfermedades como la malaria o el dengue</p>	<p>Cambios en los patrones de la circulación oceánica</p>

**ACERCA DEL IPCC**

En las dos décadas finales del siglo XX surgieron iniciativas para abordar el problema de que el calentamiento observado pudiera ser un indicio incipiente de la intensificación del efecto de invernadero. Científicamente, la más relevante tuvo lugar en Villach, Austria, en 1985, cuyos resultados se publicaron al año siguiente. Políticamente, es posible que el hecho más influyente fuera el informe de abril de 1987 de la Comisión de N.U. sobre Medio Ambiente y Desarrollo, dirigido por Ms.Brundtland y presentado a la Asamblea General de N.U. Como consecuencia casi inmediata, y en un contexto de numerosas reuniones nacionales e internacionales, científicas y ministeriales, como la Conferencia de Toronto, la Declaración de la Haya y otras muchas, se aprobó la creación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change), como entidad de la Naciones Unidas creada conjuntamente por la OMM y el PNUMA .

Este organismo, que nace en noviembre de 1988, tiene la función de evaluar el estado de los conocimientos sobre el cambio climático de la comunidad científica más especializada. Esto incluye una evaluación de certezas e incertidumbres acerca del conocimiento científico sobre los fundamentos del cambio climático en diversos escenarios de emisiones, de los impactos que produciría cada escenario y de las medidas de limitación de emisiones y de adaptación al cambio. Incluye también la estimación de costes, tanto de adaptación y de limitación, como los derivados de no adoptar medida alguna.

Desde su creación, el IPCC ha producido tres informes de evaluación de referencia, en 1990, 1995 y 2001. Una primera propuesta del informe de 1990, sugería la conveniencia de aprobar una Convención Marco sobre el Cambio Climático, que de hecho se elaboró entre 1990 y 1992, y se presentó y aprobó en la Segunda Conferencia de N.U. sobre Medio Ambiente y Desarrollo, o Cumbre de Río de 1992.

Aprobada la Convención y puesta en vigor en 1994, el IPCC se ha convertido en el principal, aunque no único, organismo asesor científico de la Convención y ejerce este papel con los informes plurianuales y con otros informes específicos que la Convención recaba o que el IPCC, autónomamente, considera necesarios.

Desde su creación se han elaborado una cantidad muy considerable de Informes Técnicos y de Informes Especiales, disponibles en versiones reducidas y completas, según los casos, en la página de Internet [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).

Su estructura esencial descansa sobre tres grupos de trabajo: El I aborda la ciencia del clima y del cambio climático, el II los riesgos de los impactos potenciales y el III las estrategias de respuesta de mitigación y adaptación. Un grupo especial elabora escenarios de emisiones para el trabajo común de los tres grupos y de quienes deseen contribuir a sus informes.

Tanto el IPCC como todo el entramado de organizaciones científicas nacionales e internacionales, así como los organismos de Naciones Unidas relacionadas con el tiempo y el clima, actúan bajo directrices comunes desde hace tiempo, que proporcionan la continuidad y la base del conocimiento actual.

En un intento de síntesis estas líneas de acción son:

- (1) observaciones continuas, comparables, disponibles y adecuadas para la investigación científica y la gestión del clima
- (2) comprensión de los procesos de pequeña escala más influyentes en las escalas superiores, que determinan el clima a gran escala, y de los procesos de gran escala de evolución lenta,
- (3) desarrollo de modelos que nos sirvan como simuladores del clima pasado y como laboratorios virtuales de la realidad en los que realizar experimentos del clima,

- (4) aplicación de nuestros datos y conocimientos a la gestión de los recursos y los sistemas naturales y humanos, y a la consideración del clima mismo como un bien común de la humanidad.

## **CONSIDERACIONES FINALES**

Hasta ahora el IPCC, ha resuelto los conflictos científicos buscando el consenso como forma de establecer un "estado del arte", ha buscado que estuvieran todas las voces relevantes en su proceso de elaboración y revisión, y ha entendido que si quienes estaban en la posición crítica, no aportaban documentos que hubieran seguido las pautas de publicación habituales, o no se hubieran sometido al proceso común de evaluación por pares, no podían aspirar a que su posición se viese reflejada con igual fuerza que quienes sí lo han hecho.

La información disponible en el mundo científico, es la base de la toma de decisiones de los gobiernos y de la toma de conciencia de cada ciudadano a partir del mejor conocimiento existente. Es un conocimiento que se obtiene con los medios que la sociedad pone en manos de sus científicos y técnicos y que tiene como fines el propio conocimiento, como fin en sí mismo, pero con la finalidad de mejorar el mundo en que vivimos, nuestra propia vida y todo aquello que consideramos el bien común. La mejora de las formas de transmisión a la sociedad deben reforzarse y mejorarse. Hemos superado, en parte, la fase inicial de toma de conciencia y descripción y diagnóstico del problema. Conocemos algunas soluciones, algunos "tratamientos" que son buenos en sí mismos, que convergen con las ideas de sostenibilidad, de eficiencia, de mejor gestión de los recursos naturales limitados. Son medidas intrínsecamente buenas, con independencia del cambio climático. Y por eso mismo no hay ninguna incertidumbre que obliga a retrasarlas. Otras medidas, por el contrario, o son costosas o no están maduras y conviene acelerar su puesta a punto y valorar su coste inmediato. Distinguir, definir y aplicar las mejores estrategias es una responsabilidad de los gobiernos y apoyar en unos casos y presionar en otros, la de cada uno de nosotros.

El cambio climático es, como hemos visto, un riesgo real con resultados potenciales negativos para nuestro bienestar inmediato y para el de generaciones futuras. Las incertidumbres no deberían ser un freno para las políticas de adaptación o para las políticas de limitación de emisiones, porque en su mayor parte las medidas posibles son beneficiosas en sí mismas como opciones que hacen real la idea de desarrollo sostenible. La idea de precaución introducida como fundamento de las negociaciones iniciadas con la aprobación de tres convenciones con contenido ambiental en la Cumbre de Río en 1992 (Cambio Climático, Biodiversidad y Desertificación), suponen un factor de racionalización del desarrollo mundial, que ha sido ampliado en Johannesburgo y en es parte de la actividad actual del IPCC: Las políticas científicas, tecnológicas y socioeconómicas para afrontar riesgos globales ambientales deben integrarse, en la medida de lo posible, en las políticas correspondientes ambientales de alcance

local. Este enfoque no siempre es o será aplicable, debido a la diversidad de escalas temporales y espaciales y a las velocidades de adaptación diferentes para cada sector y a la necesaria inexperiencia con que habrá que afrontar algunas decisiones: pero eso es parte del reto.

En un artículo de 1993, J.W.C.White, alababa la importancia del proyecto GRIP (Greenland Ice-core Project), porque nos proporcionaba información muy valiosa del pasado, entre hace 135.000 y 115.000 años. Su reflexión giraba en torno a la idea de que, quizás, los humanos hemos construido un notable sistema socioeconómico durante el único período en que, probablemente, era posible hacerlo; cuando el clima ha sido lo suficientemente estable como para permitir el desarrollo de una agricultura que mantiene nuestra sociedad. El clima de la Tierra puede cambiar por sí solo de forma brusca y su reflexión final daba título a su breve artículo "Don't touch that dial": "Si la Tierra tuviese un manual de operaciones, en el capítulo del clima podra subrayar que el sistema había sido ajustado en fábrica para un confort óptimo, de forma que *se ruega no tocar el dial*".

## BIBLIOGRAFÍA

- Arrhenius, S., 1896: *"On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground"* Alfsen, K.H., J.S. Fuglestvedt & Tora.Skodvin, 1998: "Climate change: Some elements from the scientific background and the scientific process". CICERO. Oslo.
- Balairón,L., 1998. Escenarios climáticos. En Energía y Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente, Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología, Serie Monografías, Madrid, 39-56.
- BBVA, 2001: El Cambio Climático (Monografía 137). Revista El Campo de las Artes y las Ciencias. Coord.: L.Balairón. Ed. SºEstudios del BBVA.
- Berger, A., 1980. The Milankovitch astronomical theory of palaeoclimates: a modern review. *Vistas in Astronomy*, 24, 102-122.
- Bolin, B., 1994: "Science and Policy Making". *AMBIO*, vol 23, nº1.Feb. Ed.Royal Swedish Ac.of Sciencies.
- Callendar, G.S., 1938: The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. *Quart.J.R.Met.Soc.*64, 223-240
- Gates, W.L., 1992. AMIP: The Atmospheric Model Intercomparison Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 73: 1962-1970.

- Giorgi, F., Mearns L.O., 1991. Approaches to the Simulation of Regional Climate Change. A review. *J.Geophys.Res.*, Vol.29 pp.191-216.
- Grubb, M.J.,1991. What you don't know can hurt you: scale and timing of options in responding to climate change. En Flanery, B.P., Clark R.,(Editors), *Global Climate Change*. Ed. IPIECA, London, U.K.
- Henderson-Sellers, A., McGuffie, K., 1987. *A Climate Modelling Primer*. Ed.J.Wiley&Sons Ltd., (Versión en español: Ed. Omega. Barcelona.1990).
- IPCC.1990: Primer Informe de Evaluación del Cambio Climático-. Ed. MOPT-INM, 1992, Madrid, España.
- IPCC, 1994: *Climate Change, 1994*. Cambridge Press.
- IPCC, 1995: *Second Assessment Report*. Ed J.T. Houghton y otros. Cambridge Press.
- IPCC, 1997: *Informe Técnico III*. Ed. J.T. Houghton y otros.
- IPCC, 1998: *Special Report on Emission Scenarios*. Ed.IPCC
- IPCC, 2001: *Third Assessment Report*. Ed J.T. Houghton y otros. Cambridge Press
- IPCC, 2007: *Fourth Assessment Report*. Versiones PDFdisponibles en: [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).
- U.N., 1992: *Conference on Trade and Development. Combating Global Warming*. Ed.United Nations, N.York, U.S.A.
- White, J.W.C., 1993: "Don't touch the dial". *Nature*, vol.364, p.186.
- WMO nº 913, 2000. *WMO Statement on the status of the Global Climate in 1999*. Geneve, Switzerland.