
RESUMEN PARA RESPONSABLES DE POLÍTICAS:

LA CIENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

GRUPO DE TRABAJO I DEL IPCC

RESUMEN PARA RESPONSABLES DE POLÍTICAS: LA CIENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Desde 1990, se han hecho grandes adelantos en la comprensión de la ciencia del cambio climático¹ y se están obteniendo nuevos datos y análisis.

1. SIGUEN AUMENTANDO LAS CONCENTRACIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Las concentraciones de gases de efecto invernadero desde la época preindustrial (es decir, desde 1750 aproximadamente) han producido un *forzamiento radiativo*² positivo del clima que tiende a calentar la superficie y a producir otros cambios climáticos.

- Las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero, entre otros el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) han aumentado mucho, es decir unos 30%, 145% y 15%, respectivamente (valores para 1992). Estas tendencias se pueden atribuir en gran parte a las actividades humanas, sobre todo al uso de combustibles fósiles, al cambio en el ordenamiento de las tierras y a la agricultura.
- Las tasas de crecimiento de las concentraciones de CO₂, CH₄ y N₂O se mantuvieron bajas a principios del decenio de 1990. Si bien, no se puede explicar totalmente esta variación aparentemente natural, los datos recientes indican que las tasas de crecimiento se pueden comparar en la actualidad con las tasas medias del decenio de 1980.
- El forzamiento radiativo directo de los gases de efecto invernadero duraderos (2.45 Wm⁻²) se debe sobre todo a los aumentos de las concentraciones de CO₂ (1.56 Wm⁻²), CH₄ (0.47 Wm⁻²) y N₂O (0.14 Wm⁻²) (valores para 1992).
- Numerosos gases de efecto invernadero permanecen en la atmósfera durante mucho tiempo (desde varios decenios hasta siglos para el CO₂ y el N₂O), por lo tanto afectan el forzamiento radiativo en escalas de tiempo de larga duración.
- El forzamiento radiativo directo debido a los CFC y los HCFC combinados es de 0,25 Wm⁻². Sin embargo, su forzamiento radiativo neto se reduce a 0,1 Wm⁻² porque han ocasionado el agotamiento del ozono estratosférico que produce un forzamiento radiativo negativo.
- La velocidad de aumento de la concentración de CFC, pero no de HCFC, se ha reducido tanto que es casi nula. Se prevé que las concentraciones de CFC y HCFC, y el resultante agotamiento del ozono, disminuirán considerablemente para 2050 gracias a la puesta en práctica del Protocolo de Montreal y sus enmiendas y ajustes.
- En la actualidad, varios gases de efecto invernadero duraderos (en especial el HFC (un sustituto del CFC), el PFC y el SF₆) contribuyen poco al forzamiento radiativo, pero su crecimiento previsto podría contribuir en varios puntos porcentuales al forzamiento radiativo en el siglo XXI.
- Si las emisiones de dióxido de carbono se mantienen a niveles parecidos a los actuales (1994), se producirá una tasa de crecimiento casi constante de las concentraciones atmosféricas durante, al menos, dos siglos, y se alcanzarían unos 500 ppmv para fines del siglo XXI (aproximadamente el doble de la concentración de la época preindustrial que era de 280 ppmv).
- Una serie de modelos del ciclo del carbono indica que se podría alcanzar la estabilización de las concentraciones atmosféricas de CO₂ en 450, 650 ó 1000 ppmv sólo si las emisiones mundiales antropogénicas de CO₂ descienden a los niveles de 1990, en unos 40, 110 ó 240 años a partir del presente, respectivamente, y si a la postre disminuyen hasta alcanzar niveles inferiores a los del decenio de 1990.
- Cualquier posible estabilización de la concentración depende más de las emisiones antropogénicas acumuladas de CO₂ desde el presente hasta que se alcance la estabilización que de la manera en que esas emisiones cambien en el período. Esto significa que, para un valor dado de concentración estabilizada, mayores emisiones en los primeros decenios precisan menores emisiones posteriormente. En la serie de casos de estabilización estudiados, la estabilización a 450, 650 ó 1000 ppmv de emisiones antropogénicas acumuladas en el período de 1991 a 2100 se situaba en 630 GtC³, 1080 GtC, y 1410 GtC, respectivamente (± el 15% en cada caso). A efectos de comparación, las emisiones correspondientes acumuladas de los escenarios IS92 del IPCC varían entre 770 y 2190 GtC.
- La estabilización de las concentraciones de CH₄ y N₂O a los niveles actuales supone reducciones de emisiones antropogénicas del 8% y más del 50%, respectivamente.
- Hay indicios de que las concentraciones del ozono troposférico en el hemisferio norte han aumentado desde la época preindustrial debido a las actividades humanas, y de que han producido un forzamiento radiativo positivo. Este forzamiento todavía no está bien definido, pero se estima que es de unos 0,4 Wm⁻² (15% del cual se debe a los gases de efecto invernadero duraderos). Sin embargo, las observaciones de los últimos decenios muestran que la tendencia ascendente ha disminuido o se ha detenido.

¹ El Grupo de Trabajo I del IPCC se refiere al cambio climático como a cualquier cambio climático en el tiempo debido a la variabilidad natural o como resultado de las actividades humanas. Éste difiere del uso que se da en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC) que se refiere al cambio climático atribuido directa o indirectamente a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera global, además de la variabilidad natural del clima en períodos de tiempo comparables.

² Indica la importancia de un mecanismo potencial del cambio climático. El forzamiento radiativo es la perturbación del balance energético del sistema atmósfera-Tierra (en vatios por metro cuadrado [Wm⁻²]).

³ 1 GtC = Gigatonelada de dióxido de carbono, es decir mil millones de toneladas de carbono.

2. LOS AEROSOLES ANTROPÓGENOS TIENDEN A PRODUCIR FORZAMIENTOS RADIATIVOS NEGATIVOS

- Los aerosoles troposféricos (partículas microscópicas transportadas por el aire) que resultan de la combustión de combustibles fósiles, de la combustión de la biomasa y de otras fuentes, han dado lugar a un forzamiento negativo directo de unos $0,5 \text{ Wm}^{-2}$, como media mundial, y es posible que también sean la causa de un forzamiento negativo indirecto de la misma magnitud. Si bien el forzamiento negativo se centra en determinadas regiones y zonas subcontinentales, puede afectar los esquemas climáticos a escala continental o hemisférica.
- A nivel local, el forzamiento debido a los aerosoles puede ser lo suficientemente grande como para considerarlo más que una simple compensación del forzamiento positivo producido por los gases de efecto invernadero.
- Los aerosoles antropógenos, a diferencia de los gases de efecto invernadero duraderos, tienen poca duración en la atmósfera, por lo tanto su forzamiento radiativo se ajusta muy rápido a los aumentos y reducciones de las emisiones.

3. EL CLIMA HA CAMBIADO EN EL ÚLTIMO SIGLO

El tiempo puede variar mucho, año tras año, en cualquier lugar, pero los análisis de los datos meteorológicos y de otros tipos correspondientes a zonas extensas y durante períodos de varios decenios o más han dado pruebas de la existencia de cambios sistemáticos importantes.

- La temperatura media mundial de la superficie ha aumentado entre unos $0,3$ y $0,6^\circ\text{C}$ desde fines del siglo XIX. Los datos adicionales obtenidos desde 1990 y los análisis que se han vuelto a realizar desde entonces no alteran de forma significativa el rango del aumento estimado.
- Los últimos años han sido de los más cálidos desde 1860, es decir en el período de registro instrumental, a pesar del efecto de enfriamiento de 1991 producido por la erupción volcánica del Monte Pinatubo.
- Las temperaturas nocturnas sobre tierra en general han aumentado más que las temperaturas diurnas.
- Los cambios regionales son también evidentes. Por ejemplo, el reciente calentamiento ha sido mayor sobre los continentes de latitud media en invierno y en primavera, con algunas zonas de enfriamiento, como el Atlántico Norte. Las precipitaciones han aumentado sobre tierra en latitudes altas del hemisferio norte, sobre todo durante la estación fría.
- El nivel mundial del mar ha aumentado entre 10 y 25 cm en los últimos 100 años y gran parte de ese aumento está relacionado con el incremento de la temperatura media mundial.
- No se dispone de los datos adecuados para determinar si, a nivel mundial, se han producido cambios duraderos, a lo largo del siglo XX, en la variabilidad climática o en los valores extremos de las variables meteorológicas. A nivel regional hay indicios claros de cambios en algunos valores extremos así como en indicadores de la

variabilidad climática (por ejemplo, menos heladas en varias zonas extensas, aumento en la proporción de lluvias debidas a fenómenos extremos en Estados contiguos de Estados Unidos). Varios de esos cambios se han producido en el sentido del aumento de la variabilidad. En otros casos lo que ha habido es un descenso de ella.

- Entre 1990 y mediados de 1995, la fase de calentamiento constante del fenómeno *El Niño-Oscilación Austral* (que causa sequías e inundaciones en numerosas zonas) fue excepcional respecto a la acostumbrada en los últimos 120 años.

4. EL BALANCE DE LAS PRUEBAS SUGIERE UNA INFLUENCIA HUMANA PERCEPTIBLE EN EL CLIMA MUNDIAL

Cualquier efecto humano sobre el clima se añadirá al “ruido” de fondo de la variabilidad climática natural, que resulta de las fluctuaciones internas y de las causas externas como la variabilidad solar o las erupciones volcánicas. El objetivo de los estudios de detección y atribución es distinguir entre las influencias antropogénicas y naturales. La “detección del cambio” es el proceso de mostrar que un cambio climático observado es muy raro desde el punto de vista estadístico, pero no da las razones del cambio. La “atribución” es el proceso de establecer las relaciones de causa y efecto, incluso la comprobación de las diversas hipótesis que se propongan.

Desde el Informe del IPCC (1990), se han hecho grandes adelantos para tratar de distinguir entre las influencias naturales y las antropogénicas en el clima. Este progreso se ha logrado al incluir los efectos de los aerosoles sulfatados, además de los gases de efecto invernadero, obteniéndose así estimaciones más reales del forzamiento radiativo debido a las actividades humanas. Estas estimaciones se han utilizado en modelos climáticos para lograr simulaciones más completas de la ‘señal’ del cambio climático debido a actividades humanas. Asimismo, nuevas simulaciones con modelos acoplados atmósfera-oceano han proporcionado información importante sobre la variabilidad climática interna natural en una escala temporal desde decenios hasta siglos. Otra área importante de progreso a partir de ahora es el cambio de enfoque que pasa del estudio de los cambios medios a nivel mundial a las comparaciones entre las estructuras espaciales y temporales del cambio que se observan y aquellas que resultan de los modelos climáticos.

Los resultados más importantes relativos a las esferas de detección y atribución son:

- Las limitadas pruebas disponibles de indicadores climáticos sugieren que la temperatura media mundial del siglo XX es, al menos, tan cálida como la de cualquier otro siglo a partir de 1400 A.C. Los datos anteriores a este siglo son muy escasos para poder obtener una estimación fiable de la temperatura media mundial.
- En las evaluaciones del significado estadístico de la tendencia observada de la temperatura media mundial durante el último siglo se han utilizado una variedad de nuevas estimaciones de la variabilidad natural interna así como la forzada por factores externos. Esas estimaciones se derivan de datos instrumentales, paleodatos, modelos climáticos sencillos y complejos, y modelos estadísticos adaptados a las observaciones. La mayoría de esos estudios ha detectado un cambio importante y muestra que es probable

- que la tendencia del calentamiento observado no sea totalmente de origen natural.
- Pruebas recientes más convincentes que atribuyen a las actividades humanas un efecto sobre el clima surgen de estudios basados en esquemas, en los cuales la respuesta climática que dan los modelos cuando en ellos se tiene en cuenta tanto el forzamiento de los gases de efecto invernadero como el de los aerosoles sulfatados antropógenos se compara con esquemas geográficos, estacionales y verticales observados de la variación de la temperatura atmosférica. Esos estudios muestran que las correspondencias de dichos esquemas aumentan con el tiempo, como podría esperarse dado que la señal antropogénica aumenta en fuerza. Además, es muy poco probable que esas correspondencias puedan ocurrir por casualidad como resultado sólo de una variabilidad interna natural. Los esquemas verticales del cambio también son incompatibles con los previstos para un forzamiento solar o volcánico.
 - Nuestra capacidad para cuantificar la influencia humana en el clima mundial está limitada actualmente porque la señal prevista apenas está surgiendo del ruido de la variabilidad natural, y porque existen incertidumbres en factores clave. Entre estos se incluyen la magnitud y los patrones de la variabilidad natural a largo plazo, así como el forzamiento que evoluciona con el tiempo, y la respuesta, a causa de los cambios en las concentraciones de gases de efecto invernadero y los aerosoles, y los cambios en la superficie terrestre. Sin embargo, el balance de las pruebas sugiere que existe una influencia humana perceptible en el cambio mundial.

5. SE PREVÉ QUE EL CLIMA SEGUIRÁ CAMBIANDO EN EL FUTURO

El IPCC ha elaborado una serie de escenarios (IS92a-f) de las futuras emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles precursores basándose en hipótesis relativas al crecimiento de la población y la economía, el ordenamiento de las tierras, los cambios tecnológicos, la disponibilidad de energía y la mezcla de combustibles en el período entre 1990 y 2100. Al comprender el ciclo mundial del carbono y la química atmosférica, se pueden utilizar estas emisiones para proyectar concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero y aerosoles y la perturbación del forzamiento radiativo natural. Los modelos climáticos pueden utilizarse para desarrollar proyecciones del clima futuro.

- El creciente realismo de las simulaciones del clima actual y pasado de modelos climáticos acoplados atmósfera-océano ha aumentado la confianza en su uso para la proyección del futuro cambio climático. Persisten algunas incertidumbres importantes, pero se han tomado en cuenta en toda la gama de proyecciones del cambio de la temperatura media mundial y del nivel del mar.
- Para el escenario intermedio de emisiones del IPCC (IS92a), tomando el valor “óptimo” de la sensibilidad climática⁴ e incluyendo los efectos de futuros aumentos de aerosoles, los modelos prevén un aumento de la temperatura media de la superficie mundial, con relación a 1990, de 2°C para el año 2100. Esta estimación es casi un tercio inferior a la “estimación óptima” de 1990. Ello se debe, sobre todo, a escenarios en los que las emisiones son más bajas (en particular del CO₂ y los CFC), la inclusión del efecto de enfriamiento de los aerosoles de sulfato, y a las mejoras en el tratamiento del ciclo del carbono. Combinando el escenario del IPCC con menores emisiones (IS92c) con un valor “bajo” de la sensibilidad climática e incluyendo los efectos de cambios futuros en las concentraciones de aerosoles se obtiene un aumento proyectado de aproximadamente 1°C para el año 2100. La proyección correspondiente para el escenario óptimo del IPCC (IS92e) combinado con un valor “alto” de la sensibilidad climática da un calentamiento de unos 3,5°C. En todos los casos, la tasa media de calentamiento probablemente será mayor que cualquiera que se haya registrado en los últimos 10 000 años, pero los cambios reales anuales y decenales incluirían una importante variabilidad natural. Los cambios regionales de la temperatura podrían diferir mucho del valor medio mundial. Debido a la inercia térmica de los océanos, sólo el 50-90% del posible cambio en el equilibrio de la temperatura se producirá en 2100 y esta seguirá aumentando más allá de 2100, incluso si las concentraciones de gases de efecto invernadero se estabilizan para ese año.
- Se prevé que el nivel medio del mar aumente como resultado de la expansión térmica de los océanos y la fusión de los hielos y glaciares. Para el escenario IS92a, tomando los valores de la “estimación óptima” de las sensibilidades climática y de fusión del hielo al calentamiento, e incluyendo los efectos de cambios futuros en los aerosoles, los modelos prevén un aumento del nivel del mar de unos 50 cm desde el presente hasta el año 2100. Esta estimación es aproximadamente 25% inferior a la “estimación óptima” de 1990 debido a la proyección de temperatura inferior, pero también refleja mejoras en los modelos climáticos y de fusión del hielo. Combinando el escenario de la emisión inferior (IS92c) con las sensibilidades climáticas y de fusión del hielo “bajas” e incluyendo los efectos de los aerosoles, se prevé un aumento del nivel del mar de unos 15 cm desde el presente hasta el 2100. La proyección correspondiente para el escenario de emisión óptima (IS92e) combinado con las sensibilidades climáticas y de fusión del hielo “altas” da un aumento del nivel del mar de 95 cm desde el presente hasta el 2100. El nivel del mar continuará aumentando a un ritmo similar en los siglos posteriores al año 2100, incluso si las concentraciones de gases de efecto invernadero se estabilizan para ese entonces, y continuará aumentando incluso después de que se establezca la temperatura media mundial. Los cambios regionales del nivel del mar pueden diferir del valor medio mundial debido a un movimiento de las tierras y a los actuales cambios oceánicos.
- Se tiene más confianza en las proyecciones a escala hemisférica y continental de modelos climáticos acoplados atmósfera-océano que en las proyecciones regionales, para los que la confianza sigue siendo baja. Asimismo, se tiene más confianza en las proyecciones de temperatura que en los cambios hidrológicos.

⁴ En los informes del IPCC, la sensibilidad climática se refiere generalmente al cambio a largo plazo (equilibrio) en la temperatura media mundial de la superficie tras la duplicación de la concentración del equivalente atmosférico de CO₂. De manera más general, se refiere al cambio del equilibrio en la temperatura del aire de la superficie tras un cambio de una unidad en el forzamiento radiativo (°C/Wm⁻²).

- Todos los modelos de simulación, que se fuercen con aumentos de concentraciones de gases de efecto invernadero y aerosoles o sólo con aumentos de concentraciones de gases de efecto invernadero, muestran un mayor calentamiento en la superficie de la tierra que en el mar en invierno, un calentamiento máximo en la superficie en las altas latitudes del norte en invierno, un pequeño calentamiento de la superficie en el Ártico en verano, un ciclo hídrico medio mundial más intenso, y una mayor precipitación y humedad del suelo en altas latitudes en invierno. Todos esos cambios están asociados con mecanismos físicos identificables.
- Por otra parte, la mayoría de las simulaciones muestran una reducción en la fuerza de la circulación termohalina del Atlántico Norte y una reducción generalizada en el rango de variación diurna de las temperaturas. Estas características también pueden explicarse en términos de mecanismos físicos identificables.
- Los efectos directos e indirectos de los aerosoles antropógenos tienen un importante efecto en las proyecciones. En general, las magnitudes de los cambios de temperatura y precipitación son más pequeñas cuando se representan los efectos de los aerosoles, sobre todo en las latitudes medias septentrionales. Cabe señalar que el efecto de enfriamiento de los aerosoles no es simplemente contrarrestar el calentamiento producido por los gases de efecto invernadero, sino que tienen también un efecto importante en algunos esquemas de cambio climático continentales, sobre todo en el hemisferio de verano. Por ejemplo, los modelos que sólo tienen en cuenta el impacto de los gases de efecto invernadero en general proyectan un aumento en la precipitación y en la humedad del suelo en las regiones asiáticas afectadas por los monzones de verano, mientras que los modelos que incluyen, además, varios efectos de los aerosoles sugieren que las precipitaciones monzónicas disminuirán. La distribución espacial y temporal de aerosoles influirá mucho en las proyecciones regionales que son, por lo tanto, menos seguras.
- Se prevé un calentamiento general que conducirá a un aumento de la ocurrencia de días extremadamente cálidos y una disminución de días extremadamente fríos.
- Las temperaturas más cálidas producirán un ciclo hidrológico más vigoroso; ello se traducirá en perspectivas de sequías y/o inundaciones más severas en algunos lugares y sequías y/o inundaciones menos severas en otros. Varios modelos indican un aumento en la intensidad de las precipitaciones y prevén más episodios de precipitaciones extremas. El conocimiento actual es insuficiente para decir si habrán cambios que incidirán en la ocurrencia o la distribución geográfica de fenómenos tormentosos intensos, por ejemplo ciclones tropicales.
- Un cambio climático rápido sostenido podría cambiar el equilibrio competitivo entre las especies e incluso ocasionar la extinción paulatina de los bosques, alterando la absorción terrestre y liberando carbono. Se desconoce la magnitud, pero podría ser entre cero y 200 GtC en uno o dos siglos, dependiendo de la tasa de cambio climático.

6. TODAVÍA EXISTEN MUCHAS INCERTIDUMBRES

Numerosos factores limitan actualmente nuestra capacidad de proyectar y detectar el futuro cambio climático. En particular, para reducir las incertidumbres se requiere trabajar más en las siguientes esferas prioritarias:

- estimación de las emisiones futuras y los ciclos biogeoquímicos (incluidos fuentes y sumideros) de los gases de efecto invernadero, aerosoles, y aerosoles precursores y proyecciones de futuras concentraciones y propiedades radiativas;
- representación de procesos climáticos en modelos, en especial interacciones asociadas con las nubes, los océanos, el hielo marino y la vegetación, para mejorar las proyecciones sobre la velocidad y la forma del cambio climático a escala regional;
- recopilación sistemática de observaciones instrumentales y representativas duraderas de variables de sistemas climáticos (por ejemplo, datos solares, componentes atmosféricos del balance energético, ciclo hídrico, características de los océanos y cambios del ecosistema) para probar el modelo, evaluar la variabilidad temporal y regional e identificar y atribuir estudios.

Los grandes y rápidos cambios futuros no previstos del sistema climático (como ha ocurrido en el pasado) son por naturaleza difíciles de predecir. Esto implica que los futuros cambios climáticos pueden también incluir “sorpresas”. En particular, estas surgen de la naturaleza no lineal del sistema climático. En especial, si los sistemas no lineales son rápidamente forzados pueden tener este comportamiento inesperado. Se pueden hacer progresos investigando los procesos no lineales y los subcomponentes del sistema climático. Ejemplos de dicho comportamiento no lineal son los rápidos cambios de circulación en el Atlántico Norte y las interacciones asociadas con los cambios del ecosistema terrestre.