

# Sobre las bases científicas del cambio climático antropogénico

Manuel de Castro

Catedrático de Física de la Tierra. Universidad de Castilla-La Mancha

Aunque se trata de un asunto que aparece con frecuencia en los medios de comunicación, las recurrentes opiniones confrontadas que aún se escuchan parecen apuntar a que una buena parte de la sociedad adolece de bastante desconocimiento sobre los diversos aspectos que componen el complejo asunto del cambio climático. Lo preocupante es que en este escenario de confusión tendrán que cumplirse los acuerdos adoptados en la Cumbre del Clima de París con cambios normativos que repercutirán en sectores socio-económicos. Indudablemente este proceso sería menos traumático si la sociedad dispusiera de una información fidedigna acerca de la naturaleza del problema, sin alarmismos innecesarios ni obcecado negacionismo. En ello deberían desempeñar un protagonismo los científicos dedicados a los diversos aspectos del cambio climático, aunque comprendo su reticencia a cosechar reacciones descalificadoras. Asumiendo el riesgo, me propongo aquí esbozar brevemente los fundamentos físicos del fenómeno, los medios de que dispone la Ciencia para analizarlo y cómo son las herramientas de que disponemos para simular la evolución climática futura.

Por *Cambio Climático* antropogénico se entiende el conjunto de variaciones que experimentan los diversos climas terrestres a causa del sobrecalentamiento de la superficie planetaria inducido esencialmente por la acumulación en la atmósfera de ciertos gases que emitimos al

quemar combustibles fósiles (carbón, derivados del petróleo y gas natural). Como la magnitud de dicho calentamiento no es igual en todas las latitudes, se alteran los patrones de la circulación planetaria de la atmósfera y del océano, y eso acaba afectando a todos los regímenes climáticos de la Tierra, aunque tampoco en la misma medida.

Este es el fundamento de la teoría sobre cuya consistencia la Ciencia ya no alberga dudas razonables, si bien una parte de la sociedad lo contempla todavía como un tema sujeto a controversia, quizá influida por grupos radicalizados de sesgo “negacionista” que tratan de convencer de que aún no se dispone de certezas suficientes. Pero la verdad es que los científicos sabemos bastante del cambio climático, tanto como para comprender en esencia la causa del calentamiento global observado y su repercusión sobre los climas del planeta, así como para implementar modelos matemáticos capaces de simular aceptablemente la relación entre causa y efecto.

## CAUSAS DEL CALENTAMIENTO

¿Cuál es el fundamento físico que liga el **observado** calentamiento global de la superficie terrestre con la **evidente** acumulación en la atmósfera de ciertos gases? Para tratar de contestar esta pregunta habría que empezar por las causas



que podrían dar origen a dicho calentamiento. Como enseña la Física, la temperatura de cualquier materia obedece al balance del calor que intercambia con su entorno, de manera que si gana más calor que pierde, su temperatura aumenta en una cantidad que depende de su capacidad calorífica y crece a un ritmo en función de su inercia térmica. El planeta Tierra, aislado en el espacio, solo puede ganar o perder calor en forma de radiación. Como únicamente gana el que llega del Sol, y todas las observaciones solventes indican que esa ganancia se ha mantenido prácticamente constante en el último siglo con tenues oscilaciones cíclicas, entonces habrá que examinar el calor que pierde globalmente.

Recurriendo de nuevo a la Física, la magnitud del flujo de calor que emite la Tierra en forma de radiación infrarroja hacia el espacio depen-

de del promedio global de la temperatura de emisión terrestre. Basándose en esto, se determina que tal temperatura debe ser de  $-18^{\circ}\text{C}$  para que haya equilibrio entre ganancia y pérdida. Pero sabemos que la temperatura media global de la superficie terrestre es de unos  $15^{\circ}\text{C}$  (o sea,  $33^{\circ}\text{C}$  más). Luego, resulta obvio que no todo el calor infrarrojo que se desprende de la superficie terrestre escapa al espacio exterior.

Esto se debe a que ciertos gases (vapor de agua, dióxido de carbono, metano, y otros), presentes de forma natural en la atmósfera, determinan que ésta actúe de forma semejante a un enorme invernadero. Como bien sabemos, el recubrimiento de cristal de un invernadero deja entrar una gran parte de la radiación solar incidente, que calienta su interior pero no permite que escape todo ese calor atrapado. Así se consigue

La Tierra únicamente gana el calor que le llega del Sol. Foto: Álvaro López.

La concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha crecido desde el siglo XVIII más de un 40%, pasando de unos 278 ppm a una cifra cercana a 400 ppm en la actualidad. Además hay consistentes análisis paleológicos señalando que la actual concentración es la más elevada de los últimos 800 000 años, al menos

mantener una diferencia entre la temperatura interna del invernadero y la de la cara externa del cristal que lo recubre (33°C en el “invernadero atmosférico”). Es decir, que esos gases atmosféricos vendrían a cumplir la función del recubrimiento de cristal, dicho sea esto con las salvedades inherentes a una analogía tan simple. Y, obviamente, de la misma manera que aumentaría la temperatura interior del invernadero si se instalara una cristalera doble o triple, así lo haría la temperatura de la superficie terrestre en el caso de que creciera la concentración de alguno de tales gases atmosféricos. Además, como esto obedece a leyes físicas, resolviendo ecuaciones matemáticas podría calcularse cuanto calentamiento adicional induciría un incremento cualquiera de esos gases en la atmósfera.

Por otro lado se dispone de evidencias científicas incontestables de que la presencia en el aire de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) —el gas que más contribuye al efecto invernadero natural después del vapor de agua— viene aumentando desde mediados del siglo XVIII, época que se considera como el inicio de la era industrial. Según las observaciones, la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera ha crecido desde entonces más de un 40%, pasando de unos 278 ppm a una cifra cercana a 400 ppm en la actualidad (figura 1b). Además hay consistentes análisis paleológicos señalando que la actual concentra-

ción es la más elevada de los últimos 800 000 años, al menos.

¿Qué ha causado tan insólito incremento? El amplio conocimiento científico actual sobre el ciclo natural del carbono permite determinar con pequeño margen de error que más del 99% de esa acumulación de CO<sub>2</sub> se debe a actividades humanas, de entre las cuales destaca claramente la quema de combustibles fósiles y algo menos la deforestación. Aunque los detalles completos de la evaluación se pueden consultar en el informe científico AR5-IPCC-WG1 (2013), vayan aquí estas escuetas cifras ilustrativas: Entre 2001 y 2010, las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> fueron de 33×10<sup>9</sup> Tm/año (figura 1a), mientras que todas las naturales (fotosíntesis, océanos y otras) llegaron a ser de 640×10<sup>9</sup> Tm/año. Pero la misma naturaleza solo fue capaz de eliminar de la atmósfera unas 658×10<sup>9</sup> Tm/año, es decir todas las de origen natural y algo más de la mitad de las humanas. Justamente esa cantidad acumulada (15×10<sup>9</sup> Tm/año) ha sido la responsable de que la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera haya aumentado en dicha década a un ritmo de unos 2 ppm/año. En conclusión, aunque las emisiones humanas son muy pequeñas en comparación a las naturales, han llegado a alcanzar una magnitud suficiente para alterar el equilibrio natural que se ha mantenido en los últimos diez milenios, al menos.

Cabe preguntarse ahora si un 40% de aumento de un gas invernadero tan poco abundante en el aire como el CO<sub>2</sub> (apenas el 0.04%) podría ser el principal responsable del calentamiento global observado en los últimos 150 años. Una primera aproximación a la respuesta podría deducirse del hecho incontrovertible de que los 33°C de calentamiento provocado por el efecto invernadero natural antes citado, se deben en su mayor parte a la presencia en la atmósfera de un conjunto de gases cuya concentración media global en el aire no llega al 0.5%. Pero recurriendo de nuevo a la Física, si se resuelven las ecuaciones que consideran la transferencia de radiación en la atmósfera resulta que un aumento de la concentración de CO<sub>2</sub> de 278

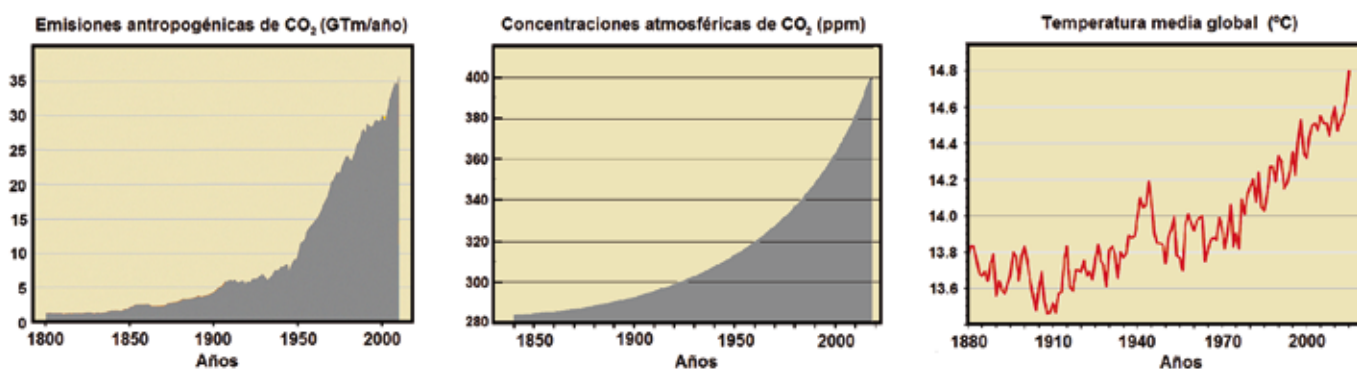


Figura 1. (a) Evolución de las emisiones anuales de CO<sub>2</sub> debidas a actividades humanas expresadas en miles de millones de toneladas por año (fuente IPCC). (b) Crecimiento observado de la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire expresada en partes por millón en volumen (fuente NOAA). (c) Evolución de la temperatura media global del aire junto a la superficie terrestre según las observaciones disponibles (fuente NOAA).

a 400 ppm (el observado desde el inicio de la era industrial) daría lugar a un calentamiento medio global del aire en superficie en torno a 6°C (Sloan&Wolfendale, 2013). No obstante, las observaciones disponibles señalan que sólo ha sido de unos 0.9°C (figura 1c). Tan notable diferencia se debe a que este sencillo cálculo solo ha tenido en cuenta uno de los numerosos procesos físicos que ocurren en el sistema climático terrestre, que no solo incluye la atmósfera, sino también los océanos, las masas de hielo, los suelos continentales y la vegetación que los cubre. En cada uno de estos cinco componentes del sistema, con capacidades e inercias térmicas tan diferentes, se producen ingentes e incesantes intercambios de energía y materia que además inducen innumerables e intrincados mecanismos de retroalimentación, la mayoría de extraordinaria complejidad.

## MODELOS DE SIMULACIÓN

Al ir contando los científicos con observaciones terrestres más completas y precisas, a lo largo de las últimas tres décadas han conseguido un extraordinario avance en el conocimiento y comprensión de lo que ocurre en el sistema climático. Esto ha permitido plasmar en ecuaciones matemáticas los efectos de un número creciente de procesos actuando en el sistema, que se han podido resolver al disponer de medios de computación cada vez más potentes. En esto consisten los llamados modelos de simulación

del clima global, que constituyen la mejor herramienta de que dispone la Ciencia para simular el cambio climático antropogénico observado y para obtener proyecciones sobre su posible evolución futura. Quizá algunos se sorprendan al enterarse aquí de lo que realmente son los modelos climáticos. Desgraciadamente existe un notable confusionismo sobre este particular, lo que puede haber facilitado la proliferación de ideas erróneas que acaban provocando cierta desconfianza.

En efecto, para simular el cambio climático se usan modelos físicos, no modelos estadísticos; simplemente, porque estos últimos no serían adecuados. Los modelos estadísticos se basan en analogías o extrapolaciones de comportamientos observados en el pasado para realizar predicciones futuras. Desde luego las proyecciones que ofrecen los modelos estadísticos sobre la evolución de un sistema complejo pueden resultar de gran utilidad, pero siempre y cuando se mantengan las condiciones subyacentes en dicho sistema. Si se sabe que alguna de ellas va a cambiar es muy posible que afecte a la manera en que interactúan las variables originales y entonces las predicciones con modelos estadísticos serían muy cuestionables. Así se comprueba, por ejemplo, con algunos modelos estadísticos que se usan en prospectiva económica cuando se aplican a escenarios inéditos. En contraste con esto, los modelos físicos se fundamentan en la comprensión suficiente de las causas físicas reales que provoca cualquier

**El amplio conocimiento científico actual sobre el ciclo natural del carbono permite determinar con pequeño margen de error que más del 99% de esa acumulación de CO<sub>2</sub> se debe a actividades humanas, de entre las cuales destaca claramente la quema de combustibles fósiles y algo menos la deforestación**

efecto, lo que permite establecer ecuaciones que relacionan causa y efecto según dicta la Física (leyes del movimiento, principios de la Termodinámica o de la conservación de materia y energía). Como tales fundamentos son inmutables, resolviendo sus ecuaciones se podrían realizar predicciones fiables aunque cambie el escenario en que se aplican.

Los modelos climáticos se basan en la resolución numérica del conjunto de ecuaciones que expresan las leyes y principios físicos que rigen la dinámica tridimensional de los procesos fundamentales que tienen lugar en cada componente del sistema climático, así como los intercambios de energía y masa entre ellos. Se trata de un complejo conjunto de ecuaciones diferenciales no-lineales que solo pueden resolverse aplicando técnicas numéricas aproximadas, lo que requiere dividir todo el espacio ocupado globalmente por la atmósfera y el océano mediante una malla compuesta por multitud de celdillas tridimensionales. En cada una de ellas se asignan unos valores iniciales de las variables climáticas (temperatura, velocidad, presión, etc.) y a partir de ellos se resuelven iterativamente las ecuaciones para derivar como van cambiando tales valores con el transcurso del tiempo.

En los modelos climáticos más actuales las celdillas tienen un tamaño horizontal en torno a 100×100 km<sup>2</sup> y cubren la altura entre la superficie y el tope de la atmósfera, o la profundidad



Ciertos gases (vapor de agua, dióxido de carbono, metano, y otros), presentes de forma natural en la atmósfera, determinan que ésta actúe de forma semejante a un enorme invernadero.  
Foto: Álvaro López.

hasta el fondo oceánico, con decenas de capas verticales de espesor variable, lo que supone un total de más de medio millón de celdillas. Como con ese tamaño de celdilla las iteraciones no deben abarcar intervalos temporales mayores de unos 15 minutos, para realizar por ejemplo una simulación de 300 años habría



que resolver cada conjunto de ecuaciones unos 10 millones de veces en todas y cada una de tales celdillas. Esto ofrece una idea del extraordinario esfuerzo de cálculo que implica cualquier simulación climática y de la necesidad de utilizar los sistemas de supercomputación más potentes. Y aún con ellos, actualmente se preci-

san meses para completar cualquier simulación climática convencional que llegue al final del presente siglo.

Además, la discretización que precisan las técnicas numéricas implica que, con las mencionadas ecuaciones físicas, no pueden resolverse

procesos atmosféricos u oceánicos con tamaños inferiores los de las propias celdillas en la malla del modelo, como por ejemplo los de intercambio turbulento de calor y materia o los implicados en formación de partículas de nube, lluvia o nieve, por lo que sus efectos se han de calcular con ecuaciones derivadas de observaciones. Es decir, los modelos climáticos contienen además ecuaciones de ajuste empírico, aunque solo se utilizan para “parametrizar” el efecto de esos procesos de escala tan pequeña sobre los valores de las variables climáticas, no para calcular su evolución temporal.

Para terminar con esta breve semblanza de los modelos climáticos, conviene señalar que el clima de cualquier región se determina a partir de promedios de las condiciones atmosféricas diarias a lo largo de periodos de decenas de años, y eso es lo que tratan de simular estos modelos. Dicho de forma simplista, su objetivo no es reproducir fielmente la secuencia diaria de las condiciones del tiempo meteorológico a lo largo de decenas de años. Resulta imposible predecir la evolución real de situaciones meteorológicas más allá de un plazo de pocos días. Esto no se debe achacar a imperfecciones de los modelos, sino esencialmente a que la atmósfera es un sistema caótico. Con los modelos climáticos se simula una posible secuencia diaria de condiciones atmosféricas en cualquier zona del globo terrestre, a lo largo de decenas o centenares de años. Dicha secuencia es muy poco probable que coincida día a día con la real, aunque no haya razones físicas que imposibiliten su ocurrencia. Pero, en definitiva, lo que se pretende con los modelos climáticos es que las distribuciones estadísticas (promedios y variabilidad) de dicha secuencia se correspondan con las del clima real observado en el periodo simulado.

En todo caso, no debe olvidarse que cualquier modelo físico es una aproximación más o menos ajustada, pero no la realidad. Por eso todos los modelos climáticos se evalúan de forma exhaustiva realizando simulaciones de épocas pasadas y comparando los resultados con observaciones o con evidencias disponibles. Por ejemplo, se examina la habilidad de los mode-

Tras una importante erupción volcánica se produce un ligero enfriamiento transitorio en la superficie de la Tierra.  
Foto: Álvaro López.



los para reproducir los cambios climáticos en la transición entre eras glaciales e interglaciales, que se sabe ocurrieron en el pasado, y así se comprueba que en esencia se debieron a variaciones en las características orbitales de la Tierra alrededor del Sol. También se constata que los modelos simulan adecuadamente el li-



gero enfriamiento transitorio que experimenta en promedio la superficie de la Tierra tras una importante erupción volcánica, como la del Pinatubo en 1991, y nos dicen que su causa es la permanencia en la baja estratosfera de una parte de las cenizas volcánicas. Y, por supuesto, se evidencia que los modelos simulan acep-

tablemente el calentamiento global observado desde el inicio de la era industrial, esos  $0.8^{\circ}\text{C}$  de media, pero siempre que se incluya el incremento observado de los gases invernadero en la atmósfera. Sin esa condición, los modelos no reproducen la tendencia térmica global observada. Esto constituye una prueba consistente



Si durante los próximos cinco años el incremento global de emisiones siguiera al mismo ritmo actual, cumplir con suficiente probabilidad no superar los 2°C de calentamiento global requeriría reducir al 50% las emisiones en tan solo una década (2021-30). Mientras que si fuera el próximo año cuando se iniciara el decrecimiento de emisiones globales, el objetivo se podría conseguir con el mismo recorte del 50%, pero repartido a lo largo de dos décadas

de que tales gases antropogénicos son los principales responsables del calentamiento global evidenciado en los últimos 150 años.

Entonces, como tales emisiones son las principales responsables del cambio climático observado hasta ahora, parece obvio que su evolución futura estará condicionada al ritmo con que la humanidad siga quemando combustibles fósiles. Para cuantificar dicha evolución solo cabe aplicar los mismos modelos climáticos que han demostrado simular aceptablemente el calentamiento global del último siglo. La cuestión ahora es cómo se comportarán las emisiones globales antropogénicas en el tiempo por venir, pues ese es el dato clave que hay que introducir en los modelos para disponer de proyecciones climáticas futuras.

Hasta hace pocos años, las proyecciones de cambio climático se realizaban según un conjunto de escenarios socio-económicos posibles, desde los basados en el consumo intensivo de combustibles fósiles a los que propiciarían su drástica reducción. Así se comprobó que, según creciera la concentración de gases invernadero

en la atmósfera, así sería la evolución del calentamiento global, y que cuanto mayor fuera éste más se alteraría la magnitud de todas las variables climáticas (temperatura, precipitación, viento, insolación, etc.). También se constató que la cuantía y el signo de tales alteraciones no serían iguales en todas las zonas geográficas del planeta. Y con estas proyecciones de cambio climático se pudieron realizar evaluaciones de los impactos de tipo económico, social y ecológico que originarían a escala regional.

### OBJETIVO GLOBAL CUANTIFICABLE

Pero mitigar el futuro cambio climático global solo se puede conseguir acordando políticas. Y para eso es preciso fijar un objetivo global cuantificable que prevenga que a largo plazo el cambio climático alcance un “nivel peligroso”. Por eso, en la Cumbre Climática de Cancún en 2010 (CoP, 2010) se acordó que el calentamiento global respecto a la era preindustrial no debería superar 2°C. Se decidió utilizar este indicador porque, según los modelos climáticos, su valor está directamente relacionado con la magnitud de la mayor parte de los impactos, y por tanto de los riesgos cuya evaluación es la que permite decidir dónde situar ese “nivel peligroso” a evitar. Y se estableció la cifra de 2°C, entre otras razones, porque en el cuarto informe del Panel Intergubernamental de expertos en Cambio Climático (AR4-IPCC-WG1, 2007) se señalaba que por encima de 1.9°C aumentaría “significativamente” el riesgo de se produjeran procesos irreversibles, tales como una fusión irreversible del hielo de Groenlandia capaz de elevar el nivel medio del mar hasta 7 metros. En el quinto informe (AR5-IPCC-WG1, 2013), con resultados de mejores modelos climáticos, se advierte que a ese mismo aumento “significativo” del riesgo se podría llegar con tan solo 1°C de calentamiento global.

No superar el mencionado umbral de calentamiento global se conseguiría con diversas “trayectorias” que sigan las emisiones humanas de gases invernadero a lo largo de las próximas décadas. Así, por primera vez, en el último in-

forme del citado panel de expertos científicos (AR5-IPCC-WG3, 2014) se incluye un análisis detallado de posibles trayectorias que acotarían el calentamiento global, señalando para cada una los correspondientes costes, riesgos y beneficios asociados.

No obstante, la ciencia ha desvelado que lo que determina, en definitiva, la magnitud del calentamiento global no son las emisiones anuales, sino la cantidad total de emisiones acumuladas. Como señala el quinto informe del IPCC (AR5-IPCC-WG1, 2013), para que con una probabilidad superior al 66% no se llegue a esos 2°C de calentamiento, las emisiones antropogénicas totales de CO<sub>2</sub> acumuladas desde el inicio de la era industrial deben limitarse a aproximadamente unas 3.5 billones de toneladas, y hasta el año 2011 ya se había emitido algo más de la mitad. Además el informe advierte de que posiblemente esa cifra máxima debería ser algo menor pues para el cálculo no se han contabilizado otros efectos de actividades humanas.

En conclusión, si se quiere conseguir con una probabilidad razonable no sobrepasar los 2°C de calentamiento global, el total de emisiones acumuladas que la humanidad emita en el futuro no debería sobrepasar la cifra de 1.6 billones de toneladas de CO<sub>2</sub>. Entonces, se tiene que decidir cómo repartirlas en el tiempo por venir. Obviamente, cuanto más se retrasen las medidas de reducción de emisiones, más severos deberían ser los recortes posteriores para conseguir el objetivo. Por ejemplo, si durante los próximos cinco años el incremento global de emisiones siguiera al mismo ritmo actual, cumplir con suficiente probabilidad no superar los 2°C de calentamiento global requeriría reducir al 50% las emisiones en tan solo una década (2021-30). Mientras que si fuera el próximo año cuando se iniciara el decrecimiento de emisiones globales, el objetivo se podría conseguir con el mismo recorte del 50%, pero repartido a lo largo de dos décadas.

Para concluir esta semblanza sobre la ciencia del cambio climático conviene incluir un breve comentario sobre las incertidumbres. Los cien-

tíficos del clima somos conscientes de que los modelos que usamos son aproximaciones y que es posible que haya procesos en el complejísimo sistema climático aún desconocidos, aunque tenemos una razonable confianza en que los actuales modelos simulan los más importantes. Consecuentemente, todas las predicciones van siempre acompañadas de sus correspondientes intervalos de incertidumbre. Y sabemos que esta no va a poder ser eliminada por completo, aunque sin duda se irá reduciendo a medida que los modelos climáticos mejoren más. Pero eso no puede esgrimirse como excusa para la inacción. Con los modelos de riesgo, que tanto se usan en la toma de decisiones trascendentes, se pueden sopesar las consecuencias de un determinado cambio climático en función de la probabilidad de que éste alcance una cierta magnitud, y a partir de ahí deducir la relación coste/beneficio de las medidas para sortear la amenaza. Esas son las evaluaciones del riesgo que los científicos proporcionamos a los que han de tomar las decisiones políticas para mitigar la formidable amenaza del cambio climático. Las medidas acordadas el pasado diciembre en la Cumbre Climática de París responden a las advertencias científicas del IPCC, aunque pasadas por el obligado tamiz para alcanzar el consenso. Ahora solo cabe esperar su cumplimiento en el horizonte marcado, incluidas las revisiones para conseguir el objetivo de evitar un nivel de calentamiento global “peligroso”. ❀

## BIBLIOGRAFÍA

- AR4-IPCC-WG1 (2007): Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report on Climate Change, [http://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/en/contents.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html).
- AR5-IPCC-WG1 (2013): Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I, <http://www.climatechange2013.org/report/>.
- AR5-IPCC-WG3 (2014): Climate Change 2014. Mitigation of Climate Change. Working Group 3, <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>.
- CoP (2010): Acuerdos de la 16ª Conferencia de las Partes de la UNFCCC en Cancún, <http://unfccc.int/resource/docs/2010/cop16/eng/07a01.pdf#page=2>.
- Sloan, T. and A.W. Wolfendale (2013): “Cosmic rays, solar activity and the climate”, *Environ. Res. Lett.*, vol. 8, 045022. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/045022>.