

EFFECTOS DE LAS ACTIVIDADES HUMANAS EN EL CLIMA DEL GLOBO - PARTE I

Por W. W. KELLOGG*

Introducción

El hecho de que el clima de la Tierra haya cambiado muchas veces en el pasado es por supuesto bien conocido. Estos cambios pueden haberse debido a alguna combinación de influencias naturales, muchas de las cuales han sido identificadas ahora por los climatólogos, aunque nuestro conocimiento de cómo funcionan los sistemas climáticos dista mucho de ser completo. No obstante, es relativamente nueva la comprobación de que la humanidad debe constituir también un factor significativo para la determinación de nuestro clima.

Ha habido una comprensible resistencia por parte de la comunidad científica para entablar abiertamente un debate sobre la controvertida y, a veces, acongojante cuestión de hasta qué punto nosotros, la humanidad, podemos influir en el clima del mundo. Sin embargo, está claro que la consideración de la misma es inevitable. De hecho, en el curso de la historia, nunca se encontró la comunidad de naciones enfrentada con un cambio ambiental de extensión verdaderamente global, que pueda ser aproximadamente previsto con anticipación y que podría modificarse por medio de determinadas medidas internacionales.

De acuerdo con ello, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) ha tomado diversas medidas encaminadas a la obtención de asesoramiento sobre los cambios climáticos, en general, y sobre las influencias antropógenas en el clima, en particular. Una de dichas medidas consistió en encargar un informe al autor, del que el presente artículo constituye un resumen. Fue preparado con objeto de ayudar al Grupo de Expertos en Cambios Climáticos del Comité Ejecutivo de la OMM en su continuada consideración de estas importantes cuestiones y se publicará, por recomendación del citado Grupo como una Nota Técnica de la OMM con miras a ensanchar el ambiente de la discusión.

Respaldan este informe importantes documentos, como la Declaración sobre Cambios Climáticos de la OMM, editada por el Comité Ejecutivo (*Boletín de la OMM*, Vol. XXV, N.º 3, págs. 261 - 263) y el Informe Técnico del Grupo de Expertos en Cambios Climáticos del Comité Ejecutivo (*Boletín de la OMM*, Vol. XXVI, N.º 1, págs. 61 - 69). Ya que ambos informes, especialmente el último, discuten el estado actual de nuestros conocimientos sobre los sistemas climáticos, los climas del pasado y la predictibilidad de los cambios del clima, no nos detendremos en estos temas. En cambio, en las secciones que siguen, resumiremos tan explícitamente como sea posible, lo que puede decirse actualmente sobre las distintas influencias

* El Dr. W. W. Kellogg es un científico jefe en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica (patrocinado por la Fundación Nacional de Ciencias), Boulder, Colorado, EE. UU.

de la humanidad en el clima y la escala cronológica a que tienen lugar los cambios correspondientes.

Debe manifestarse que las suposiciones y conclusiones contenidas en este informe no obtendrán probablemente un consenso universal y la responsabilidad de ellas corresponde al autor. No obstante, el tema ha sido cuidadosamente estudiado y documentado, como podrá observarse y, por lo tanto, supone un intento de expresar una especie de acuerdo de quienes han considerado en profundidad los cambios climáticos y las posibles influencias que las actividades humanas pueden ejercer sobre él en el futuro.

No podemos plantear una revisión de este tipo sobre los factores físicos relacionados con los futuros cambios climáticos sin esbozar, al menos, algunas de sus implicaciones políticas y sociales. Las ciencias físicas no pueden todavía suministrar respuestas a muchas de estas implicaciones en la sociedad, incluyendo la forma en que ésta podría llevar a cabo «juicios de valoración», pero, no obstante, podemos intentar presentar las probables perspectivas del futuro, de manera que los responsables de las decisiones en el mundo puedan comenzar a formular sus diversos juicios de valoración. Creemos que ello constituye el objetivo final de este informe.

Se observará que aparece un número relativamente escaso de referencias en este artículo. Sin embargo, el lector interesado en una información más completa, podrá obtenerla en la Nota Técnica, en la que se incluyen unas 200 referencias.

Cambios climáticos y su predictibilidad

El Informe Técnico del Grupo de Expertos en Cambios Climáticos de la OMM (aludido en la Introducción y al que nos referiremos en lo sucesivo como «el Informe del Grupo») especifica que actualmente nuestras posibilidades son muy escasas o nulas para predecir los cambios *naturales* del estado de los sistemas climáticos, añadiendo que «habrá que partir de la hipótesis según la cual la evolución futura del clima mundial no será previsible en forma intrínseca, al menos, con bastante detalle y para períodos suficientemente amplios, para poder responder a la necesidades de la sociedad a este respecto».

¿Cómo será, pues, posible expresar algo en forma cuantitativa sobre los efectos futuros de la humanidad en el clima? Es importante distinguir entre dos clases de predicción: la de los cambios estadísticos del conjunto de los diferentes estados de la atmósfera, producidos por las numerosas interacciones *dentro del propio sistema climático*, y un segundo tipo de predicción sobre cómo estas estadísticas climáticas podrían cambiar como resultado de una alteración en las *condiciones externas o de contorno* del sistema, tal como aparece esquemáticamente en la *Figura 1*.

Por ello, en tanto que el Informe del Grupo manifiesta que las perspectivas para el desarrollo de una posibilidad útil a largo plazo de la predicción de la variación natural del clima, en una escala cronológica de años a decenios, se revelan completamente dudosas, la predicción del *segundo tipo* es un caso diferente. Nuestros actuales modelos climáticos pueden simular el equilibrio a largo plazo del clima con algún realismo, cuando se utilizan las condiciones de contorno actuales. Si se producen cambios

lentos en las condiciones de contorno a lo largo de períodos cronológicos mucho más largos que el intervalo de respuesta del sistema, se pueden emplear nuestros modelos climáticos para introducir correcciones escalonadas en el sistema, de modo que éste responda lentamente a las condiciones de contorno cambiantes.

Para que las predicciones del segundo tipo sean útiles y fidedignas, se necesitan dos elementos. Debemos poder introducir una función o matriz de respuesta que relacione los cambios en los parámetros del clima con cambios determinados en las condiciones de contorno. Y debemos suponer que estos cambios son únicos, es decir, que un estado de equilibrio estable en el clima corresponde a un único conjunto de condiciones de contorno. Afortunadamente, resulta que muchos de nuestros actuales modelos disponen de soluciones para estados estacionarios estables.

Es bien sabido que nuestros modelos de sistemas climáticos son incompletos y que algunos factores posiblemente importantes, o «lazos de realimentación» están deficientemente incluidos o ni siquiera lo están. Las deficiencias más perturbadoras en los modelos actuales están relacionadas con la respuesta de los océanos a los cambios en la atmósfera y en las masas de hielo (criosfera) y con la respuesta de la nubosidad global. Sin embargo, tenemos actualmente algunas razones para creer que el no tomarlas adecuadamente en cuenta en nuestros modelos, no invalidará nuestras predicciones del segundo tipo, por lo menos dentro de una gama limitada de cambios climáticos. En todo caso, resistiremos la tentación de llevar nuestras estimaciones de las influencias antropógenas futuras más allá de mediados del siglo próximo, aún cuando otros han intentado efectuarlo.

El alcance creciente de las intervenciones humanas

Es evidente que quienes estudian los cambios ambientales deben ya tomar nota de los efectos de las actividades humanas a escala *regional*, pero el tema de este artículo concierne a escalas de cambio aún mayores. No tenemos una evidencia muy completa de que se haya producido ya un cambio global del clima, como resultado de las actividades humanas, pero al considerar el ritmo de crecimiento de dichas actividades, ¿no se tratará solamente de una cuestión de tiempo? Este es el interrogante.

Para poner de relieve este punto, repetiremos algunas estadísticas bien conocidas: la población mundial está creciendo en un dos por ciento al año, aproximadamente (excepto en los países más industrializados); la energía y otros recursos para la producción de alimentos crecen en un tres a cuatro por ciento al año (pese a que en muchas partes parece seguir persistiendo la escasez de alimentos) y el empleo de la energía mundial se incrementa en un seis por ciento anual, y probablemente en más. La actual producción total de energía mundial es de unos 10^{13} vatios (10^4 GW), y comparando esta cifra con el aumento de 8×10^7 GW de la energía solar absorbida en la superficie, resulta un factor casi 10^4 mayor. La causa de que la utilización de la energía total aumente más deprisa que la población se debe, obviamente, al crecimiento *per cápita* en el empleo de la energía, que llega actualmente a unos 2,5 kW (el máximo corresponde a los EE. UU. con un valor de

10 kW). Un estudio reciente indica que este empleo de energía *per cápita* puede estar incrementándose actualmente en más del cinco por ciento anual.

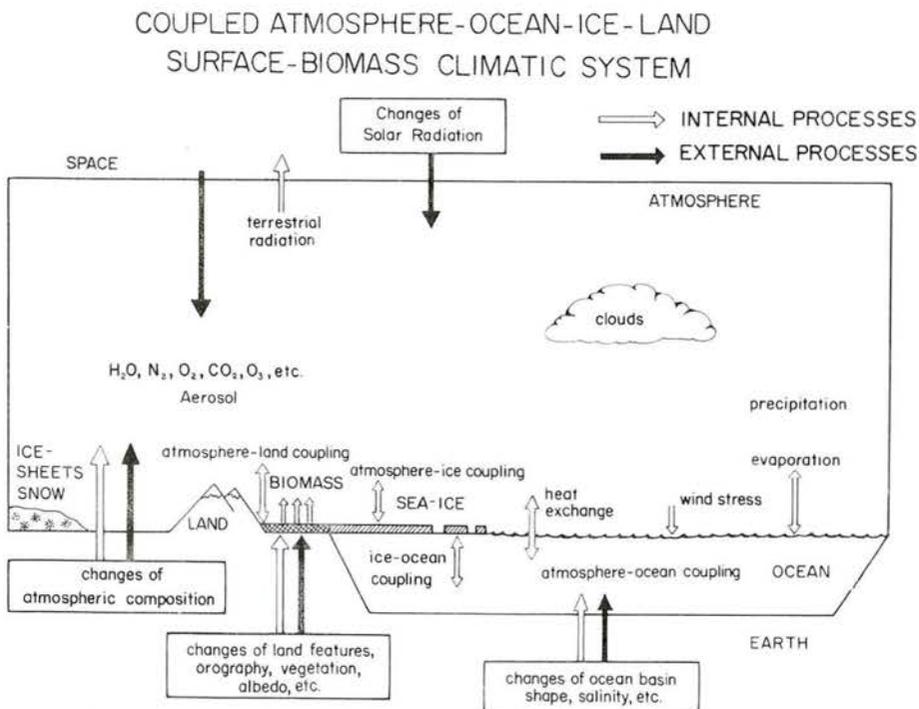


Figura 1.—Representación esquemática de los componentes de la interacción del sistema climático acoplado atmósfera-océano-hielo-superficie terrestre-biomasa. (Adaptado de la Figura 3.1, GARP-16 (1975)).

¿Qué podemos decir de las tendencias futuras? Una observación obvia es que el crecimiento exponencial no puede continuar indefinidamente, de manera que se pueden relacionar adecuadamente los límites de crecimiento con las escalas cronológicas correspondientes, como se indica en la Figura 2. En ella, se representa la clase de escala cronológica que se requeriría, si debe llegarse a una estabilización en una sociedad «post-industrial», como se denomina por algunos. Se observa que la transición del período actual de máximo crecimiento a algún tipo de estado estable *debe completarse hacia fines del siglo próximo*, a no ser que aparezcan catástrofes, como una guerra nuclear total o una escasez de alimentos muy generalizada.

No insistiremos más en este punto, aunque es la base de una importante *suposición* que debemos señalar para nuestras perspectivas del futuro: *el crecimiento de la sociedad continuará durante algunas de las próximas décadas, disminuyendo sólo muy poco su índice, pero se estacionará en algo más de cien años*. Esta suposición contiene otras ramificaciones que desarrollaremos en su momento apropiado, como la futura disponibilidad de combustibles fósiles.

Una perspectiva de la influencia humana en el clima

En la sección, cambios climáticos y su predictibilidad, se discutió la distinción entre el problema de tratar de predecir el cambio natural del clima o sus variaciones a corto plazo y el de tratar de predecir cómo respondería el clima a un cambio dado de sus condiciones de contorno. Sobre este segundo tipo de predicción vamos a tratar aquí, y es necesario decir algo sobre los comienzos de cómo se emprendió esta tarea.

Todas las influencias del clima con las que nos relacionaremos, con una o dos excepciones de menor importancia, se manifiestan a través de cambios en el balance térmico del sistema (véase *Figura 1*). La cuestión más sencilla que podemos proponer sobre los efectos climáticos de tal influencia, es ¿cuál será el cambio en la temperatura media de la tierra, para un cambio dado en las condiciones externas o de contorno? (Se transcribe aquí *externas* en el sentido especial de estar excluidas de los procesos internos y de interacción en el modelo climático empleado. Aquello que puede ser externo en un modelo, como la temperatura superficial del mar o la cobertura de nieve, puede ser interno en un modelo físicamente más completo).

Existe toda una jerarquía de modelos del sistema climático y muchos de ellos se han utilizado en experimentos «del segundo tipo», para mostrar de qué manera respondería el sistema a un cambio dado de las condiciones externas. Es reconfortante observar que, cuando se comparan los resultados de experimentos con las mismas perturbaciones (por ejemplo, uno por ciento más de radiación solar o el doble de contenido de anhídrido carbónico), pero utilizando diferentes modelos, se encuentra generalmente la misma respuesta o diferencias en magnitud que pueden atribuirse usualmente a las diferencias o hipótesis establecidas en los modelos. En todo caso, se pueden reconocer y admitir en qué son deficientes nuestros modelos y, por lo tanto, fijar el factor que es responsable de la incertidumbre de sus respuestas.

Realmente, los modelos son las únicas herramientas de que disponemos hoy para predecir las características de respuesta del sistema *real* atmósfera-oceano-tierra. En un centenar de años aproximadamente, podremos finalmente conocer el resultado de nuestro teórico «experimento» con el prototipo original pero, para entonces, los cambios climáticos, sean los que fueren, habrán sido un «hecho consumado».

Procesos específicos — En esta sección consideraremos los distintos procesos individuales en los sistemas climáticos que puedan ser influenciados por la humanidad. En cada caso intentaremos efectuar una estimación de la respuesta del sistema climático (haciendo hincapié en la temperatura superficial y, en segundo lugar, en la precipitación), una indicación de la escala cronológica que implica el cambio y alguna consideración sobre la incertidumbre de nuestra estimación. Para que sea *significativo* un cambio en el clima del globo, producido artificialmente, debe ser más amplio y de más duración que las fluctuaciones naturales cuasi-aleatorias que son de esperar en el mismo intervalo cronológico, y trataremos estas pruebas de significación en la segunda parte de este artículo (que se publicará en el Número de Enero de 1978 del *Boletín*).

Desprendimiento de calor—El clima se rige por el balance térmico de los sistemas climáticos, de lo que resulta claro que la adición de una cantidad apreciable de calor en cualquier forma, producirá un cambio en el clima, principalmente en las temperaturas medias y también, probablemente, en las configuraciones de la circulación atmosférica. En varias grandes ciudades del mundo, especialmente en las de las altas latitudes, donde la insolación es relativamente pequeña, la cantidad de calor desprendido por metro cuadrado es igual o incluso mayor que el flujo medio de radiación solar absorbida por la superficie a lo largo del año. Sin embargo, a escala regional (del orden de 10^5 km²), esta relación raramente supera un pequeño porcentaje y sobre una base mundial, la cantidad total del calor cedido por todas las actividades de la humanidad es sólo ligeramente mayor que 10^{-1} de la energía solar absorbida por la superficie. Una fracción tan pequeña tendrá un efecto despreciable en el balance térmico total de la Tierra.

El desarrollo futuro de las actividades humanas y el ritmo a que aumentará esta emisión de calor, dependen de factores difíciles de valorar. Se han discutido antes las bases de que no parece ser una suposición irrazonable que el crecimiento de la sociedad continuará a lo largo de las próximas décadas con incrementos sólo ligeramente inferiores, pero tenderá a estabilizarse en poco más de cien años. Nos referimos de nuevo a la *Figura 2*, para representar gráficamente esta perspectiva y su escala cronológica, teniendo en cuenta el hecho empírico de que el consumo de energía *per cápita* y el producto nacional (o mundial) bruto *per cápita* son, en buena aproximación, linealmente proporcionales.

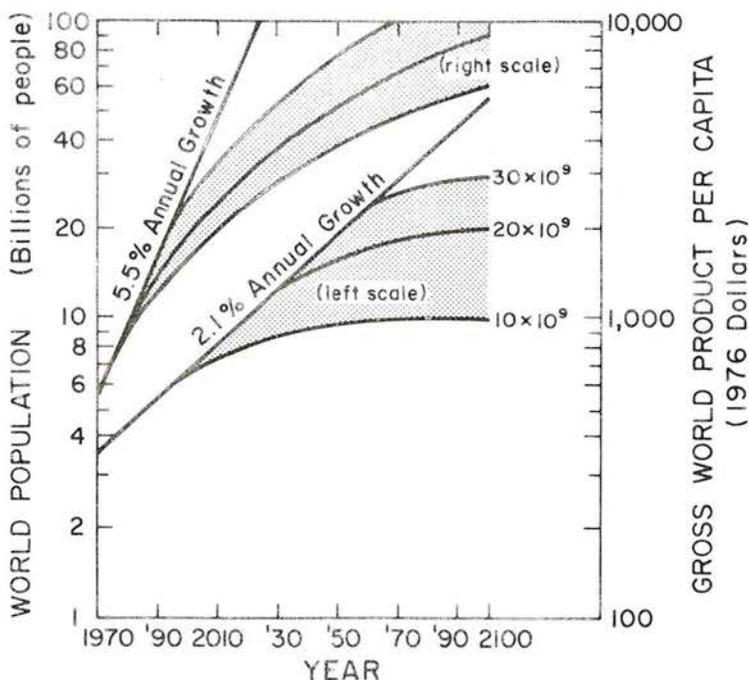


Figura 2.—Un conjunto de las posibles evoluciones de la población mundial en miles de millones de personas (ordenadas de la izquierda) y del producto mundial bruto (PMB) *per cápita* (ordenadas de la derecha). Nótese que estas curvas tienden hacia una estabilización que es obviamente más realista que un crecimiento exponencial continuo. Sin embargo, no deben tomarse en el sentido de “predicciones”, sino en el de una indicación aproximada de la escala cronológica que implica un proceso evolutivo de este tipo.

Veamos la significación del “punto de estabilización” en función del calor total desprendido. Si suponemos una población de 20 mil millones (cinco veces la actual)

y una demanda media de energía *per cápita* de 20 kW (unas diez veces el promedio actual mundial y el doble del de los Estados Unidos), ello totaliza 4×10^5 GW, es decir, el 0,5 por ciento de la energía solar absorbida por la superficie. Es difícil que este nivel pueda alcanzarse antes del año dos mil cien y no podemos intentar una perspectiva más allá de dicha fecha.

Esta ingente cantidad de calor será probablemente cedida sobre los continentes poblados, lo que supondrá una distribución irregular del calentamiento considerado a escala mundial, que producirá marcados efectos regionales y cambios en las configuraciones de la circulación a gran escala. Podemos, no obstante, suponer que este calor terminará distribuyéndose en forma más o menos uniforme y utilizar entonces nuestros modelos climáticos para estimar los efectos que tendría en la temperatura media superficial. Teniendo en cuenta que gran parte del calor será transferido en la superficie o en sus proximidades, el calor adicional puede considerarse (en estos experimentos con modelos) como si se tratase de un aumento de la cantidad total de radiación solar) que llega a la superficie. No existe una concordancia exacta entre los distintos modelos climáticos, pero el actual conjunto de ellos concuerda perfectamente en la respuesta de que un uno por ciento de aumento en el calor disponible, conduciría aproximadamente a un incremento de 2 grados C., en la temperatura media superficial, probablemente en un intervalo con factor menor o igual a 2. Por lo tanto, el aumento de la temperatura media superficial podría ser aproximadamente de 1 grado C., *hacia finales del próximo siglo*, a causa del desprendimiento directo de calor.

Todos los modelos climáticos que hemos citado, que relacionan la entrada de calor en el sistema con la temperatura superficial, revelan un incremento notable de sensibilización en las regiones polares. El cambio en latitudes superiores a unos 50°, será de más de 1 grado C., y en las regiones polares es de esperar que sea tres a cuatro veces mayor. Esta mayor sensibilización de las regiones polares a los cambios de clima, ha sido admitida, tanto a partir de estudios en la atmósfera real, como de experimentos en modelos. Se trata de una cuestión sobre la que volveremos de nuevo.

Anhidrido carbónico — Desde los comienzos de la Revolución Industrial, hace más de un siglo, estamos extrayendo carbono del interior de la Tierra y quemándolo en forma de carbón, petróleo y gas natural, resultando del proceso anhídrido carbónico y vapor de agua, además de calor que es, por supuesto nuestra principal razón para efectuar dicho proceso. Del anhídrido carbónico que procede de las incontables chimeneas y tubos de escape, queda en la atmósfera aproximadamente la mitad, y el resto se disuelve en los océanos o penetra en las biomásas terrestres, principalmente en los bosques.

La Figura 3, representa la historia en el pasado de la concentración del anhídrido carbónico y el aumento que debe esperarse en el futuro. La implicación principal que presenta este componente variable de la atmósfera, es su efecto en el balance térmico, ya que el anhídrido carbónico es virtualmente transparente para la radiación solar, pero absorbe la radiación infrarroja que difunde la tierra en varias bandas de dicha radiación, la cuál, de lo contrario, atravesaría la atmósfera y se perdería en el espacio. El anhídrido carbónico adicional aumenta la absorción de la radiación, con lo que calienta la atmósfera inferior y retransmite parte de aquélla hacia abajo, calentando de este modo la superficie. Debido a ésto, el resultado de un incremento del anhídrido carbónico es un aumento de la temperatura superficial, acompañado de la correspondiente disminución de la temperatura de la estratosfera, que mantiene el total de la radiación infrarroja emitida dentro de un valor constante en la atmósfera. Ello se denomina a menudo "el efecto de invernadero", aunque las analogías con éste son muy escasas.

Se han efectuado diversos cálculos con modelos, para mostrar la influencia del anhídrido carbónico en la temperatura superficial; algunos como modelos medios monodimensionales, como los de Manabe y Wetherald (1967) y otros con modelos en función de la latitud, teniendo en cuenta los océanos en forma elemental (Sellers, 1974; Manabe y Wetherald, 1975; Manabe, App. 2.4, GARP-16, 1975). Los diversos resultados se han revisado más recientemente por Schneider (1975) y por Budyko y Vinnikov (1976). En la Tabla 1, aparece un conjunto representativo de estimaciones (hemos ajustado más o menos arbitrariamente el grado de incertidumbre con un factor de dos positivo o negativo, aun cuando los resultados de los modelos concuerden actualmente mejor).

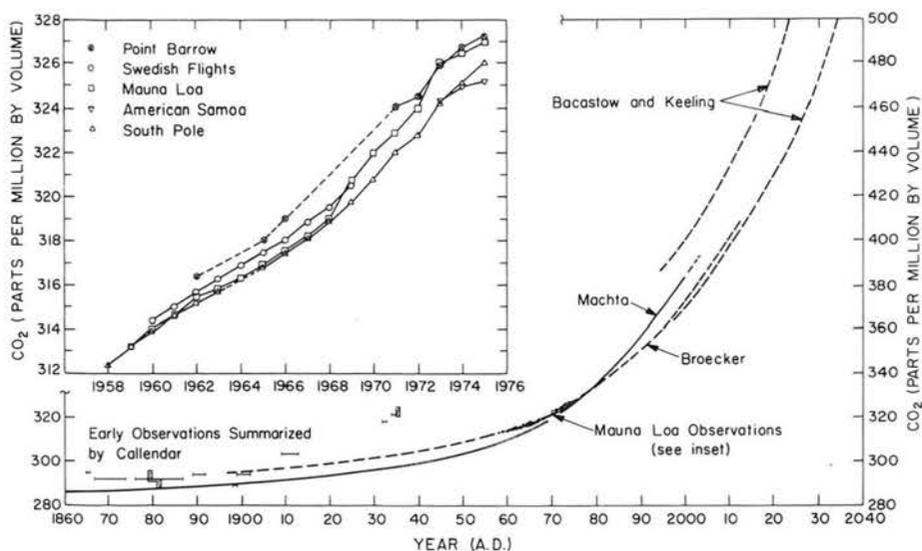


Figura 3.—Registro de la concentración de anhídrido carbónico entre 1860 y 1975, medida en distintas localidades y algunas estimaciones de las tendencias futuras. Los datos más antiguos fueron revisados críticamente por Callendar (1958) y reevaluados posteriormente por Barrett (1975). Las series de observaciones actuales de Mauna Loa y las preparadas por Keeling y col. (1976 a) y C. D. Keeling (comunicación personal), sobre el Polo Sur por Keeling (1976 b) y Keeling (comunicación personal), sobre Samoa Americana y Punta Bardow por la NOAA (1975) y T. Harris (comunicación personal) y sobre las observaciones desde aeronaves suecas por Bolín y Bischof (1970). Obsérvese que las concentraciones de anhídrido carbónico vienen dadas en "valores de índice ajustable" (con miras a la continuidad con los datos anteriores); pueden ajustarse estos valores por encima hasta unos 3 a 4 ppmv (partes por millón en volumen), de acuerdo con Keeling y col. (1976 a), para obtener la fracción molar correcta, pero no afecta a las pendientes de las curvas. Los cálculos en modelos para la predicción del aumento del anhídrido carbónico efectuados por Machta (1973), Broecker (1975), y Bacastow y Keeling (1973) tienen todos en cuenta la absorción del anhídrido carbónico antropógeno por los océanos y las biomásas (pero por procedimientos algo diferentes) y presuponen un crecimiento cuasi-exponencial en el ritmo de la combustión de combustibles fósiles (principalmente carbón) durante la próxima mitad de siglo, por lo menos. Es de esperar que en este período, aproximadamente, la mitad del nuevo anhídrido carbónico liberado permanecerá en la atmósfera y, a causa de la lenta mezcla de las aguas profundas oceánicas con las de las capas superficiales, el plazo de desaparición del anhídrido carbónico añadido, si cesara su producción, se estima en unos 1000 a 1500 años.

TABLA I

Efectos del anhídrido carbónico desprendido a la Atmósfera

Factor de Cambio del anhídrido carbónico desde el presente por ciento	Año previsto para que se produzca el cambio	Aumento de la Temperatura Media Superficial grados C
+ 25	2000	0,5 a 2
+ 100	2050	1,5 a 6

Dichos cambios en superficie, debemos insistir que se refieren al promedio mundial ponderado (por área superficial). Tanto los cambios observados del clima como los modelos climáticos, indican que en altas latitudes, por encima del paralelo 50° aproximadamente, debe esperarse que los cambios climáticos sean más amplios y, en las regiones polares, de tres a cinco veces mayores que los cambios medios, como los que aparecen en la Tabla, y quizá incluso más en invierno (SMIC, 1971; Sellers, 1974; Manabe y Wetherald, 1975; van Loon y Williams, 1976a; 1976b; Borzenkova y col. 1976).

Una cuestión frecuentemente suscitada sobre la continua escalada en la utilización de combustibles fósiles, contemplada desde esta perspectiva, es la de su disponibilidad. En tanto que es de esperar que el gas natural lluegue a ser de obtención mucho menos fácil a fines de siglo y que varias fuentes de petróleo estén también casi agotadas, las reservas mundiales de carbón son tan grandes que incluso con un índice creciente de consumo, subsistirán probablemente durante varios siglos, aunque será más difícil y, por lo tanto, más caro, obtenerlo conforme pase el tiempo. Se ha estimado que si todo el combustible fósil económicamente recuperable se quemara eventualmente en unos pocos siglos próximos, el contenido atmosférico de anhídrido carbónico se elevaría de cinco a ocho veces su valor con respecto al anterior a la Revolución Industrial (Keeling, 1977, Baes y col., 1977; Siegenthaker y Oeschger, 1977).

Mientras que los cálculos en modelos del aumento de la temperatura media superficial correspondiente a un crecimiento dado en la concentración del anhídrido carbónico han llegado solamente a la duplicación de éste, parece que la relación es aproximadamente logarítmica. Es decir, para cada duplicación debe esperarse un calentamiento de 2,5 a 3 °C. Algunas estimaciones han extendido los cálculos más allá de nuestro marco cronológico y, si el incremento de combustión de combustibles fósiles continúa su escalada (como actualmente), la segunda duplicación del anhídrido carbónico se producirá antes del año dos mil cien (Keeling, 1977; Siegenthaker y Oeschger, 1977), lo que produciría un calentamiento de 5 a 6 °C. Recordemos, de nuevo, que los aumentos de la temperatura polar serán varias veces mayores que los del promedio global.

Los sumideros principales del anhídrido carbónico en el ciclo más largo serán los océanos (Keeling, 1977; Bolín, App. 8, GARP-16, 1975; Oeschger y col., 1975), ya que los bosques del mundo no pueden ir creciendo indefinidamente; por el contrario, es muy posible que decrezcan con más rapidez de lo que puedan aumentar. Los océanos contienen unas 60 veces más anhídrido carbónico que la atmósfera, pero para que éstos alcancen un nuevo equilibrio con un contenido atmosférico mayor, deberá aparecer un intercambio entre las capas superiores del océano (que varían en promedio entre los 100 y los 1.000 m de profundidad) y las aguas profundas oceánicas. Se ha estimado que este proceso puede durar al menos mil años y Keeling (1977) calcula un plazo de desaparición del anhídrido carbónico de mil quinientos años. (No importa para nuestro propósito, si comete un error de muchos cientos de años). Por lo tanto, incluso si por algún procedimiento determinado e improbable, se pudiera detener la emisión de anhídrido carbónico a partir de los combustibles fósiles en el próximo siglo, aún así encontraríamos todavía anhídrido carbónico o residual, permaneciendo en la atmósfera en una concentración lentamente decreciente a lo largo de muchos siglos.

Otras trazas gaseosas absorbentes del infrarrojo — El anhídrido carbónico y el vapor de agua no son las únicas trazas (gases que se presentan en cantidades muy pequeñas) gaseosas en la atmósfera que pueden absorber la radiación infrarroja, contribuyendo así al "efecto de invernadero". Existen otras dos trazas de gases en particular, en cuyas concentraciones globales puede influir la humanidad: los clorofluorometanos (CFMs) y el óxido nitroso. Hay buenas razones para creer que ambos pueden aumentar en los años venideros; los CFMs, por su transmisión directa en la atmósfera desde los envases para la pulverización de aerosoles y de los sistemas de refrigeración y acondicionamiento del aire (NAS, 1976) y el óxido nitroso, por la desnitrificación acelerada de los suelos cuanto más se utilizan fertilizantes nitrogenados en la agricultura (Bolín y Arrhenius, 1977).

Los recientes estudios de este crecimiento potencial del efecto de invernadero señalan una gran proporción de incertidumbre sobre el incremento de estas trazas gaseosas, en parte, a causa de la inseguridad en lo que hará la humanidad en el futuro y, sobre todo, en el caso del óxido nitroso, el desconocimiento relativo de sus

fuentes y sumideros. No obstante, es de esperar que su influencia sea sensiblemente menor que la del anhídrido carbónico.

Aerosoles — Otro efecto de la actividad humana lo constituyen las partículas producidas por la industria, generadores de energía, automóviles, calentamiento del espacio, prácticas agrícolas de tala y combustión y así, sucesivamente. Dichas partículas, conocidas comúnmente como aerosoles, constituye obviamente adiciones a la atmósfera de las grandes ciudades del mundo, donde se producen en gran cantidad por la combinación de la combustión de carbón (de la que resulta hollín y anhídrido sulfuroso que se convierte rápidamente en partículas de sulfato) y por la creación de partículas en la atmósfera de hidrocarburos no quemados, mediante reacciones fotoquímicas en presencia de la radiación solar ultravioleta. Tales *partículas secundarias* (sulfatos e hidrocarburos) suelen ser de menor tamaño que las de humo u hollín, producidas directamente, pero tras permanecer cierto tiempo en el aire, reaccionan unas con otras entre sí y con las partículas mayores, formando otras que son una combinación de ambas, habiéndose demostrado que los núcleos alrededor de los que se forman las partículas secundarias son, frecuentemente, partículas de hollín.

Hay pocas dudas de que desde comienzo de siglo se ha incrementado el ritmo con que se producen los aerosoles por la humanidad, particularmente en los países más industrializados (véase, por ejemplo, SMIC, 1971), y muchas estaciones no urbanas, no todas en realidad, han registrado alguna tendencia al crecimiento en el contenido total de aerosoles. Si ello es así cabe preguntarse en qué extensión actúan realmente los aerosoles antropógenos y cuál será su efecto en el balance de la radiación regional o mundial, si el incremento en el contenido de aerosoles continúa. (La posible influencia de la agricultura en los aerosoles *arrastrados del suelo por el viento* (y arena) se examinará al final de esta sección).

Las partículas de aerosoles pueden tanto difundir como absorber la luz solar y, asimismo, absorben y retransmiten la radiación infrarroja en una magnitud más limitada. Cuando una partícula no absorbente difunde la radiación solar, parte de la radiación difundida se dirige tanto hacia arriba como hacia abajo, y la primera componente se pierde en el espacio. Ello conduce a que alcance al sistema atmósfera-tierra, lo que producirá un enfriamiento neto. Sin embargo, si una partícula absorbe parte de la radiación solar, se calienta, así como el aire que la rodea, y el efecto es una reducción del albedo neto. La teoría indica que, para decidir si los aerosoles de la atmósfera inferior producirán un incremento (enfriamiento) o una disminución (calentamiento) en el albedo neto, debemos tener en cuenta la relación de la absorción de la partícula a su difusión, que denominaremos $a:b$ y, asimismo, el albedo de la superficie subyacente. Cuando aerosoles de una relación dada $a:b$ están sobre una superficie oscura, como el océano, existe una mayor posibilidad de que aumente el albedo neto, que cuando aparecen sobre una superficie clara, como un banco de hielos, una capa de nubes bajas, o sobre la tierra, en general.

Ha existido la creencia, ampliamente compartida, de que los aerosoles antropógenos producen, por lo general, un enfriamiento, siendo la razón de ello que cuando se difunden uniformemente alrededor de la Tierra, su efecto sobre los océanos oscuros aumenta el albedo e impide, por lo tanto, que parte de la luz solar sea absorbida por el sistema tierra-atmósfera. Sin embargo, recientemente se ha señalado que muchos de estos aerosoles antropógenos existen sobre tierra, cerca del lugar de su formación y son lo suficientemente absorbentes para reducir el albedo en lugar de aumentarlo (Kellogg y col 1975).

Los aerosoles industriales, probablemente debido a su facilidad de detección visual por la población de las grandes ciudades han constituido el objeto de vigorosos intentos para controlarlos. Los resultados han conducido a que, en muchas ciudades del mundo, el contenido de aerosoles, *particularmente el de las partículas mayores*, haya mostrado un claro decrecimiento. No puede, en general, decirse lo mismo del *contenido total de aerosoles* en la atmósfera, observado en Europa y en la parte oriental de los Estados Unidos, donde la producción de aerosoles secundarios de partículas menores que una micra, en especial los sulfatos procedentes del anhídrido sulfuroso generado por quemar combustibles muy sulfurosos, han llegado a ser un factor dominante en la contaminación *regional* del aire. Debe señalarse que los problemas prácticos planteados en las citadas regiones por los efectos ecológicos y sanitarios de las cantidades crecientes de partículas sulfatadas, sobrepasan con creces su influencia sobre el clima regional (e.g. Bolin y col. 1971), pero esto queda fuera del alcance de este artículo.

Cuando consideramos los "aerosoles antropógenos", no puede ignorarse el hecho de que las prácticas agrícolas de la humanidad y los pastos de los animales domésticos influyen en la cantidad de polvo mineral o tierra arrastrada por el viento. La exposición de suelos previamente cultivados, permite al viento levantar partículas finas (principalmente "loess", que está formado por material ya arrastrado por el viento con anterioridad) y Flohn (GARP-16, Ap. 1.2, 1975 y en una comunicación personal) estima que las actividades humanas pueden actualmente constituir una fuente principal de polvo mineral en el aire, debido a las extensas áreas de cultivo (unos 35×10^5 km²) o sometidas a pastos intensivos (unos 5×10^5 km²) (Véase también SMIC, 1971; Bryson y Baerreis, 1976). Las partículas arrastradas por el viento son generalmente menos absorbentes de la radiación solar que las industriales o las procedentes de los restos de talas y combustiones, de modo que los anteriores argumentos sobre la probable influencia en el calentamiento de los aerosoles industriales puede no ser aplicada a estas partículas minerales de polvo y no disponemos de estimaciones cuantitativas de su influencia total en el clima del mundo.

Cambios que afectan a los procesos de precipitación — Muchos de los aerosoles producidos por la industria tienen la propiedad de actuar como núcleos de condensación o de congelación, es decir, pueden iniciar la formación de gotículas de nubes o acelerar su congelación a temperatura por debajo de 0° C. Entre las fuentes de núcleos de congelación destacan las fábricas de acero y los compuestos de plomo de los escapes de los automóviles. También son excelentes núcleos de condensación los tipos más comunes de aerosoles producidos por la combustión del carbón y del aceite pesado, como, asimismo, los sulfatos.

Mientras que el efecto de estos núcleos de condensación y congelación en los procesos de precipitación está constreñido a ser notoriamente regional, y aunque se ha demostrado claramente que la precipitación ha aumentado a sotavento en determinadas ciudades como San Luis, Chicago y París (Dettwilles y Changnon, 1976), es difícil evaluar cuantitativamente el efecto de estas actividades, incluso a escala regional. Debemos contentarnos, por ahora, con reconocer este efecto potencial como verdaderamente real.

Existen diversos gases radiactivos que se desprenden en la atmósfera desde las centrales de energía nuclear y las plantas que generan combustible nuclear. Entre ellos es de notar el cripton-85, con una vida media de 10,7 años. El cripton-85 es un gas noble que existe más o menos permanentemente en la atmósfera sin combinarse químicamente y solamente sometido a una lenta desintegración radiactiva. La desintegración del cripton-85 radiactivo adicional en la atmósfera, produce algún aumento de la ionización de ésta, y puede estimarse que será del orden del 10 al 15 por 100 de crecimiento en la ionización o conductividad total de la atmósfera inferior, dentro de unos 50 años (Boek, 1976). Existe la posibilidad de que este crecimiento de la conductividad disminuirá el campo eléctrico global con cielo despejado lo que influiría a su vez en los procesos de electrificación y precipitación de las tormentas. Sin embargo, hay demasiadas dudas en este complejo conjunto de interacciones, para llegar a conclusiones definitivas sobre la magnitud de los efectos e incluso sobre el signo de ellos.

Configuraciones de utilización de las tierras — Hay muchas formas por las que la humanidad puede influir en el balance térmico de la Tierra, y una en la que se ha trabado al máximo, es en la alteración de las configuraciones de la vegetación. Cuando se tala un bosque para convertirlo en un terreno de pastos o en un trigo, el resultado es una zona que refleja generalmente más luz solar, puesto que las mieses y la hierba usualmente absorben menos que los árboles. Lo mismo ocurre cuando las tribus nómadas permiten que su ganado (y especialmente, el cabrío) pasten excesivamente en tierras marginales, ya que la destrucción de vegetación aumenta notablemente la reflectividad de la superficie (SMIC, 1971; Bryson y Baerreis, 1967).

Estos cambios en la radiación solar absorbida por la superficie deben, ciertamente, tener efectos en el balance térmico y el clima de una región, influyendo en sus precipitaciones, así como en su temperatura media (Charney y col., 1975; Charney, Ap. 2.6, GARP-16, 1975). Como efecto secundario, es muy probable un aumento en las tierra y arena arrastradas por el viento (lo que se discutió en los aerosoles) y ello afectará también a la radiación en superficie y a la estabilidad de la atmósfera sobre ella (Bryson y Baerreis, 1967).

Que nosotros sepamos, nunca ha existido un inventario a nivel mundial sobre este tipo de efecto, aunque estamos informados de que algunos cambios regionales en superficie han sido y continuarán siendo muy extensos (SMIC, 1971). Flohn (App. 1.2, GARP-16, 1975) ha efectuado estimaciones globales de algunos aspectos del problema, tales como el impacto energético de la conversión de los bosques lluviosos tropicales, en tierras de cultivo y el efecto del polvo troposférico debido a la destrucción de la vegetación y esto parece ser un buen comienzo. Aunque desconocemos cuál es el efecto acumulativo sobre nuestro clima de todos los cambios citados, creemos que no han sido tan importantes como algunos de los otros efectos que han sido descritos.

Resumen de la influencia de la humanidad en el clima— Se han expuesto varias causas antropógenas de los cambios de clima, en función de sus efectos en la temperatura media superficial y, en algunos casos, también en la precipitación. Puede observarse que, aún con las imprecisiones de nuestro conocimiento sobre el comportamiento del sistema climático y de los factores que determinan el clima, el efecto del crecimiento del anhídrido carbónico atmosférico aparece, con mucho, como el factor dominante. Además, muchos de los demás factores (notoriamente la generación directa de calor y las posibles adiciones de CFMs y óxido nitroso) contribuyen también a cambios de temperaturas en el mismo sentido de calentamiento.

La Figura 4 sintetiza el efecto del anhídrido carbónico solamente, despreciando las restantes influencias. Se observa que las fluctuaciones de las temperaturas medias superficiales en el pasado, a lo largo de varios siglos, y, probablemente, en los últimos mil años por lo menos, han sido

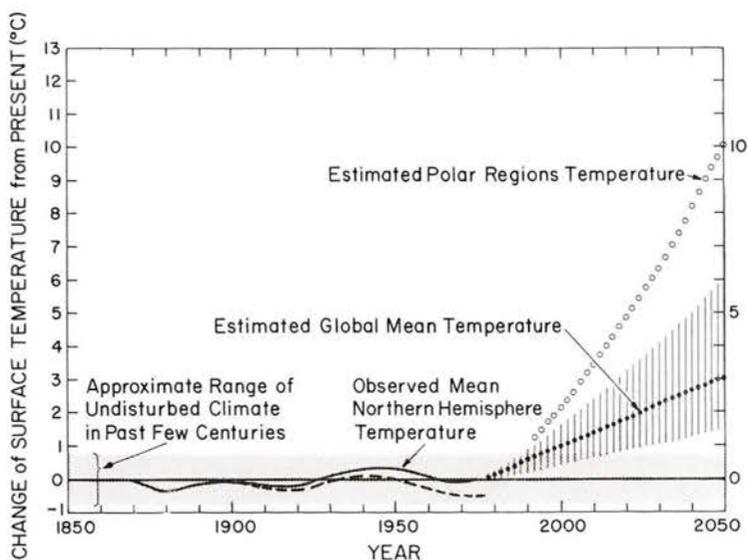


Figura 4.—Registro de la temperatura media superficial para el hemisferio norte desde 1860 (línea continua) y el que resultaría sin la adición de anhídrido carbónico (línea de trazos). El área sombreada incluye casi todas las fluctuaciones de la temperatura experimentadas a lo largo de los 1000 años últimos por lo menos. El cambio futuro de la temperatura media mundial (línea de puntos) es el que se indica en la Tabla 1, representando la zona rayada verticalmente la incertidumbre de un factor de dos, en los cálculos con modelos. Es de esperar que el cambio de la temperatura en la región polar sea de 3 a 5 veces superior a la media mundial. (Adaptado de Mitchell (1977).)

en general, inferiores a ± 1 grado centígrado, según se deduce de los registros climatológicos. Por lo tanto, podemos concluir que el calentamiento que es de esperar para el año dos mil, será el resultado de una situación climática más cálida, en promedio, que en cualquier época del milenio. Ello puede significar que, en términos estadísticos, la «señal» debida a las influencias antropógenas será, pues, superior al «ruido» de las fluctuaciones climáticas naturales. Esta estimación supone, desde luego, que la sociedad continuará incrementando la utilización de combustibles fósiles a aproximadamente el ritmo actual de crecimiento del cuatro por ciento anual y, por otro lado, que no habrá acontecimientos notables naturales que intervengan en contra del calentamiento antropógeno, como sería un período de actividad eruptiva volcánica muy intensa.

Se ha considerado el evento (más en la literatura popular que en la prensa científica) de la posibilidad de que nos encaminamos a otra «Era glacial». Incluso aceptando la teoría de que las edades glaciales e interglaciales tienden a alternarse en intervalos de cien mil años y que hay también periodicidades en los registros a largo plazo del clima, de unos veinte mil y cuarenta mil años (Hays y col. 1976; Mitchell, 1976; NAS, 1976), el ritmo de cambio de la temperatura media, como resultado de estas causas naturales a largo plazo, puede difícilmente superar 0,01 °C por década (o sea menos de 0,1 °C en la escala cronológica de esta perspectiva). Ello contrasta con el ritmo de cambio del 0,4 °C por década, debido al aumento de anhídrido carbónico hacia el año dos mil, que es 40 veces mayor. Debido a esto, parece prudente decir que no debemos razonablemente tener en cuenta este tipo de cambio climático a largo plazo en la presente discusión.

En la Tabla 2, hemos sintetizado la «mejor aproximación» sobre la influencia de la humanidad en la temperatura media superficial, incluyendo los efectos de la adición de otras trazas gaseosas absorbentes del infrarrojo, pero desconectando otros factores que antes se mencionaron, bien por no estar seguros de su magnitud, bien por estar convencidos de que sólo tendrán una importancia regional en el siglo próximo. Las cifras son probablemente correctas hasta un factor aproximado de dos, aunque cabe discutir esta estimación de incertidumbre.

TABLA II

Estimación más probable de la influencia de la Humanidad en la Temperatura Media Superficial. (Más o menos un factor de dos)

	<i>Actual</i>	<i>Año 2000</i>	<i>Año 2050</i>
Absoluta (°C)	0,5	+ 1,2	+ 4 cambio
Ritmo de Cambio (°C por década)	0,15	+ 0,5	+ 0,7

Hipótesis:

- La producción de clorofluorocarburos permanece al nivel de 1973.
- La adición directa de calor no será importante globalmente hasta 2050.
- No se incluyen los efectos de aerosoles y las configuraciones de utilización de las tierras.

NOTA DEL EDITOR: En la segunda parte de este artículo, que se publicará en la edición de enero de 1978 del *Boletín de la OMM*, el Dr. Kellogg se referirá a las implicaciones de una Tierra más caliente y a las cada vez más estrechas áreas de incertidumbre.

Las influencias sobre una sociedad en transición de un clima generalmente más cálido, presentan varios aspectos que varían de región a región. Entre ellas se incluyen aumentos de la estación de cultivo en las latitudes medias y altas, variaciones en las configuraciones de la circulación a gran escala y, como consecuencia, cambios en la precipitación y en las temperaturas regionales, disminución del área de los bancos de hielos oceánicos y posibles cambios (en un período cronológicamente más largo) en el volumen de las grandes capas de hielo que cubren Groenlandia y el Antártico, lo que podría afectar al nivel del mar.

Teniendo en cuenta que existe una considerable incertidumbre en estas perspectivas del clima futuro, está claro que no es demasiado prematuro considerar las decisiones políticas que tendrán que afrontar las naciones en semejante situación sin precedentes.

REFERENCIAS

- BACASTOW, R. B., and C. D. KEELING (1973): Atmospheric carbon dioxide and radio-carbon in the natural carbon cycle: I. Changes from AD 1700 to 2070 as deduced from a geochemical model, Chapt. in *Carbon and the Biosphere*, ed. by G. M. Woodwell and E. V. Pecan (Brookhaven Lab.), U. S. Atomic Energy Comm. CONF-720510 (available from Natl. Tech. Info. Service), pp. 68-135.
- BAES, C. F., H. E. GOELLER, J. S. OLSON, and R. M. ROTT, (1977): Carbon dioxide and climate: The uncontrolled experiment, *Amer. Scientist*, 65, pp. 310-320.
- BARRETT, E. W., 1975: Inadvertent weather and climate modification, *Critical Rev. in Environ. Control*, 6, pp. 15-90.
- BOECK, W. L., (1976): Meteorological consequences of atmospheric Krypton, 85, *Science*, 193, pp. 195-198.
- BOLIN, B., and W. BISCHOF (1970): Variations in the carbon dioxide content of the atmosphere of the northern hemisphere, *Tellus*, 22, pp. 431-442.
- BOLIN, B., L. GRANAT, L. INGELSTAM, M. JOHANNESON, E. MATTSSON, S. ODEN, H. RODHE, and C. O. TAMM (1971): *Air Pollution Across National Boundaries: The Impact on the Environment of Sulfur in Air and Precipitation*, Royal Ministry for Foreign Affairs and Royal Ministry of Agriculture, Stockholm, Sweden.
- BOLIN, B., and E. ARRHENIUS, eds., (1977): Nitrogen-an essential life factor and a growing environmental hazard, *Ambio*, 6, pp. 96-105.
- BORZENKOVA, I. I., K. YA VINNIKOV, L. P. SPIRINA, and D. I. STEKHNOVSKIY, (1976): Change in the air temperature of the northern hemisphere for the period 1881-1975. *Meteorologiya i Gidrologiya* (Moscow), No. 7, pp. 27-35. (NOAA Transl. UCD 551-524.34).
- BROECKER, W. S., (1975): Climatic change: Are we on the brink of a pronounced global warming? *Science*, 189, pp. 460-463.
- BRYSON, R. A., and D. A. BAERREIS, (1967): Possibilities of major climatic modification and their implications: Northwest India, a case for study, *Bull. Amer. Meteorol. Soc.*, 48, pp. 136-142.
- BUDYKO, M. I., and K. YA, VINNIKOV (1976): Global warming. *Meteorologiya i Gidrologiya* (Moscow), No. 7, 16-26. (NOAA Transl. UCD 551.583).
- CALENDAR, G. S., (1958): On the amount of carbon dioxide in the atmosphere, *Tellus*, 10, pp. 243-248.
- CHARNEY, J., P. H. STONE, and W. J. QUIRK, (1975): Drought in the Sahara: A biophysical feedback mechanism, *Science*, 187, pp. 434-435.
- DETTWILLER, J., and S. A. CHANGNON, Jr., (1976): Possible urban effects on maximum daily rainfall rates at Paris, St. Louis, and Chicago, *J. Appl. Meteorol.*, 15, pp. 517-519.

- GARP-16 (1975). *The Physical Basis of Climate and Climate Modeling*. WMO/ICSU Joint Organizing Comm., GARP Publ. Series No. 16, Geneva; Appendices cited in this report: 1.2-H. Flohn: History and intransitivity of climate; 2.1-E. N. Lorenz: Climatic predictability; 2.4-S. Manabe: The use of comprehensive general circulation modeling for studies of the climate and climate variation; 2.6-J. Charney: Dynamics of deserts and drought in the Sahel; and 8-B, Bolin: A critical appraisal of models of the carbon cycle.
- HAYS, J. D., J. IMBRIE, and N. J. SHACKLETON, (1976): Variations in the earth's orbit: Pacemaker of ice ages, *Science*, 194, pp. 1121-1132.
- KEELING, C. D., (1977): Impact of industrial gases on climate, Chapt. in *Energy and Climate: Outer Limits to Growth?* Natl. Acad. of Sci., Washington, D. C., in press.
- KEELING, C. D., R. B. BACASTOW, A. E. BAINBRIDGE, C. A. EKDAHL, Jr., P. R. GUENTHER, and L. S. WATERMAN, (1976a): Atmospheric carbon dioxide variations at Mauna Loa Observatory, Hawaii, *Tellus*, 28, pp. 538-551.
- KEELING, C. D., J. A. ADAMS, JR., C. A. EKDAHL, Jr., and P. R. GUENTHER, (1976b): Atmospheric carbon dioxide variations at the South Pole, *Tellus*, 28, pp. 552-564.
- KELLOGG, W. W., J. A. COAKLEY, Jr., and G. W. GRAMS (1975): Effect of anthropogenic aerosols on the global climate, *Proc. WMO/IAMAP Symp. on Long-Term Climatic Fluctuations* (Norwich, U. K.), WMO Document 421, Geneva, pp. 323-330.
- MACHTA, L., (1973): Prediction of CO₂ in the atmosphere, Chapt. in *Carbon and the Biosphere*, ed. by G. M. Woodwell and E. V. Pecan (Brookhaven Lab.), U.S. Atomic Energy Comm. CONF-720510 (available from Natl. Tech. Info. Service), pp. 21-31.
- MANABE, S., and R. T. WETHERALD, (1967): Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity, *J. Atmos. Sci.*, 24, pp. 241-259.
- MANABE, S., and R. T. WETHERALD, (1975): The effects of doubling the CO₂ concentration on the climate of a general circulation model, *J. Atmos. Sci.*, 32 pp. 3-15.
- MITCHEL, J. M., Jr., (1976): An overview climatic variability and its causal mechanisms. *Quaternary Res.*, 6, pp. 481-493.
- MITCHELL, J. M., Jr., (1977): Carbon dioxide and future climate, *EDS* (Environ. Data Service, Washington, D. C.), March, pp. 3-9.
- NAS, (1975): *Understanding Climatic Change: A Program for Action*, U. S. Comm. for GARP, Natl. Acad. Sci., Washington, D. C.
- NAS, (1976): *Halocarbons: Environmental Effects of Chlorofluoromethane Release*. Comm. on Impacts of Stratospheric Change, Natl. Acad. Sci., Washington, D. C.
- NOAA, (1975): *Geophysical Monitoring for Climatic Change*, No. 3, Summary Rept.-1974. ed. by J. M. Miller, Environ. Res. Labs., Natl. Oceanic and Atmosph. Admin., Boulder, Colo
- OESCHGER, H., U. SIEGENTHALER, U. SCHOTTERER, and A. GUGELMAN (1975): A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature, *Tellus*, 27, pp. 168-192.
- SCHNEIDER, S. H., (1975): On the carbon dioxide-climate confusion, *J. Atmos. Sci.*, 32, pp. 2060-2066.
- SFILLERS, W. D., (1974): A reassessment of the effect of CO₂ variations on a simple global climatic model, *J. Appl. Meteorol.*, 13, pp. 831-833.
- SIEGENTHALER, U., and H. OESCHGER, (1977): Predicting future atmospheric CO₂ levels. *Science*, in press.
- SMIC, (1971): *Inadvertent Climate Modification: Report of the Study of Man's Impact on Climate*, Mass. Inst. Tech. Press, Cambridge, Mass.
- VAN LOON, H., and J. WILLIAMS, (1976a): The connection between trends of mean temperature and circulation at the surface: Part I, Winter, *Mon. Wea. Rev.*, 104, pp. 365-380.
- VAN LOON, H., and J. WILLIAMS, (1976b): The connection between trends of mean temperature and circulation at the surface: Part II, Summer, *Mon. Wea. Rev.*, 104, pp. 1003-1011.