

CALENTAMIENTO GLOBAL CALCULADO CON EL MODELO TERMODINAMICO

René Garduño y Julián Adem
C. Ciencias de la Atmósfera-UNAM

Se reseña el trabajo de una década sobre la aplicación del modelo termodinámico del clima (MTC) de J. Adem a la simulación del efecto climático del aumento del CO_2 atmosférico. Calculamos los incrementos de temperatura, precipitación, etc, causados por una supuesta duplicación de la concentración de CO_2 en la atmósfera. Para esto tuvimos que mejorar el MTC en varios aspectos; se comenzó por refinar el espectro atmosférico de onda larga para que fuera sensible al contenido del CO_2 , posteriormente se incorporó la sensibilidad radiacional al contenido de vapor por agua (H_2O) y una parametrización de éste en términos de variables climáticas comúnmente medidas; con esto queda integrado al modelo el efecto climático de retroalimentación positiva entre temperatura y vapor. Además, se ha introducido una parametrización alternativa de nubosidad que da otra retroalimentación positiva. Con estos dos mecanismos, y el de criosfera (también positivo) que ya estaba incorporado, el MTC contiene los tres retroalimentadores considerados principales, todos debidos al agua.

Actualmente, los dos nuevos mecanismos están en valor promediado, global y anualmente, y en el futuro tendrán resolución espacio-temporal. Nuestros cálculos de calentamiento global se ubican, dentro del enjambre de resultados reportados por diversos autores con diferentes modelos, un poco debajo de la media. Hemos calculado también los factores de retroalimentación evaluando la contribución de los mecanismos con todas las combinaciones de uno o varios de ellos; estos factores resultan intermedios a los reportados por otros autores adicionalmente, las mejoras hechas al MTC han sido empleadas en otras aplicaciones de éste.

Hace diez años incorporamos al MTC la absorptividad atmosférica por CO_2 en el intervalo de 12μ a 19μ , tomada de Yamamoto y Sasamori (1958 y 1961). En esa banda sólo actuaba el CO_2 y el resto del espectro era fijo. Con esta parametrización calculamos el efecto climático de duplicar el CO_2 (Adem y Garduño, 1982). Posteriormente y usando el mismo espectro, hicimos cálculos más completos de los incrementos de variables climáticas, incluyendo la conservación del agua en el sistema, con la hipótesis de que el incremento de evaporación iguala al de condensación, punto por punto y mes por mes (Adem y Garduño, 1984).

Años después (Garduño y Adem, 1988) incorporamos al

MTC una nueva parametrización espectral, de 12μ en adelante, tomada de Smith (1969); en ella la absorptividad es función analítica de variables climáticas y de los contenidos de vapor de agua y de CO_2 en la atmósfera, con alta resolución espectral. Adicionalmente, parametrizamos el perfil vertical de humedad en términos de variables climáticas (Garduño y Adem, 1988). Con esto, el espectro resulta una función analítica que sólo depende de variables climáticas medidas comúnmente y del contenido de CO_2 , que se prescribe.

En años recientes adaptamos al MTC dos bandas de absorptividad de Ramanathan (1976) para longitudes de onda menores de 12μ , las cuales también se calculan con variables climáticas. Con esto, se completa el espectro atmosférico de onda larga analíticos e interactuante con el clima, quedando así incorporado al MTC el mecanismo climático de retroalimentación positiva por opacidad infrarroja del vapor de agua atmosférico.

También formulamos una parametrización alternativa de la extensión horizontal de nubosidad, basada en la hipótesis de conservación de humedad relativa en la atmósfera. Incorporada al MTC, esta parametrización produce otra retroalimentación positiva.

Ya anteriormente estaba incluida en el MTC la retroalimentación también positiva, por criosfera (extensión horizontal del casquete polar de hielo y nieve, cubriendo parcialmente océano y continente). Este mecanismo se genera haciendo coincidir la isoterma superficial de 0°C con la frontera del casquete.

Los mencionados son los tres principales mecanismos de retroalimentación del clima, todos se deben al agua, cada uno corresponde a una de sus tres fases.

En el MTC el mecanismo de criosfera tiene resolución espacio-temporal, pues se genera punto por punto y mes por mes, sin embargo, los de nubes y vapor están incorporados sólo en promedio anual y global.

Hemos manejado dos modelos, que difieren en el tratamiento espectral del vapor de agua. Este gas actúa realmente en todo el espectro de onda larga y así aparece en nuestro modelo ATM1; pero en el ATM2 el vapor no aparece en la banda del CO_2 (12μ a 19μ). ATM1 y ATM2 son propiamente las dos versiones del MTC

utilizadas en los cálculos de duplicación de CO₂.

La tabla I muestra los incrementos de temperatura superficial promedio y los respectivos factores de retroalimentación para todas las combinaciones posibles de los tres retroalimentadores; ocho casos, desde ningún mecanismo incluido hasta incluir los tres, y para los dos modelos. También se enlista el cociente de comparación entre los resultados de ambos modelos. En la tabla aparecen, además, los valores correspondientes calculados por otros autores, usando dos modelos de circulación general: Hansen y col (1984) y Schlesinger (1986), denotados HGCM y SGCM, respectivamente.

La figura 1 muestra algunas decenas de valores del incremento de temperatura superficial calculados por diversos autores con diferentes modelos, en las últimas décadas.

Del MTC se obtienen varias decenas de mapas mensuales y hemisféricos de temperatura superficial y de altura, precipitación, evaporación, balance y radiación, etc. Aquí sólo reportamos los resultados de incremento de temperatura superficial que es la variable climáticas más elevada. Como ejemplo, ilustramos en la figura 2 el mapa de julio, que se obtuvo del modelo completo (ATM1) con los tres retroalimentadores (caso 8).

En la figura 3 aparecen los espectros de emisión atmosférica que usamos: el de CO₂ (A), el de vapor (B) y el espectro conjunto de ambos gases (C). La emisión con el contenido actual de CO₂ es el área sombreada, su incremento por duplicación del CO₂ es la negra. Se ilustra para 280 K, pero esta temperatura es variable en el MTC.

Artículo aparecido en
Ciencia Rev. Invest. Cient. Septiembre 1992

Tabla I
Incrementos de temperatura y factores de retroalimentación

Caso	Retroalimentadores incluidos	Incremento de temperatura (°C)				Factor de retroalimentación				ATM2/ ATM1
		ATM1	ATM2	HGCM	SGCM	ATM1	ATM2	HGCM	SGCM	
1	(Δ CO ₂)	0.3	0.8	1.2	1.35	1.0	1.0	1.0	1.0	2.7
2	+Δ H ₂ O	0.4	1.1	2.0	1.94	1.3	1.4	1.7	1.4	2.8
3	+Δ nubes	0.4	1.3	1.6	1.38	1.3	1.6	1.3	1.0	3.3
4	+Δ criosfera	0.4	1.2	1.3	1.56	1.3	1.5	1.1	1.2	3.0
5	+Δ H ₂ O +Δ nubes	0.8	1.7	3.2	1.81	2.7	2.1	2.7	1.3	2.1
6	+Δ H ₂ O +Δ criosfera	0.5	1.8		2.39	1.7	2.3		1.8	3.6
7	+Δ nubes +Δ criosfera	0.6	2.2			2.0	2.8			3.7
8	+Δ H ₂ O +Δ nubes +Δ criosfera	1.2	3.5	4.2	2.69	4.0	4.4	3.5	2.0	2.9

Aumento de temperatura superficial en °C y factor de retroalimentación al duplicar el CO₂ atmosférico, obtenidos con nuestros modelos (ATM1 y ATM2), por Hansen y col (1984) (HGCM) y por Schlesinger (1986) (SGCM). El caso 1 es sin retroalimentadores, el caso 8 incluye los tres (a saber, los incrementos de vapor de agua, nubosidad y nieve-hielo), los casos 2, 3 y 4 tienen un retroalimentador y los 5, 6 y 7 tienen dos. ATM1 es nuestro modelo con vapor de agua actuando radiacionalmente en todas las longitudes de onda del espectro atmosférico, en ATM2 el vapor está ausente de la banda donde el CO₂ actúa (12 a 19 μ).

Se define factor de retroalimentación a la razón del incremento de temperatura en un caso, dividido entre la del caso 1. En la última columna aparece la razón del incremento de temperatura al cambiar de uno al otro de nuestros modelos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de Alejandro Aguilar, Rodolfo Meza y Jorg Zintzún, en las investigaciones aquí reportadas.

REFERENCIAS

- Ackerman, TP, *Tellus* (1979) 31, 115-123.
 Adem, J. y R. Garduño, *Geof Int* (1982) 21, 309-324.
 Adem, J. y R. Garduño, *Geof Int* (1984) 23, 17-35.
 Augustsson, T. y V. Ramanathan, *J. Atmos Sci* (1977) 34, 448-451.
 Charlock, TP, *J. Atmos Sci* (1981) 38, 661-663.
 Chou, MD. L. Peng y A. Arking, *H. Atmos Sci* (1982) 39, 2657-2666.
 Garduño, R. y J. Adem, *Atmósfera* (1988) 1, 157-172.
 Garduño, R. y J. Adem, *Reporte Técnico Núm. 13* (CCA, UNAM, 1988).
 Gutowski, WJ, WC Wang y PH Stone, *J. Geophys Res* (1985) 90, 13081-13086.
 Hansen, J.D. Johnson, A. Lacis, S. Lebedeff, P. Lee, D. Rind y G. Russel, *Science* (1981) 213, 957-966.
 Hansen, J. A. Lacis, D. Rind, G. Russell, P. Stone, I. Fung, R. Ruedy y L. Lerner, en *Climate processes and climate sensitivity*. JE. Hansen y T. Takahashi (Eds) (M. Ewing ser 5 AGU, Washington, 1984) 130-163.
 Hummel, JR, *Tellus* (1982) 34, 203-208.
 Hummel, JR, *J. Atmos Sci* (1982) 39, 879-885.
 Hummel, Jr, y WR, Kuhn, *Tellus* (1981) 33, 254-261.
 Hummel, Jr, y WR, Kuhn, *Tellus* (1981) 33, 372-381.
 Hummel, JR, y RA Reck, *J. Geophys Res.* (1981) 86, 12035-12038.
 Hunt, BG, *Tellus* (1981) 33, 78-88.
 Hunt, BG, y NC Wells, *J. Geophys Res.* (1979) 84, 787-791.
 Lal, M. y V. Ramanathan, *J. Atmos Sci.* (1984) 41, 2238-2249.
 Lindzen, RS, AY Hou y BF Farrell, *J. Atmos Sci.* (1982) 39, 1189-1205.
 Manabe, S, en *Man's impact on the climate*. WH Mathews, WW Kellogg y GD Robinson (EDS) (MIT Press, Cambridge, 1971) 249-264.
 Manabe, S, y RT Wetherald, *J. Atmos Sci* (1967) 24, 241-259.
 Manabe, S, y RT Wetherald, *J. Atmos Sci* (1975) 32, 3-15.
 Manabe, S, y RT Wetherald, *J. Atmos Sci* (1980) 37, 99-118.
 Ohring, G. y S Adler, *J. Atmos Sci* (1978) 35, 186-205.
 Ou, SCS, y N Liou, *J. Geophys Res.* (1985) 90, 2223-2232.
 Potter, GL, en *Environmental and climatic impact of coal utilization*. JJ. Singhy y A. Deepack (EDS) (Academic Press, Nueva York, 1980) 433-454.
 Ramanathan, V. *J. Atmos Sci.* (1976) 33, 1330-1346.
 Ramanathan, V. *J. Atmos Sci.* (1981) 38, 918-930.
 Ramanathan, V. MS Lian y RD Cess, *J. Geophys Res* (1979) 84, 4949-4958.
 Rasool, SI, y SH Schneider, *Science* (1971), 173, 138-141.
 Rowntree, PR, y J. Walker, en *Carbon dioxide, climate and society* J. Williams (ED) (Pergamon, Oxford, 1978) 181-191.
 Schlesinger, ME, *Reporte Núm. 41* (Clim Res Inst, OSU, Corvallis, 1983).
 Schlesinger, ME, *Adv Geophys* (1984) 26, 141-235.
 Schlesinger, ME, *Clim Dyn* (1986) 1, 35-51.
 Smith, V'L, *ESSA Tech Rep.* (1969) NES-47.
 Somerville, RCJ, y LA Remer, *J. Geophys Res.* (1984) 89, 9668-9672.
 Temkin, RL, y FM Snell, *J. Atmos Sci.* (1976) 33, 1671-1685.
 Tricot, Ch, y A. Berger, *Clim Dyn* (1987) 2, 39-61.
 Yamamoto, G. y T. Sasamori, *Sci Rep. Tohoku Univ.* 5th ser (1958) 10, 2.
 Yamamoto, G, y T. Sasamori, *Sci. Rep. Tohoku Univ.* 5th ser (1961) 12, 1.
 Wang, WC, G. Molnar, TD Mitchell y PH Stone, *J. Geophys Res.* (1984) 89, 4699-4711.
 Wang, WC, WB Rossow, MS Yao y M. Wolfson, *J. Atmos Sci.* (1981) 38, 1167-1178.
 Wang, WC, y PH Stone, *J. Atmos Sci.* (1980) 37, 545-552.
 Washington, WM, y GA Meehl, *J. Geophys Res.* (1983) 88, 6600-6610.
 Washington, WM, y GA Meehl, *J. Geophys Res.* (1984) 89, 9475-9503.
 Weare, BC, y FM Snell, *J. Atmos Sci* (1974) 31, 1725-1734.
 Wetherald, RT, y S Manabe, *Clim Change* (1986) 8, 5-23.

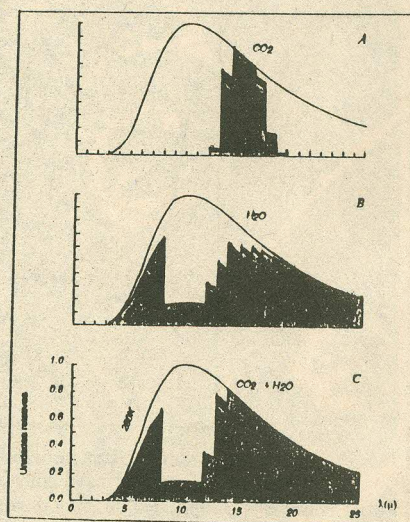


Figura 3. Espectros de emisión atmosférica usados en nuestros modelos: energía normalizada emitida en función de la longitud de onda (λ). El área sombreada es la energía emitida por la atmósfera con el contenido actual de CO_2 y el área negra es el incremento debido a la duplicación del CO_2 . Las partes A y B son los espectros para CO_2 y para vapor de agua, respectivamente. La parte C es el espectro para ambos gases combinados. Los espectros se ilustran con la curva de Planck para 280 K, pero esta temperatura es variable en los modelos.

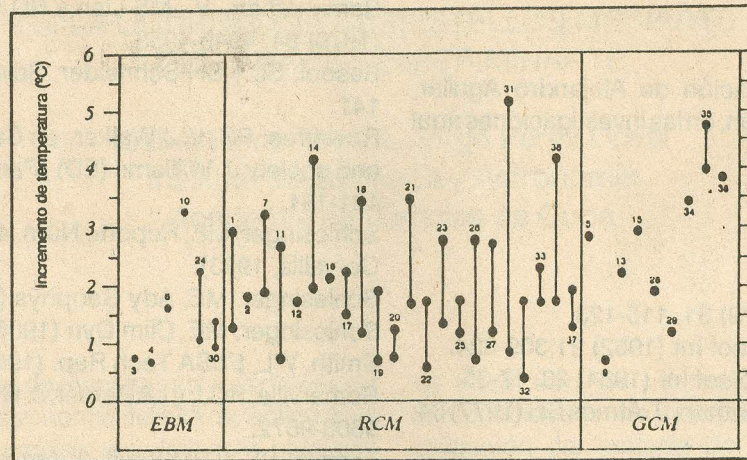


Figura 1. Incremento de temperatura superficial (en ° C) calculado para la duplicación del CO_2 atmosférico usando modelos de balance de energía (EBMs), modelos radioactivo-convectivos (RCMs) y modelos de circulación general (GCMs). Esta figura fue adaptada y modificada por Tricot y Berger (1987) a partir de una de Schlesinger (1984). Los resultados están numerados en orden cronológico: 1 Manabe y Wetherald (1967), 2 Manabe (1971), 3 Rasool y Schneider (1971), 4 Weare y Snell (1974), 5 Manabe y Wetherald (1975), 6 Temkin y Snell (1976), 7 Augustson y Ramanathan (1977), 8 Rowntree y Walker (1978), 9 Ohring y Adler (1978), 10 Ramanathan y col (1979), 11 Hunt y Wells (1979), 12 Ackerman (1979), 13 Potter (1980), 14 Wang y Stone (1980), 15 Manabe y Wetherald (1980), 16 Ramanathan (1981), 17 Charlock (1981), 18 Hansen y col (1981), 19 Hummel y Kuhn (1981), 20 Hummel y Kuhn (1981), 21 Hummel y Reck (1981), 22 Hunt (1981), 23 Wang y col (1981), 24 Chou y col (1982), 25 Hummel (1982), 26 Hummel (1982), 27 Lindzen y col (1982), 28 Schlesinger (1983), 29 Washington y Meehl (1983), 30 Adem y Garduño (1984), 31 Wang y col (1984), 32 Somerville y Remer (1984), 33 Lal y Ramanathan (1984), 34 Washington y Meehl (1984), 35 Hansen y col (1984), 36 Ou y Liou (1985), 37 Gutowski y col (1985), 38 Wetherald y Manabe (1986).

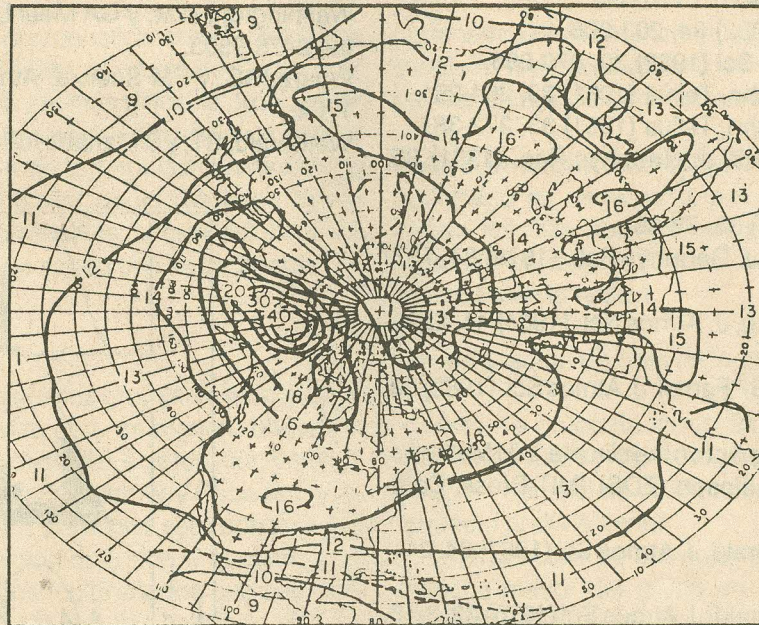


Figura 2. Incremento de temperatura superficial para julio (en décimas de ° C) debido a la duplicación de CO_2 atmosférico, calculado con nuestro modelo ATM1 (en el cual el vapor de agua actúa en todas las longitudes de onda del espectro atmosférico) para el caso 8 (que incluye los tres mecanismos retroalimentadores).