

UNA REVISIÓN DE LOS DATOS PALEOCLIMÁTICOS DE VOSTOK Y SU EXTRAPOLACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO GLOBAL ACTUAL

Daniela A. CRUZ PASTRANA y René GARDUÑO LÓPEZ

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

RESUMEN

A causa de la preocupación en el cambio climático inducido por el ser humano, esfuerzos considerables han sido dedicados a desarrollar estimaciones de la temperatura superficial media global del aire, basadas en registros instrumentales y evaluaciones de tendencias temporales, para el siglo pasado (HARTMANN, 1994).

Actualmente a partir de las observaciones que se realizan en observatorios meteorológicos a diario y de registros paleoclimáticos es posible el desarrollo de modelos de pronóstico para el clima de este siglo.

Estudios preliminares del hielo proveen información de temperatura, razón de precipitación local, flujo de aerosoles de origen marítimo, volcánico y terrestre, gases atmosféricos traza y propiedades físicas del hielo. El programa ruso-estadounidense-francés de perforaciones profundas y estudios de barrenos de hielo en la estación antártica de Vostok, alcanzó en 1998 una profundidad de perforación de 3.623 m, convirtiendo al barreno glacial de Vostok (BGV) en el más profundo recuperado. El registro del BGV abarca cuatro ciclos climáticos glacial-interglacial.

Las tres variables del BGV que se utilizaron en este trabajo son: anomalía de la temperatura, concentración atmosférica de CO₂ y CH₄. La temperatura, en el periodo que abarca el BGV, ha oscilado en un rango de anomalía de -8 a 2°C respecto a la normal 1961-1990; el CO₂ ha alcanzado una concentración mínima de 180 ppmv y máxima de 280 ppmv aproximadamente y; el CH₄ presenta sus mínimos con valores de 320-350 ppbv y sus máximos con 650-770 ppbv. Debido a que las concentraciones atmosféricas de CO₂ y CH₄, se mantuvieron dentro de rangos delimitados, se les ha llamado cotas naturales.

Mediante procedimientos estadísticos se presenta un escenario de temperatura para finales de siglo basado en la alta correlación de la anomalía de la temperatura y los GEI.

Palabras clave: Cambio climático, paleoclima, barreno glacial de Vostok, gases de efecto invernadero, variación de la temperatura.

ABSTRACT

The concern the anthropogenic climate change has led to considerable efforts for estimating the surface temperature trends for the past century (HARTMANN, 1994). Based on meteorological observations and paleoclimatic records, climate forecast for the present century are possible.

Analyses of ice cores yield information of temperature, precipitation, aerosol fluxes, atmospheric trace gases and physical properties of the ice.

The Russian-American-French drilling program, at the antarctic Vostok station, reached in 1998 a depth of 3623 m, the deepest ice core ever obtained, which spans over four glacial-interglacial cycles.

Three variables of the Vostok ice core were used in this work: temperature anomaly and both CO₂ and CH₄ atmospheric concentrations. The temperature anomaly oscillated between -8 and +2°C with respect to the 1961-1990 normal; the CO₂ between about 180 and 280 ppmv, and the CH₄ between 320-350 and 650-770 ppbv.

Using statistical techniques, an estimation of temperature for the year 2100 is presented, based in the high correlation of the temperature and the greenhouse gases.

Key words: Climatic change, paleoclimate, Vostok ice core, greenhouse gases, temperature anomaly.

1. REGISTRO GLACIAL DE PALEOCLIMA

Cualquier nevada abundante, que haya ocurrido en los últimos cientos de miles de años, es representada por el hielo que no se ha derretido (DANSGAARD, 1980). Los procesos de recristalización en las capas de nieve en los glaciares producen diferencias estacionales en la estructura y densidad, lo que resulta en una estratigrafía de capas anuales en las que las diferencias de un año a otro en la caída de nieve o acumulaciones prevalecen y pueden ser reconocidas (BENSON, 1962 y 1967).

Estudios preliminares del hielo proveen información de:

- a) Temperatura y razón de precipitación local, mediante estudios de composición isotópica;
- b) Flujo de aerosoles de origen marítimo, volcánico y terrestre, por medio de análisis de contenido químico, medidas de conductividad eléctrica y de polvo;
- c) Gases atmosféricos traza, en particular dos de los gases de efecto invernadero (GEI), CO₂ y CH₄, y,
- d) Propiedades físicas del hielo (PETIT, 1999).

Los aerosoles atrapados en el hielo dan evidencia de la cantidad de polvo en la atmósfera y la química de los aerosoles en el pasado. Las burbujas de aire atrapadas en el hielo proveen información de la composición gaseosa de la atmósfera en el momento en que se formaron las burbujas (HARTMANN, 1994).

2. DIAGNÓSTICO DEL BARRENO GLACIAL DE VOSTOK (BGV)

El *Programa ruso-estadounidense-francés de perforaciones profundas y estudio de barrenos de hielo en la estación Vostok*, que se localiza sobre el lago de Vostok, en una superficie plana de nieve del altiplano en la Antártida Este, con las coordenadas: 78°28' S, 106°48' E y 3.488 m s.n.m., inició en 1990 la perforación del agujero número 5G, el cual se detuvo durante la estación 1997-1998, al alcanzar una profundidad de 3.623 m, lo cual lo convirtió en el barreno de hielo más profundo recuperado; esto sitúa al barreno glacial de Vostok (BGV) en un importante sitio en la reconstrucción del paleoclima del planeta, ya que los 3.000 m superiores del barreno, proveen un registro de los últimos 400.000 años (PETIT *et al.*, 1999; ATCM Working Paper WP-019).

El análisis del BGV incluye: contenido de deuterio (δD) en el hielo, a partir de éste se reconstruye la serie de tiempo de temperatura local del aire, debido a que el deuterio está relacionado linealmente con la temperatura sobre el nivel de inversión térmica (donde se forma la precipitación) y con la temperatura superficial; contenido de polvo; concentración de sodio, el cual está relacionado con los aerosoles marinos; GEI y O¹⁸ atrapados en burbujas de aire los cuales reflejan cambios en el volumen del hielo global y en el ciclo hidrológico.

2.1. Diagnóstico bio-geo-físico-químico del BGV

En el análisis del BGV la variable independiente es el tiempo, la edad del hielo se determinó mediante un análisis isotópico. Del análisis por separado del hielo y de las burbujas de aire atrapadas en él, se obtuvieron cuatro variables principales, todas dependientes del tiempo.

Del estudio del hielo se obtiene de manera indirecta la temperatura, que se determina a partir de la medición de contenido de deuterio, el cual varía como lo hace la temperatura, tanto en el sitio donde se acumula la nieve, como en el nivel donde ésta se forma. El deuterio se expresa como una diferencia en partes por mil, con respecto al estándar medio del agua de océano $\delta D(\text{‰})$. La temperatura se expresa como una anomalía en grados Celsius con respecto al valor climatológico promedio 1961-1990, que es de $-55,5^{\circ}\text{C}$ (REINWART, 1989 y PETIT *et al.*, 1999).

Al analizar las burbujas de aire atrapadas en el hielo se obtiene de manera directa la concentración de CO_2 , CH_4 y $\delta^{18}\text{O}$ de O_2 (de aquí en adelante $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$), al momento de formarse las burbujas. El estudio de los dos primeros se realiza dada su importancia como GEI y el del tercero debido a que refleja cambios en el volumen global del hielo y en el ciclo hidrológico. El CO_2 se expresa como contenido absoluto en partes por millón de volumen (ppmv), el CH_4 como contenido absoluto en partes por mil millones de volumen (ppbv) y el $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ es una diferencia expresada en partes por mil (‰).

En la figura 1 se observan las curvas de CO_2 , temperatura, CH_4 , $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$ y la insolación a los 65°N para la mitad de junio de BERGER (1978). Aunque ésta última no se obtuvo del análisis del BGV, se presenta debido a que se considera que la insolación actúa como detonador en los cambios glaciales-interglaciales.

En la figura 1 se observa que las curvas de CO_2 , temperatura y CH_4 (a, b y c, respectivamente) tienen un comportamiento similar. Comprenden cuatro ciclos climáticos, los cuales tienen un máximo que dura un breve periodo, conocido como interglacial, seguido por una disminución oscilante en las tres variables, hasta llegar a una relativa estabilidad alrededor de los valores inferiores con un largo periodo de duración, denominado glacial; después de esto se presenta una súbita elevación de los valores que da inicio a un nuevo periodo interglacial.

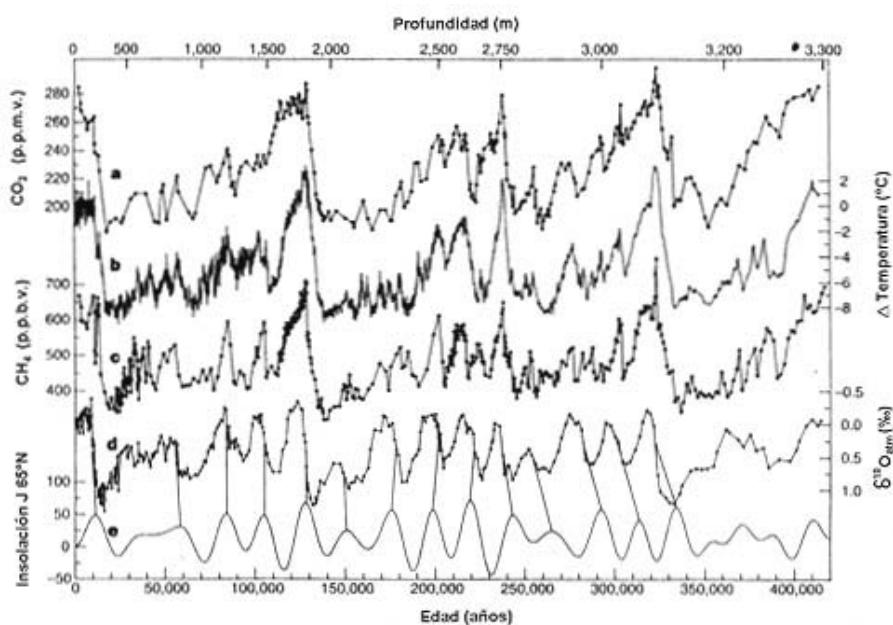


Fig. 1. Series de tiempo de Vostok e insolación. Series con respecto al tiempo de:
a, CO_2 ; **b**, anomalía de temperatura de la atmósfera; **c**, CH_4 ; **d**, $\delta^{18}\text{O}_{\text{atm}}$; y **e**, insolación a 65°N (en W m^{-2}) para la mitad de junio (PETIT *et al.*, 1999)

La gran semejanza entre el comportamiento de las curvas a, b y c, lleva a considerar a estos dos GEI como causa y/o efecto de la variación de la temperatura.

Primer caso: la variación de los GEI como causa y la de la temperatura como efecto. Los GEI se comportan como cuerpos transparentes ante la radiación de onda corta, lo que permite que la radiación solar, emitida en este rango de longitud de onda, pueda viajar a través de la atmósfera, llegar a la superficie del planeta y calentarla. Sin embargo, la radiación que emite la Tierra es de onda larga y los GEI son parcialmente opacos a tales longitudes de onda, por lo que no permiten que toda la energía que emite el planeta se fugue al espacio, sino que una fracción la absorben y la reemiten hacia la superficie calentándola aún más. Esto implica que la temperatura del planeta sea mayor de lo que sería si no hubiera GEI en la atmósfera.

Segundo caso: la variación de la temperatura como causa y la de los GEI como efecto. Un descenso de la temperatura genera una disminución en la producción de CH₄, debido a que la actividad biológica en los pantanos y hábitats similares se reduce y una disminución en el contenido de CO₂ ya que éste es más soluble en agua fría lo que ocasiona que el océano puede almacenar una cantidad mayor en un clima frío que en uno cálido.

Como lo menciona GARDUÑO (1994) el sistema climático incluye varios procesos que refuerzan o amortiguan las fluctuaciones y los cambios del clima, se les llama mecanismos retroalimentadores y se denominan positivos si su efecto es el de amplificar y negativos si es atenuar. En los períodos de transición entre glacial e interglacial la temperatura y los GEI actúan como retroalimentadores.

Como ya se ha mencionado, el registro del BGV presenta cuatro ciclos climáticos, a lo largo de 420.000 años (Fig. 1). En estos se puede ver una relativamente rápida transición del estado glacial al interglacial y una gradual transición del interglacial al glacial, lo que de acuerdo con FALKOWSKI *et al.* (2000), sugieren que la razón de absorción y emisión de CO₂ de los ecosistemas oceánicos y terrestres es asimétrica, esto es que no absorben y emiten a la misma velocidad. De la figura 1 se puede inferir que la extracción de CO₂ y CH₄ de la atmósfera, es más lenta y más estable que su ingreso a ésta y que es relativamente más sencillo calentar el planeta que enfriarlo; pero ese estado "caliente" es precario.

3. PERTURBACIÓN ANTROPÓGENA DEL SISTEMA NATURAL

Durante los 420.000 años pasados inmediatos, las concentraciones atmosféricas de CO₂ y CH₄, se han mantenido dentro de rangos delimitados, debido a esto se les ha llamado cotas naturales; éstas alcanzan sus máximos valores durante el período interglacial y sus mínimos durante el glacial. De acuerdo con los datos de PETIT *et al.* (1999), la concentración máxima natural de CO₂ atmosférico es de 280 ppmv y su mínima de 180 ppmv y las concentraciones de CH₄, van de 650-770 ppbv a 320-350 ppbv.

Del registro paleoclimático de Vostok se infiere que, debido a que tanto la temperatura como los GEI ya alcanzaron (y rebasaron) su cota máxima natural, lo correspondiente sería el inicio de un descenso en los valores de estas variables. Esto es, si el sistema continuara con su comportamiento cíclico nos encontraríamos en el final del período interglacial.

Los registros de cambios pasados en la composición atmosférica proveen el contexto para determinar la influencia de las emisiones antropógenas. La reconstrucción de series de datos climáticos para los 1.000 años pasados, indican que el calentamiento en los últimos 100 años fue inusual y que principalmente el de los 30 a 50 años recientes es por influencia antropógena, ya que las respuestas a las simulaciones de forzamiento únicamente natural no explican el calentamiento en la segunda mitad del siglo XX, pero ellas indican que el forzamiento natural pudo contribuir en el calentamiento de la primera mitad de ese siglo (MITCHELL *et al.*, 2001).

Durante cerca de mil años antes de la Revolución Industrial, la cantidad de GEI en la atmósfera permaneció relativamente constante, desde entonces la concentración de varios GEI se ha ido incrementando. La cantidad de CO₂ se incrementó en más del 30% desde la era preindustrial hasta el 2000; se determinó que este incremento es antropógeno debido al cambio en la composición isotópica del CO₂ atmosférico (BAEDE *et al.*, 2001).

3.1. Concentraciones actuales de GEI en la atmósfera

De acuerdo con HOUGHTON *et al.* (2001), la concentración atmosférica de CO₂ se incrementó en un 31% desde 1750. La concentración actual de CO₂ no fue alcanzada en los pasados 420.000 años y probablemente (66-90% de probabilidad) tampoco lo fue en los pasados 20 millones de años. En las décadas de los ochenta y noventa del siglo XX, la razón de incremento de la concentración de CO₂ atmosférico fue de 1,5 ppmv por año. De acuerdo con datos del observatorio de Mauna Loa, Hawaii, la concentración promedio de 2001 fue de 370,89 ppmv, la cual es la media aritmética de los valores observados el 15 de cada mes durante los doce meses del año.

La concentración atmosférica de CH₄ se incrementó en 1.060 ppbv desde 1750. La concentración presente de CH₄ tampoco fue alcanzada en los pasados 420.000 años (HOUGHTON *et al.*, 2001). La concentración promedio de CH₄ registrada en 2001 en el observatorio de Mauna Loa, Hawaii, fue de 1.766,38 ppbv.

4. ESTIMACIÓN DE LA MAGNITUD Y TEMPORALIDAD DEL CALENTAMIENTO POR RUPTURA DE LA COTA DE GEI

La base de datos del BGV obtenida de PETIT *et al.* (1999), consta de observaciones de variación de la temperatura (ΔT) cada metro a partir de la superficie, hasta 3.311 m de profundidad obteniendo un número similar de datos. Los datos de CO₂ y CH₄ se obtuvieron en los puntos en los que se localizaron burbujas de aire por lo que no tienen una distribución homogénea, ni espacial ni temporalmente. De CO₂ se tienen 283 datos y de CH₄ un total de 457.

El objetivo principal fue la obtención de una extrapolación de ΔT para los próximos 100 años, para lo cual se analizaron los datos y la relación que existe entre ellos a fin de poder proponer un modelo. Para esto primero se obtuvo una matriz de correlación entre las tres variables (Tabla 1), que permitiera saber si era factible proponer un modelo que relacionara las variables.

Tabla 1. Matriz de correlación entre ΔT , CO₂ y CH₄ considerando 181 tercias de datos

| | ΔT | CO ₂ | CH ₄ |
|-----------------|------------|-----------------|-----------------|
| ΔT | 1,00 | 0,84 | 0,81 |
| CO ₂ | 0,84 | 1,00 | 0,77 |
| CH ₄ | 0,81 | 0,77 | 1,00 |

Para la matriz de correlación (Tabla 1) se consideraron 181 tercias de datos, debido a que únicamente en estos puntos se presentan simultáneamente observaciones de las tres variables. En dicha tabla se observa que existe una alta correlación entre la ΔT y ambos GEI lo que es un indicio de la alta dependencia en el comportamiento de las tres variables.

La alta correlación entre las variables permite, por tanto, plantear un modelo de regresión. Sin embargo, dado que la ΔT sería la variable predictiva, no se debían utilizar ambos GEI como variables independientes, ya que éstos son *multicolineales* (están fuertemente correlacionados), lo cual de acuerdo con STORCH y ZWIERS (1999), daría como resultado una sobreestimación de los parámetros. Por tanto, conforme a la matriz de correlación lo más conveniente fue utilizar el CO₂ como variable independiente, ya que su correlación con la ΔT es más alta que la de ésta con el CH₄.

Se consideró una regresión lineal simple de la forma

$$\Delta T = a + b * \text{CO}_2 \quad (\text{Ec. 1})$$

y una polinomial de segundo grado

$$\Delta T = a + b * \text{CO}_2 + c * \text{CO}_2^2 \quad (\text{Ec. 2})$$

Únicamente fueron considerados modelos de las formas de las ecuaciones 1 y 2 debido a que el coeficiente de tercer grado en la regresión polinomial es insignificante.

Sin embargo, dado que el sistema climático no tiene una respuesta inmediata ante cambios naturales o inducidos, se hizo un corrimiento en los datos de CO₂ de aproximadamente 500 y 1.000 años al pasado, esto es, se propuso que el efecto de las concentraciones del GEI se ve reflejado en la temperatura, con tal retardo. El corrimiento de datos se hizo de forma manual, debido a que el número de observaciones no es el mismo para cada intervalo o profundidad de capa de hielo no es constante. Además, el mínimo corrimiento se hizo de 500 años ya que a partir de los 3.173 m de profundidad la mínima distancia temporal que hay entre dos puntos separados un metro es de 500 años.

La matriz de correlación para los corrimientos de 500 y 1000 años es similar en ambos casos, ésta se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Matriz de correlación entre ΔT , CO_2 y CH_4 , para un desplazamiento de los GEI de 500 y 1.000 años al pasado, en ambos casos la matriz es similar

| | ΔT | CO_2 | CH_4 |
|------------|------------|--------|--------|
| ΔT | 1,00 | 0,86 | 0,83 |
| CO_2 | 0,86 | 1,00 | 0,77 |
| CH_4 | 0,83 | 0,77 | 1,00 |

Para estos corrimientos se elaboraron igualmente regresiones del tipo de las ecuaciones 1 y 2. Las ecuaciones de regresión obtenidas a partir de las ecuaciones 1 y 2, se presentan en la tabla 3.

En la tabla 3 se observa que ΔT se encuentra mejor representada con el modelo polinomial con un corrimiento de 500 años, con un r^2 de 0,7895 lo que equivale a 78,95% de representatividad. De estas figuras se infiere que el CO_2 tiene un mayor impacto en la ΔT con un retraso de 500 años, lo que significa un periodo de respuesta muy lento, desde la perspectiva humana. Esta respuesta lenta se debe en parte a que el océano tiene una capacidad alta tanto calorífica como de absorción de CO_2 .

Tabla 3. Ecuaciones de regresión para las ecuaciones 1 y 2

| Periodo de corrimiento de los datos | Ecuaciones de regresión | r |
|-------------------------------------|--|----------|
| Sin corrimiento | $\Delta T = -25,4944 + 0,0915028(CO_2)$ | 0,866743 |
| | $\Delta T = -2,266277 - 0,1093706(CO_2) + 0,0004278(CO_2)^2$ | 0,873870 |
| 500 años | $\Delta T = -26,21753 + 0,094101(CO_2)$ | 0,882251 |
| | $\Delta T = -3,97408 - 0,0982572(CO_2) + 0,0004097(CO_2)^2$ | 0,888544 |
| 1.000 años | $\Delta T = -26,04407 + 0,0933543(CO_2)$ | 0,881385 |
| | $\Delta T = -3,231944 - 0,1039216(CO_2) + 0,0004202(CO_2)^2$ | 0,888102 |

Por tanto, el modelo que se eligió para realizar la extrapolación fue el de regresión polinomial con 500 años de retraso de la respuesta de ΔT ante el valor actual (año 2001) de CO_2

$$\Delta T = -3,97408 - 0,09826(CO_2) + 0,00041(CO_2)^2 \quad (\text{Ec. 3})$$

lo que arrojó como resultado un $\Delta T = 15,98^\circ\text{C}$ para el año 2500. Para la ecuación 3 el error estándar de estimación es $1,44^\circ\text{C}$.

Como observación actual de CO_2 atmosférico global, se tomó el último promedio anual disponible del observatorio de Mauna Loa, Hawaii, que corresponde a 2001.

Con el valor obtenido a partir de la ecuación 3 y el error estándar de estimación, se tiene que

$$\Delta T = (15,98^\circ\text{C} \pm 1,44^\circ\text{C}) / 500 \text{ años}$$

Considerando que a partir del registro actual, la tendencia de la temperatura sea lineal hasta el punto determinado a partir de la ecuación 3 y considerando que se desea obtener la variación de la temperatura para dentro de 100 años respecto al valor medio actual, se tiene que:

$$\Delta T_{100 \text{ años}} = 3,2 \pm 0,3^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, mediante procedimientos únicamente estadísticos a partir de las observaciones de Vostok y sin considerar las alteraciones correspondientes físicas, químicas y biológicas a causa de la salida del CO₂ de sus límites naturales, se considera que la temperatura aumentará 3,2°C con un error de ±0,3°C en los próximos 100 años. Este resultado no representa de forma completa el comportamiento de la temperatura superficial media global, dado que los gases por sí solos no explican la dinámica del sistema; pero está dentro del rango (1,9-5,8°C) previsto por el IPCC.

5. CONCLUSIONES

En el modelo de la ecuación 3 se tomó la concentración atmosférica de CO₂ como variable predictiva, considerándola como representativa de un mecanismo bio-geo-físico-químico complejo. Sin embargo, en el sistema climático ésta no es la única variable independiente y no se pretende señalarla como la más importante.

Además, aunque se planteó un periodo de respuesta de 500 años de la temperatura ante la variación de CO₂, es necesario un estudio del comportamiento del CO₂ que permita plantear con mayor detalle ese periodo de respuesta y su relación con otros componentes del sistema.

Aunque la extrapolación se realizó considerando un retardo en la respuesta de la variación de la temperatura de 500 años, el resultado (15,98°C ± 1,44°C) / 500 años no representa la tendencia que se considera para el próximo medio milenio. Se tomó un periodo de 500 años porque la base de datos del BGV, tiene una resolución de milenios, lo que no permite hacer una extrapolación para un periodo más corto.

El resultado obtenido para dentro de cien años (3,2 ± 0,3 °C) no explica la dinámica del sistema, pero está dentro del rango de incremento de temperatura para fines del siglo previsto por el IPCC (1,4-5,8°C). Es decir, que la metodología utilizada para estimar las variaciones futuras de la temperatura a partir de los registros de GEI del BGV, es aceptable.

Trabajo futuro, revisión de un mayor número de componentes del sistema como: la variación de vapor de agua en la atmósfera, el cambio en el albedo por vegetación e incremento en el nivel del mar, y su interacción desde un enfoque distinto al estadístico en el que se consideren las relaciones causa-efecto, a fin de plantear con mayor detalle una probable tendencia de la temperatura en el transcurso de un siglo.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Adalberto Tejeda Martínez, del Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana, los comentarios hechos a este trabajo.

7. REFERENCIAS

- ATCM WORKING PAPER WP-019. *Water Sampling of the Subglacial Lake Vostok*. Rusia: XXV ATCM On-Line: <http://salegos-scar.montana.edu/docs/researchprojects/ATCMWorking%20paperWP-019.pdf> [consultado 15 de enero de 2003].
- BAEDE, A.P.M. et al. (2001). The Climate System: an Overview. En: HOUGHTON et al. (Eds.) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Reino Unido y Nueva York, 881pp.
- BENSON, C.S. (1962). "Stratigraphic studies in the snow and firn of the Greenland Ice Sheet". *Res. Report*, 70.
- BENSON, C.S. (1967). "Polar Regions Snow Cover". *Physics of Snow and Ice*, pp. 1039-1063.
- BERGER, A.L. (1978). "Long-term variations of daily insolation and Quaternary climatic change". *J. Atmos. Sci.*, 35, pp. 2362-2367
- DANSGAARD, W. (1980). Palaeo-Climatic Studies on Ice Cores. En: OESCHGER, H., B. MESSERLI y M. SVILAR (Eds.) *Das Klima: Analysen und Modelle; Geschichte und Zukunft*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 237-245.
- FALKOWSKI, P. et al. (2000). "The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System", *Science*, 290, pp. 291-296
- GARDUÑO, R. (1994). *El Veleidoso Clima*. Colección La Ciencia desde México, 127, México, 170 pp.
- HARTMANN, D.L. (1994). *Global Physical Climatology*. Academic Press, USA, 411 pp.
- HOUGHTON, J.T. et al. (Eds.) (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press, Reino Unido y Nueva York, 881pp.
- MITCHELL, J.F.B. et al. (2001). Detection of Climate Change and Attribution of Causes. En: HOUGHTON et al. (Eds.) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Reino Unido y Nueva York, 881pp.
- PETIT, J.R. (1999). Evidence from the Vostok Ice Core Studies. Lake Vostok Workshop Final Report. On-Line: <http://www.ideo.columbia.edu/vostok/> [consultado 17 de diciembre de 2002].
- PETIT, J.R. et al. (1999). "Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica", *Nature*, 399, pp. 429-436
- REINWARTH, O. (1988). "Isotopenanalysen von Eisbohrkernen". *Promet: meteorologische fortbildung*, 19(1/2), pp. 7-15
- STORCH, H.V. y ZWIERS, F.W. (1999). *Statistical analysis in climate research*. Cambridge, Reino Unido 484pp.

