

y estimar los cambios en el clima como posible consecuencia de influencias perturbadoras específicas.

Estos objetivos son ramificaciones naturales del Subprograma del GARP de Dinámica del Clima. Fácilmente se observa que la base científica es excesivamente amplia en cuanto a materia, pues incluye no sólo procesos meteorológicos tales como dinámica atmosférica y radiación, sino también oceanografía, hidrología, criografía, biogeoquímica y paleoclimatología. El acceso del CCC a las comunidades científicas a través del CIUC y de la OMM será aún más importante que antes. Además, para alcanzar los objetivos totales del PMC, el PIMC necesitará colaborar con los otros tres componentes, intercambiando información para permitir que el PMC cumpla totalmente las aspiraciones de sus patrocinadores en el plazo más breve posible.

Al entrar el presente número en imprenta se ha conocido la noticia de que a los Profesores Smagorinsky y Jule G. Charney les ha sido concedido conjuntamente el premio Cleveland Abbe correspondiente a 1980, de la American Meteorological Society "por su destacada labor científica al frente del Programa de Investigación Mundial de la Atmósfera, el cual, después de un decenio, ha culminado en el notable éxito del Experimento Meteorológico Mundial". Felicitamos calurosamente a los Profesores Charney y Smagorinsky por este reconocimiento a su valiosa labor precursora.

RECONSTRUCCION DE LAS CONDICIONES CLIMATOLOGICAS EN EL PASADO A PARTIR DE LOS ESTUDIOS SOBRE LAS VARIACIONES DEL FRENTE GLACIAR

*Por W. KARLEN**

¿Podemos reconstruir las características de los climas del pasado basándonos en los datos geológicos y biológicos? ¿Tiene algún objeto pretender conseguir esta reconstrucción? Ambas preguntas pueden ser contestadas afirmativamente, aunque con ciertas reservas. En este artículo se analiza extensamente la primera pregunta. Respecto a la segunda, únicamente es necesario señalar que, a pesar de la moderna tecnología, la producción de alimentos depende en gran parte del clima y que un conocimiento de éste, en el pasado, podría ser decisivo para nuestras posibilidades a la hora de predecir el clima futuro. Por ejemplo, un estudio llevado a cabo por el Instituto de Ecología de los Estados Unidos de América mostró que, si se repiten las condiciones meteorológicas del año 1936, la producción de trigo, sorgo y soja, en los EE.UU. podría reducirse a un 27 por 100 de la cosecha de 1975 (Hinckley 1976). Incluso, si no pudiéramos prevenir los cambios climáticos accidentales, las predicciones facilitarían muchísimo la planificación (Thomas 1979) y reducirían los efectos de las catástrofes producidas por el clima.

Sería posible predecir las condiciones climatológicas futuras sólo en el caso de que el clima se comportase de alguna forma aleatoria. Se debería encontrar una razón de peso para elaborar un modelo, antes de que estos modelos puedan aceptarse como instrumentos de trabajo en la predicción. La reconstrucción de las condiciones climatológicas pasadas, proporciona información para comprobar las teorías propuestas sobre los cambios climáticos.

La información sobre las condiciones climatológicas de tiempos pasados puede conseguirse de varias formas. Cada técnica tiene sus limitaciones, pero la mayoría también

* Departamento de Geografía Física de la Universidad de Estocolmo (Suecia).

poseen claras ventajas. En la reconstrucción del clima del pasado deberán emplearse el mayor número posible de métodos de estudio, ya que con una combinación de los datos obtenidos probablemente se conseguirá un producto final más fiable. En este artículo, la discusión se limita al empleo de las variaciones del frente glaciar, que es un buen método cuando únicamente se pretende una información climatológica ligeramente suavizada.

Los glaciares y el clima

Los glaciares se forman donde la acumulación de nieve excede a la ablación. La masa de hielo así formada fluye hacia altitudes más bajas, hasta que las condiciones son tales que permiten una ablación suficientemente intensa para compensar las condiciones de la parte superior. Ya que las variaciones del frente glaciar son producidas por los cambios en la acumulación o ablación de la nieve (balance de masas del glaciar), es razonable suponer que también reflejen los cambios climatológicos del pasado. La relación entre el balance de masas y el clima es compleja, ya que el balance de masas viene afectado, tanto por las precipitaciones en estado sólido como por la actividad durante la época de fusión de los hielos (fusión debida al calentamiento por convección, radiación y condensación). Las variaciones del frente glaciar dan una indicación menos directa de los cambios climáticos que el balance de masas, pero desgraciadamente, no se dispone de suficiente número de datos antiguos sobre dicho balance.

La complicada teoría de cómo un glaciar reacciona frente a los cambios climáticos, fue pormenorizada por Nye (1965). Como respuesta al aumento en el balance neto de masas, una denominada "onda cinemática" desciende por la superficie del glaciar. Esta onda cinemática se desplaza a una velocidad varias veces superior a la del flujo real del hielo. El tiempo empleado por la onda en alcanzar la cara terminal del glaciar se llama tiempo de respuesta y viene determinado por factores tales como la forma geométrica del glaciar y las características del flujo. Para un pequeño glaciar de América del Norte (el South Cascade Glacier) y para el Storglaciären en Suecia se calculó este tiempo en varios decenios (Nye 1965).

Esto nos lleva a la conclusión de que los glaciares reaccionan a los enfriamientos climatológicos, solamente después de un considerable período de tiempo, y que incluso, dentro de una zona restringida, la respuesta de los diferentes glaciares no es sincrónica. Sobre estas bases, difícilmente será posible sacar ninguna conclusión sobre los cambios climáticos debidos a las fluctuaciones del frente del glaciar. Sin embargo, los frentes de los glaciares responden inmediatamente a los cambios en las condiciones de acumulación y ablación. Observaciones empíricas de los glaciares han mostrado una correlación directa entre las reacciones del frente y el clima. La información proporcionada por los avances controlados del glaciar cerca de Jostedalbreen en Noruega, indican un tiempo de respuesta de solamente unos pocos años, por término medio (Liestøl 1967). Hoinkes (1968) fue capaz de demostrar que en los Alpes, el intervalo de tiempo entre los veranos fríos de principios de este siglo y el período de avance glaciar fue muy pequeño o nulo. Messeril y otros (1978) obtuvieron unos resultados similares en los estudios sobre la evolución de un glaciar en los Alpes, durante los últimos 200 años. En todos los estudios donde las variaciones del frente glaciar se vayan a tomar como indicadores de los cambios climáticos, es importante estudiar varios glaciares diferentes, ya que alguno de ellos puede no reaccionar de forma normal.

Reconstrucción de las fluctuaciones del frente glaciar

Los estudios sobre las variaciones del frente glaciar están casi siempre enfocados hacia los distintos depósitos morrénicos que marcan la distancia máxima alcanzada por los avances de los numerosos glaciares. Con mucha frecuencia, las morrenas debidas a pequeños avances anteriores son invadidas, y casi en su totalidad destruidas, por los avances mayores, de forma que la cronología de las fluctuaciones del frente glaciar basadas en estos estudios morrénicos tienen tendencia a resaltar los avances más grandes y las subsiguientes fluctuaciones más pequeñas. Esto puede dar lugar a confusiones cuando se comparan tales cronologías, ya que pueden aparecer discrepancias debidas a fenómenos de magnitudes ligeramente diferentes. Este problema puede evitarse empleando cronologías que incluyan informaciones obtenidas por métodos estratigráficos, ya que con estos métodos pueden registrarse fenómenos relativamente pequeños. Sin embargo, incluso estas cronologías tienen algunos inconvenientes; por ejemplo; la dificultad de distinguir entre los fenómenos propios del glaciar y los fenómenos locales, tales como los hundimientos.

Una cuestión importante, relacionada con los estudios sobre las fluctuaciones del frente glaciar, es conocer si los avances en las diferentes zonas fueron sincrónicos. Esto es esencial para evaluar de forma realista la precisión de las técnicas empleadas para la determinación de las fechas. A continuación se examinan algunos posibles errores cometidos al fijar la fecha de los fenómenos del glaciar. A tal fin se disponen de numerosos datos escritos y de dibujos contenidos en un documento de los Alpes sobre las posiciones del frente glaciar que data del año 1546 A.C. (Le Roy Ladurie, 1971), así como de antiguos datos históricos de otras zonas. Generalmente estos datos se refieren solamente a unos pocos glaciares y dan una descripción incompleta de la posición de la cara terminal del glaciar, al mismo tiempo que las observaciones se anotaron solamente de forma esporádica. Generalmente los datos históricos proporcionan información precisa y fiable, pero desgraciadamente, muy pocas veces se mostró interés en registrar la fecha de la máxima extensión del glaciar. Podría conseguirse una pequeña serie de datos concernientes a los períodos de avance glaciar dado que estos fenómenos algunas veces influyeron en la economía de las zonas agrícolas. La mayor parte de la información está relacionada con los grandes glaciares, cuando probablemente, son los pequeños glaciares los que reaccionan de forma más sensible a los cambios climáticos. Por tanto, no se puede esperar que muchas de estas cronologías construidas sobre datos históricos sean "completas".

Otra técnica que se emplea corrientemente para fijar la fecha de los cambios del frente glaciar está basada en el estudio de los anillos de crecimiento anual de los árboles (dendrocronología). La principal ventaja de estos métodos dendrocronológicos es que proporcionan fechas precisas. Sin embargo, su aplicación viene limitada en el presente contexto, ya que la mayoría de los glaciares no se extienden por zonas forestales y aunque esto sucediera, hay que tener en cuenta que, la duración media de la vida de los árboles es de sólo unos pocos cientos de años, lo que limita el alcance de esta técnica. Los datos más fiables se obtienen a partir de los árboles que actualmente están inclinados debido al avance del hielo o de los acarreo, pero desgraciadamente este tipo de información es muy escasa. Lo más corriente para determinar las fechas es contar los anillos de los árboles que crecen en la cima de las morrenas o en las aguas de fusión del glaciar. Esto fija un tope mínimo fiable para la determinación del final del período de avance glaciar, pero el intervalo de tiempo que media entre este final y el nacimiento del bosque tiene que ser estimado, lo que reduce la precisión de esta técnica.

Se ha tratado bastante (por ejemplo Olsson, 1970), sobre la fiabilidad de la técnica de la datación isotópica del carbono y la relación entre los períodos del C^{14} y su edad actual. En este artículo basta con señalar unas cuantas dificultades encontradas en el empleo de esta técnica. Un problema serio es que el contenido atmosférico del C^{14} fluctúa (Stuiver 1978). Esto puede conducir a la obtención de datos erróneos, ya que muestras orgánicas, realmente separadas por varios cientos de años, pueden mostrar la misma edad del C^{14} . Cuando este método se aplica a la reconstrucción de las variaciones del frente glaciar, la precisión viene limitada, además de lo anterior, por las dificultades, tanto para determinar el origen del material fechado (Griffey y Matthews 1978), como para la interpretación estratigráfica. Probablemente el material que se emplea con mayor frecuencia para determinar la fecha en los estudios cronológicos de los glaciares es el abono enterrado, que ocasionalmente puede encontrarse en secciones estratigráficas entre las morrenas (por ejemplo Schneebeli y Röthlisberger 1976). La edad indicada por el C^{14} del abono enterrado puede ser algo mayor que el tiempo de avance del glaciar, ya que este abono se formó durante un período cronológico de duración desconocida, antes de quedar enterrado en la morrena. Esta diferencia de tiempos, conocida como tiempo de permanencia media, se estima generalmente en unos pocos cientos de años (Griffey y Matthews 1978, Karlén 1979), pero en esto pueden haber grandes variaciones, dependiendo de los constituyentes del abono, de la edad del sustrato y del clima local.

Por tanto, se deduce que las fechas obtenidas por medio de la técnica del C^{14} no indican los avances glaciares más que con una precisión del orden de algunos cientos de años, y, por esta razón, el método raramente puede determinar si los avances producidos en las diferentes partes del mundo fueron contemporáneos.

La liquenometría es otro método que últimamente se ha venido aplicando con frecuencia. Fue desarrollado por Beschell (1950) y desde entonces ha sufrido ciertas modificaciones. La técnica se basa en el hecho de que los líquenes inmigran rápidamente a zonas recientemente expuestas y después crecen a un ritmo constante. Ciertas especies de líquenes son más adecuadas que otras para fines de determinación de fechas, porque son más abundantes, tienen un ritmo de crecimiento más lento y se pueden identificar y medir con mayor facilidad. La principal ventaja de esta técnica estriba en que puede emplearse en la mayoría de las morrenas, lo que permite obtener un conocimiento a escala regional del comportamiento de los glaciares. Entre los inconvenientes están, la necesidad de disponer de una zona adecuada con suficiente extensión para favorecer la inmigración de los líquenes, los posibles efectos significativos que las condiciones climatológicas locales pudieran tener en el crecimiento de los mismos, la dificultad de identificar correctamente ciertas especies de líquenes y el probable desplazamiento de los mismos hacia abajo desde las laderas circundantes. Estas complicaciones hacen que esta técnica se tenga que utilizar con cierta reserva. En otras palabras, la aplicación de la liquenometría entraña una cierta cantidad de evaluación subjetiva.

Además, a menudo resulta difícil deducir la edad real del líquen basándose en su tamaño. El ritmo de crecimiento del líquen varía con el clima, y debe de determinarse para cada zona la correlación edad-tamaño. Dado que son escasos los puntos apropiados de control, las fechas obtenidas por medio de esta técnica pueden contener ciertos errores. Parece ser que el método es muy útil en ciertas zonas, tales como el norte de Suecia, pero en cambio para otras, como por ejemplo la costa occidental de Noruega es menos apropiado (Karlén 1976, 1979), debido probablemente al carácter más marítimo del clima de Noruega.

Fluctuaciones de los glaciares en el Holoceno

Se ha reunido una gran cantidad de información sobre los avances de los glaciares, pero solamente se han conseguido muy pocas y dispersas fechas que indiquen el retroceso de los mismos (analizadas por Porter y Denton 1967, Grove 1979). Los datos de los avances de los glaciares son corrientes durante los últimos 2.000-3.000 años, pero en cambio para el Holoceno antiguo y medio son raros, debido probablemente a que los vestigios de los avances producidos durante este período han sido destruídos.

Basándose en los avances fechados de los glaciares, se han formulado diversas hipótesis relativas a la frecuencia del ciclo de las fluctuaciones climatológicas. Denton y Karlén (1973) sugirieron un intervalo de 2.500 años aproximadamente para el proceso evolutivo de los avances, particularmente pronunciados, de los glaciares. Miller (1960) observó una periodicidad de 1.600 años en la actividad del glaciar de la isla de Baffin y más recientemente Andrews y Barnett (1979) sugirieron un período de 300 a 600 años para la misma zona.

Generalmente las variaciones del frente glaciar revelan únicamente los fenómenos particularmente intensos, pero en cierta medida este problema puede resolverse mediante los estudios estratigráficos de los sedimentos encontrados en los lagos situados aguas abajo de los pequeños glaciares. En los sedimentos de tales lagos, la cantidad relativa de limo varía con la actividad del glaciar, y las variaciones en el contenido del mismo, en las diferentes capas se determina fácilmente por medio de rayos X. Un estudio de este tipo, que actualmente realiza el autor en la región septentrional de Suecia, confirma que el antiguo y medio Holoceno fueron relativamente calientes y que el clima se volvió más frío hace 2.000-3.000 años, lo que dio origen a varios glaciares en esta época. Las fluctuaciones climatológicas de frecuencia más alta se superpusieron a esta tendencia general. Los resultados de los estudios sobre los sedimentos lacustres indican que los intervalos entre los avances glaciares se redujeron a unos pocos cientos de años. Todavía no han sido detectados otros ciclos diferentes durante el Holoceno.

Estos descubrimientos confirman inicialmente los resultados obtenidos por el análisis del polen, referentes a un calentamiento relativo en el Holoceno medio, seguido de un período de enfriamiento hace aproximadamente 2.000-3.000 años. Sin embargo, en la actualidad, existen datos fucientes que prueban que también en el antiguo y medio Holoceno ocurrieron muchos avances glaciares. Las fluctuaciones climatológicas de mayor frecuencia reflejadas en los vestigios estratigráficos muestran que han sido de la misma magnitud relativa durante todo el Holoceno, y en realidad, pudieran haber tenido más importancia para la humanidad que las variaciones a largo plazo.

Ya se ha mencionado que los avances glaciares raramente pueden ser fechados con una precisión superior a unos pocos cientos de años, y aunque han sido frecuentes en el Holoceno, los vestigios dejados por muchos de ellos han sido destruídos. Así pues, es difícil utilizar los resultados obtenidos en estos estudios del frente glaciar para determinar si existió un exacto sincronismo en los cambios climatológicos producidos en grandes zonas; no obstante, tales estudios son útiles para intentar determinar si los períodos de enfriamiento climático se produjeron a escala mundial.

El período más relevante de avances sincrónicos de glaciares fue la “pequeña edad de hielo”. Se han dado varias fechas para el comienzo de este período, pero todos los estudios están fundamentalmente de acuerdo en que los avances glaciares, durante los siglos XVII, XVIII y XIX fueron particularmente extensos. Estudios más detallados

realizados dentro de este período indican también avances coincidentes. Otros períodos caracterizados por avances en muchas partes del mundo tuvieron lugar hace 1.000-1.100 y 2.000-3.000 años. Durante este último período el clima no fue continuamente frío, pero las caras terminales de los glaciares casi alcanzaron sus más alejadas morrenas en tres o cuatro ocasiones. En diversas partes del mundo, las morrenas están fechadas por medio del C¹⁴ entre 4.000 y 5.000 años antes de la época actual, pero la evidencia de una expansión a escala mundial de los glaciares en este período es menos convincente que para los otros intervalos de tiempo antes mencionados. También pueden encontrarse morrenas fechadas en otros períodos del Holoceno, pero tales fechas rara vez coinciden. No está claro si esto es debido a la falta de precisión de las técnicas de fechado, a los datos incompletos o al hecho de que estas morrenas marcan únicamente acontecimientos locales.

Conclusiones

- Muchos glaciares son indicadores sensibles de los cambios climáticos.
- Las morrenas marcan la extensión máxima de algunos de los grandes avances y de algunas fluctuaciones pequeñas. Las morrenas de la mayoría de los avances glaciares han sido invadidas, y en gran parte destruídas, por los posteriores avances más extensos.
- Los vestigios de incluso los menores avances, pueden obtenerse algunas veces mediante estudios estratigráficos de las morrenas y mediante el análisis de los sedimentos lacustres procedentes del glaciar.
- Los fenómenos glaciares raramente están fechados con suficiente precisión como para permitir sacar conclusiones sobre las expansiones sincrónicas glaciares a escala mundial, pero los vestigios disponibles indican que, incluso en zonas muy alejadas, los avances glaciares fueron particularmente extensos durante los mismos grandes períodos.
- Diversos estudios han sugerido un modelo de cronometraje de los fenómenos glaciares. Sin embargo, los resultados publicados no son por ahora convincentes.

BIBLIOGRAFIA

- ANDREWS, J.T. and D.M. BARNETT (1979). Holocene (neoglacial) moraine and preglacial lake chronology, Barnes Ice Cap, Canadá. *Boreas*, 8 págs. 341-358.
- BESCHELL, R. (1950). Flechten als Altermasstab rezenter Moränen. *Z. Gletscherkd. Glazialgeol.*, 1 págs. 152-161.
- GRIFFEY, N.J. and J.A. MATTHEWS (1978). Major neoglacial glacier expansion episodes in southern Norway: Evidences from moraine ridge stratigraphy with ¹⁴C dates on buried palaeosols and moss layers. *Geogr. Ann.* 60 (A), págs. 73-90.
- GROVE, J.M. (1979). The glacial history of the Holocene. *Progress in Physical Geography*, 3 págs. 1-54.
- HINCKLEY, A.D. (1976). *Impact of climatic fluctuations on major North American food crops*. The Institute of Ecology, Washington D.C.
- HOINKES, H.C. (1968). Glacier variation and weather. *J. of Glaciology*, 7 págs. 3-19.
- KARLEN, W. (1973). Holocene glacier and climatic variations, Kebnekaise Mountains, Swedish Lapland. *Geogr. Ann.* 55 (A), págs. 29-63.
- (1976). Lacustrine sediments and tree-limit variations as indicators of Holocene climatic fluctuations in Lappland, northern Sweden. *Geogr. Ann.* 58 (A), págs. 1-34.
- (1979). Glacier variations in the Svartisen area, northern Norway, *Geogr. Ann.* 61 (A), págs. 11-28.
- LE ROY LADURIE, E. (1971). *Times of feast, times of famine: a history of climate since the year 1000*. Doubleday & Company Inc., New York. 426 págs.
- LIESTOL, O. (1967). *Storbreen glacier in Jotunheimen, Norway* Norsk Polarinstittutt, Skrifter No. 141, 63 págs.

- MESSERLI, B., P. MESSERLI, C. PFISTER and C.H. ZUMBUHL (1978). Fluctuations of climate and glaciers in the Bernese Oberland, Switzerland, and their geological significance, 1600 to 1975. *Artic and Alpine Research*, 10 págs., 247-260.
- MILLER, A.A. (1961). *Climatology*. Ninth edition. Methuen & Co., London, 320 págs.
- NYE, J.F. (1965). The frequency response of glaciers. *J. of Glaciology*, 5 págs., 567-607.
- OLSON, I.U. (editor) (1970). *Radiocarbon variations and absolute chronology*. Nobel Symposium 12; Almquist & Wiksell, Stockholm. 652 págs.
- PORTER, S.C. and G.H. DENTON (1967). Chronology of neoglaciation in the North American Cordillera. *American Journal of Science*, 265 págs., 177-210.
- SCHNEEBELI, W. and F. ROTH LISBERGER (1976): 8000 Jahre Walliser Gletschergeschichte. *Die Alpen*, 52 págs., 1-152.
- THOMAS, M.K. (1979). ¿Predicciones climatológicas? – La importancia de la información y de las predicciones climatológicas. *Boletín de la OMM* 28 págs., 114-117.

EL CENTRO "AGRHYMET" DE NIAMEY

INAUGURACION OFICIAL, NOVIEMBRE DE 1979

En la mañana del sábado 24 de noviembre de 1979, el Excmo. Sr. Daouda Diawara, Presidente de la República de Gambia y actual Presidente de la Conferencia de Jefes de Estado del Comité Interestatal Permanente para la Lucha Contra la Sequía en el Sahel –el CILSS—* inauguró oficialmente el Centro de Formación Profesional y Aplicaciones de la Agrometeorología y la Hidrología Operativa, conocido generalmente como el Centro AGRHYMET (véase también la pág. 160).

Al término de la prolongada y grave sequía que afectó a muchas partes de la región sudano-saheliana de Africa desde 1968 hasta 1973, seis países de la zona más afectada, a saber, Chad, Mali, Mauritania, Níger, Senegal y Alto Volta, constituyeron el CILSS en un esfuerzo para prevenir tan desastrosas consecuencias en el futuro. A estos seis países se adhirieron posteriormente Gambia en 1974 y Cabo Verde en 1975.

Niamey, noviembre de 1979. – El Presidente Kountché de la República de Níger (a la izquierda) con el Presidente Diawara de la República de Gambia con ocasión de la inauguración oficial del Centro AGRHYMET.



En el contexto del programa de desarrollo del Sahel, cuyo objetivo es el progreso autónomo y el auto-abastecimiento en materia de alimentación, se da gran prioridad

* Comité inter-états pour la lutte contre la sécheresse dans le Sahel.