

# POSIBLES CONSECUENCIAS CLIMATICAS DE UNA GUERRA NUCLEAR A GRAN ESCALA

## *Introducción*

Recientemente, se han emprendido estudios en respuesta a la preocupación que existe sobre los posibles efectos atmosféricos y climáticos a largo plazo de un conflicto nuclear a gran escala. El Comité Científico Mixto discutió, en su quinta reunión (Hangzhou, marzo de 1984), los aspectos climáticos de este problema, y encargó a dos de sus miembros, el Dr. G.S. Golitsyn y el Dr. N.A. Phillips, la preparación de un informe de la situación para presentarlo a la reunión del año siguiente. En este informe se analizan los estudios recientes y se resumen las conclusiones de un informe general publicado por el National Research Council de EE.UU. (NRC (1984)).

Bajo el tema genérico conocido como "invierno nuclear", se está publicando gran cantidad de literatura científica, en la que se postula que la inyección en la atmósfera de grandes cantidades de aerosol negro, producido por los incendios masivos provocados por las explosiones nucleares, producirá temperaturas bajo cero en la superficie de la Tierra.

Los aerosoles atmosféricos pueden, o bien enfriar la superficie al impedir el paso de la luz solar, o bien calentarla por el conocido "efecto invernadero". Que ocurra uno u otro de estos dos fenómenos depende del tamaño de las partículas. Si éstas son menores que la longitud de onda típica de la radiación terrestre en el infrarrojo (aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ ), el efecto invernadero será reducido y se reforzará la absorción de la radiación "visible". Las partículas oscuras de hollín, con tamaños entre una y diez décimas de micra (como las que se desprenderían debido a los incendios a gran escala), absorben fuertemente la radiación visible, pero son casi transparentes a la infrarroja. Por lo tanto, para evaluar las posibles consecuencias climáticas de una guerra nuclear, necesitamos considerar primero la producción de partículas finas en gran cantidad y la evolución de éstas con el paso del tiempo.

## *Humo y polvo producidos por un gran conflicto nuclear -Un escenario -*

Los estudios recientes están basados en la hipótesis de que se lanza una parte importante del arsenal nuclear existente sobre objetivos situados en las latitudes medias del hemisferio norte. La mayoría de las armas nucleares de hoy son del orden de un megatón (1 Mt) (que es el explosivo equivalente a un millón de toneladas de TNT). El escenario del NRC se basa en 6.500 Mt, un conflicto en que entra en juego aproximadamente la mitad del arsenal nuclear de 1983; se estima que en esas circunstancias quedarían completamente destruidas 1.000 ciudades por los incendios generalizados, creando grandes cantidades de humo negro carbonoso.

Aún no está bien estudiada la producción de humos por incendios a gran escala. Las estimaciones sugieren que una ciudad moderna contiene cantidades importantes de material combustible, que alcanza una concentración de 200 kg  $\text{m}^{-2}$  en el centro de la urbe; una ciudad de un millón de habitantes contendrá entre diez y cuarenta millones de toneladas de material combustible (Larson y Small (1982)). Admitiendo que sólo arda realmente la mitad de este material, con el 1 por ciento de producción de humo carbonoso, Crutzen *et al.* (1984) calculan que el desprendimiento de humo a la atmósfera sería entre 50.000 y 200.000 toneladas. La cantidad total de humo que se generaría por los incendios urbanos depende también del escenario elegido -en su escenario *Ambio*, Crutzen y Birks (1982) consideran que 1000 blancos urbanos producirían entre 50 y 200 millones de toneladas de humo. Pero, desde luego, también se producirían humos al quemarse el petróleo bruto al-

macenado, los pozos de petróleo y de gas y los grandes bosques. El petróleo almacenado actualmente se calcula en 10<sup>9</sup> toneladas, y su combustión total generaría 100 millones de toneladas de humo (Teller (1984)). Según Crutzen y Birks (1982), los incendios forestales podrían afectar a un área de un millón de kilómetros cuadrados y producirían unos 150 millones de toneladas de humo. El informe de los ponentes del CCM (Golitsyn y Phillips) concluye que la producción total de humo de los incendios urbanos y forestales y de la combustión de los pozos y depósitos de almacenamiento de petróleo bien podría superar los 100 millones de toneladas. Los cálculos del estudio del NRC dan 180 millones de toneladas, con un margen de fiabilidad desde 20 hasta 650 millones de toneladas.

Otra fuente de contaminación atmosférica sería el polvo levantado por las explosiones en superficie o cerca de ella. Los datos disponibles indican que estas últimas generarían unas 7.000 toneladas de partículas de menos de una micra por cada megatón de explosivo. Una vez que alcanzan la altitud de 10 km o más, las partículas de este tamaño permanecen en la atmósfera durante meses, pero el polvo produce principalmente la dispersión de la luz y no tiene un efecto tan catastrófico como el humo. Por ejemplo, la erupción del volcán Krakatoa de 1883 lanzó a la estratosfera unas 7.000 toneladas de polvo, y el enfriamiento medio observado en superficie fue de sólo 0,5 K.

La distribución vertical del humo poco después de un conflicto nuclear, y su evolución subsiguiente en la cronología y en el espacio, son elementos esenciales para la evaluación de las consecuencias climáticas. La concentración inicial de humo irá disminuyendo progresivamente debido a tres factores: la coagulación de las partículas de humo entre ellas mismas y con los aerosoles naturales; el lavado por la precipitación; la dispersión horizontal a otras partes del globo. Se admite que, en el caso de incendios generalizados forestales y urbanos, de un cinco a un diez por ciento del humo será inyectado a la estratosfera por encima de los 10 km, donde puede permanecer durante varias semanas y ser transportado a grandes distancias. Sin embargo, la mayoría de los estudios ignoran la falta de homogeneidad horizontal y suponen, en cambio, una concentración uniforme de humo. Según MacCracken (1983), si 200 millones de toneladas de humo estuvieran distribuidas uniformemente sobre el total del hemisferio norte, la profundidad óptica de la atmósfera sería cuatro (lo que significa que su transmisividad a la radiación en longitudes de onda visibles se reduce en un factor cuatro). Este valor es lo suficientemente alto para detener el proceso de fotosíntesis de las plantas, por lo que el crecimiento de éstas quedaría seriamente afectado si dichas condiciones duraran varias semanas.

### *Simulaciones en modelos del impacto climático*

Para la evaluación de las consecuencias potenciales de una guerra nuclear a gran escala se han aplicado modelos de diversos grados de complejidad. El primer intento fue realizado por Turco *et al.* (1983) utilizando un modelo microfísico unidimensional para predecir la evolución cronológica de las nubes de polvo y de humo, y un modelo radiativo-convectivo unidimensional para calcular la transferencia radiativa y el perfil de temperatura del aire en función de la cronología. A este trabajo siguieron pronto muchos otros estudios con modelos similares y diversidad de hipótesis sobre la profundidad óptica inicial del humo (entre cuatro y ocho) y velocidades de eliminación. En estos modelos se supone usualmente que las nubes de polvo y de humo se dispersan uniformemente sobre el globo.

Todos estos cálculos indican que se produciría un gran enfriamiento en la superficie de la Tierra y en la troposfera más baja, junto con el gran calentamiento correspondiente de la troposfera más alta, entre 15 y 42 K, ocurriría entre 14 y 35 días después del lanzamiento nuclear, cifra que depende de las hipótesis sobre la profundidad óptica inicial y su variación con la cronología.

Aunque estos modelos (unidimensionales) promediados especialmente sugieren la posibilidad de que la superficie se reduzca hasta descender del punto de congelación del agua durante el verano del hemisferio norte, presentan todos ellos una limitación significativa, que consiste en que no tienen en cuenta el efecto moderador de la gran inercia térmica de los océanos, ni tampoco consideran las diferencias regionales del régimen térmico de la atmósfera.

Se ha informado sobre varios estudios de simulación con modelos tridimensionales de la circulación general de la atmósfera (MCG). Por ejemplo, Aleksandrov y Stenchikov (1983) utilizaron un MCG de dos capas con resolución horizontal no muy fina, y suponiendo una carga de humo en la atmósfera, uniformemente distribuida sobre el hemisferio norte hasta los 12°N, correspondiente a una profundidad óptica inicial de siete (que está de acuerdo con los cálculos basados en un escenario de guerra de 10.000 Mt). Se supuso que la profundidad óptica disminuiría gradualmente para volver al valor normal al cabo de un año. La radiación solar incidente se tomó igual a la media anual. Con este modelo resultó que el día 40 la temperatura del aire en superficie descendió hasta 40 K por debajo de las condiciones iniciales en el interior de los continentes, con un enfriamiento menor (unos 10 K) sobre los océanos. Covey, Schneider y Thompson (1984) consiguieron una simulación más elaborada utilizando un modelo de nueve niveles, con armónicos esféricos hasta el número de onda 16 y un flujo solar medio diurno en la cima de la atmósfera; hicieron la hipótesis de que un conflicto nuclear de 6.500 Mt había generado 180 millones de toneladas de humo, que se distribuyó uniformemente en la atmósfera entre los niveles de alturas uno y ocho kilómetros entre las latitudes de 30° y 70°N. En este escenario, la profundidad óptica para la radiación solar en las zonas cubiertas por el humo era tres, cifra que se mantuvo constante durante los 20 días de integración del modelo; el resultado fue un rápido descenso de la temperatura media de la superficie sobre la tierra de unos 25 K en las condiciones normales de julio.

En ambos cálculos, resultó evidente la influencia moderadora de los océanos sobre las zonas continentales adyacentes. Los modelos de MCG también predijeron un cambio importante en la circulación meridional media, como respuesta al calentamiento de la alta troposfera y de la estratosfera baja producido por la absorción de la radiación solar por el humo; la naturaleza de este cambio sugirió una intensificación de la circulación inter-hemisférica, con el consiguiente transporte del humo a las latitudes bajas y al hemisferio sur.

#### *Otras consecuencias a largo plazo*

Los estudios tales como los de Crutzen y Birks (1982) e Izrael *et al* (1983) indicaron que, con un gran conflicto nuclear en que se lancen bombas de un megatón o más, podría resultar destruido hasta un 70 por ciento del ozono del hemisferio norte. Las explosiones más pequeñas, en cambio, constituirían una fuente de ozono en la troposfera. Además, se podrían desprender grandes cantidades de otros gases tales como metano (CH<sub>4</sub>), etano (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>) e hidrocarburos más pesados, procedentes de la liberación de gas natural y petróleo sin quemar, o bien generados por la combustión parcial de la materia orgánica en los incendios urbanos. Aún no han recibido las consecuencias químicas sobre la atmósfera de un conflicto nuclear la misma atención que la que se ha dado a la cuestión del “invierno nuclear”.

#### *Problemas más importantes*

Golitsyn y Phillips citan dos problemas básicos para lograr la evaluación del “invierno nuclear”:

- Cuantificación de la cantidad de humo carbonoso generado por un conflicto nuclear, su distribución y propiedades iniciales y su posterior evolución cronológica y espacial.

– Estimación de los efectos atmosféricos resultantes, incluyendo el impacto sobre las temperaturas y las configuraciones de la circulación y sobre la tierra y el agua subyacentes, y de los efectos de la atmósfera sobre el humo.

La dispersión de los penachos iniciales de humo es probablemente el problema más crítico dentro de la primera categoría, ya que todo lo demás depende del conocimiento de la concentración local del humo. En este tema, la experiencia es muy limitada, excepto los estudios sobre la contaminación del aire en la capa límite. Otro aspecto de este problema es el desarrollo de la convección provocada por el sol en la cima de la nube de humo; el transporte hacia arriba del humo por este mecanismo aumenta su intervalo de permanencia en la atmósfera, y esto podría ser muy importante al evaluar la plausibilidad de un “invierno nuclear“. Otro tema que no se conoce bien es el de la remoción de las partículas de humo por los distintos procesos de eliminación, tales como la coagulación, la absorción del vapor de agua y el lavado por la precipitación. Está llena de dificultades la simulación numérica de estos complejos procesos micrometeorológicos.

### Conclusiones

La mayoría de los estudios realizados hasta ahora han partido de una carga inicial de humo en la atmósfera de 100-200 millones de toneladas, lo que sería suficiente para impedir casi por completo la llegada de la luz solar al suelo en las zonas cubiertas por el humo. Teniendo en cuenta la información sobre los resultados obtenidos mediante los modelos, los ponentes del CCM concluyen que se produciría un enfriamiento de las zonas continentales del hemisferio norte durante un período de varias semanas. Sin embargo, las incertidumbres actuales en cuanto al transporte, la difusión, la eliminación y la alteración de las partículas de humo, limitan a un período de pocas semanas cualquier conclusión fiable en lo que se refiere al efecto de esta cantidad de humo en el hemisferio norte, y no permiten llegar a una conclusión alguna para los trópicos y el hemisferio sur. Ni tampoco se pueden dar conclusiones precisas sobre el efecto potencial del desprendimiento de cantidades menores de humo en la atmósfera.

V.M.

*Nota:* El informe completo de los Dres. Golitsyn y Phillips se publicará en la serie de informes del PMC.

### REFERENCIAS

- ALEKSANDROV, V. and STENCHIKOV, G. (1983): On the modelling of the climatic consequences of nuclear war. Proc. Appl. Math. Computing centre of the USSR Academy of Sciences.
- COVEY, C., SCHNEIDER, S. THOMPSON, S. (1984): Global atmospheric effects of massive smoke injections from a nuclear war – results from general circulation model simulations. *Nature* 308 pp. 21-25.
- CRUTZEN, P. and BIRKS, J. (1982): The atmosphere after a nuclear war twilight at noon. *Ambio* 11 (2/3) pp. 114-125.
- CRUTZEN, P., GALBALLY, I. and BRUHL, C. (1984): Atmospheric effects from post-nuclear fires. *Climatic change* 6 (4) pp. 323-364.
- GOLITSYN, G.S. and PHILLIPS, N.A. (1985): Possible climatic consequences of a major nuclear war. Abridged report of the thirty-seventh session of the WMO Executive Council (WMO-No.648), pp. 148-166.
- IZRAEL, YU.A., PETROV, V. and SEVEROV, D. (1983): On the impact of atmospheric explosions on the ozone content of the atmosphere. *Meteorología i Gidrología* 9 pp. 5-13.
- LARSON, D. and SMALL, R. (1982): Analysis of the large urban fire environment Part II: Parametric analysis and model city simulations. PSR Rep. 210, Pacific Sierra Research Corporation, Los Angeles.
- MACCRACKEN, C.M. (1983): Nuclear war – preliminary estimates of the climatic effects of a nuclear exchange. Paper presented at the Third International Conference on Nuclear War (Erice, August 1983).

NRC (U.S. National Research Council) (1984): *The effects on the atmosphere of a major nuclear exchange*. National Academy Press, Washington, 193 pp.

TELLER, E. (1984): Widespread after-effects of nuclear war, *Nature* **310** pp. 621-624..

TURCO, R., TOON, O., ACKERMAN, T., POLLACK, J. and SAGAN, C. (1983): Global atmospheric consequences of multiple nuclear explosions, *Science* **222** pp. 1283-1293.

## CONFERENCIA CIENTIFICA SOBRE LA MODIFICACION ARTIFICIAL DEL TIEMPO

### HONOLULU (EE.UU) AGOSTO DE 1985

Del 12 al 14 de agosto de 1985, en Honolulu, Hawaii (EE.UU), se celebró la cuarta Conferencia Científica de la OMM sobre la modificación artificial del tiempo, dentro del marco de la Asamblea General AIMFA/AICFO. Por ello, tomó la forma de un simposio conjunto OMM/AIMFA. Se escogió esta organización porque (a) ninguna conferencia de la OMM sobre la modificación artificial del tiempo se había celebrado en la cuenca del Pacífico o sus alrededores y (b) la Asamblea General AIMFA/AICFO era un foro ideal para mezclar la física atmosférica con la modificación artificial del tiempo. Los participantes disfrutaron de los medios puestos a su disposición por la Unión Americana de Geofísica, así como del clima benigno y de la soberbia situación de Honolulu.

Es un hecho irrefutable el que, en 1946, Langmuir y Schaefer provocaron lluvia artificialmente a partir de un rectángulo de estratocúmulos que sembraron con  $\text{CO}_2$  sólido (hielo seco), desde un avión. Sin embargo, desde entonces se han hecho muchos intentos de aplicar este proceso de forma generalizada a muchos tipos de nubes sin ninguna prueba real de que hayan tenido éxito: sus autores han sido instituciones públicas y empresas privadas tentadas por el éxito aparente o el provecho económico y los científicos y beneficiarios movidos por una fe carismática. Por ello, la cuestión de la modificación artificial del tiempo la desatendieron durante mucho tiempo la mayoría de los meteorólogos consecuentes. Sin embargo, el problema continúa siendo potencialmente importante para la humanidad, especialmente en las regiones más pobres que sufren las sequías, las inundaciones y los ciclones tropicales, lo cual sólo se puede atajar adecuadamente con la ayuda de estos meteorólogos consecuentes.

En Honolulu se logró un cierto grado de asociación entre la física atmosférica y la modificación artificial del tiempo gracias, en gran parte, a la calidad de los seis trabajos solicitados para su preparación y a los otros 63 trabajos aceptados por el comité internacional del programa. Los textos se imprimieron en dos volúmenes y se distribuyeron a los participantes; en la Secretaría de la OMM quedan aún algunos ejemplares.

¿Cuáles fueron los puntos sobresalientes en las conferencias y en las discusiones?. Puede que mi respuesta esté influida por mi concepto de los problemas científicos, pero haré cuanto pueda para resultar objetivo.

Para empezar, evidentemente la conferencia no ofreció métodos milagrosos ni para aumentar la precipitación, ni para prevenir el granizo ni para moderar los ciclones. Sin embargo, reveló algunos progresos. Incluso aunque estos progresos resulten demasiado lentos para los posibles usuarios, constituía una base más firme y más prometidora para el futuro previsible que algunas de las ideas surgidas prematuramente hace decenios.