

tendrán el conocimiento básico, que es el fruto de la experiencia. Los ordenadores deberían considerarse como una herramienta para interpretar con rapidez los datos, pero no como un fin en sí mismos.

H.T.- ¿Tiene Vd. una idea de cuantos artículos ha escrito?

H.R.- Entre cien y doscientos, uno se pregunta si era necesario escribir tanto; en el momento en que uno estaba excitado porque había descubierto algo y por supuesto hemos asistido a una explosión de publicaciones sobre temas científicos. Pero considerándolo en su conjunto, creo que es bueno. Es preferible publicar las ideas en vez de arrinconarlas y quejarse cuando algún otro publique las conclusiones que previamente habías encontrado.

H.T.- ¿Cuál de los muchos honores que ha recibido le produjo una satisfacción personal más grande?

H.R.- Estuve encantado de recibir la "Losey Award" del Instituto Americano de Aeronáutica y Astronáutica, en 1962, y muy agradecido de ser elegido, en 1979, para la "Carl-Gustav Rossby Research Medal". Pero creo que la que más he apreciado fue la primera, la "AMS Meisinger Award", en 1948. El anuncio se hizo en una reunión en San Francisco, y nunca olvidaré la formidable fiesta que tuvimos en un mesón cercano para celebrarlo.

H.T.- Profesor Riehl, muchas gracias por esta entrevista tan informativa e interesante. Espero que continuará disfrutando de su gran fortaleza física e intelectual por muchos años.

LA FISICA DE LAS NUBES EN RELACION CON LA MODIFICACION ARTIFICIAL DEL TIEMPO

PARTE II – LA SIEMBRA GLACIOGENICA PARA LA INTENSIFICACION DE LA PRECIPITACION

*Por R.R. BRAHAM Jr**

Los postulados en que se basa la siembra glaciogénica

Además de los cuatro hechos bien comprobados a que se hacía referencia en la primera parte de este artículo (*Boletín de la OMM* **35** (3) págs. 228-236), la siembra glaciogénica para la intensificación de la precipitación se basa en uno de los dos postulados siguientes:

- La eficiencia en precipitación de algunas nubes está limitada por el déficit de núcleos de hielo. Añadiendo núcleos de hielo se aumentará la precipitación.
- Aumentando la flotabilidad de las corrientes ascendentes convectivas (favoreciendo la glaciación mediante la siembra), éstas se hacen más fuertes, pueden procesar más vapor de agua y producir más precipitación.

* Universidad de Chicago (EE.UU.).

El primer postulado se basa en la observación de que la eficiencia en precipitación de algunas nubes subfundidas es muy bajo, aparentemente debido a la escasez de núcleos de hielo. Se define la eficiencia en la precipitación como la fracción de agua condensada que llega al suelo en forma de lluvia. Para las nubes subfundidas, esta eficiencia no se ha estudiado con toda la amplitud que se merece; se cree que es del 80-90 por ciento en los grandes temporales ciclónicos de las latitudes medias, pero inferior al 20 por ciento en los temporales aislados. Muchas nubes medias subfundidas tienen una eficiencia cero en precipitación; la condensación que no aparece como precipitación en el suelo vuelve a la atmósfera por evaporación, que puede estar asociada con el arrastre, las corrientes descendentes, la salida en el yunque o la disipación de las nubes residuales. Las nubes subfundidas con eficiencia baja en precipitación son objetivos para el estudio por siembra.

El segundo postulado se centra en la observación de que las corrientes ascendentes convectivas en las nubes contienen usualmente cantidades sustanciales de agua subfundida. Si se puede hacer que esta agua se congele con mayor rapidez, a mayor temperatura o en mayor cantidad de lo que tiene lugar naturalmente, el consiguiente aumento de la flotabilidad permite que la nube se eleve más alto y que procese más vapor de agua de lo que hubiera hecho en otro caso, y que se produzca un aumento en la precipitación.

Los conceptos y los tipos de siembra

El tipo estático de siembra

Este tipo de siembra consiste en añadir pequeñas concentraciones de núcleos de hielo a las nubes en que se supone que la eficiencia en la precipitación está limitada por la escasez de dichos núcleos. Ya que las partículas de aerosol natural se hacen más eficientes como núcleos de hielo a medida que desciende la temperatura, el modo estático de siembra sólo es utilizable en nubes subfundidas con cimas a temperaturas superiores a unos -20° C. En este tipo de siembra, cualquier cambio concomitante que tenga lugar en la dinámica de la nube se supone que es pequeño y de efectos pequeños.

Para obtener concentraciones de núcleos de hielo del orden de uno a diez por litro (que se estima es el valor óptimo para la formación de precipitación por el modo estático de siembra), la salida del dispositivo de siembra debe estar muy diluida, ya sea antes de la nucleación de los cristales (como cuando la siembra se efectúa por debajo de la base de la nube), ya sea después de la nucleación (como cuando el núcleo se coloca directamente dentro de la nube subfundida), o de ambos modos. En cualquier caso, la necesaria dilución se efectúa por la turbulencia y la difusión atmosféricas naturales.

El tipo dinámico de siembra

Este tipo de siembra sostiene que las circulaciones verticales en las nubes convectivas se pueden reforzar por glaciación de la corriente ascendente, o bien antes o bien a menor altura de lo que ocurre de forma natural, permitiendo así que la nube alcance mayor altura. Además, se postula que las corrientes ascendentes reforzadas en la parte subfundida de una nube se comunican de alguna manera con la capa de debajo de la nube, lo que produce un aumento del flujo entrante por la base de la nube y un reforzamiento de la circulación en toda la nube. Cómo y en qué medida tiene lugar esta comunicación es un tema bastante discutido. Para conseguir la rápida glaciación en las corrientes ascendentes, los que proponen el tipo dinámico de siembra recomiendan concentraciones de núcleos de 100 – 1000 por litro en grandes volúmenes del aire ascendente.

Este tipo es particularmente atractivo en situaciones en que el nivel medio de las ca-

pas estables (digamos entre -10 y -20° C) limita el crecimiento de los cúmulos naturales, y donde un modesto aumento de la flotabilidad permite que las nubes tengan un crecimiento adicional considerable.

La distinción entre estos dos tipos de siembra se hace confusa. Cualquier cambio en la cantidad y el carácter de la fase de hielo en una nube de fase mezclada tendrá algún efecto sobre la dinámica de la nube. La magnitud de estos efectos dependen del gradiente vertical de temperatura y de detalles tales como cuántos núcleos se añaden, en dónde y en qué fase del ciclo de vida de la nube.

La sembrabilidad o potencial de siembra

Se dice de una nube que es “sembrable” o que tiene un potencial de siembra cuando hay una expectativa razonable de que la siembra producirá aumento de la precipitación. Evidentemente para la siembra glaciogénica, una condición necesaria, es la presencia de agua líquida subfundida, aunque no es suficiente por sí misma.

Los procesos de la formación de la nube y de la precipitación son dependientes del tiempo. Los embriones introducidos artificialmente deben tener tiempo de crecer hasta el tamaño suficiente para alcanzar el suelo dentro del periodo de condiciones favorables para el crecimiento. Si hay algún efecto en el crecimiento de los embriones naturales, debe ser tal que aumente la precipitación total, si la siembra ha de ser útil para intensificar la precipitación. Los cambios en la precipitación pueden influir por realimentación en la dinámica de la nube, a través del calor latente desprendido y de la alteración de la carga de agua; y, a su vez, la alteración de la dinámica de la nube afecta a los procesos de la precipitación.

La mejor forma de determinar la sembrabilidad será mediante la simulación en el ordenador de la complicada e interactiva microfísica de las nubes y de sus procesos dinámicos, para hallar qué tipo de siembra podría intensificar la precipitación para cada condición particular de la nube. Aunque en este método se ha progresado considerablemente, aun no es suficiente, debido a que nuestro conocimiento de las condiciones naturales de las nubes y de los procesos de la precipitación es inadecuado. Por esto es por lo que los físicos de nubes necesitan recurrir a los experimentos de campo.

Hasta la fecha, se han realizado entre diez y veinte experimentos científicos al azar para estudiar los efectos de la siembra glaciogénica en la intensificación de la precipitación. La mayor parte de ellos fueron demasiado cortos, con menos de 100 casos. Los resultados han sido diferentes; varios sugirieron aumentos netos en la precipitación, y unos pocos, disminuciones netas. Muy pocos de estos experimentos se continuaron lo suficiente para llegar a niveles aceptables de significación estadística.

Los análisis a posteriori de muchos experimentos indican que la precipitación podía haber aumentado en ciertas condiciones de las nubes y haberse reducido en otras. En general, estas indicaciones no se siguieron con nuevos experimentos; en vez de esto, tienden a ser aceptadas como un hecho, con muy poca consideración hacia los riesgos que esta aceptación entraña. Tal despliegue de resultados diferentes y aparentemente conflictivos ha llevado a que muchas personas se pregunten si puede esperarse algún beneficio de la siembra de nubes. Estudiando la literatura científica, parece evidente que la oportunidad que se percibía para la siembra útil de las nubes se ha visto reducida. Sin embargo, hay varias líneas de evidencia que garantizan el optimismo y la continuación de los trabajos de investigación.

Los fundamentos del optimismo

Los experimentos israelíes

Los experimentos realizados en Israel se consideran usualmente como que dan importantes pruebas a favor del aumento de la precipitación, como resultado de la intervención por siembra. Los resultados parecen tener buena valoración estadística y verosimilitud física. Los detalles de los experimentos se han publicado (Gagin and Neumann (1974, 1981); Gagin (1981)). Para nuestro propósito, sólo destacaremos aquí algunos puntos. Los experimentos israelíes combinados sumaron 769 días de pruebas, muchos más que en la mayoría de los otros proyectos. Las nubes objetivo eran agrupaciones nubosas postfrontales de invierno; la temperatura en la base variaba entre $+5^{\circ}\text{C}$ y -8°C . Según los informes, la precipitación natural en dichas nubes era enteramente por el mecanismo de los cristales de hielo. La siembra consistió en soltar AgI en la base de las nubes a lo largo de una línea a 20-25 km del objetivo contra el viento. Al alcanzar las partes más altas de la zona objetivo, las nubes experimentaban un ascenso orográfico de unos 800 m. Los datos publicados de ecos de radar muestran que las temperaturas en las cimas variaban en un intervalo grande, pero en los días con mayor efecto de siembra tenían valores modales en el intervalo de -15°C a -21°C (a estas temperaturas, el número de partículas naturales de hielo es probablemente inferior al óptimo).

Debido a que estos experimentos implicaban campos enteros de nubes tratadas de tal forma que impedían el conocimiento de cuáles nubes resultaban sembradas, y con qué intensidad, de ellos sólo se pueden deducir relaciones de causa a efecto. No han sido completamente aislados los factores que dieron éxito a estos experimentos.

Los experimentos físicos sobre las nubes, incluyendo el HIPLEX-1

Veamos ahora tres proyectos diseñados específicamente para estudiar la física de las nubes sembradas. Tienen tres puntos en común: excelente física; objetivos limitados; se necesitaron relativamente pocos casos para alcanzar una significación aceptable.

El primer ejemplo procede del proyecto Cirrus al final de los años 1940, y ha sido verificado desde entonces en muchos otros estudios. No puede haber duda de que los núcleos glaciogénicos crean cristales de hielo en las nubes subfundidas.

El segundo ejemplo se refiere a experimentos sobre el crecimiento de las torres convectivas que sigue a la siembra del tipo dinámico. Se demostró por Simpson y col. (1967) que este tipo de siembra de los cumulus congestus aislados producían alturas de la cima de las nubes casi exactamente como se predecían en la teoría. Otros investigadores han informado sobre resultados análogos.

El tercer ejemplo lo tenemos en el proyecto HIPLEX realizado en Montana (EE.UU.), durante las estaciones de verano de 1979 y 1980 (Cooper y Lawson (1984); Mielke y col. (1984)). El objetivo de este experimento era comprobar la respuesta paso a paso de los pequeños cúmulos subfundidos a la siembra en la cima con gránulos de anhídrido carbónico sólido. Las nubes de prueba estaban semi-aisladas y no eran orográficas, con bases al nivel de aproximadamente $+5^{\circ}\text{C}$, y con cimas entre los -11°C y -15°C . Las nubes no sembradas de este tamaño y en esta zona no presentaban pruebas de mecanismo activo de coalescencia ni de desarrollo de nieve granulada. Se eligieron para el estudio veinte nubes, de acuerdo con un conjunto de condiciones prescritas, medidas desde un avión que volaba al nivel de -8°C ; doce de ellas fueron seleccionadas mediante un proceso de azar para percibir el tratamiento con hielo seco al nivel de -10°C , dentro de los dos minutos siguientes a la selección.

Los resultados mostraron aumentos en las concentraciones de cristales y en el crecimiento del cristal inicial por difusión del vapor, exactamente como predecía la teoría. Sin embargo, en la mayoría de las nubes sembradas, el desarrollo de la precipitación provino de la combinación de la agregación y de la acreción de baja densidad en agregados sueltos. Esto no estaba previsto. Este tipo de embriones de precipitación no se encuentra usualmente en nubes naturales de la clase en estudio, y presumiblemente fue el resultado de las concentraciones muy elevadas de cristales formados en las estrechas estelas detrás de los gránulos individuales de CO_2 .

Solamente cuatro de las doce nubes sembradas desarrollaron nieve granulada (la forma de precipitación que se esperaba), y éstas fueron las que tenían corrientes ascendentes más sostenidas. La mayoría de las nubes mostraron una disminución del agua tan rápida, debido al arrastre, que no hubo tiempo suficiente para que los agregados crecieran convirtiéndose en nieve granulada.

El HIPLEX fue un buen experimento y tuvo mucho éxito. Al centrarse sobre etapas específicas del proceso de la precipitación, y al hacer las observaciones detalladas que se precisan para verificar estas etapas, proporcionó una nueva e importante introspección en la física de las nubes sembradas. También puso de manifiesto de forma espectacular el importante papel que el ciclo de vida de la nube tiene en la formación de la precipitación.

La modificación antropogénica del tiempo

Parece claramente cierto que en las ciudades el hombre ha causado cambios meteorológicos iguales, o incluso mayores, que los producidos aparentemente por la siembra de las nubes. Aunque las causas de estos cambios pueden ser totalmente diferentes de los que intervienen en la siembra deliberada de las nubes, el hecho de que la raza humana está cambiando el tiempo alrededor de las ciudades nos da una razón más para proseguir con las posibilidades de la siembra de nubes. En Changnon (1981) se expone una discusión excelente sobre la modificación antropogénica del tiempo.

El Proyecto de Intensificación de la Precipitación (PIP)

El PIP fue un proyecto, patrocinado por la OMM, que se planificó para su ejecución de campo en el decenio de 1980. La intención era utilizar la siembra con AgI desde aviones con objeto de aumentar las lluvias de invierno, con nubes de un sistema ciclónico en una zona de 10.000 Km^2 en la cuenca del Duero, en el noroeste de España. La evaluación sería principalmente estadística, basada en los datos de la red pluviométrica durante un período de cinco estaciones.

Durante los inviernos de 1979-1981 se realizó un estudio de factibilidad meteorológica, por el que se descubrió que mucha de la precipitación estacional provenía de extensas y profundas capas de nubes de sembrabilidad limitada. De este estudio se dedujo que, en tales condiciones, un proyecto estacional sobre un área amplia no podía tener éxito, por lo que el PIP se dio por terminado antes de entrar en la fase de siembra. Se encontraron muchas zonas sembrables en capas poco profundas y en nubes convectivas, y da la impresión de que se podría haber diseñado un tipo distinto de experimento que tuviera posibilidad razonable de obtener resultados estadística y físicamente aceptables. Pero no podía haber seguridad con las pruebas de siembra.

Es encomiable la iniciativa de la OMM de organizar el PIP. Este proyecto introdujo la nueva tecnología para evaluar la sembrabilidad en condiciones estacionales de área grande. Sería muy útil realizar estudios análogos en otras regiones con escasez de lluvias.

Avances recientes

Los últimos años han visto notables avances en la física de nubes y la modificación artificial del tiempo. Los nuevos instrumentos han mejorado nuestra capacidad para observar y cuantificar la microestructura de la nube y los campos de movimiento de las nubes; los estudios teóricos y de laboratorio han profundizado nuestro conocimiento sobre los procesos de las nubes y nos han facilitado valores más precisos sobre la velocidad y la eficiencia de estos procesos; el mejor conocimiento de la física de las nubes ha conducido a la realización de modelos de nubes más realistas. La experimentación numérica con ordenador tiene ahora un papel igual al de los experimentos de campo y de laboratorio como fuente de nuevos conocimientos de las nubes.

Desde 1980 se han desarrollado nuevas herramientas (tanto de "hardware" como de "software") para el estudio de las nubes y de la precipitación. El radiómetro de longitud de onda dual se utiliza para el control de la localización y la cantidad de agua líquida subfundida en las nubes orográficas de invierno. Los radiómetros están demostrando ser extremadamente útiles para el estudio de las nubes, ya que pueden dar datos continuos de las regiones en que los aviones no pueden penetrar con seguridad. Ahora es posible obtener datos de viento precisos y continuos sobre un punto utilizando el perfilador NOAA. El lidar de polarización resulta valioso para la detección de la cima de las nubes de hielo cristalizado, así como las capas de agua líquida subfundida, aunque a veces su capacidad queda limitada por la absorción del hidrometeoro. Los radares de polarización pueden distinguir entre hidrometeoros líquidos y sólidos. La instrumentación de los aviones para el estudio de las nubes va mejorando continuamente; el radar Doppler de a bordo y una combinación de radares Doppler a bordo y en tierra han pasado con éxito las pruebas de demostración. "On the drawing-board" es un método que utiliza técnicas tomográficas con radiómetros para trazar la distribución tridimensional del agua líquida de las nubes.

Ahora estamos en condiciones de hacer cálculos realistas de las etapas de crecimiento de la precipitación en que se deposita el vapor y la nieve granulada, pero aún hay mucho que aprender sobre las fuentes de las partículas de hielo naturales y sobre el proceso de agregación. Los modelos de ordenador se han hecho más realistas en el tratamiento de las nubes y de los procesos de la precipitación; la simulación numérica de los procesos en las nubes estratificadas ha sido muy útil, ya que estas nubes son con frecuencia muy sensibles a factores de entrada demasiado pequeños para ser medidos por los aviones o el radar.

Los últimos años han sido testigos de un saludable aumento de la cooperación entre los partidarios de la observación, los teóricos y los modelistas. Un ejemplo muy interesante de esto fue el cursillo práctico/conferencia de la OMM sobre la modelización de las nubes en Irsee (República Federal de Alemania), en julio de 1985 (*Boletín de la OMM* 35 (1) pág. 66). La modelización de las nubes y la precipitación es un campo en que se hacen contribuciones a la meteorología en un amplio frente.

Una nueva técnica de análisis utiliza datos digitalizados de radar con exploración en volumen para definir las células individuales de lluvia, seguir su trayectoria y calcular datos como el movimiento de la célula, el área de lluvia, la intensidad de la lluvia y la lluvia total de las células. Esta técnica se está aplicando al estudio de la producción de lluvia en las nubes naturales y en las sembradas, y los resultados prometen ser de utilidad para la parame-trización de los procesos a escala de la nube en los modelos a escala mayor. Otros estudios de física de nubes son importantes para la predicción inmediata, los estudios de la calidad del aire, la telemedida, los estudios climáticos, etc.

Si los efectos de la siembra son reales, ¿por qué ha sido tan difícil comprobarlos?

Aparentemente, los efectos de la siembra del experimento israelí no fueron difíciles de

verificar, y hay general aceptación de sus resultados estadísticos. Su interpretación física es verosímil, pero no se puede comprobar a nivel de las nubes individuales, debido a la naturaleza del experimento. Es importante aislar los factores que dieron tanto éxito al proyecto; se han sugerido varios de ellos, pero, mientras no se comprendan mejor, sería muy arriesgado reproducir las pruebas israelíes en otra parte.

Exploremos ahora la cuestión en un contexto más amplio. La comprobación de los efectos de la siembra ha resultado ser mucho más difícil de lo que nadie se podía haber imaginado hace sólo algunos años. A gran escala, los procesos atmosféricos parecen vigorosos, pero a escala de la nube quedan equilibrados delicadamente. Este punto está cumplidamente demostrado en las simulaciones numéricas y en los resultados de los estudios de los cambios antropogénicos del tiempo. Pequeñas diferencias en el ambiente o en la microestructura de la nube pueden conducir a diferencias importantes en la precipitación.

Las técnicas que se utilizan para medir los efectos de la siembra son inadecuadas. Los cambios inducidos artificialmente en la lluvia, incluso aunque sean demasiado pequeños para poder predecirse con confianza por los modelos o ser detectados por las medidas de la red pluviométrica (excepto promediando en grandes zonas y durante períodos cronológicos largos), podrían fácilmente tener valor económico. Dependiendo de ciertos factores, los efectos de la siembra pueden ser positivos o negativos; los experimentos que incluyen a la vez las condiciones favorables y las desfavorables pueden producir un efecto neto muy pequeño, próximo al margen del error de medida.

Podemos diseñar experimentos conceptualmente válidos, pero que son imposibles de realizar. Se ha comprobado que es muy difícil planificar pruebas de siembra con base científica que sean practicables y que tengan la potencia suficiente para dar respuestas en un tiempo razonable.

Las limitaciones de la mayor parte de los experimentos del pasado se deben a que fueron demasiado cortos (demasiado pocos casos de prueba), que contaban con muy poca física (los que se llaman proyectos de “caja negra”) y que requerían demasiada fe ciega (diseño conceptual y sistemas de observación inadecuados). Los experimentos de Israel, en cambio, duraron diez años, acumularon 769 casos de prueba, e incluyeron estudios paralelos para explorar la física de las nubes de prueba. El HIPLEX tuvo sólo 20 nubes de prueba, pero había sido diseñado específicamente para esclarecer los detalles de los procesos físicos de las nubes, y para esto sirvió muy bien.

A medida que la física de las nubes ha ido avanzando, ha abierto nuevas perspectivas a la siembra para la intensificación de la precipitación. Yo, personalmente, creo que la ventana de la oportunidad que se percibe para la siembra de las nubes se ha reducido en tamaño. Solamente el tiempo y la investigación revelarán su utilidad final.

¿Cómo podemos seguir progresando?

Debemos proseguir nuestra búsqueda para comprender los fundamentos de las nubes y de la precipitación. Son extremadamente escasos los datos fiables sobre las nubes, con el detalle suficiente para la evaluación de la sembrabilidad. Necesitamos datos sobre la microestructura de las nubes en relación con su circulación y con las etapas de desarrollo, para las nubes de cada situación meteorológica y de cada región. Nuestro conocimiento de la dinámica de la nube, de las interacciones entre las nubes y el medio que las rodea, y de las interacciones entre los procesos microfísicos y dinámicos, es completamente inadecuado. Estos son temas difíciles, pero puede estar en juego la continuación del desarrollo del potencial de siembra de las nubes.

Debemos encontrar medios más sensibles para detectar los efectos de la siembra en grandes zonas, y la forma de reducir el tiempo requerido para llegar a conclusiones válidas. Entretanto, hay que aceptar el hecho de que la investigación sobre la siembra de nubes será larga, difícil y costosa. Las pruebas de siembra deben incluir un buen complemento de estudios físicos en las nubes de prueba y en su medio ambiente.

Basándonos en nuestros conocimientos actuales, las nubes con escaso o nulo crecimiento de gotas por coalescencia parecen ser las más prometedoras para la intensificación de la precipitación. Este es el tipo de nube que más se encuentra en las regiones semiáridas. Hay que explorar desde el punto de vista energético las nubes convectivas continentales y del tipo continental modificado, de mayor tamaño que las del HIPLEX. Se debe someter a pruebas de campo la siembra de estas nubes por el tipo dinámico; habría que atender, en particular, a las condiciones atmosféricas que limitan los cúmulos naturales a temperaturas en la cima de unos -10°C a -20°C . Las nubes orográficas estables y de poco espesor parecen ser buenos objetivos; las medidas recientes con radiómetros muestran que con frecuencia contienen capas delgadas de agua subfundida, mientras que varios estudios han demostrado que los sistemas ciclónicos estratificados, de bastante espesor, contienen relativamente poco exceso de agua subfundida.

La siembra de las nubes que muestran un mecanismo de coalescencia activo debe tratarse con precaución. Hay pocas razones que indiquen que con dichas nubes se consigue un aumento de la precipitación con la siembra del tipo estático; de los estudios de campo se deduce que más bien se obtiene una reducción de la precipitación. Por lo que se refiere al tipo dinámico de siembra de nubes de tipo marítimo, la evidencia que se tiene es mixta; sin embargo, tanto los estudios de campo, como los estudios con modelos, indican que cuando la siembra incide directamente en el seno de las corrientes ascendentes en las primeras etapas del ciclo de vida de las nubes individuales, se pueden producir aumentos útiles en la precipitación (Gagin *et al.* (1986)).

Aún seguimos teniendo el problema de que el aumento local de la precipitación se consigue a expensas de la redistribución de la lluvia de una zona más grande. En la literatura de investigación, cada vez aparecen más alusiones a que los aumentos locales de la lluvia pueden tener como consecuencia su disminución en las zonas de alrededor. Puede haber momentos y lugares en que esto sea aceptable, pero los científicos especialistas en nubes deben tomar como objetivo el poder determinar si puede ocurrir una redistribución y, en caso afirmativo, saber con exactitud cómo va a ser. Aún no se ha publicado ningún estudio científico completo sobre este tema; en realidad, lo que sucede es que los datos disponibles son probablemente inadecuados para este propósito.

¿Compensa este esfuerzo?

En mi opinión, no hay otra alternativa viable. Se deben continuar los estudios sobre la física fundamental de las nubes y sobre la sembrabilidad de todos sus tipos. En este sentido hay varias razones, aparte del valor intrínseco que tienen los nuevos descubrimientos. Los experimentos de Israel parecen demostrar que es posible intensificar la precipitación, siempre que las condiciones de las nubes sean las adecuadas; el estudio de los impactos antropogénicos muestra claramente que la humanidad es capaz de cambiar el tiempo. Mientras haya posibilidades no exploradas, o poco exploradas, de intensificar la precipitación por medio de la siembra glaciogénica, debemos seguir adelante. Es cierto que la gente que vive en regiones áridas o semiáridas nos pide encarecidamente que sigamos; no tienen otras alternativas para aumentar su abastecimiento de agua.

Mirando hacia un horizonte más amplio, debemos recordar que, combinando las investigaciones de campo, de laboratorio, teóricas y numéricas, los estudios de la modifica-

ción artificial del tiempo constituyen un excelente y fructífero campo para la investigación de los elementos meteorológicos que afectan más directamente a la humanidad. La precipitación está en el corazón de la predicción del tiempo; las transformaciones de energía que incluyen a las nubes son fundamentales para comprender y modelizar los movimientos atmosféricos.

La meteorología no puede permitirse despreciar los estudios de los procesos de la precipitación. Esto es lo que constituye la física de nubes, la ciencia de la modificación artificial del tiempo.

Agradecimiento

Muchas de las ideas aquí expuestas se discutieron en un cursillo práctico de la American Meteorological Society en Park City, Utah (EE.UU.), en mayo de 1984. Se halla en prensa una monografía de las comunicaciones presentadas a este cursillo. El autor reconoce agradecido el beneficio que ha obtenido de sus discusiones con los participantes y con los que han colaborado en la monografía. Sin embargo, este artículo representa sus propios puntos de vista, y no necesariamente los de sus colegas, ni los de la National Science Foundation, entidad que concedió la subvención con cargo a la cual se ha preparado este artículo.

REFERENCIAS

- CHANGNON, S.A., Jr. (1981)(Ed.): *METROMEX: A review and summary*. AMS Meteor. Monograph 40, Boston; 181 pp.
- COOPER, W. A. and LAWSON, R.P. (1984): *Physical interpretation of results from the HIPLEX-1 experiment*. *J. Climate Appl. Meteor.* 23 pp. 523-540.
- DENNIS, A. S. (1980): *Weather modification by cloud seeding*. Academic Press, New York; 267 pp.
- GAGIN, A. (1981): *The israeli rainfall enhancement experiment: A physical overview*. *J. Wea. Mod.* 31 pp. 108-120.
- GAGIN, A. and NEUMANN, J. (1974): *Rain stimulation and cloud physics in israel*. *Weather and climate modification*; W. N. HESS (Ed.) J. Wiley and Sons, New York; pp. 454-494.
- (1981): The second Israeli randomized cloud seeding experiment: Evaluation of the result. *J. Appl. Meteor.* 20 pp. 1301-1311.
- GAGIN, A., ROSEFELD, D., WOODLEY, W. L. and LOPEZ, R. E. (1986): Results of seeding for dynamic effects on rain cell properties in FACE-II. *J. Climate. Appl. Meteor.* 25 pp. 1-12.
- HESS, W. N. (1974)(Ed.): *Weather and climate modifications*. H. Wiley and Sons, New York; 842 pp.
- MIELKE, P. W. Jr., BERRY, K. J., DENNIS, J. R., Jr. and SILVERMAN, B. A. (1984): HIPLEX-1: Statistical evaluation. *J. Climate Appl. Meteor.* 23 pp. 513-522.
- SIMPSON, J., BRIER, G.W. and SIMPSON, H.R. (1967): analysis and main results. *J. Atmos. Sci.* 24 pp. 508-521.

EL SISTEMA CLIMATICO MUNDIAL EN 1985

La variabilidad del tiempo y del clima regionales es un resultado de las fluctuaciones en el sistema climático mundial. Todavía no hay modelos cohesivos del sistema climático interactivo (que comprendan la atmósfera, los océanos, las superficies continentales y la criosfera), aunque recientemente se ha progresado mucho en este campo, por ejemplo, aumentando nuestro conocimiento en la comprensión de las interacciones entre la atmósfera y los océanos. Quizá la conclusión más importante que se ha obtenido en los últimos años es que las fuentes tropicales diabáticas de calor (y los océanos tropicales) desempeñan una función importante en la modulación de la circulación general mundial. Aunque, por sí mismo, este no sea un descubrimiento sorprendente, refleja un cambio en el enfoque de la investigación me-