

*re-Ocean Interactions* (I, 155-197), *Advances in Fluid Mechanics*.

KOMEN, G. J., L. CAVALERI, M. DONELAN, K. HASSELMANN, S. HASSELMANN y P. A. E. M. JANSSEN, 1994: *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge Univ. Press, 532 pp.

STERL, A., 2003: On the (in-)homogeneity of reanalysis products. Preimpresión 03-12 del KNMI. Presentado a *J. Climate*.

TOLMAN, H. L., B. BALASUBRAMANIAN, L. D. BURROUGHS, D. V. CHALIKOV, Y. Y. CHAO, H. S. CHEN y V. M. GERALD,

2002: Development and implementation of wind generated ocean surface models at NCEP. *Weather Forecasting*, 17, 311-333.

WANG, X. L. y V. R. SWAIL, 2001: Changes of extreme wave heights in northern hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes. *J. Climate*, 14, 2204-2221.

Grupo WASA, 1998: Changing waves and storms in the Northeast Atlantic? *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79, 741-760.

YOUNG, I. R. y G. J. HOLLAND, 1996. *Atlas of the Oceans: Wind and Wave Climate*. Pergamon.

## Progresos en la supresión del granizo\*

### Introducción

La OMM, en colaboración con el Roshydromet (Servicio Federal Ruso de Hidrometeorología y Control Medioambiental), organizó una reunión de expertos en supresión del granizo en el Instituto Geofísico de Alta Montaña de Nalchik (en el Cáucaso). Los 28 expertos (trece de Rusia y quince de otros diez países) se reunieron en el Centro Ruso de Investigación de Supresión del Granizo, del 27 de septiembre al 2 de octubre de 2003.

### Antecedentes

Hay un interés generalizado en el tema de la supresión del granizo, motivado por intereses económicos y sociales. Ya a finales de la década de 1970 se estimaba que la pérdida mundial anual por daños ocasionados por el granizo superaba los 2 000 millones de \$ EE.UU. (850 millones de \$ EE.UU. sólo en los EE.UU.). Un estudio más reciente (R. Herzog, en el Congreso de Seguridad Profesional y Doméstica de 2002) mostraba que en los EE.UU., entre 1994 y 2000, las pérdidas por granizo verificadas sumaban una media de  $2,5 \times 10^9$  dólares EE.UU. por año. En los territorios de la antigua URSS, el daño ocasionado por el granizo se estimó en unos  $8 \times 10^8$  dólares EE.UU. por año. A la vez, se gastaron en proyectos mundiales de supresión del granizo menos de 100 millones de \$ EE.UU.

En la reunión de Nalchik, se informó de que sólo en China hay más de 1 600 proyectos secundarios con un área de 420 000 km<sup>2</sup> que utilizan la ayuda proporcionada por unos 200 radares digitalizados. En la antigua URSS, el área era de unos 110 000 km<sup>2</sup>; en Serbia, un área de 77 000 km<sup>2</sup> tenía 13 centros de radar; y en Bulgaria, el área era de 16 000 km<sup>2</sup>, con 10 radares. Las

necesidades agrícolas provocan y financian la mayor parte de las actividades de supresión del granizo en todos los países. Los prometedoros resultados económicos apoyados por datos físicos limitados pero fiables, están ocasionando que las compañías de seguros y los ministerios y/o las empresas de agricultura sigan con las actividades de supresión del granizo, aunque los procesos sean complicados y no se conozcan bien.

Ya en la década de 1970 el Comité Ejecutivo de la OMM puso de relieve que, a la vista de la naturaleza compleja de la formación del granizo y de los numerosos problemas sin resolver, era esencial financiar los esfuerzos internacionales para comprender mejor los procesos físicos que rigen las grandes nubes convectivas y la formación de granizo. Durante los 30 años siguientes, la OMM patrocinó seis reuniones de expertos (en 1977, 1979, 1981, 1984, 1995 y 2003) que se ocuparon de problemas particulares de la ciencia y de la incertidumbre de los procesos y la supresión del granizo. En el Decimocuarto Congreso Meteorológico Mundial, en 2003, se observó con agradecimiento que muchos países Miembros estaban realizando actividades operativas y de investigación destinadas a incrementar la precipitación y suprimir el granizo. Se consideraba esencial la necesidad de evaluación internacional por iguales. Esto volvió a confirmar las recomendaciones de la Conferencia de la OMM de Casablanca de 2003 de examinar los métodos de supresión del granizo con atención a su eficacia, su evaluación y los nuevos resultados de las actividades operativas y de la modelización numérica que habían surgido durante la última década.

### Hipótesis que sirve como base para la supresión del granizo

En la década de 1960 surgió el impulso para las operaciones de supresión del granizo, con un enfoque unifi-

\* Preparado por el Dr. Rumen D. Bojkov, Asesor Especial del Secretario General de Temas Medioambientales Mundiales

ador para incrementar la competencia entre los embriones de granizo promulgados por G. Sulakvelidse y desarrollados a partir de ahí por muchos otros. Hay tres grupos de opinión: los optimistas, los moderadamente optimistas y los pesimistas. Generalmente, el tercer grupo (que se considera minoritario) refleja los puntos de vista de aquellos administradores y científicos que piden pruebas de que la supresión del granizo funciona. El grupo de los moderadamente optimistas, por el contrario, pide estudios detallados y una evaluación objetiva de los resultados de la siembra para contribuir al conocimiento de los procesos. El hecho de que los fondos para la mayor parte de las actividades de supresión del granizo provengan sobre todo de organizaciones agrícolas podrá apoyar el punto de vista de los moderadamente optimistas. Esto no elimina la necesidad de un trabajo serio sobre las hipótesis físicas y sobre la evaluación objetiva de los resultados de las actividades de supresión del granizo.

En la reunión se creía que, en esta etapa de la investigación de la supresión del granizo, estamos en una posición curiosa de disponer de una tecnología adaptada en general, pero sin una evidencia concluyente de que funciona (y en qué condiciones) y sin un conocimiento detallado de los mecanismos naturales exactos implicados o de la manera en que la siembra les influye realmente. El potencial de ganancias económicas sustanciales a partir de efectos positivos, incluso pequeños, continúa siendo la motivación para llevar a cabo proyectos de supresión del granizo.

### El concepto de la supresión del granizo

La hipótesis más prometedora propuesta para la supresión del granizo es la de la competición limitadora del crecimiento entre los embriones de granizo (competición beneficiosa), cuando se introducen muchos más embriones de cristal en la célula nubosa de los que se producirían normalmente. De esta manera, todos comparten el contenido de agua líquida (CAL) disponible que limita su crecimiento. Esto, combinado con la precipitación temprana fuera de una zona de embriones de granizo mediante la siembra en la zona comprendida entre  $-5$  y  $-15^{\circ}\text{C}$  en presencia de gotitas de lluvia subfundidas, parece ser el método

más atractivo para la supresión del granizo. Las débiles corrientes ascendentes de la región fuente no pueden soportar las partículas generadas, que caen sin participar en el proceso de formación del granizo (véase la Figura 1).

Los conceptos más plausibles de supresión del granizo requieren la siembra en la región fuente, donde está la mayor parte del agua líquida subfundida (véase la Figura 1). Esta región de la nube se conoce generalmente como bóveda y tiene un eco de radar débil (es decir, no hay partículas de crecimiento en la bóveda, y por lo tanto, no se reduce el CAL). El objetivo es destruir la bóveda implicando a gran parte del CAL en la precipitación temprana y/o haciendo que las partículas de hielo creadas por la siembra temprana se adelanten en una trayectoria más baja. La trayectoria más baja inhibe el crecimiento de las partículas y da como resultado lluvia temprana y/o piedras de granizo más pequeñas (véase la línea delgada continua (marcada con el 1) que atraviesa la flecha de las corrientes ascendentes principales de la Figura 1).

La siembra se hace en la región de corrientes ascendentes débiles por medio de aeronaves, cohetes o cañones que liberan (generalmente) material de siembra de yoduro de plata en la parte baja de la nube. A veces, se utilizan sales higroscópicas. Las partículas sembradas que alcanzan la bóveda crecen allí reduciendo parcial o totalmente el CAL. Otra manera de sembrar es penetrar en la bóveda y liberar directamente el material de siembra donde la temperatura está comprendida entre  $-5$  y  $-12^{\circ}\text{C}$  (perpendicular al vector de propagación de la nube) como se muestra en la trayectoria del avión superior de la Figura 1.

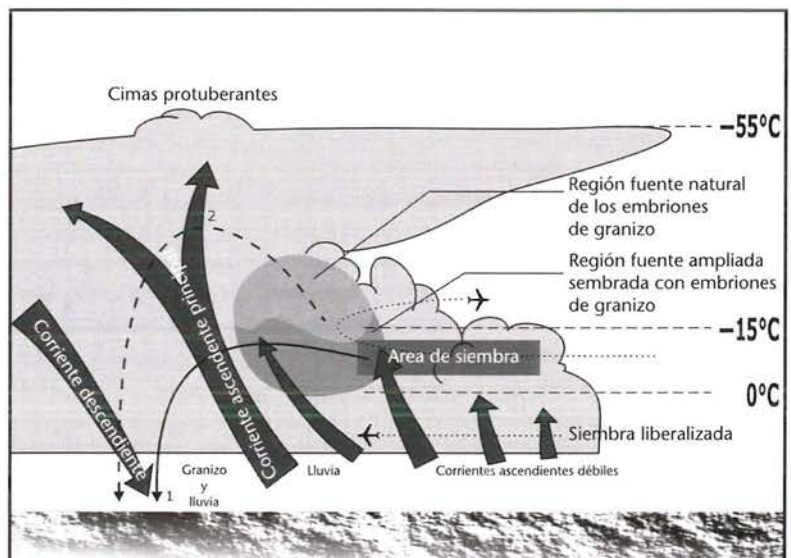


Figura 1 — Concepto de supresión del granizo (en este dibujo, el movimiento de la nube tormentosa es de derecha a izquierda)

Si la nube de granizo no está sembrada, el crecimiento natural del granizo (la trayectoria de la línea larga de puntos marcada con 1 en la Figura 1) se verá incrementado con el CAL del límite de la bóveda, y las corrientes ascendentes fuertes elevarán las partículas de hielo a las regiones superiores de la nube. En su camino hacia arriba, seguirán creciendo en tamaño y finalmente caerán en forma de piedras de granizo grandes, a menos que la fuente de humedad de la nube disminuya mediante las partículas rivales sembradas.

Es necesario mejorar la capacidad de evaluación de los experimentos de supresión del granizo y comprender los procesos físicos asociados. Para que una hipótesis tenga sentido debe especificarse el proceso de intervención dentro del contexto de los procesos naturales. Una teoría de crecimiento del granizo que sea lo bastante completa para servir como base de fondo para todo concepto de supresión del granizo debe incluir al menos:

- Los procesos de formación del embrión de granizo, incluida la microfísica del crecimiento de partículas y las regiones de la tormenta en las que se produce el crecimiento.
- El transporte de los embriones a las regiones con abundante contenido de agua líquida subfundida en las que es posible el crecimiento de granizo.
- La trayectoria de crecimiento de las piedras de granizo y su capacidad de reducir el agua subfundida.
- Se tienen que comprender los elementos anteriores en términos de evolución a lo largo del tiempo que duren las corrientes ascendentes de la tormenta y el desarrollo continuado de la célula.

### Algunas mejoras

Algunas de las mejoras de los métodos durante los últimos diez años son las siguientes:

- Importantes avances en el desarrollo de materiales de siembra glaciogénicos con respecto a la eficacia de los núcleos de hielo (número de núcleos de hielo por gramo de material en función de la temperatura), y con respecto a la velocidad de activación (porcentaje total de material nucleado en función del tiempo). Los cristales de hielo se pueden nuclear a temperaturas de hasta  $-3,8^{\circ}\text{C}$  y a una temperatura de  $-6^{\circ}\text{C}$  se activan en 1 ó 2 minutos el 90 por ciento de los núcleos. La siembra de la base de la nube mediante sales higroscópicas ha demostrado resultados prometedores en la formación de gotas y en la estimulación de la precipitación. Se recomendó que se identificara un laboratorio internacional para la prueba normalizada de los agentes de siembra glaciogénica e higroscópica.

- La mejora del objetivo de las aeronaves de siembra utilizando el Sistema de Posicionamiento Mundial, que puede superponer la posición de la aeronave de siembra en las visualizaciones CAPPI (pantalla panorámica de altitud constante) del radar. Esto permite a los controladores del radar dirigir la aeronave (o los cohetes) a las zonas clave de nuevo crecimiento de la tormenta. La cobertura y los índices de repetición de la siembra deben ser proporcionales a la velocidad de propagación de la tormenta.
- Un mayor uso del análisis asistido por radar utilizando el análisis de rastreo de identificación de tormentas y el software de predicción inmediata (TITAN) o el sistema similar AntiGrad, experimentado en el Centro de Nalchik. Los barridos de volumen del radar se registran en intervalos de 3 a 5 minutos. Los criterios objetivos de rastreo de células permiten el cálculo de numerosos estadísticos de tormentas para tormentas sembradas y sin siembra. También hay beneficios en tiempo real para el TITAN, ya que las secciones transversales verticales a lo largo del vector de propagación resultan críticas para identificar los núcleos de ecos elevados que corresponden a nubes de nuevo desarrollo que deben sembrarse para que tenga éxito la supresión del granizo.
- Mejores medidas de granizo utilizando el radar convencional: la cantidad de líquido integrada verticalmente (VIL) (calculado a partir de la reflectividad integrada verticalmente) es un parámetro obtenido a partir del radar que se utiliza mucho para determinar el potencial de producir granizo de las tormentas. El VIL máximo es el mejor parámetro convencional de radar disponible en la actualidad que se correlaciona con el tamaño del granizo en la superficie. Cualquier determinación de la eficacia de la siembra de nubes debe ser capaz de medir la variabilidad espacial y temporal completa de las hileras de granizo. Se necesita más trabajo para desarrollar parámetros mejorados de radar utilizando radares sofisticados de diversidad de polarización que sean más sensibles a la cantidad, el tipo y el tamaño de las partículas de la nube y del granizo y que pueden utilizarse en los programas de supresión del granizo.
- Se ha trabajado mucho en estimar la probabilidad de granizo a partir de la altura del nivel de 45 dBZ (H45) en la tormenta. La probabilidad de granizo aumenta bruscamente a medida que el H45 aumenta unos pocos kilómetros por encima de las altitudes de temperatura cero. Para tener confianza en que un radar métrico tenga cierta capa-

cidad de medir granizo, es necesario hacer algunas comparaciones con los datos de superficie. Un haz de radar se promedia en un volumen grande (aproximadamente,  $1 \text{ km}^3$  ó más). Se cree que la mejor manera de estimar el granizo es mediante una combinación de radar y almohadillas de granizo. Los datos de las almohadillas de granizo de superficie ofrecen la base para desarrollar y evaluar los algoritmos utilizados para estimar el granizo a partir de las medidas de reflectividad del radar. Con este fin, es posible utilizar una red limitada de almohadillas de granizo. Por ejemplo, un número de líneas largas de almohadillas de granizo, separadas, digamos, entre 2 y 3 km y de unos 25 a 50 km de largo, podrían suministrar una muestra suficiente de medidas de granizada.

- La capacidad para predecir granizo podría mejorarse más mediante el uso de modelos detallados de 3D que incorporen el comportamiento y los efectos del material de siembra. El objetivo principal de la simulación numérica en la supresión del granizo es producir un fenómeno análogo que reproduzca con precisión el propio fenómeno. Entonces la salida del modelo podría utilizarse para predecir el desarrollo de los procesos naturales. Para tener éxito, los modelos numéricos deberían utilizar observaciones microfísicas y aerológicas de nubes in situ. El progreso en la modelización numérica de las granizadas se ha visto marcado por la utilización de un modelo mesoescalar de resolución de nubes. Los experimentos de modelización numérica en 3D de siembra de tormentas de granizo en los 10 últimos años crecieron hasta un punto en el que ahora se pueden explicar grandes partes de los procesos nubosos, incluida la siembra de nubes. Aunque la mayor parte de los modelos numéricos todavía son poco adecuados, pueden constituir un medio poderoso para seguir avanzando en el conocimiento de los efectos de la siembra de nubes.

### Evaluación de la supresión del granizo

La precipitación en forma de granizo tiene una gran variabilidad tanto temporal (es decir, de segundos a horas y de un año a otro) como espacial (es decir de  $100 \text{ m}^2$  a  $10^5 \text{ m}^2$ ). Los procesos físicos implicados en la formación de nubes y en la precipitación incluyen la interacción de una serie extremadamente amplia de partículas discretas (de  $10^{-2} \mu\text{m}$  a  $10^5 \mu\text{m}$ ), y no son lineales. El conjunto de campos dinámicos que dan como resultado la formación y la evolución de las nubes visuales pueden ir desde la escala disipativa a la escala convectiva y la escala sinóptica de movimiento. Por lo tanto, la manera de medir, calcular y explicar la

precipitación en forma de granizo y su estructura no está lo suficientemente avanzada, lo que ocasiona problemas en la evaluación de la eficacia de la supresión del granizo. No hay dos nubes con igual estructura o dinámica que puedan compararse de manera fácil. El conocimiento de las nubes de tormenta es extremadamente complejo y está lejos de ser completo. Hace algunos años se desarrolló un proyecto en Rusia (y ahora se utiliza en todo el mundo) que solo utiliza la reflectividad máxima y la altura del eco de 45 dBZ que se produce al menos a dos kilómetros por encima de las isotermas de cero grados. Se han obtenido resultados fascinantes que son aplicables a la supresión del granizo y a su evaluación.

Hay tres maneras distintas de enfocar la evaluación de la supresión del granizo: física, estadística y económica. La aplicabilidad de cada una depende del tipo y de la calidad de las medidas realizadas durante los experimentos de supresión del granizo. Las distinciones en la tecnología de supresión del granizo, incluidos los distintos modelos conceptuales, los conceptos y los criterios de siembra, han creado dificultades al comparar los resultados de los distintos proyectos de supresión del granizo.

La incapacidad (todavía) para comparar entre las cantidades de granizo observadas y las que se hubieran producido sin siembra porque estas últimas no se conocen, hace necesario al evaluar los resultados de las actividades de supresión del granizo volver al análisis estadístico. Uno de los puntos más débiles de la evaluación de la supresión del granizo es la falta de fiabilidad de los métodos basados en la calidad variable de la información agrícola relativa. Un uso más vigoroso de los resultados de las observaciones avanzadas in situ y de la modelización podría aumentar la información de los procesos físicos, ayudar a la evaluación de la supresión del granizo y apoyar (o rechazar) las hipótesis de siembra aplicadas. La aplicación del enfoque estadístico debería basarse en datos objetivos suministrados por redes de almohadillas de granizo (energía cinética del granizo, etc.) y de las salidas del radar (contenido de VIL, parámetros volumétricos, etc.). Se han encontrado algunos intentos, utilizando sistemas de rastreo por radar, como TITAN y software similares, como la principal herramienta de investigación para la evaluación física de los proyectos. Se piensa que van en la dirección correcta.

La información sobre los seguros, el gasto, los datos agrícolas, la información sobre el daño al valor y la superficie de los cultivos, se almacenan generalmente en zonas distintas, de maneras distintas, puede que en momentos distintos y en diferentes etapas del desarrollo del cultivo. Consiguientemente, no se puede tomar la validez de estos conjuntos de datos como objetiva y

no debería tener ningún reconocimiento científico. Resulta difícil cualquier procedimiento de evaluación si no se tienen en cuenta la gran variabilidad natural de los datos de precipitación en forma de granizo y las variaciones en el tipo y en el momento de las estimaciones de los seguros. Es difícil explicar y, por lo tanto, aceptar las reivindicaciones de índices extremadamente altos (hasta del 94 por ciento) de éxito que alegan algunos participantes.

La información sobre los seguros, la información sobre el daño al valor y la superficie de los cultivos y los datos históricos no pueden considerarse simplemente como parámetro(s) o predictor(es) primario(s). Sin embargo, en la situación actual, la susodicha información, burda, podría contribuir, si se mejorara de manera importante, y siempre que las evaluaciones cumplan estrictamente con los principios básicos de la estadística de la climatología. Dicho enfoque podría disminuir el sesgo encontrado entre la realidad y algunos de los índices poco creíbles de éxito de los que se ha informado.

Debería recordarse que al enfrentarse a la incertidumbre asociada a la falta de evaluaciones aleatorias de supresión del granizo, en la Declaración de la OMM sobre el Estado de la Modificación Artificial del Tiempo (2001) se observaba que nuestro conocimiento de las tormentas no permite todavía una predicción fia-

ble de los efectos de la siembra para la supresión del granizo. Concluía que los importantes avances en la tecnología, incluidas las sofisticadas capacidades de medida de la última década, han abierto nuevos caminos para documentar y comprender mejor la evolución de las tormentas y las granizadas violentas. Se necesitan nuevos experimentos sobre la organización de tormentas y la evolución de la precipitación, incluido el granizo, que podrían conllevar avances importantes.

La reunión de Nalchik contó con el punto de vista de primera mano del sistema ruso de supresión del granizo, con detallados informes sobre las actividades relacionadas desarrolladas en China durante la última década y con numerosos informes de otro tipo.

Los participantes concluyeron que, aunque existe la tecnología, no se lleva a cabo mucha investigación sobre el granizo, lo que supone un serio obstáculo para progresar. Se puso de manifiesto que el intercambio regular de información entre los grupos más activos, una colaboración internacional más estrecha y una mayor financiación de la investigación, incluida la planificación de un enfoque común para resolver algunas cuestiones científicas notables, resultaban esenciales para un mayor progreso en el campo de la supresión del granizo.

El informe completo de la reunión está disponible a través de la Secretaría de la OMM.

## *El Met Office del Reino Unido, cambia de sitio*

Por Claire SMITH y Sancha TETLOW

En 2003, el *Met Office*, del Reino Unido, trasladó con éxito su sede y centro de operaciones de Bracknell a un edificio totalmente nuevo y construido especialmente con este fin en las afueras de Exeter, en Devon.

Cuando se inauguró en 1961, nuestra sede de Bracknell era moderna y bien adecuada a nuestras necesidades. Durante cuarenta años, el *Met Office* creció y se expandió a través de numerosos lugares del sureste del Reino Unido y los edificios se habían vuelto completamente inadecuados para dirigir un complejo importante de tecnologías de la información (TI).

Después de muchos meses de investigación, análisis y discusiones —que incluyeron una votación del personal— en noviembre de 2000 decidimos que un

lugar adecuado en Exeter, y la oportunidad de construir un edificio totalmente nuevo y diseñado especialmente con este fin, ofrecían los mejores beneficios profesionales a largo plazo. En estos días de tecnología y conexiones de comunicación avanzadas ya no es necesario que las empresas internacionales tengan su base en las cercanías de la capital del país. Exeter es una zona en desarrollo con todas las conexiones y la infraestructura necesarias para una empresa meteorológica y medioambiental líder en el mundo. Tiene todo lo que el sureste del Reino Unido ofrecía antes, con el valor añadido de una mejor calidad de vida.

Queríamos fomentar el compromiso del sector privado en la entrega del edificio pero también deseá-