

estaba en Utrech. Nos hicimos muy amigos. El tenía una actitud especial hacia la meteorología; creía en la termodinámica de la atmósfera y no se dejaba impresionar por las ideas puramente dinámicas de los procesos. Después de la guerra Sir Nelson Johnson dejó de ser un científico, aunque fue el primer Presidente de la OMM. Su sucesor, Graham Sutton, fue providencial, ya que era un entusiasta del desarrollo de la investigación en el Meteorological Office y consiguió obtener ordenadores electrónicos para nosotros. Pero tengo que reconocer que en aquella época no había en Gran Bretaña científicos creadores en meteorología sinóptica o dinámica que se puedan comparar con personalidades como Bergeron, Bjerknes, Rossby, Charney o Eliassen. Entonces teníamos en Inglaterra un meteorólogo dinámico clarividente, Eric Eady, que realizó algunos bellos estudios teóricos sobre lo que ahora conocemos como ondas de Eady, que desgraciadamente murió joven. También mantuve una fructífera colaboración con el Profesor P.A. Sheppard, que sucedió a Sir David Brunt en la cátedra de meteorología del Imperial College. Trabajamos en estrecha colaboración durante muchos años, él representaba a la universidad y al mundo académico y yo al Meteorological Office.

*H.T.* — En su vida ha recibido varias recompensas. ¿Qué sintió cuando le otorgaron el premio IMO?

*R.C.S.* — Como es natural me agradó mucho. No entiendo porqué me seleccionaron, pero creo que los ganadores de premio deben siempre algo a la suerte. Los premios que más me han complacido fueron el primero, y, prácticamente, el último. Fué durante la guerra cuando, con total asombro, me enteré de que me habían condecorado con la OBE (militar), como Jefe de Escuadrón, por mi trabajo para los ataques de los bombarderos. El premio más reciente, ser miembro honorario de la American Meteorological Society, fue también una sorpresa completa y una satisfacción muy grande.

*H.T.* — Mi última pregunta es ésta ¿Qué consejo daría a un joven meteorólogo de hoy día?

*R.C.S.* — Esto es muy difícil. Le diría que recuerde que sólo se vive una vez y aproveche todas las oportunidades que se le presenten en estos primeros años para aumentar su conocimiento y desarrollar sus aptitudes. Que recuerde que el trabajo que se realiza durante estos primeros años va a ser probablemente el más provechoso que haga nunca y que después no podrá reparar las omisiones que cometa ahora. Creo que no tengo ningún consejo concreto para los meteorólogos. Pienso que es una buena profesión y una profesión afortunada. Siempre he pensado en los meteorólogos como un grupo en el que hay muchas personas felices y quizás haya algo de cierto en ello. La materia es atractiva por sí misma, está relacionada con la naturaleza y el ambiente, carece de implicaciones molestas y es enteramente beneficiosa para la humanidad. También pienso que tendrá una importancia creciente en el futuro, ya que vivimos en la atmósfera y tenemos que saber lo más posible acerca de ella, si queremos triunfar como especie en esta Tierra, como ha ocurrido en el pasado.

## **SUPRESION DEL GRANIZO. INVESTIGACION Y ACTIVIDADES EN BULGARIA**

*Por K. STANTCHEV y P. SIMEONOV\**

### *Antecedentes*

Bulgaria está situada en las latitudes medias, y las granizadas constituyen el azote

\* El Dr. Stantchev es el Director del Servicio Hidrometeorológico y Representante Permanente de Bulgaria en la OMM. El Sr. Simeonov es científico del Instituto de Hidrología y Meteorología en Sofía.

de su agricultura intensiva. Las estadísticas demuestran que los daños producidos por el granizo en un año determinado afectan entre el 7 y el 22 por ciento de la superficie cultivada, con pérdidas en las cosechas que van del 15 al 40 por ciento. En términos monetarios, las pérdidas anuales medias a causa del granizo se calculan en 150 millones de dólares EE.UU. como mínimo; si se tuvieran en cuenta otras consideraciones (tales como el efecto que producen estos daños en el rendimiento agrícola de los años siguientes), la cifra resultaría mayor. Por esta razón, los meteorólogos búlgaros llevan muchos años estudiando el fenómeno del granizo. Ya en los años 40, el fallecido Académico Krastanov (*Boletín de la OMM* 27 (1), pág. 82) y sus discípulos obtuvieron importantes resultados de sus estudios teóricos sobre los cambios de fase del agua, que utilizaron para explicar los procesos microfísicos en las nubes y la formación de la lluvia.

Posteriormente, se emprendieron estudios sobre la dinámica de las nubes convectivas y las condiciones propicias para la formación del granizo en Bulgaria, de los cuales se dedujo en 1965 un método para la predicción del granizo a partir de la información sinóptica y en altitud, método que aun se sigue utilizando. Más adelante, se realizaron estudios de dinámica térmica de la atmósfera y de la formación de nubes.

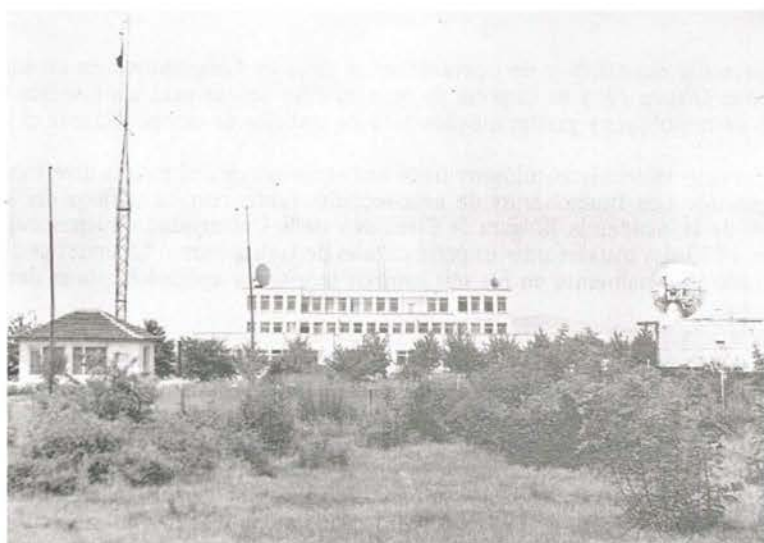


Figura 1 – El Centro de Investigación para la supresión del granizo en Gelemenovo, Bulgaria

En 1969 se estableció el primer campo de experimentación de las operaciones de supresión del granizo, proyectado para proteger una zona de unos 3000 Km<sup>2</sup> en el sur del país. Inicialmente, se utilizaron los métodos desarrollados en la URSS (por el Instituto Geofísico Georgiano y el Observatorio Aerológico Central). El procedimiento consistía en la dispersión, mediante cohetes, de yoduro de plomo (PbI<sub>2</sub>) en los cúmulonimbus. Se fueron reuniendo los datos meteorológicos (incluyendo los de radar) y sometiéndolos a tratamiento para disponer de un historial del desarrollo de las granizadas en las condiciones que prevalecen en Bulgaria. En el Instituto de Hidrología y Meteorología de Sofía se formó un núcleo de jóvenes especialistas en investigación teórica y aplicada sobre las nubes convectivas y la supresión del granizo, y así surgió un equipo de técnicos especializados en la modificación artificial del tiempo.

## *Experimentación actual en la supresión del granizo*

La red de supresión del granizo cubre hoy en día una superficie cultivada de más de 9000 Km<sup>2</sup>. Hay nueve centros de supresión del granizo distribuidos por todo el país, de los cuales uno ha sido proyectado y equipado especialmente para la experimentación y la investigación. Se trata del centro de Gelemenovo, próximo a la ciudad de Pazardzhik, a unos 100 km al SE de Sofía. El distrito correspondiente a este centro (1500 Km<sup>2</sup>) cubre ambas orillas del río Maritsa y tiene una altitud media de 300 m sobre el nivel del mar, pero está rodeado al norte, oeste y sur por montañas de hasta 2000 m. En esta zona hay unos 40 tipos de cultivos distintos, los más importantes de los cuales son viñas, frutales, legumbres, tabaco, trigo, cebada y maíz.

Durante la estación de verano, la ocurrencia de granizo en esta zona está casi siempre asociada a la aproximación de frentes fríos y oclusiones de dirección comprendida entre el NW y el SW. La relación entre las tormentas de granizo frontales y las locales de masa de aire es de 7 a 3. Los datos de los 15 años anteriores al comienzo de las actividades anti-granizo indican que había como promedio 19 días al año en que los cultivos resultaban perjudicados por el granizo. Las tormentas de mayor amplitud podían dañar hasta el diez por ciento del total de la zona cultivada, lo que equivale a 80 Km<sup>2</sup>, y la duración de la precipitación en un punto dado podía llegar hasta los 90 minutos. Las nubes productoras de granizo podían ser de naturaleza multicelular o supercelular.

El personal científico y de operaciones se aloja en Gelemenovo en un edificio de tres plantas (*figura 1*), y se dispone de otro edificio aparte para los trabajos técnicos así como de remolques y garitas móviles para los trabajos de campo durante el verano.

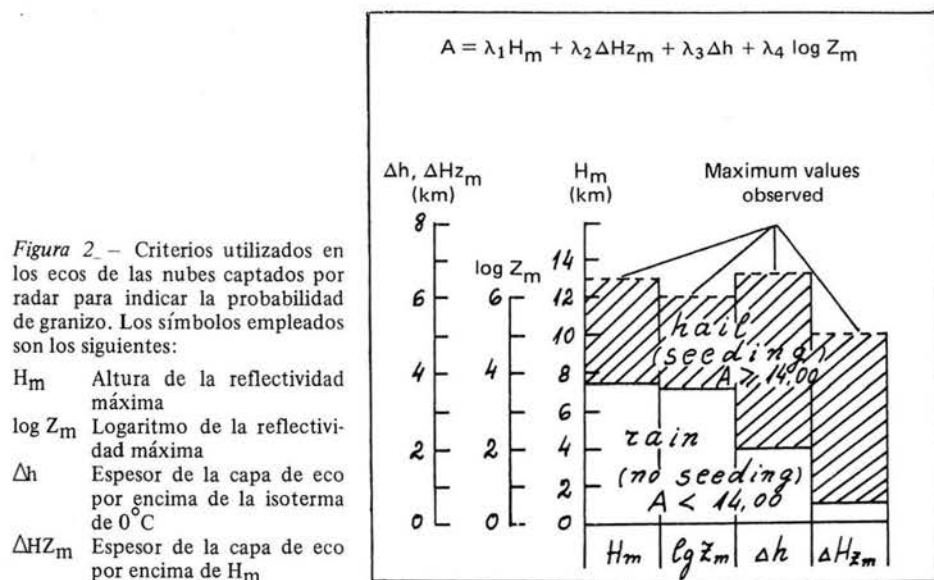
El Servicio Hidrometeorológico tiene una sección especial para la investigación sobre el granizo. Los funcionarios de esta sección, junto con científicos del Instituto Geofísico de la Academia Búlgara de Ciencias y de la Universidad, utilizan ampliamente, desde 1970, las instalaciones experimentales de Gelemenovo. La investigación se ha concentrado especialmente en los seis campos teóricos y aplicados que se describen a continuación.

*Física y dinámica de las nubes convectivas* – Se ha desarrollado un método de predicción de las condiciones asociadas con la ocurrencia del granizo, basado en la información sinóptica y de los sondeos en altitud, habiéndose comprobado su éxito en el 90 por ciento de los casos. Se han hallado relaciones cuantitativas entre la inestabilidad convectiva y la intensidad máxima de la precipitación. Se ha estudiado el movimiento de las nubes convectivas en relación con la topografía del terreno. Se efectuaron análisis en profundidad en algunas de las tormentas de granizo más fuertes. Basándose en un modelo de convección por chorro y en un tratamiento físico-estadístico, se ha determinado una clasificación de correlación cuantitativa para relacionar las propiedades dinámicas y microfísicas de una nube convectiva con el tipo e intensidad de la precipitación, calculándose a estima la influencia que la cristalización artificial tendrá sobre la convección. Se ha elaborado un modelo tridimensional de nube convectiva, y también se realizan estudios de modelos sobre los cambios en la estratificación atmosférica debidos a la convección, así como sobre comparación entre casos reales de convección muy fuerte.

*Cambios de fase del agua en la atmósfera* – Se ha estudiado en el laboratorio el umbral de temperatura para la formación de hielo a partir de las gotas aisladas de agua, y también se ha investigado sobre los efectos de los diversos agentes aerosoles (PbI<sub>2</sub>, AgI y CuS).

*Estudios basados en el radar* – Utilizando el radar en la banda X, se han observado ciertas diferencias en las características de los cúmulonimbus productores potenciales

de granizo entre los de Bulgaria y los de Georgia (URSS). Y así se ha desarrollado un método físico-estadístico para la identificación del granizo potencial, utilizando equipos de radar en las bandas X y S, que es aplicable a Bulgaria (figura 2), y se ha determinado un factor de reflectividad crítica para indicar la zona de siembra dentro de la nube.



**Técnicas de supresión del granizo** – Sobre la base de los estudios de laboratorio y la experiencia local, ha sido posible modificar los métodos de siembra desarrollados en Georgia para conseguir el máximo rendimiento en las condiciones que prevalecen en Bulgaria. Se encontró que la capa de nubes más adecuada para la siembra es la comprendida entre las isotermas  $-5^\circ\text{C}$  y  $-10^\circ\text{C}$ . Sin embargo, cuando la tormenta es muy fuerte, la siembra se realiza en más de un nivel y, en este caso, el límite superior se amplía hasta la isoterma de  $-15^\circ\text{C}$ . El objetivo es situar el agente de siembra en la zona más activa de la tormenta en desarrollo.

**Climatología del granizo** – En estos estudios se incluyen la distribución espacio-cronológica de los días de granizo, su distribución dentro de un área unidad, la relación entre el número de días de granizo y de tormenta, la dirección de llegada de las tormentas de granizo, duración de las granizadas, daños ocasionados por el granizo, características de las piedras de granizo y otros factores.

**Evaluación del rendimiento de la supresión del granizo** – Se utiliza un método físico-estadístico basado en relaciones de regresión mensuales entre los parámetros predictores (índices de inestabilidad) y los parámetros que se predicen (zonas afectadas por el granizo y valor de las pérdidas en las cosechas). A fines comparativos, se hace uso de los datos de muchos años anteriores al comienzo de las actividades de supresión del granizo. Los resultados obtenidos en Gelemenovo con este método demuestran que la intervención durante el período 1972-1978 coincidió con una reducción de las pérdidas en cosecha a causa del granizo de un 50-60 por ciento cada año, lo que representa una relación coste-beneficio de 1:3. La media anual de días de granizo durante los ocho años de operaciones de siembra es de alrededor de 11 en lugar de los 19 registrados en los 15 años anteriores. Se identificaron por radar y se sembraron en total 715 zonas nubosas productoras potenciales de granizo durante estos ocho años de operaciones.

De todas ellas, sólo se produjeron daños en 138 casos. También hay que mencionar el escaso éxito obtenido en la siembra de tormentas fuertes de supercélula, que se presentan en promedio una vez cada cuatro años.

*Procedimientos operativos de supresión del granizo en Gelemenovo* — La oficina de predicción meteorológica de Plovdiv, distante unos 40 km, facilita predicciones de granizo cada dos horas, basadas en los datos sinópticos, que incluyen los sondeos ordinarios de Sofía y de Kurdzhali así como los radiosondeos especiales —tres al día— que se realizan en Gelemenovo. Este año se dispone de un nuevo radar MRL-5 además del radar fijo en la banda X y el radar móvil en la banda S; se emplean para detectar cúmulonimbus e identificar las zonas potenciales de formación de granizo.

El meteorólogo de servicio de Gelemenovo es el responsable de decidir la iniciación de las operaciones de siembra, para lo cual se basa en las informaciones de radar (*figura 2*). Está en comunicación por radio con las 18 bases de lanzamiento de cohetes repartidos por la zona de supresión del granizo de Gelemenovo, y puede dar las instrucciones necesarias para el lanzamiento teniendo en cuenta las hipótesis experimentales y teóricas a que nos hemos referido en los párrafos anteriores. En cada una de las bases hay un pluviógrafo, y otras 17 estaciones de la zona suministran datos de precipitación (en cinco de éstas se hacen también observaciones regulares de temperatura, humedad y viento).

La temporada operativa de supresión del granizo se extiende desde abril hasta septiembre. En el distrito de Gelemenovo están empleadas más de 100 personas, entre meteorólogos, técnicos y personal de lanzamiento de cohetes. En los ocho años comprendidos entre 1972 y 1979 se efectuó la siembra en un total de 219 días. Los funcionarios del centro de Gelemenovo acompañan a los representantes del Instituto Estatal de Seguros y a los expertos agrícolas en las visitas de inspección de los daños ocasionados por el granizo.

### *Conclusiones*

El Octavo Congreso adoptó una resolución por la que se solicita a los Miembros que realizan trabajos de investigación sobre la supresión del granizo que intercambien información y colaboren a nivel internacional en la resolución del gran número de cuestiones científicas para las que aún no se tiene respuesta.

El éxito de las medidas de supresión del granizo en Bulgaria asegura el mantenimiento y ulterior desarrollo de estas actividades. Hay una firme infraestructura para la investigación en los diversos problemas aun sin resolver, tales como la comprobación de nuevos métodos de tratamiento de las tormentas de supercélula, el desarrollo de mejores métodos estadísticos para la evaluación de los efectos físicos y económicos de la supresión del granizo, el estudio de la distribución de los núcleos de hielo en distintas condiciones atmosféricas, y el mecanismo de formación y crecimiento en las diferentes variedades de cúmulonimbus.

De acuerdo con esta resolución del Octavo Congreso\*, ya han visitado Bulgaria cierto número de científicos con el objeto de tratar cuestiones relacionadas con el mejor conocimiento de las tormentas de granizo.

---

\* Resolución 26 (Cg-VIII)

[ En la página 213 de este número se encontrará un informe sobre una reunión de expertos en supresión del granizo ]