

## ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ESTRUCTURA DE GRANIZOS

Luisa Lubart, M. E. Saluzzi\*, J. M. Nuñez\* y L. Levi\*\*

Servicio Meteorológico Nacional

\* Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales

\*\* Comisión Nacional de Energía Atómica

Buenos Aires, República Argentina

### RESUMEN

Se analiza la estructura cristalina de 57 granizos provenientes de tres tormentas severas ocurridas en la provincia de Mendoza durante el verano 1976-77. Se observan secciones delgadas de las piedras y se clasifica, en las diferentes tormentas, el tipo de embriones que iniciaron la formación del granizo. Se mide el tamaño y la orientación de las cristales en las distintas capas de varios granizos y se infiere la temperatura ambiente en la cual éstos han crecido. Los resultados obtenidos, junto con los datos del radiosondeo y la información del radar, se utilizan para reconstruir posibles trayectorias de los granizos en la nube.

### ABSTRACT

The crystallographic structure of 57 hailstones from three severe storms, are analysed. The hailstorms took place in Mendoza, during the summer 1976-77.

Thin sections of the stones are studied and a classification of the hailstone embryo type are made.

The size and orientation of the crystals in the hailstone layers indicate the ambient temperature on which the growth of the hailstones took place.

The obtained results, together with radiosounding and radar data are used in order to get the hailstone trajectories in the clouds.

## INTRODUCCION

Debido a la severidad de las tormentas graniceras, resulta difícil obtener información de las condiciones que existen durante el crecimiento de las piedras de granizo, a través de medidas directas en la nube. Teniendo en cuenta que la estructura del granizo refleja, en cierto grado, las condiciones bajo las cuales se ha formado, utilizamos la piedra de granizo como un sensor de la tormenta que lo produjo.

La historia del crecimiento de un granizo puede representarse esquemáticamente por dos etapas: el crecimiento del embrión y el desarrollo posterior de las capas subsiguientes (Felderer et al. 1978).

Teniendo en cuenta su forma, los embriones se clasifican de manera simple en dos categorías: esférico y cónico. Se considera que los embriones esféricos provienen de gotas congeladas y que los cónicos tienen su origen en crecimiento de tipo "riming".

En un trabajo reciente, Knight y Knight (1978) hacen una clasificación de los embriones de más de 10000 granizos provenientes de tormentas producidas en diferentes zonas de EE.UU., Africa y Europa. Encuentran que, en una recolección de piedras realizada en un mismo lugar, generalmente hay más del 80% de embriones de la misma categoría. Además observan que, cuando la temperatura de la base de la nube es baja (de  $-5$  hasta  $+10^{\circ}\text{C}$ ), predomina el embrión de tipo cónico y que cuando esta temperatura es mayor que  $+10^{\circ}\text{C}$ , predominan embriones de gota congelada.

Por otra parte, investigaciones realizadas en acreciones artificiales sobre la orientación, el tamaño y la opacidad de los cristales (Levi y Aufdermaur, 1970; Levi et al., 1974; Macklin y Rye, 1974; Rye y Macklin, 1975; Levi et al., 1978; Carras y Macklin, 1975), han dado resultados que permiten determinar, en cada una de las capas que forman el granizo natural, el tipo de crecimiento, seco ó húmedo, y estimar las temperaturas del aire que encuentra el granizo en la nube ( $T_a$ ) y la de depósito ( $T_d$ ).

En este trabajo, se estudian granizos provenientes de tres tormentas producidas en

la provincia de Mendoza durante el verano 1976-77. Se proponen posibles trayectorias para los granizos analizados, y las condiciones que experimentan durante su formación en la nube.

### LAS TORMENTAS GRANICERAS

#### Características sinópticas

Las tres tormentas que originaron los granizos estudiados, participan de las características generales de las que se producen en el norte de Mendoza. En todas, estaban dadas las condiciones superficiales de alta temperatura y humedad y, asimismo, la parte delantera de una vaguada de altura estaba interesando la zona. Las tormentas del 22-12-76 y del 27-2-77 fueron frontales. Ambas se formaron sobre la pendiente frontal, cuyo empuje facilitó el proceso. Sin embargo, estos frentes eran débiles y por lo tanto no favorecieron la formación de hileras de grandes nubes, sino que éstas resultaron eventos aislados en la zona. Esta circunstancia las hace semejantes a las tormentas de masa de aire. La tormenta del 22-12 muestra ecos simbióticos que al unirse reactivan la producción de hidrometeoros, conformando para el radar una gran masa nubosa con varios focos altamente reflectantes. La del 27-2 se singulariza por disponer, en superficie, de valores menores de temperatura y punto de rocío, dando por lo tanto nubes de base más alta y ecos reflectantes más numerosos pero bien aislados. La tercer tormenta, del 18-1-77, era de masa de aire y se puede considerar la más representativa en su génesis.

#### Los granizos

Se analizaron 57 granizos provenientes de las tres tormentas consideradas. En la Tabla 1 se registra lugar y fecha de ocurrencia de la precipitación, número de granizos recogidos y diámetro máximo y medio de las piedras que forman cada lote.

Tabla 1

Puesto N°	Fecha	Lote	N° de granizos	Diám. máx. (cm.)	Diám. medio (cm.)
Rivadavia 2148	22-12-76	B	8	5,6	4,5
Rivadavia 3152	22-12-76	C	10	4,6	2,4
Rivadavia 2858	18-1-77	I	12	1,3	1,0
C. Mendoza 5913	27-2-77	E	15	3,0	2,5
C. Mendoza 6612	27-2-77	G	12	3,0	2,4

## METODO DE ANALISIS DE LOS GRANIZOS

### Estudio de la estructura cristalina

Cada uno de los granizos se seccionó a través de su centro, en el plano ecuatorial, y se obtuvieron las réplicas plásticas correspondientes. Se prepararon luego, secciones delgadas de aproximadamente 2 y 0,6 mm de espesor que se observaron, respectivamente, por luz natural y luz polarizada, y se obtuvieron las fotografías. Del análisis de estas fotografías se pudo estimar, en forma cualitativa, la opacidad de las zonas que forman el granizo.

Se realizó asimismo, para toda la muestra, una clasificación de los embriones en dos tipos: cónico y esférico.

Un análisis más exhaustivo se llevó a cabo en 32 de los granizos estudiados. Observando las réplicas a través de un microscopio proyector se midió, en las sucesivas capas que forman el granizo, el tamaño de los cristales (aproximadamente 100 cristales por zona) y se calculó la superficie media  $\bar{S}$  y la longitud media  $\bar{l}$  = elongación en la dirección radial. Con estos valores, y teniendo en cuenta resultados previos obtenidos en experiencias realizadas en acreciones artificiales (Rye y Macklin, 1975; Levi et al., 1978), se determinaron las temperaturas del aire de nube ( $T_a$ ) y la del depósito ( $T_s$ ).

Se midieron además, en algunos granizos, las orientaciones cristalográficas de alrededor de 100 cristales en cada capa. Estas medidas se realizaron de acuerdo a lo ya indicado en trabajos previos (Levi et al., 1974). Se calcularon, para cada una de las capas, los valores medios de los ángulos que forman los ejes  $c$  de los cristales con la dirección de crecimiento. Se obtuvieron curvas de frecuencia  $H(\varphi)$ , que muestran la distribución estadística de la orientación de los cristales.

Los valores encontrados para  $H(\varphi)$  (Levi et al., 1974; Macklin y Rye, 1974) y la estimación de la opacidad de las capas (Carras y Macklin, 1975) se utilizaron para ajustar las temperaturas  $T_a$  y  $T_s$ , previamente estimadas con el estudio del tamaño de cristales.

### Cálculo de los parámetros de nube y estimación de la trayectoria

Conocidos el radio  $R$  del granizo en función de la temperatura  $R(T_a)$  y utilizando la curva de ascenso adiabático húmedo construida aplicando el modelo numérico de nube convectiva (Ghidella y Saluzzi, 1979) a los datos de cada tomento, se halla la función  $R(h)$ , don-

de  $h$  es la altura sobre el nivel del mar.

Por otra parte, y teniendo en cuenta que el análisis cristalográfico está restringido a piedras que tienen una simetría aproximadamente esférica, si éstos están formados fundamentalmente en crecimiento seco, dados  $R(T_a, T_s)$  se puede calcular, para cada capa, el contenido de agua líquida ( $W$ ), utilizando la ecuación de balance calórico.

Conocidos  $W$  y  $dR/dh$ , se calcula la velocidad ascensional  $U(R)$  y el tiempo de formación de cada capa de granizo ( $\Delta t$ ), aplicando la ecuación de crecimiento de la piedra.

## RESULTADOS

### Embriones

Para los granizos provenientes de las tormentas del 22-12 y del 18-1, se encontró prevalencia de embriones esféricos. En la Figura 1, que es una fotografía de una sección del granizo C8 perteneciente a la tormenta del 22-12, se observa un embrión de gota congelada.

Por el contrario, el 80% de los embriones de los granizos provenientes de la tormenta del 27-2, eran de tipo cónico. La Figura 2, que es una fotografía de una sección del grana del granizo G11, ejemplifica un embrión de tipo cónico.

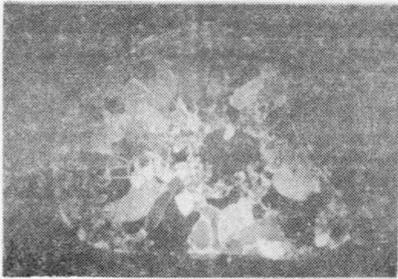


Figura 1. Sección granizo C8

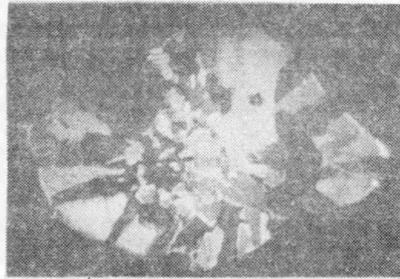


Figura 2. Sección granizo G11

### Trayectorias de los granizos y parámetros $W$ , $U$ y $t$

La evaluación de las trayectorias y de los parámetros  $W$ ,  $U$  y  $t$ , se realizó para los granizos de los lotes B, C e I. En la mayoría de las capas de las piedras analizadas se obtuvieron para  $T_s$  valores inferiores a  $0^{\circ}\text{C}$  (crecimiento seco). Teniendo en cuenta que las experiencias con acreciones artificiales fueron realizadas en condiciones de crecimiento seco, resultó posible evaluar  $T_a$  a partir del tamaño de los cristales y determinar la función  $R(T_a)$ .

Tabla 2

Fecha	Lote	W (g/k)		U (m/s)		t (minutas)
		W <sub>max.</sub>	W <sub>mín.</sub>	U <sub>mín.</sub>	U <sub>máx.</sub>	
22.12.76	B	5.8	2.1	16	39.6	70
22.12.76	C	5.2	2.3	16.6	37.5	52
18.1.77	I	4.3	2.5	18	30.2	28

Datos meteorológicos y aplicación del modelo numérico

Se dan en la Tabla 3 los resultados obtenidos de la aplicación del modelo numérico de nube convectiva a la estratificación de aire claro, en cuyo seno se formaron las nubes (Ghi

Tabla 3

Fecha	h (Km)	T <sub>e</sub> aire claro (°C)	T <sub>a</sub> nube (°C)	W (gr/kg)	U (m/s)	Tope (Km)	Nivel superior Z 32 dbz
22-12-76	1,9	15,5	16,4	0,00	4	13,9	supera los 10 km durante todo el lapso de la tar- menta
	6,1	-14,5	-7,9	8,325	30,4		
	6,3	-16,0	-9,3	8,597	31,3		
	6,5	-17,4	-10,7	8,852	32,0		
	6,7	-18,8	-12,2	9,084	32,8		
	6,9	-20,3	-13,7	9,274	33,4		
	7,1	-21,7	-15,1	9,368	34,0		
	7,3	-23,2	-16,6	9,226	34,6		
	7,5	-24,7	-17,9	8,536	35,1		
	7,7	-26,1	-19,0	6,915	35,7		
	7,9	-27,5	-20,0	4,841	36,3		
	8,1	-29,0	-21,3	3,379	36,9		
8,3	-30,4	-22,7	2,583	37,6			
18-1-77	2,04	-12,7	15,6	0,00	4	11,1	8 km
	6,5	-14,4	-9,9	8,794	28,2		
	7,1	-17,7	-14,1	9,437	28,6		
	7,5	-19,9	-16,8	9,159	28,3		
	7,7	-20,8	-17,9	8,158	28,0		
	7,9	-21,7	-18,9	6,303	27,7		
	8,1	-22,6	-19,8	4,331	27,3		
	8,3	-23,5	-21,0	2,977	26,9		

Las observaciones del radar se consideran para el momento de máximo desarrollo del eco granicero, considerando los t de crecimiento calculados.

Para las muestras pertenecientes a los lotes B y C se encontraron para  $T_a$  valores entre  $-18^\circ$  y  $-22^\circ$  C, mientras que para los granizos del lote I,  $T_a$  resultó estar comprendida entre  $-16^\circ$  y  $-20^\circ$  C. Para ambas tormentas se encontró que los granizos describían trayectorias cuyas alturas están comprendidas entre 7,5 y 8,3 km.

En la Figura 3 se grafican como ejemplo dos trayectorias que corresponden a los granizos C6 e 12, características de las dos tormentas mencionadas.

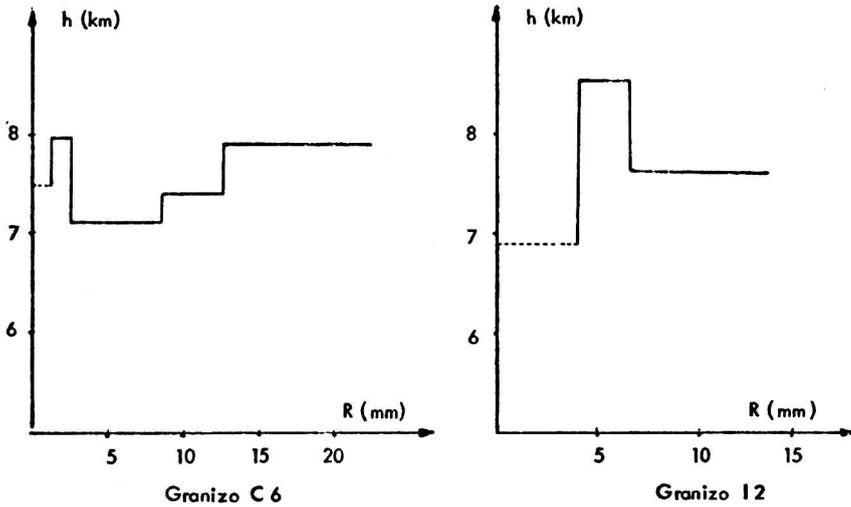


Figura 3. Trayectorias de los granizos: C 6 e 12

En lo referente a los cálculos de los parámetros de nube, éstos se realizaron siguiendo el esquema propuesto anteriormente. En la Tabla 2 se resumen, para cada lote, los valores máximos y mínimos calculados para el contenido de agua líquida ( $W$ ) y para la velocidad de la corriente ascendente ( $U$ ) y los tiempos  $t$  necesarios para la formación de granizos de máximo tamaño ( $R > 2$  cm).

Los valores de  $W$  máximo y de  $U$  mínimo corresponden a las primeras capas de los granizos, mientras que  $W$  mínimo y  $U$  máximo corresponden a las capas periféricas.

della y Saluzzi, 1979), y los datos suministrados por la observación del radar F.P.S. 18.

La temperatura del aire claro  $T_e$  se obtiene a partir del radiosondeo y los valores de  $T_a$ ,  $W$  y  $U$ , se calculan aplicando el modelo numérico. Finalmente, la determinación del tope de nube y del nivel superior  $Z$  (zona de elevada reflectividad que se corresponde con la zona de grandes gotas), se realiza por observación del radar.

## DISCUSION

Los resultados obtenidos a partir del análisis de estructura de granizos pueden compararse, para su discusión, con la información suministrada por el radar y con los datos resultantes de la aplicación del modelo numérico de nube convectiva.

### Embriones

Hemos encontrado en este trabajo, para las tormentas del 22.12. y del 18.1, prevalencia de embriones esféricos y temperatura de la base de la nube, obtenida por radiosondeo  $+10^{\circ}$  C. Este resultado, estaría de acuerdo con el obtenido por Knight y Knight.

Con respecto a la tormenta del 27.2, no hay datos meteorológicos, pero el hecho de que la mayoría de los embriones eran de tipo cónico indicaría que la temperatura de la base de la nube era en este caso más baja que para las tormentas anteriores.

### Contenido de agua líquida

Los valores del contenido de agua líquida calculados por estructura (Tabla 2) coinciden bastante bien con los obtenidos mediante la aplicación del modelo numérico, correspondiente a las alturas donde tuvo lugar el crecimiento del granizo (Tabla 3). Para algunas capas de granizos, la evaluación de  $W$  por estructura puede haber resultado en defecto. Esto se debe a que los cálculos se realizan considerando los coeficientes de recolección a presiones ordinarias, mientras que existen evidencias en trabajos recientes de que el agua efectiva recogida por el granizo podría disminuir con la disminución de la presión.

### Tiempo de crecimiento

Los tiempos de crecimiento, calculados para los granizos de máximo diámetro,

pueden alcanzar hasta 70 minutos. Estos valores pueden parecer excesivos; sin embargo son compatibles con el tiempo de vigencia en la nube de la zona de las grandes gotas, observada por el radar, que recién decae cuando comienza la precipitación sólida masiva.

Por otra parte, la evaluación en defecto de  $W$ , discutida anteriormente, determina en el cálculo una sobrevaluación en los lapsos de tiempo  $t$ .

#### Velocidad de la corriente ascendente

También en el caso de la velocidad de la corriente ascendente los valores obtenidos a través del estudio de estructura son comparables con los resultantes de la aplicación del modelo. Esta correspondencia no se cumple para las primeras capas de los granizos ( $U_{min}$  en la Tabla 2), probablemente debido a que el modelo es no dependiente del tiempo y en consecuencia no retrata la evolución de la nube, sino su estado estacionario. De esta manera, las velocidades iniciales más pequeñas, que corresponden a los primeros estadios de desarrollo de la nube, no pueden ser visualizados por el modelo, a los términos de comparación.

#### Trayectorias de los granizos

Se puede observar que las trayectorias de los granizos estimadas a partir del análisis de estructura y de la información obtenida aplicando el modelo de nube convectiva (Figura 3), coinciden satisfactoriamente con la zona de máxima reflectividad, que corresponde generalmente a la llamada zona de grandes gotas (última columna de la Tabla 3).

### CONCLUSIONES

Tanto las observaciones del radar, que permiten visualizar las zonas de alta reflectividad hasta los 8 km en la tormenta del 18.1. y hasta los 10 km en la del 22.12., como las informaciones numéricas del modelo de nube convectiva, avalan los cálculos de los parámetros de nube obtenidos a través de los estudios de estructura.

Se ha conseguido de esta manera, presentar un cuadro coherente de la conducta de las grandes nubes convectivas en cuyo seno se generaron los granizos analizados. Esta circunstancia indica que, a medida que se pueda mejorar la calidad de las observaciones, se po-

drá intentar, por el camino seguido, un mayor ajuste de los resultados que permitirá acrecentar un conocimiento objetivo del comportamiento de la convección severa.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a las Licenciadas S. Chiabrera y M. Ghidella por su eficaz colaboración en la elaboración de datos y realización de cálculos y al Sr. Mario Ferrantino por la laboriosa preparación de las muestras analizadas.

#### BIBLIOGRAFIA

- Carras, J.N., Macklin, W.C., 1975: The opacity of accreted ice; *Quart. J. R. Met. Soc.*, V. 101, p. 203-206.
- Federer, B., Jauzel, J.; Waldvogel, A., 1978: Hailstone trajectories determined from crystallography, deuterium content and radar backscattering; *Pageoph.*, V. 116, p. 112-129
- Ghidella, M.E., Saluzzi, M.E., 1979: Estudio de un modelo numérico de nube convectiva; a publicar.
- Knight, N.C., Knight, C.A., 1978: South African Lowveld hailstone embryos; *Preprints Conf. Cloud Phys. Atmosph. Elect. Issaquah, Wash.* p. 194-197.
- Levi, L., Aufdermaur, A., 1970: Crystallographic orientation and crystal size in cylindrical accretions of ice; *J. Atmos. Sci.*, C. 27, p. 443-452.
- Levi, L., Achával, E.M. de, Lubart, L., 1974: Structure of ice grown from droplet accretion and solidification process; *J. Crystal Growth*, V. 22, p. 303-310.
- Levi, L., Lubart, L., Achával, E.M. de, 1978: Crystal structure of ice accretions; *Il Nuovo Cimento*, V. 1, p. 86-92.
- Macklin, W.C., Rye, P.J., 1974: Crystallographic orientation distribution in accreted ice; *J. Atmos. Sci.* V. 31, p. 849-852.
- Rye, P.J., Macklin, W.C., 1975: Crystal Size in accreted ice; *Quart. J. Met. Soc.*, V. 101, p. 207-215.