

DISCUSION DE LAS CONDICIONES DE CRECIMIENTO DE GRANIZOS NATURALES

L. LEVI, E. M. de ACHAVAL, L. LUBART
Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas;
Servicio Meteorológico Nacional

Se interpretan las determinaciones de List et al. en granizos naturales, según conclusiones de Levi & Aufdermar. Las muestras presentan una pronunciada simetría de capas opacas y transparentes, en forma alternada. Se concluye que:

- 1 En algunas capas, la orientación preferencial de los cristales indica crecimiento seco. En otras se observa una distribución uniforme, lo que puede atribuirse a zonas de transición o, simplemente, a inhomogeneidades localizadas.**
- 2 La transición de cristales grandes y transparentes, a pequeños y opacos, y viceversa, parecen debidas a variaciones periódicas del contenido de agua líquida.**
- 3 La orientación preferencial de los cristales, en las distintas capas y las fáciles fluctuaciones del cambio opaco-transparente-opaco, llevan a ubicar la temperatura de la zona de crecimiento en la nube, en valores próximos a -18° C.**

The measurements made by List et al. on natural hail are explained, using the conclusions of Levi & Aufdermar. The samples analyzed show a pronounced symmetry of alternating opaque and transparent layers. We conclude:

- 1 In some layers the preferential crystal orientation indicates dry growth. In others the distribution is uniform which could be due to a zone of transition or only to local inhomogeneities.**
- 2 The transition from big transparent crystals to small opaque ones and viceversa, seems to be caused by periodic changes in liquid water content.**
- 3 The preferential crystal orientation in the layers and the easy change from opaque to transparent and from transparent to opaque, lead us to assign a temperature near -18° C to the zone of accretion in the cloud.**

Cuando gotas sobreenfriadas, a temperatura T_a , inciden sobre una piedra de granizo cuya superficie se encuentra a temperatura T_s , la solidificación se produce en dos etapas. En la primera, el hielo crece rápidamente a expensas del sobreenfriamiento y, simultáneamente, la temperatura T_a se eleva a 0°C . Esta etapa produce láminas dendríticas que se desarrollan en el plano basal para T_a próxima a 0°C . A temperaturas T_a inferiores a 0°C las dendritas forman entre sí un ángulo que crece con el sobreenfriamiento (Macklin & Rayan, 1965 — Pruppacher, 1967). A continuación se produce la congelación total del agua líquida remanente por intercambio calórico con el medio ambiente. Si esta segunda etapa, y el posterior enfriamiento de la nueva capa de hielo hasta alcanzar T_s , se producen antes de la llegada de nuevas gotas, la temperatura de superficie del granizo será inferior a 0°C y el crecimiento se denomina seco. En estas condiciones, el gradiente de temperatura es en general radial y la transmisión de calor se efectúa hacia el sustrato sólido y de allí se transfiere al aire (Macklin, 1967). En caso contrario, T_s será aproximadamente igual a 0°C y el crecimiento se denomina húmedo.

Al analizar los histogramas de φ (ángulo entre el eje cristalográfico \vec{C} de cada cristal (·) y la dirección de crecimiento) se encontró que, para crecimiento seco, φ mostraba máximos que, en general, se ubicaban en el intervalo $0^\circ - 10^\circ$ (Levi & Aufdermaur, 1968). En condiciones de crecimiento húmedo, los máximos se encuentran en el intervalo $80^\circ - 90^\circ$ (Aufdermaur et al, 1963).

Levi & Aufdermaur, 1970, estudian en más detalle la vinculación entre ciertos parámetros variables en el túnel de viento y las estructuras de los granizos resultantes. Utilizan T_a entre -2°C y -24°C y obtienen muestras en crecimiento seco y húmedo. Los resultados obtenidos por los citados autores son válidos para granizos con densidad mayor que 0.7 g/cm^3 y pueden sintetizarse en la siguiente forma:

- 1 **Crecimiento seco:** la orientación radial se define inmediatamente al comenzar la acreción, y los valores máximos de φ se desplazan del intervalo $0^\circ - 10^\circ$ al intervalo $40^\circ - 50^\circ$, cuando T_a decrece de -2°C a -24°C .
- 2 **Crecimiento húmedo:** los máximos valores de φ próximos a 90° , se desplazan hacia los 45° al disminuir T_a , en sentido inverso al desplazamiento del crecimiento seco. Para $T_a < -20^\circ\text{C}$, los máximos de φ se ubican en el intervalo $40^\circ - 50^\circ$, para ambos tipos de crecimiento.
- 3 **Tamaño de cristales:** los autores eligen como magnitud característica la dimensión mayor, es decir, el largo L que presentan los cristales en esa sección, y los denominan grandes, medianos ó pequeños, según sea $L > 2\text{ mm}$, $2\text{ mm} > L > 0.5\text{ mm}$, ó $L < 0.5\text{ mm}$, respectivamente. Analizan la distribución de tamaños en función de T_a y T_s para ambos tipos de crecimiento, concluyendo que:
 - a) Para $0^\circ\text{C} > T_a > -15^\circ\text{C}$, los cristales son grandes.
 - b) Para $-15^\circ\text{C} > T_a > -20^\circ\text{C}$, su tamaño depende de otros parámetros.
 - c) Para $-20^\circ\text{C} > T_a > -30^\circ\text{C}$, los cristales resultan pequeños o medianos, estos últimos solo para crecimiento húmedo.

(·) El hielo cristaliza en el sistema exagonal y se denomina \vec{C} al eje del prisma.

En un trabajo reciente, List et al., 1970, estudian la estructura de dos lotes de granizos naturales, provenientes de dos tormentas consecutivas, una de ellas sin sembrar y la otra fuertemente sembrada con IAg. En ambos lotes, los granizos estaban formados por capas sucesivas, opacas y transparentes, formadas por cristales pequeños y grandes respectivamente. Los autores nombrados numeran las capas a partir del centro, y las determinaciones se refieren a las capas correlativas de las distintas muestras; analizan la orientación de los cristales para 49 capas y trazan los histogramas de φ' (ángulo entre la dirección de crecimiento y la proyección del eje \vec{c} de cada cristal sobre el plano de la réplica), de -90° a 90° , con intervalo de clase de 10° . En ambos lotes la moda se ubica en $-5^\circ < \varphi' < +5^\circ$, con frecuencia modal de 9, para datos normalizados a 100 cristales. Posteriormente, clasifican las capas por su frecuencia en dicho intervalo (frecuencia modal de cada capa) y determinan la densidad de los granizos utilizando como valor de referencia $\delta = 0.88 \text{ g/cm}^3$. Los resultados obtenidos por List et al., 1970, pueden ser resumidos en la siguiente forma para el lote I.

Capas transparentes:	frecuencia modal > 9
	densidad $\delta > 0.88 \text{ g/cm}^3$
	tamaño entre 1.6 mm^2 y 7.6 mm^2
Capas opacas:	frecuencia modal < 9
	densidad, $0.92 \text{ g/cm}^3 > \delta > 0.82 \text{ g/cm}^3$
	tamaño $< 1.6 \text{ mm}^2$

En el lote II los valores son más dispersos y se nota especialmente una reducción en el tamaño de los cristales, hecho que se sugiere pueda ser debido a la siembra con IAg.

Tomando esencialmente en cuenta los valores de la densidad, los citados autores se inclinan a considerar que las capas transparentes corresponden a crecimiento húmedo y a identificar las opacas con crecimiento seco; aunque, como mencionan, experiencias de List aún no publicadas, están en contradicción con este hecho.

Si no se consideran los valores de la densidad como definitorios del tipo de crecimiento, las capas transparentes pueden ser identificadas tanto con crecimiento seco como con crecimiento húmedo. Surge entonces la necesidad de aplicar otro criterio para determinar el tipo de crecimiento en las distintas capas. Las conclusiones de Levi & Aufdermar, 1970, antes indicadas, permiten analizar sin contradicciones estos resultados.

Recalculando los histogramas de φ' de 0° a 90° , con intervalo de clase de 10° se obtienen los gráficos de la Fig. 1 para las distintas capas de un granizo que pertenece al lote I.

Se observa que, las capas 2 y 4 corresponden a crecimiento seco, las capas 1 y 3 presentan una distribución uniforme y en la capa 5 se insinúa un máximo que indicaría condiciones de crecimiento húmedo. Debe mencionarse que las capas 2 y 4 son transparentes y las 1, 3 y 5 son opacas.

Recordemos que las conclusiones de Levi & Aufdermar son aplicables a valores de φ , ángulo entre el eje \vec{c} y la dirección de crecimiento medido en el espacio. Los histogramas de la Fig. 1 se refieren en cambio a φ' , ángulo medido en el plano de la réplica y que evidentemente resulta menor que φ . En estas condiciones, los resultados no cambian cualitativamente, pero los máximos pueden corresponder a otros valores. En particular, se puede especificar que para $-12^\circ \text{ C} > T_a > -20^\circ \text{ C}$,

los máximos de φ' se ubican en el intervalo $0^\circ-10^\circ$, mientras que los correspondientes de φ , lo hacen en el intervalo $10^\circ-20^\circ$ (Levi & Achaval & Lubart, no publicado). De manera que es lógico aceptar que las capas 2 y 4 presentan las características de crecimiento seco, con $-12^\circ \text{ C} > T_d > -20^\circ \text{ C}$. Recordando que todas las capas transparentes presentan frecuencia modal mayor que 9 y densidad mayor que 0.88 g/cm^3 , puede extenderse este resultado a la totalidad de las capas transparentes.

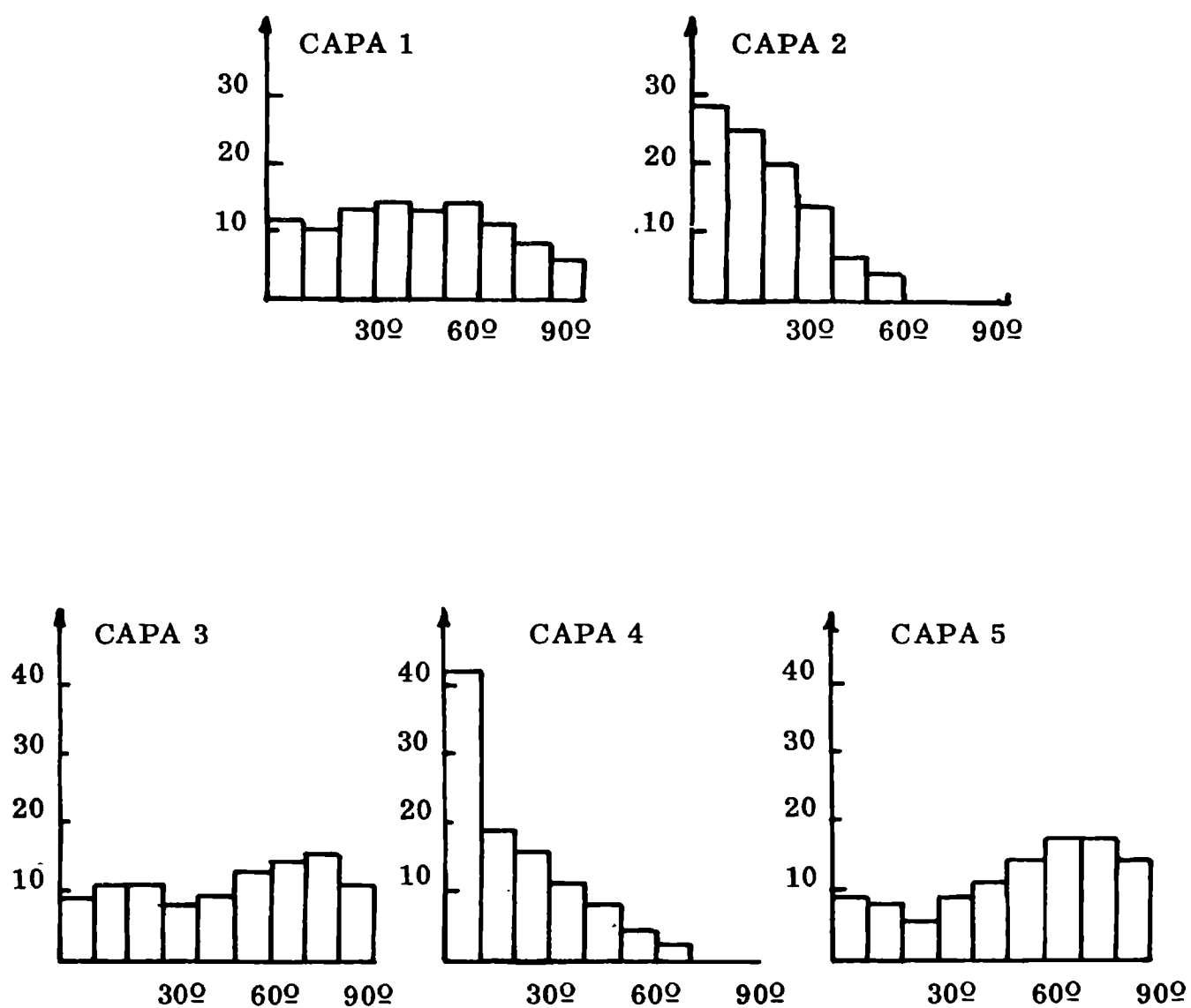


Fig. 1 Histogramas de φ' para las 5 capas de un granizo del lote I

Coincidiendo con List et al., puede observarse que la pronunciada simetría de los cambios opaco-transparente-opaco requeriría, para otros parámetros constantes, una variación periódica de T_a mayor que 10°C , hecho muy poco probable. Resulta más lógico suponer variaciones significativas en el contenido de agua líquida (w), de las corrientes ascendentes, para lo cual no se necesitan grandes desplazamientos verticales y, en consecuencia, cambios sustanciales en la temperatura del aire. Por otra parte, las capas transparentes están formadas por cristales que corresponden a los denominados grandes, y las capas opacas por pequeños. O sea que podemos aceptar que las condiciones son tales, que el tamaño de los cristales no sólo depende de T_a , sino de otros parámetros meteorológicos, en este caso de w . Esta situación se presenta a temperaturas del aire entre -15°C y -18°C para crecimiento seco y de -18°C a -22°C para crecimiento húmedo. Es decir que T_a oscila alrededor de -18°C .

Asimismo, para una temperatura T_a constante, la temperatura T_s depende de w . Es decir, T_s es menor que -2°C para las capas de crecimiento seco que corresponden a los menores contenidos de agua líquida. A medida que w crece, aumenta T_s y se aproxima a 0°C , en cuyo caso se presentan las capas de transición para pasar, en algunos casos, a capas de crecimiento húmedo. Tanto las capas de transición, como las de crecimiento húmedo, son opacas y de cristales pequeños.

En consecuencia podemos concluir que: la temperatura de la zona de crecimiento del granizo en la nube debía ser próxima a -18°C ; que el crecimiento era en general seco; y que las fluctuaciones de la temperatura de superficie eran tales que ésta era más baja en la zona de cristales opacos y aumentaba en las zonas transparentes.

B I B L I O G R A F I A

- AUFDERMAR, A. N. R. & R. LIST & W. C. MAYES & M. R. de QUERVAIN**
 1963: *Kristallachagen in Hagelkörner*; *Z. Angew. Math. Phys.*, **14**, 574-589.
- AUFDERMAR, A. N. & W. C. MAYES**, 1965: *Correlations between hailstone structures and growth conditions*; *Proc. Intern. Conf. Cloud Physics, Tokyo*, 281-285.
- LIST, R.** 1961: *On the growth of hailstones*; *Nubila*, **4**, 29-38.
- LIST, R. & J. CANTIN & M. G. FERLAND**, 1970: *Structural properties of two hailstone samples*; **27**, 1080-1090.

- LEVI, L. & A. N. AUFDERMAR, 1968:** *Orientation of ice crystals grown from accretion of supercooled droplets. Proc. Inter. Symp. Physics of Ice, Munich, New York Plenum Press, 620-630.*
- LEVI, L. & A. N. AUFDERMAR, 1970:** *Cristallographic orientation and crystal size in cylindrical accretions of ice; Jour. Atmos. Sci., 27, 443-452.*
- MACKLIN, W. C. & B. F. RAYAN, 1965:** *The structure of ice grown in bulk supercooled water; Jour. Atm. Sci., 22, 452-459.*
- MACKLIN, W. C. & G. S. PAYNE, 1967:** *A Theoretical investigation of the ice accretion process. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 93, 195-214.*
- PRUPPACHER, H. R., 1967:** *Growth modes of ice crystals in supercooled water and aqueous solutions; J. Glaciology, 6, 651-662.*
-