

BASE CIENTÍFICA

1. INTRODUCCIÓN

La Observación de los fenómenos tormentosos puede realizarse desde el suelo mediante técnicas de teledetección o desde sus proximidades con ayuda de aviones.

La Ciencia necesita observar, clasificar y caracterizar los procesos. Una vez que esto ocurre, la Ciencia aplica el método científico para establecer una respuesta que indique el porqué de los fenómenos ocurridos.

Aquí se exponen algunos de los fundamentos que han permitido establecer los procesos microfísicos que ocurren en la formación de las piedras de granizo y las estrategias que permiten actuar disminuyendo el riesgo de que precipiten al suelo.

Cabe aclarar que los métodos Científicos desarrollados hasta ahora y aplicados a la Lucha Antigranizo, hacen que se logre una disminución del tamaño de las piedras de granizo, reduciendo: la superficie afectada, la energía cinética, la masa y el tamaño de los granizos sobre los cultivos.

1. FORMACIÓN DE GOTITAS NUBOSAS

Cuando el aire húmedo consigue ascender por convección desde el suelo, puede que alcance la saturación. Si esto ocurre, se formará la base de una nube convectiva (ver figura 1)

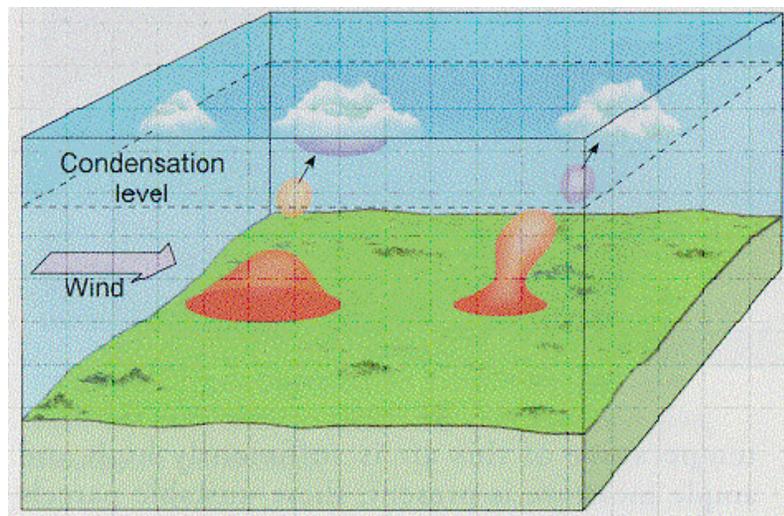


Figura 1. El aire caliente forma burbujas que, cuando se dan las condiciones meteorológicas, se elevan desde el suelo. En su elevación sufren un enfriamiento adiabático de forma que disminuyen su temperatura alrededor de 1°C por cada 100 metros elevados. En estas condiciones puede que alcancen la saturación. Si eso ocurre, entonces se forma una nube convectiva.

Al producirse la condensación, ver un ejemplo en Figura 2, siempre que las condiciones meteorológicas lo permitan, el aire saturado con las gotas formadas a

partir del vapor condensado, sigue subiendo. En este caso la temperatura disminuirá del orden de $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$.

En el caso de Mendoza las bases de las nubes se suelen situar a alturas en las que la temperatura es del orden $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para que la condensación de lugar a gotas, se precisa que el vapor de agua se condense sobre un tipo de aerosoles llamados **núcleos de condensación de nube** (CCN). En la Figura 3 vemos como van incorporando moléculas de vapor a la gota inicial formada sobre un CCN. Las gotas de la nube iniciales suelen tener diámetros del orden de una centésima de milímetro. En la Figura 4 hemos representado los tamaños de las gotas de lluvia

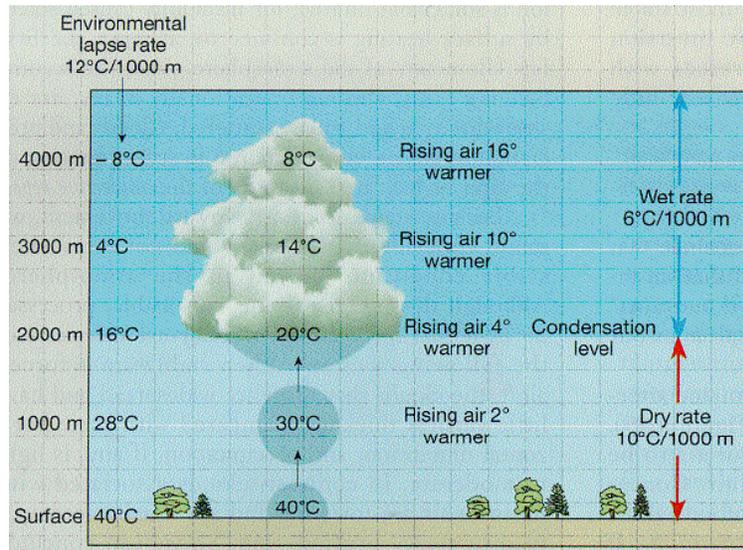


Figura 2. Ejemplo de una ascensión de una parcela de aire en un ambiente inestable y formación de una tormenta

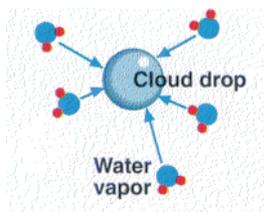


Figura 3. Se ha representado la formación de una gota mediante un CCN y los procesos de crecimiento por condensación de las moléculas de vapor.

Por consiguiente se precisan al menos un millón de estas gotitas para hacer una gota de lluvia de unos dos milímetros de diámetro,

Para centrar el problema de la formación de gotas precipitables podemos hacer algunos números:

- Una gota de lluvia pequeña pesa alrededor de 1 miligramo,
- Un litro del aire que se encuentra en el interior de una nube contiene del orden de 1 a 3 miligramos de agua líquida. Por tanto para formar una gota de lluvia de ese tamaño los mecanismos de formación y crecimiento de las

gotas deben actuar de forma que la gota acapare todo o una buena parte del agua disponible.

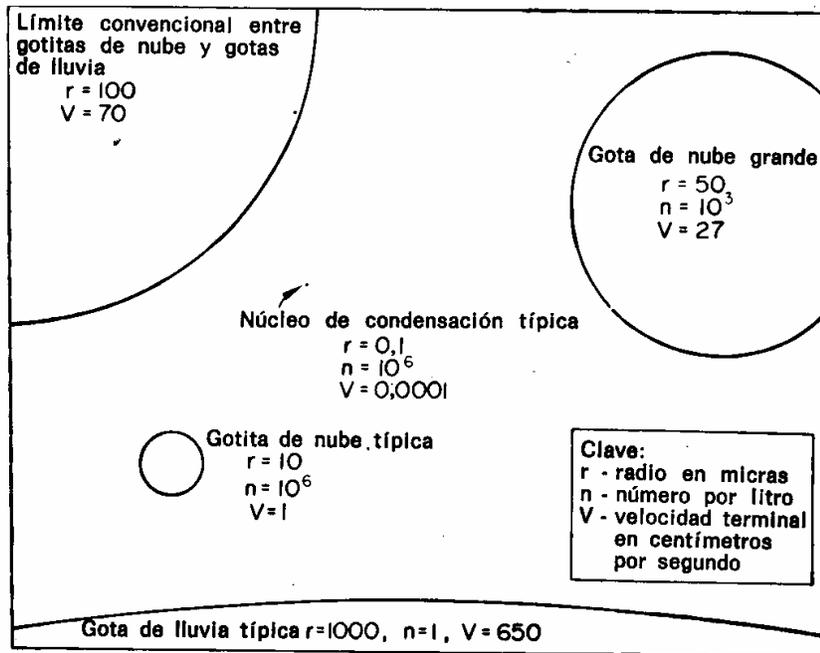


Figura 4. Órdenes de magnitud de las gotas desde su nacimiento hasta que alcanzan tamaños precipitables

¿Como se consigue este proceso de crecimiento? No se conocen bien todos los mecanismos, pero podemos decir que las gotas se mueven en un fluido viscoso. Por tanto, asumiendo que las gotas son esféricas, la velocidad de caída en el interior de la masa nubosa es directamente proporcional a su radio. Según el tamaño que tiene la esfera, la velocidad resulta obedecer a las expresiones que recoge la Tabla 1

Por tanto, las partículas esféricas de mayor tamaño caen a velocidades mayores que las más pequeñas. Si es el caso de una gota que cae en el interior de una masa nubosa en una región en la que solo hay gotas, el proceso será parecido al de la Figura 5.

Tabla 1. Velocidad de caída de las gotas

Velocidad	Rango de tamaño	Unidades	Constante
$U = K_1 r^2$	$r < 40$ micras	cm s^{-1}	$K_1 = 1,19 \cdot 10^6 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$
$U = K_2 r^{1/2}$	$0,6 \text{ mm} < r < 2 \text{ mm}$	cm s^{-1}	$K_2 = 2,01 \cdot 10^3 \text{ cm}^{1/2} \text{ s}^{-1}$
$U = K_3 r$	$40 \text{ micras} < r < 0,6 \text{ mm}$	cm s^{-1}	$K_3 = 8 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$

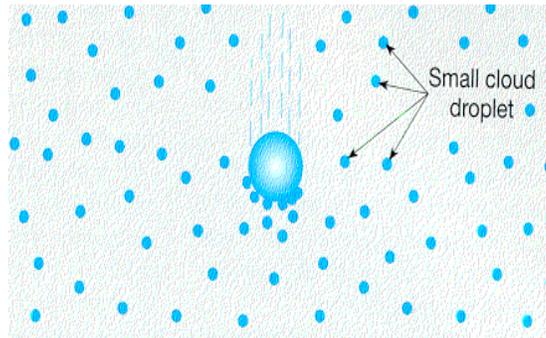


Figura 5. Crecimiento por colisión y coalescencia de una gota nubes que colisiona con otras y las atrapa

2. FORMACIÓN DE CRISTALES DE HIELO

Para que se forme un cristal de hielo se requiere de unos aerosoles llamados **núcleos de congelación** (*Ice Forming Nuclei* o IFN). Básicamente, hay cuatro posibilidades para que se forme un cristal de hielo en la llamada nucleación primaria (ver Figura 6):

1. Deposición heterogénea a partir del vapor
2. Condensación seguida de congelación
3. Nucleación por contacto
4. Nucleación por inmersión

Hay que tener en cuenta que un cristal de hielo se forma cuando la temperatura de la región nubes se encuentra algo por debajo de 0°C. A veces hasta que no llega a temperaturas muy bajas (incluso a veces hasta por debajo de -40°C no se consigue la congelación completa). Es por ello, que las gotas formadas se encuentran a temperaturas por debajo de 0°C en fase líquida. A estas gotas se las llama *gotas sobre enfriadas*.

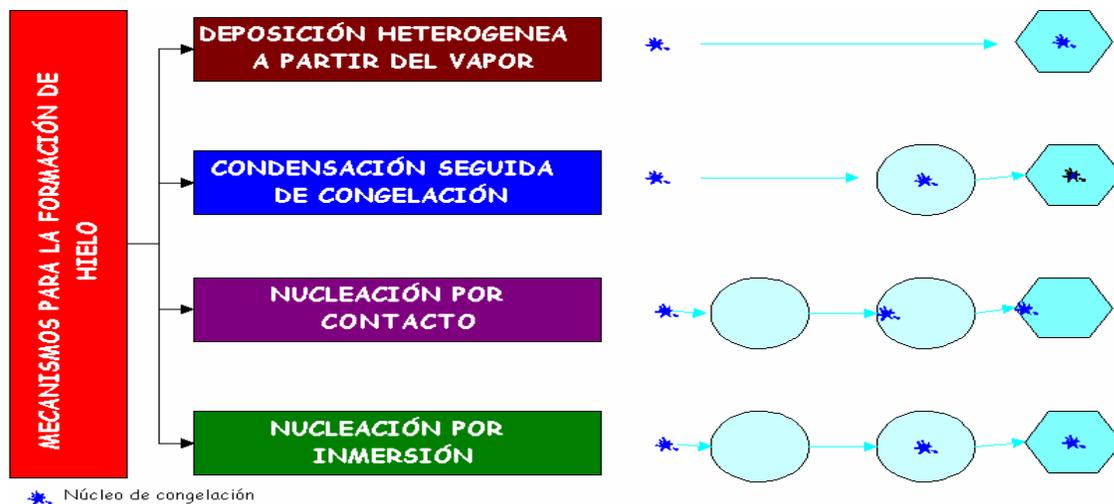


Figura 6. Las cuatro formas de formación de un cristal de hielo. Las gotas se han representado como esferas y los cristales de hielo como hexágonos.

6. PARTÍCULAS DE TAMAÑOS PRECIPITABLES

Hasta ahora hemos visto la formación de las gotitas nubosas y su crecimiento por difusión del vapor. Este mecanismo actúa de forma eficaz hasta que las gotas alcanzan tamaños del orden de algunas decenas de micras de diámetro. A partir de ahí son los mecanismos de colisión-coalescencia los encargados de hacer crecer las gotas.

Para que el proceso de formación y crecimiento de una gota permita alcanzar tamaños precipitables, es posible que tengan que transcurrir no menos de 15 minutos.

¿Como se pueden alcanzar los tamaños precipitables, es decir suficientemente grande como para que tengan alguna posibilidad de llegar al suelo? Tenemos varias posibilidades:

- Algunas gotas encuentran un ambiente más favorable para su crecimiento y alcanzan tamaños mayores. Comienzan a caer y se encuentran con gotitas más pequeñas, las cuales a su vez tienen velocidades de caída inferiores. El resultado es que se van a producir colisiones. A veces las gotas pequeñas se incorporarán a la grande y otras no. Por tanto las gotas más grandes crecerán a través de mecanismos de colisión seguidos de coalescencia. A estos procesos se les denomina colisión-coalescencia.
- Vamos a suponer que se forman cristales de hielo y que más tarde crecen en el interior de la nube. A partir de ese momento puede que:
 - conserven la fase sólida y crezcan en esa fase
 - que en algún momento se produzca la fusión y sigan creciendo en fase líquida

Haciendo algunos números:

- Una gota líquida que logra un diámetro de 1 mm tiene una velocidad de caída del orden 6 m/s. Asumiendo que la gota líquida, por ejemplo, cae 3600 metros, necesitará 10 minutos para recorrer esa distancia. Durante este intervalo de tiempo iría aumentando de tamaño, su velocidad aumentaría y por tanto necesitaría un tiempo menor para recorrer la distancia.
- Una piedra de granizo de 2 centímetro del diámetro tiene una velocidad de caída del orden de 20 m/s. Para recorrer, como en el ejemplo anterior 3600 metros, necesitaría unos 3 min. Como puede ir aumentando de tamaño al incorporar masa a su interior, el tiempo requerido para recorrer la distancia de 3600 metros sería algo menor a 3 minutos. De hecho se sabe que una piedra de granizo que inicialmente tiene un diámetro de 2 cm, en un ambiente nuboso en el que la concentración de agua líquida es de 2.5 g/m³, crece del orden del 10 por ciento por minuto.

¿Como se consiguen estos crecimientos tan rápidos en las piedras de granizo? La razón hay que buscarla en el comportamiento que tienen las gotas sobre enfriadas frente al vapor de agua. En la Figura 7 hemos representado esquemáticamente los procesos que ocurren. Vamos a suponer que tenemos una región nubosa a -10°C. La concentración de gotas sobre enfriadas es mucho mayor que la de cristales de hielo (de hecho la concentración de CCN es varios

órdenes de magnitud a la de IFN). ¿Por qué desaparecen las gotas y crecen los cristales de hielo? La razón hay que encontrarla en el comportamiento del vapor de agua frente al agua líquida y al hielo.

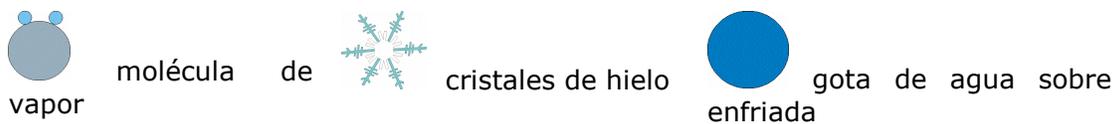
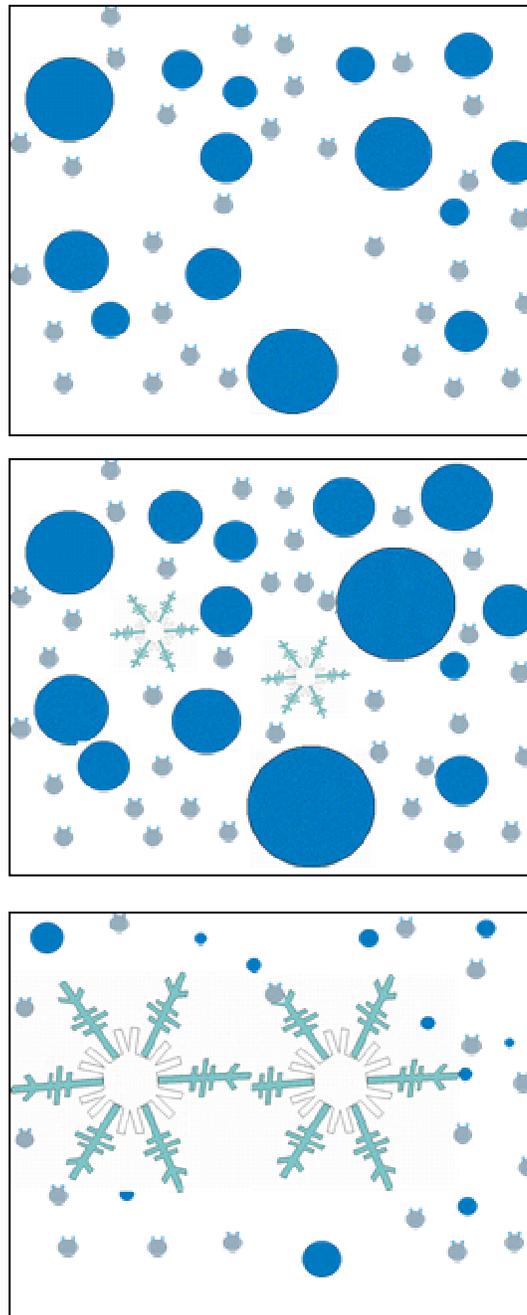


Figura 7. Procesos de crecimiento de las partículas de hielo en un ambiente de agua sobre enfriada.

Antes de que aparezca un cristal de hielo, el vapor y el agua líquida se encuentran de forma que entre los dos hay un equilibrio. Cuando surge un cristal de hielo, este atrae al vapor y este a su vez se deposita sobre él haciendo que crezca. Entonces las gotas de agua se encuentran con que el ambiente es "más seco que antes", es decir las moléculas de vapor se fueron al hielo y dejaron de estar en equilibrio con el agua líquida. Lo podemos decir de otra manera: ya no hay ambiente saturado del vapor frente al agua líquida pero si hay ambiente saturado del vapor frente al hielo. ¿Qué pasa entonces? Que las gotas de agua se evaporan para producir moléculas de vapor. Los cristales de hielo encuentran la manera de crecer a costa del vapor "extra" procedente de las gotas. Este proceso explica que el crecimiento del hielo cuando hay gotas sobre enfriadas siga un ritmo muy fuerte.

7. FORMACIÓN DE GRANIZO EN EL INTERIOR DE TORMENTAS

No podemos olvidar que estamos simplificando en exceso. Hasta ahora no se ha considerado ninguna corriente ascendente. Una tormenta contiene una o varias corrientes ascendentes que puede llegar a tener valores bastante elevados. Estas corrientes pueden ayudar a que queden suspendidas las piedras de granizo. Hay que pensar que las velocidades típicas de una tormenta con granizo suelen oscilar entre 20 y 50 m/s.

Entonces, en estas tormentas nos vamos encontrar con un ambiente en el que tenemos:

- Piedras de granizo suspendidas en el aire gracias a la corriente ascendente que las sostiene
- Gotas de agua líquida sobre enfriada que circulan en las cercanías de las piedras
- Partículas de hielo

En la medida en que las corrientes ascendentes son mayores, serán capaces de sostener piedras de mayores tamaños.

En la Figura 8 hemos representado un muestreo de cristales de hielo, gotas y "graupel" (una especie de granizo blando o de copo de nieve muy pequeño pero bastante compacto). Como vemos hay una serie de ingredientes, que mezclados convenientemente pueden quedar atrapados en la piedra de granizo.

Parece razonable asumir que para que el granizo crezca deben coexistir dos fases:

- Una primera, en la que se forman y desarrollan las gotas hasta alcanzar tamaños del orden de unas 100 micras de diámetro o incluso mayores y, a veces, *graupel*. En esta fase es posible que se formen los embriones de granizo.
- Una segunda, en la que las corrientes ascendentes son suficientemente grandes como sostener partículas de gran tamaño. Por tanto los embriones de granizo pueden crecer hasta convertirse en piedras ya que la corriente ascendente se encarga de soportarlos. En esta misma fase, las piedras de granizo pueden seguir creciendo ya que están rodeadas de los ingredientes necesarios para hacerlo: agua sobre enfriada, partículas de hielo, vapor, etc.

Algunos estudios microfísicos encontrados en el interior de las nubes concluyen que habitualmente la primera fase que lleva a la formación de "los embriones de granizo" tiene lugar en una región de la nube, mientras que el crecimiento de las piedras de granizo ocurre en otra diferente.

¿Tenemos otras evidencias que soportan esta tesis de las dos fases? En la figura 7 podemos observar el corte de una piedra de granizo. Observamos en el centro, un embrión, rodeado, por una serie de capas de crecimiento. El embrión se ha formado en la Fase 1 y las capas de crecimiento se han ido adhiriendo en la Fase 2. Podemos pensar que las distintas capas que aparecen son el resultado del proceso de crecimiento del embrión en el medio ambiente en el que ha crecido, especialmente de la temperatura de la región y de la concentración de agua de líquida sobre enfriada que ha encontrado en su camino.

Es evidente que la piedra de granizo ha ido creciendo en la Fase 2 ¿Cómo lo ha hecho? En general podemos decir que el crecimiento de una piedra de granizo puede ocurrir de dos maneras:

- "Crecimiento seco", en el que la piedra de granizo incorpora agua sobre enfriada, la congela sobre su superficie y libera el calor latente de la congelación
- "Crecimiento húmedo", que se produce cuando no consigue liberarse de todo el calor latente con lo que solo una parte del agua acumulada consigue congelarse.

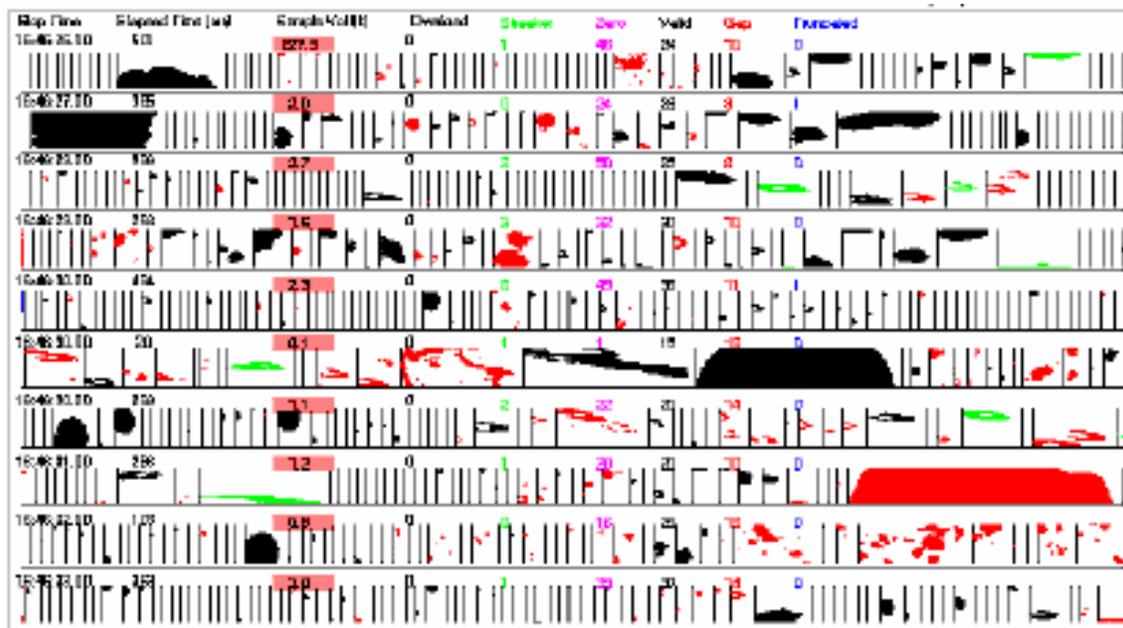


Figura 8. La barra vertical tiene una dimensión de 1,12 mm. Las imágenes de los hidrometeoros figuran en negro. Se han identificado algunos hidrometeoros. El muestreo está efectuado en una región de una tormenta en la que la temperatura era de -5°C.

La visualización de la piedra de granizo (de nuevo ver Figura 9) nos permite obtener información de lo ocurrido:

- Siempre que hay "crecimiento seco" las gotas incorporadas se congelan rápidamente quedando atrapadas las burbujas de aire. El resultado es una capa con apariencia lechosa.

- En el "crecimiento húmedo" el proceso de congelación es más débil y las burbujas de aire tienen tiempo para escapar de la partícula, dejando una capa de hielo transparente.

Vamos a suponer que una piedra de granizo se encuentra recolectando agua sobre enfriada en una región en la que la temperatura es de -20°C . Solo una cuarta parte de este agua puede congelar espontáneamente y quedar adherida a la piedra de granizo. ¿Qué pasa con el agua restante que no ha congelado? Aquella que también siga adherida a la superficie exterior de la piedra de granizo, estará en equilibrio térmico con la que acaba de congelar. Por tanto a una temperatura de 0°C . ¿De donde ha salido la energía para hacer que el agua haya pasado de -20°C a 0°C ? La razón hay que buscarla en que la energía latente liberada al congelar el agua líquida sobre enfriada ha permitido elevar la temperatura del agua líquida que también esta adherida a la superficie de la piedra.

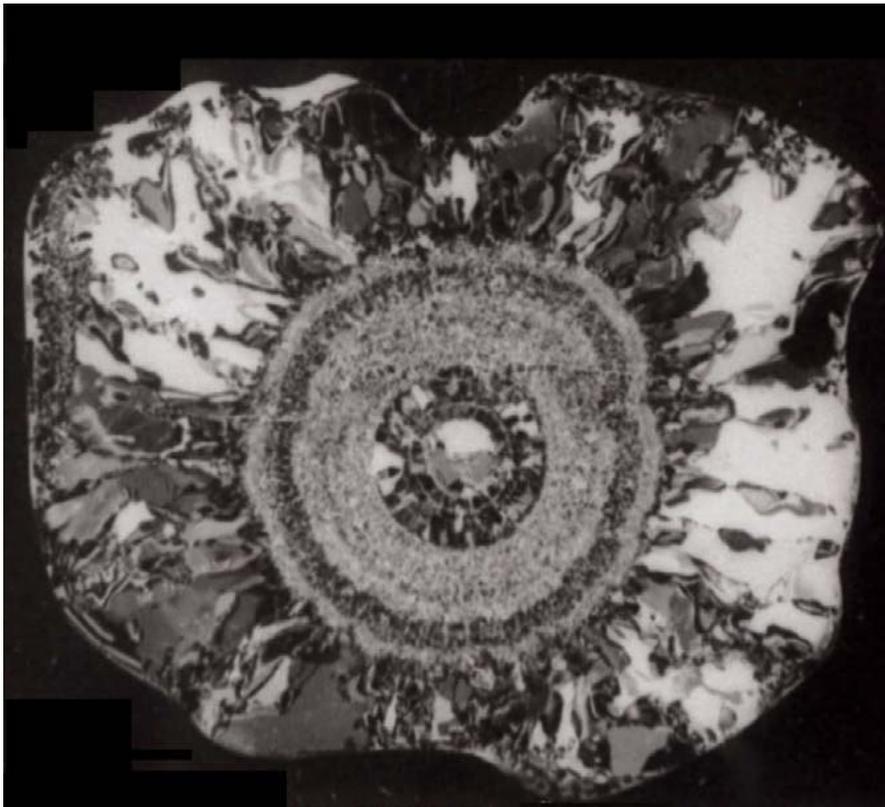


Figura 9. Corte de una piedra de granizo. Vemos en el centro una esfera "lechosa" lo que significa que ha habido un crecimiento seco. Mas tarde entramos en otra zona en la que hay mayor transparencia, señal de que ha habido un crecimiento húmedo.

Una vez que esto ha ocurrido, tenemos dos posibilidades:

- Que el agua forme en la superficie de la piedra un conglomerado con una forma esponjosa.
- Que el agua se desprenda de la superficie reduciendo la tasa de crecimiento de la piedra. Si esto ocurre puede suceder que las pequeñas partículas de agua sobre enfriada se desprendan, se congelen y proporcionen nuevos embriones para el desarrollo de piedras de granizo adicionales.

Además, como la piedra de granizo, presumiblemente, ha alcanzado un tamaño relativamente grande y se encuentra dentro de una corriente ascendente turbulenta, se moverá dando vueltas, con lo que la incorporación a su superficie de nuevas partículas resultará ser menos ordenada que la que tenía cuando su tamaño era más pequeño. Como podemos ver en la Figura 9, las capas más externas de la piedra resultan ser menos homogéneas que las más interiores.

Los análisis efectuados indican que el ritmo de crecimiento de una piedra de granizo suele ser mayor en el estrato comprendido entre -10°C y -25°C . Estos estudios muestran que los embriones de granizo se forman en una región (ver Figura 10) algo alejada de la corriente ascendente más intensa, y una vez que se desplazan a otras zonas en las que las velocidades ascendentes son más elevadas, van aumentando de tamaño.

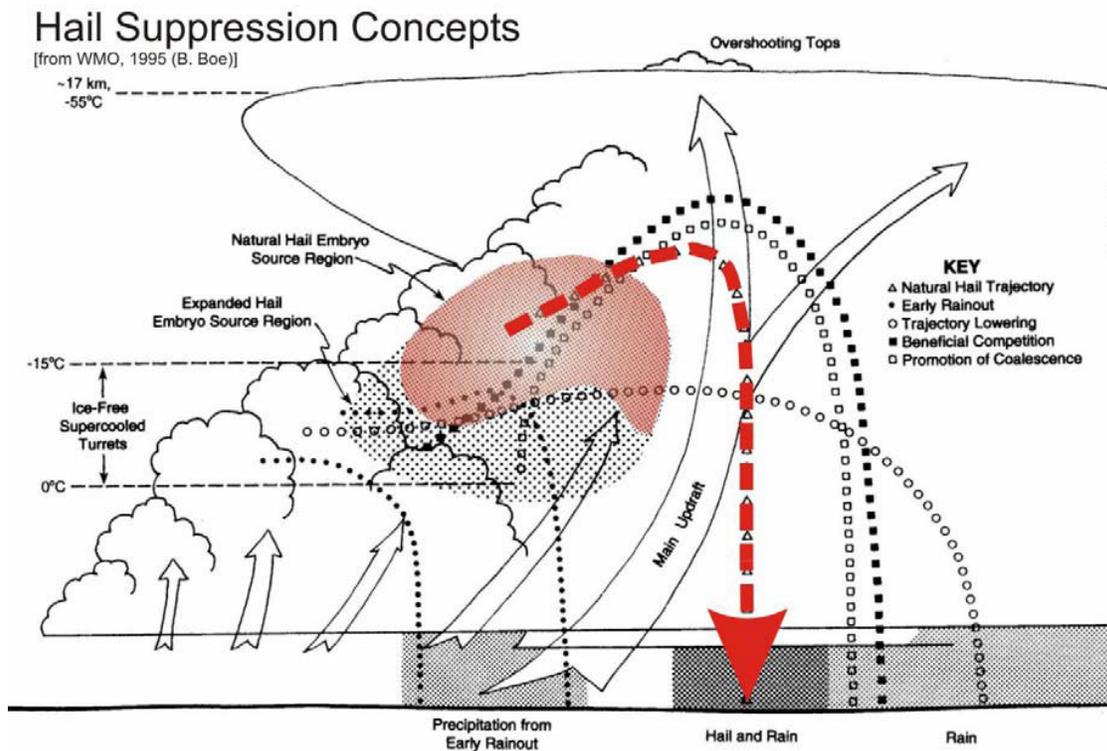


Figura 10. Estructura general de un tipo de tormentas muy habitual, es decir aquel en el que pueden identificarse los nuevos desarrollos (ver explicación en el texto)

8. ESTRUCTURA DE LAS TORMENTAS

Muchas tormentas que dan lugar a caídas de granizo, adquieren la forma que recoge la Figura 10. Vemos en ella un núcleo central (a veces se le llama *célula madre*) con unos torreones (se les suele denominar *células alimentadoras* o también *nuevos desarrollos*) que partiendo de la base de la nube actúan como elementos que proporcionan el "alimento" a la parte principal de la tormenta. Estas regiones suelen aparecer en uno de los flancos posteriores de la tormenta. En la figuras 11 (a) y (b) vemos dos fotografías de una misma tormenta que sigue este modelo.



Figura 11. En la parte (a) se observa la estructura general y en la (b) el nuevo desarrollo y los torreones vigorosos que actúan de alimentación a la tormenta principal

Cuando se vuelan los nuevos desarrollos a alturas de -10°C o -15°C , se encuentra lo siguiente:

1. En las zonas con menores corrientes ascendentes, se observan cristales de hielo con gotas sobre enfriadas
2. Conforme nos introducimos en las regiones más cercanas a la corriente principal, la aparición de *graupel* se hace frecuente, continuando la concentración de gotas sobre enfriadas y de cristales de hielo.
3. Al introducirnos un poco más en el interior de la tormenta y situarnos ya cerca de la corriente ascendente principal, aparecen algunas piedras de granizo. En toda la región siguen apareciendo, además de granizo, gotas sobre enfriadas, cristales de hielo y *graupel*.

Es por esto que, como vemos en la figura 10, en las torres convectivas que se encuentran en los nuevos desarrollos de la tormenta, aparece una región en la que se forman embriones de granizo de forma espontánea. Más tarde son absorbidos por la corriente ascendente principal con lo que se sitúan en una zona rica en los ingredientes que precisan las piedras para crecer. Además como la velocidad vertical de la corriente ascendente puede ser de 40 m/s o incluso más lenta, esta puede llegar a soportar piedras de gran tamaño. Hay una clara correlación entre velocidad vertical de la corriente ascendente y formación de granizo. Más adelante veremos algunos detalles.

Por otro lado, hay un hecho que no puede ser ignorado. Las corrientes ascendentes se encuentran algo inclinadas respecto de la vertical. Esto facilita la entrada de los embriones de granizo de la zona de alimentación hacia la parte principal de la tormenta. Además, puede ocurrir que la precipitación que caiga de forma inclinada (este hecho se observa con cierta facilidad en una buena parte de las tormentas), con lo que tenemos una cierta probabilidad de que una parte de la misma actúa inyectando masa de agua a la corriente ascendente.

9. DETECCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LAS TORMENTAS

Las tormentas están formadas por un bloque central y sus nuevos desarrollos. Al detectarla con el radar adquiere una formación compacta llamada célula. Hay que tener en cuenta que la utilización de radares meteorológicos permite obtener información de las regiones en las que los hidrometeoros que contiene han

adquirido el tamaño suficiente para producir un "eco". La convección y la forma en que se organiza para formar una tormenta admite variantes. Es por ello que podemos clasificar las tormentas acorde a la estructura que presentan en el radar:

1. Unicélula: tormentas formadas por un bloque central, con poco desarrollo vertical y, habitualmente, corta duración y no demasiada reflectividad
2. Multicélulas: tormentas formadas en torno a varios bloques, fácilmente detectables con un radar de buena resolución, ya que dentro del contorno de reflectividad más exterior que define la tormenta, se encuentran pequeños núcleos separados entre sí. Este tipo de tormentas tiene una organización convectiva compleja y son el resultado de mecanismos de convección mucho más intensos que los existentes en las unicélulas. Tienen varias corrientes ascendentes secundarias en las denominadas *zonas alimentadoras*.
3. Supercélulas: son estructuras tormentosas caracterizadas por una fuerte rotación de las corrientes ascendentes (mesociclones). Su formación es fruto de una fuerte convección en la que influye la cizalladura del viento, con lo que se favorece la vorticidad. La duración de una tormenta de este tipo suele ser superior a una hora, su reflectividad se mantiene en niveles elevados. Hay que tener en cuenta que los tornados están asociados a supercélulas pero, afortunadamente, solo una mínima parte de éstas dan lugar a tornados.
4. Sistemas Mesoscalares: aquí la organización convectiva se extiende a un área grande por lo que solamente pueden ser detectadas con satélite. La apariencia es una masa nubosa que se extiende a través de un área de miles kilómetros, con fuertes desarrollos verticales. Es por ello que los criterios para clasificar a una masa nubosa como un sistema convectivo mesoscalar se basan en considerar la extensión que tiene el área. Dentro de esta enorme masa nubosa, pueden surgir todo tipo de células. La precipitación a que dan lugar puede ser convectiva en una zonas y en otras de tipo estratiforme. La aparición de sistemas mesoscalares son sinónimo de precipitaciones intensas en unas zonas y persistentes en otras.

En las Tablas 2 y 3 tenemos algunos parámetros típicos de los tipos más habituales de tormentas en Aragón (España)

Tabla 2. Dimensiones de algunos tipos de tormentas

Tipos	Extensión (km ²)	Volumen(km ³)
unicelulares	150 a 500	1000 a 10.000
multicelulares	500 a 3500	10.000 a 40.000
supercelulares	500 a 3500	10.000 a 60.000

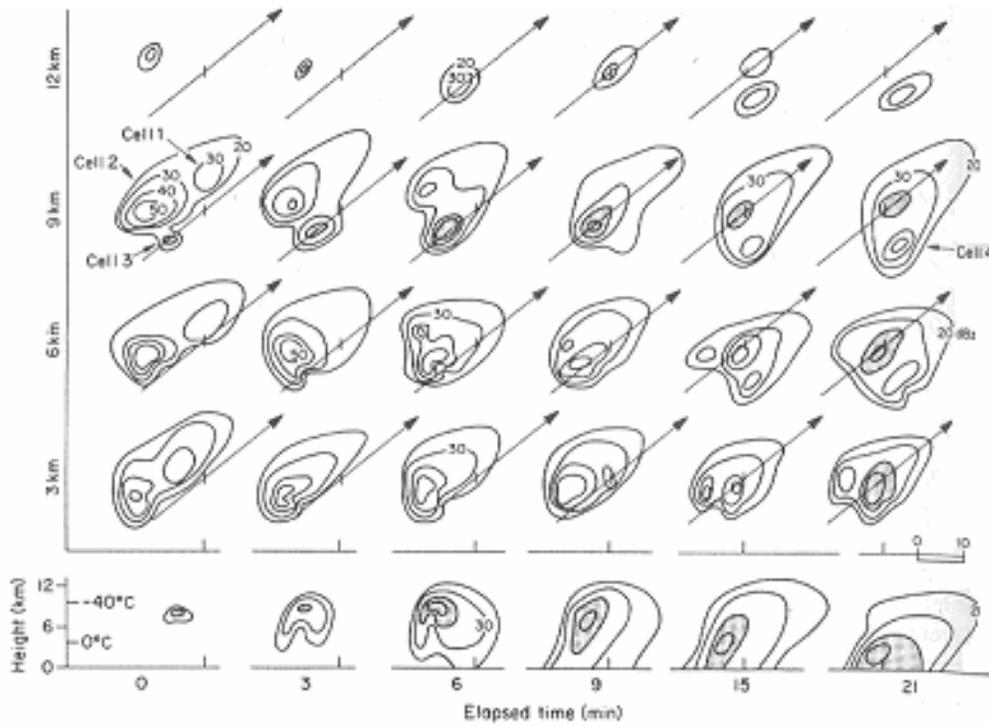


Figura 12. Evolución de una tormenta multicelular.

Tabla 3. Contenido de agua que tienen algunos tipos de tormentas expresadas en toneladas. Según el contenido de agua líquida de las tormentas, se han considerado dos supuestos: 2 g/m^3 y 5 g/m^3

Tipos	Sí $c= 2 \text{ g/m}^3$	Sí $c= 5 \text{ g/m}^3$
unicelulares	$2 \cdot 10^3$ a $2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$ a $5 \cdot 10^4$
multicelulares	$2 \cdot 10^4$ a $8 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$ a $20 \cdot 10^4$
supercelulares	$2 \cdot 10^4$ a $12 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^3$ a $30 \cdot 10^4$

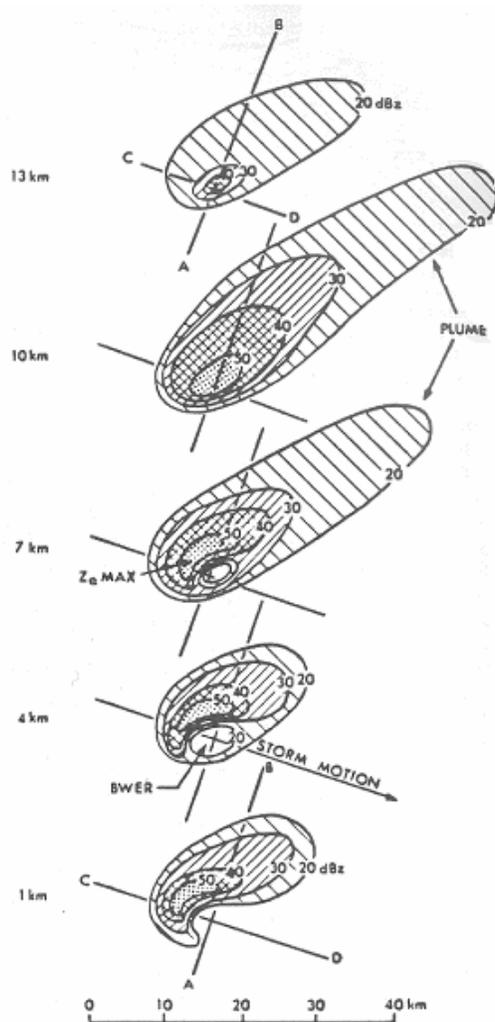


Figura 13. Evolución de una tormenta supercelular.

En la figura 12 podemos ver la evolución de una multicélula. En este tipo de tormentas la vorticidad es mucho menor que en las supercélulas como también lo son las corrientes ascendentes.

En la figura 13 se ha representado la estructura una supercélula, obsérvese que la dirección del movimiento de la tormenta forma un ángulo de unos 45° con el yunque de la tormenta.

10. CORRIENTE ASCENDENTE Y TURBULENCIA DE LAS TORMENTAS

Una de las características de las tormentas, como ya hemos comentado ampliamente en los apartados anteriores, es la presencia de corrientes ascendentes. Los Radars Doppler detectan el campo de velocidades del aire en el interior de las tormentas. Gracias a ellos se ha podido avanzar para comprender la configuración de las corrientes ascendentes y descendentes del aire.

La corriente ascendente está controlada por 4 procesos:

1. Los gradientes de presión a mesoscala

2. El denominado parámetro de flotación debido a las anomalías de la temperatura virtual y al flujo de agua líquida y congelada
3. Régimen turbulento de Reynolds
4. Viscosidad del aire

Hay una relación directa entre contenido de agua líquida que tiene una tormenta (habitualmente esta magnitud se representa por LWC, es decir *Liquid Water Content*) y la velocidad vertical. Esto es debido a que el aire transporta materia prima (es decir LWC) hacia arriba. Cuanto mayor sea la velocidad ascendente, mayor será el LWC desplazado.

En la figura 14 se ha representado un ejemplo que muestra la relación entre LWC, la velocidad vertical (w) y la altitud tomada desde el suelo. En la figura 15 se tiene otro caso. En ambos se puede observar que la velocidad vertical aumenta hasta llegar a unos 6000 metros de altura y luego, de nuevo, comienza a disminuir.

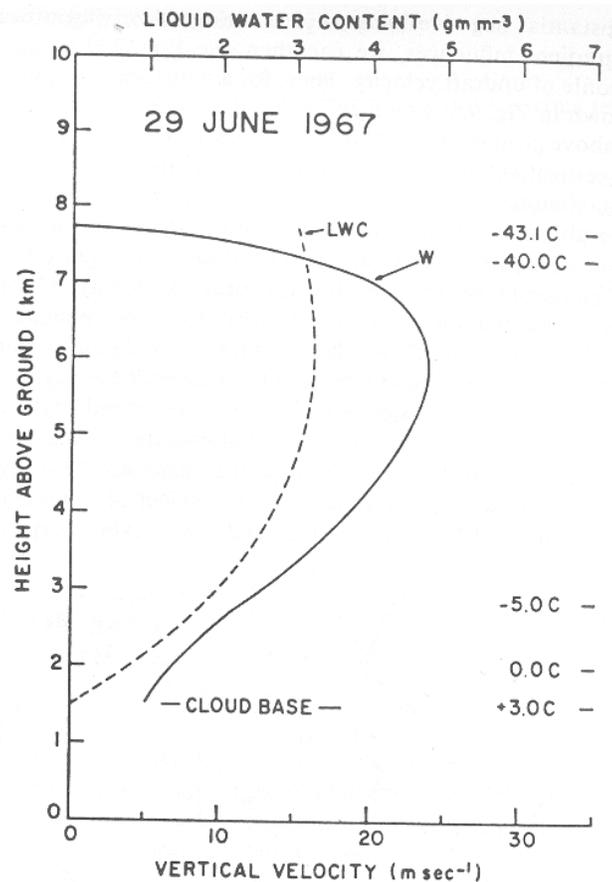


Figura 14. Variaciones del LWC y la velocidad vertical (w) en relación a la altura

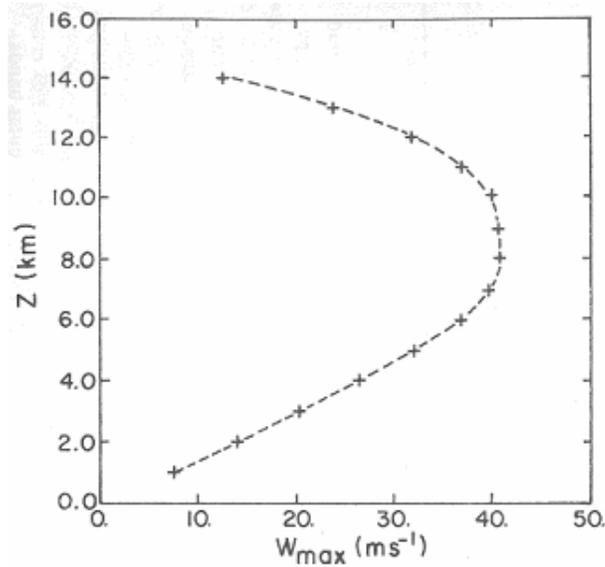


Figura 15. Perfil vertical de la velocidad ascendente máxima en función de la altura, obtenido para una supercélula.

¿Existe una relación entre tamaño de granizo y la corriente ascendente? La respuesta es afirmativa. Algunos autores han señalado que existe una relación entre ambas ligada a una tercera variable: la temperatura a la que se encuentra la velocidad máxima ascendente. En la figura 16 hemos representado la relación entre las 3 variables

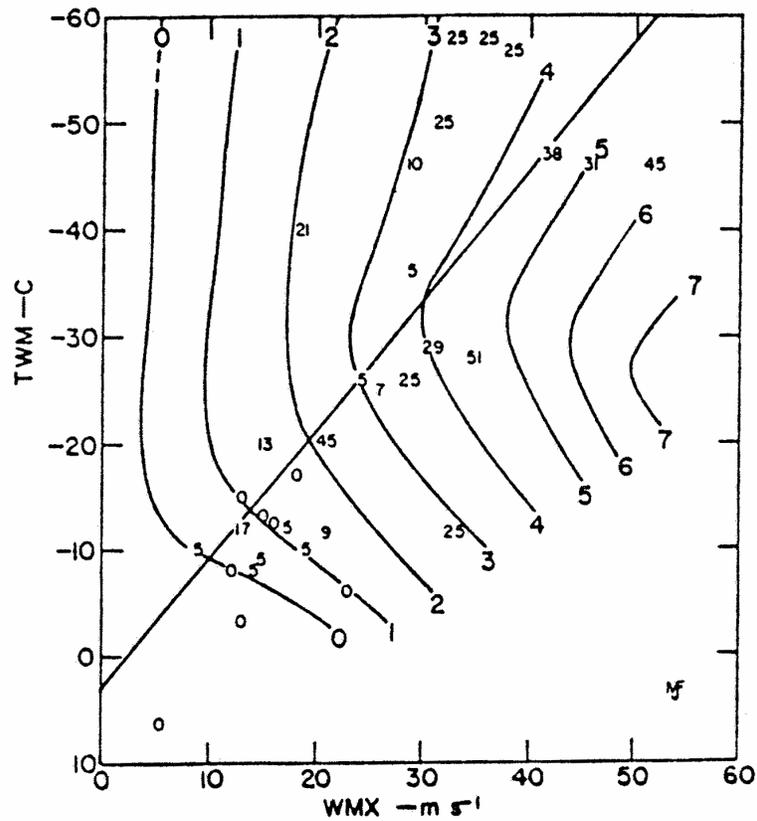


Figura 16. Relación entre la velocidad máxima ascendente (m/s), la temperatura a la que tiene lugar (°C) y el tamaño del granizo máximo formado (cm) representado por isólineas curvadas (0, 1, 2...7)

11. CORRIENTE DESCENDENTE

Al Igual que las corrientes ascendentes, los procesos que gobiernan la corriente descendente son:

1. Los gradientes de presión a mesoscala
2. El denominado parámetro de flotación debido a las anomalías de la temperatura virtual y al flujo de agua líquida y congelada
3. Régimen turbulento de Reynolds
4. Viscosidad del aire

Hay un buen número de casos que demuestran que las corrientes descendentes están asociadas a regiones en las que se producen intensos procesos de precipitación.

Cuando las corrientes descendentes son intensas y llegan al suelo producen una divergencia de aire que favorece la formación de *nubes arco*. Visualmente se puede ver que, en los días de fuerte actividad convectiva, las tormentas más intensas presentan por debajo de su base algunas nubes de escasa entidad.

12. BASES CIENTÍFICAS DE LA LUCHA ANTIGRANIZO

En el 2003, la ASCE (*American Society of Civil Engineers*) editó el **Standard Practice for the Design and Operation of Hail Suppression Projects**. Allí, se muestran con todo detalle las diferentes teorías que pueden ser utilizadas en las actuaciones de lucha antigranizo. En la figura 10 mostramos la estructura de una tormenta multicelular con los nuevos desarrollos. Es claro que tenemos muchas más oportunidades de actuar sobre los mecanismos de formación de granizo cuando lo hacemos en las primeras fases de aparición de las tormentas.

Una de las grandes diferencias entre tormentas multicelulares y supercelulares es que en las primeras los nuevos desarrollos evolucionan para formar el nuevo núcleo principal de la tormenta, mientras que en las segundas, el núcleo principal de la tormenta incorpora los nuevos desarrollos.

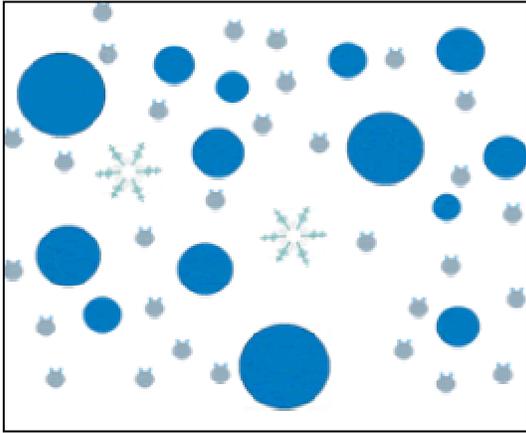
Por tanto, para evitar problemas de seguridad aérea cuando se realice la siembra de nubes, debemos hacer el tratamiento oportuno en las zonas de formación de la tormenta y, preferentemente, en los primeros minutos de formación de la estructura tormentosa.

¿Qué significa siembra de nubes? Incorporación de IFN para que se incremente la concentración de partículas congeladas a costa de disminuir la de agua sobre enfriada en el interior de las regiones de formación. Vamos a comparar lo que ocurría en la figura 17 en el caso de una situación "natural" y en el de una "sembrada".

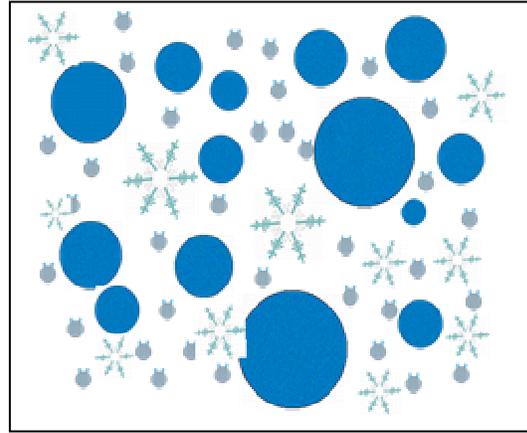


Condición Natural

Condición con Siembra



Existen por metro cuadrado, muchas moléculas de vapor, gotas y muy pocos núcleos de formación de cristales de hielo disponible.



Cuando se siembra con AgI, se aumenta mucho los núcleos de formación de hielo, a Igual número de moléculas de vapor de agua.

Posteriormente los cristales hielo crecen a expensas de las moléculas de vapor de agua y las gotas disponibles:

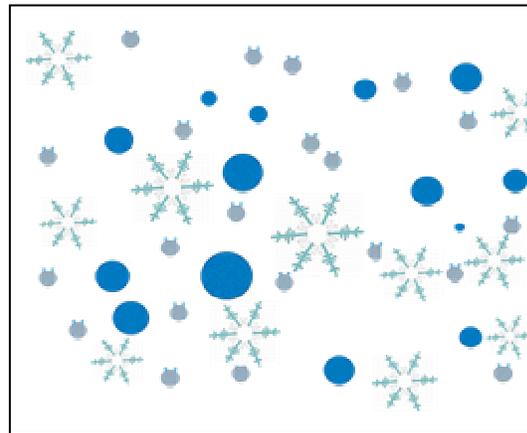
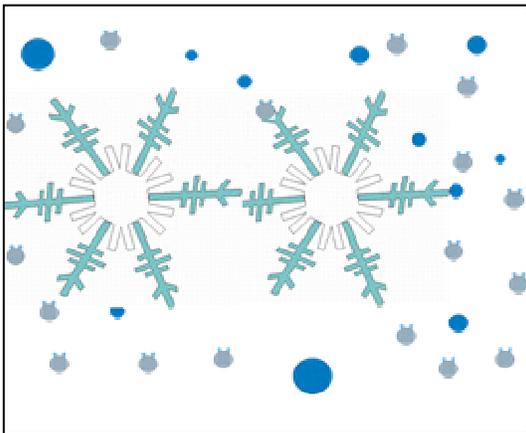
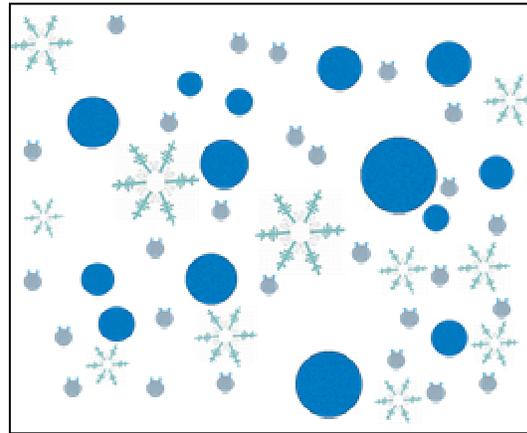
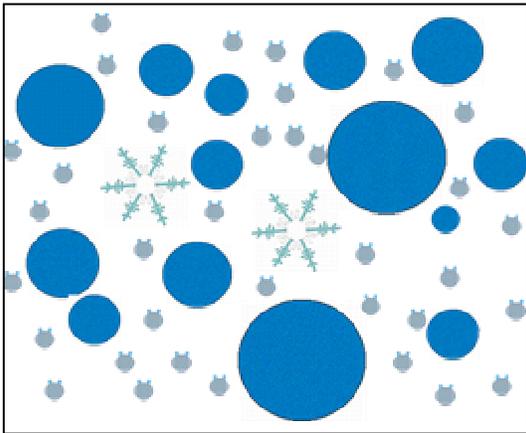


Figura 17. Comparación entre el proceso de crecimiento de las partículas de hielo en un ambiente de agua sobre enfriada cuando hay pocos IFN (izquierda) y cuando, como consecuencia de las actuaciones de siembra, se aumenta la concentración (derecha).

Como vemos en dicha figura, siempre que los IFN alcancen la zona en la que hay regiones de gotas sobre enfriadas, sus efectos son claros:

- Aparición de cristales de hielo en concentraciones más elevadas que en condiciones naturales en regiones en las que la temperatura está algo por debajo de 0°C.
- Disminución del agua sobre enfriada disponible para el crecimiento del granizo
- Al aumentar el número de cristales de hielo, aumentarán los embriones de granizo y además competirán entre sí por crecer a base del agua sobre enfriada con lo que el tamaño final de granizo será más pequeño
- Dado que, las tormentas de granizo suelen producirse cuando las temperaturas son elevadas, al caer ese granizo desde la nube, entrará en contacto con capas cálidas y se irá descongelando, con lo que aumentará la probabilidad de que llegue al suelo en forma de agua líquida

Tabla 4. Características *nucleantes* de diversas sustancias

Substance	Contact freezing	Condensation freezing	Deposition	Immersion freezing
Silver iodide	-3 to -5	-4	-8	-13 to -16
Cupric sulfide	-6	n/a	-13	-16
Lead iodide	-6	-7	-15	n/a
Cadmium iodide	-12	n/a	-21	n/a
Metaldehyde	-3	-2	-10	n/a
1,5-Dihydroxynaphlene	-6	-6	-12	n/a
Phloroglucinol	n/a	-5	-9	n/a
Kaolinite	-5 to -12	-10	-19	-32

Basados en estos supuestos, los principios de lucha antigranizo se basan en el concepto denominado "competencia beneficiosa", es decir aumentar drásticamente la concentración de núcleos de congelación inyectando núcleos de congelación artificiales. El material más popular y conocido para que actúe como núcleos de congelación es el AgI cuya estructura cristalina es muy similar al agua.

En la Tabla 4 podemos observar algunos materiales y su capacidad para producir los diferentes tipos de nucleación.

Cuando se inyectan cantidades de AgI en las corrientes ascendentes de las zonas de crecimiento de las tormentas, aumenta la concentración de cristales de hielo y al volar en la región en donde esto se produce, el aspecto pasa a ser diferente. Se produce una glaciación.

¿Dónde colocar el AgI? Para contestar a esta pregunta debemos de tener en cuenta los siguientes puntos:

1. En las tormentas multicelulares, las zonas de crecimiento pueden detectarse visualmente por que aparecen torres nubosas en su parte más alta. En el Hemisferio Sur, estas zonas se sitúan, habitualmente, en el

flanco izquierdo de la tormenta. Por tanto, en las imágenes de radar correspondientes a este tipo tormentas deberemos distinguir los lugares en donde se encuentran las zonas de crecimiento. Si se alcanzan los criterios para efectuar la siembra, deberemos inyectarlas AgI. ¿Cómo se pueden detectar estas regiones de crecimiento? Habitualmente coinciden con aquellas regiones de las células tormentosas en donde hay un fuerte gradiente de reflectividad. Es muy importante detectarlas correctamente pues debemos recordar que en las multicélulas, los nuevos desarrollos acaban evolucionando y se acaban convirtiendo en la región principal de la tormenta. Por tanto debemos actuar preventivamente colocando AgI en las zonas de crecimiento ya que tenemos más probabilidades de actuar en la competición beneficiosa y disminuir la probabilidad de formación de granizo.

2. Los procesos de formación de granizo en las supercélulas son más complejos. En estas tormentas hay una fuerte corriente ascendente y otras secundarias y las regiones de crecimiento son incorporadas por la parte principal de la tormenta. ¿Qué ocurrirá si inyectamos AgI en esa corriente ascendente? La respuesta no puede ser contundente pero parece razonable pensar que la corriente las va a lanzar hasta zonas más frías y altas de la tormenta, rodeadas de las piedras de granizo ya formadas. El resultado es que colocando AgI en esas zonas los cristales de hielo formados acabarán, en gran proporción, en el yunque de la tormenta. Es decir no habrán actuado generando embriones de granizo en la región más conveniente para frenar la formación de las piedras de granizo.
3. En el caso de las tormentas unicelulares, la corriente ascendente tiene valores moderados y están mal definidas las corrientes secundarias (o simplemente no aparecen). En estos casos el AgI debe ser colocado en la zona de la corriente ascendente. Con ello se favorece que la nucleación y la formación de embriones sea consistente con la competición beneficiosa.

13. NIDOS DE FORMACIÓN DE TORMENTAS

Las zonas en las que se aparecen con mayor frecuencia las tormentas se suelen denominar "nidos de formación", expresando con ello aquellas regiones en las que los mecanismos de disparo de las tormentas actúan con mayor eficiencia. En el caso de Mendoza se dispone de excelentes bases de datos que han permitido determinar algunas zonas que podemos calificar como nidos de formación de tormentas. En muchos casos se encuentran cercanas a la precordillera o a otros accidentes orográficos.

En la figura 18 podemos observar los nidos de formación y su posición respecto de los Oasis de Mendoza. Además se han representado las direcciones habituales que suelen llevar las tormentas una vez formadas.

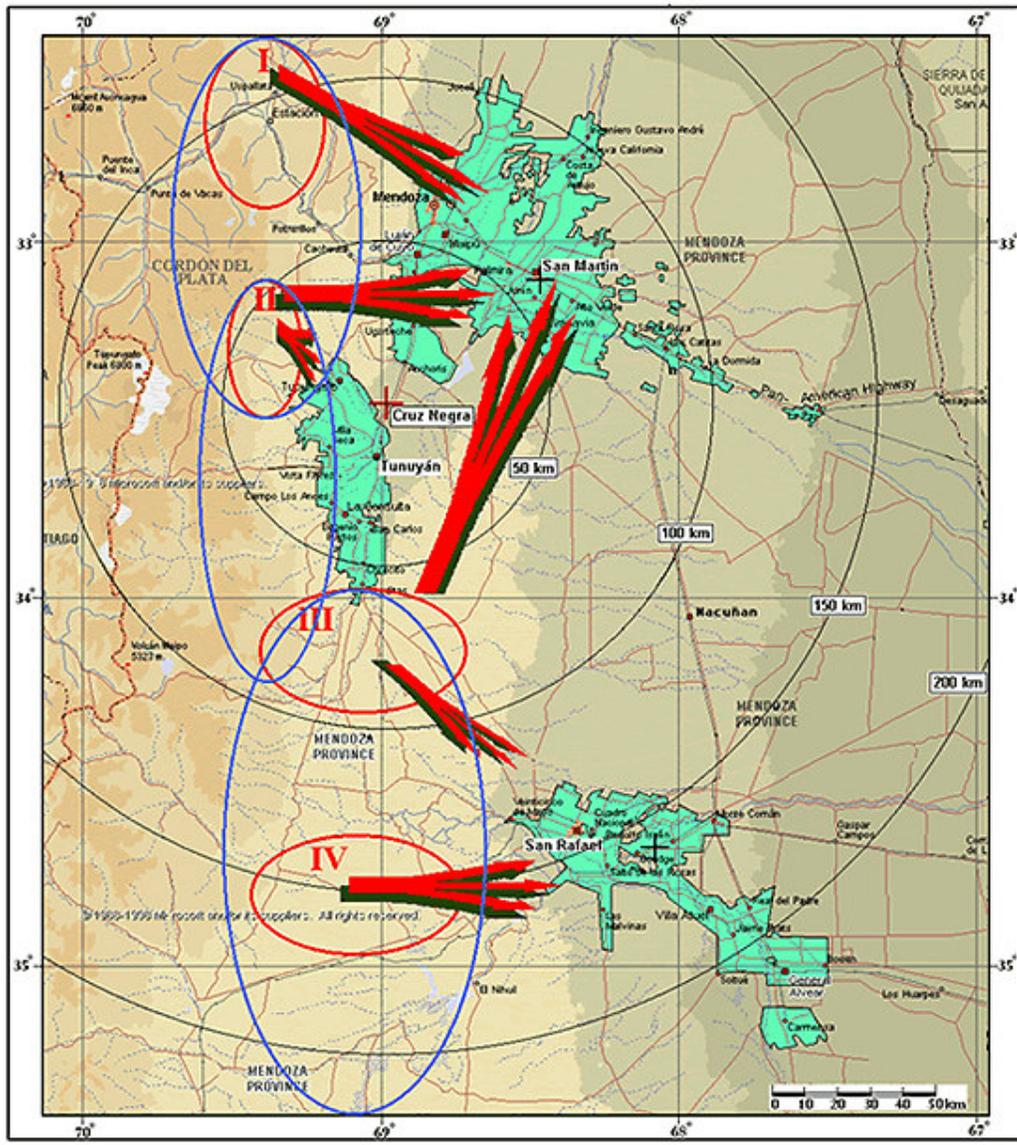
Las elipses en rojo representan las 4 zonas calificadas como **nidos de formación**.

14. ESTRATEGIAS DE SIEMBRA

Como pudimos concluir en el apartado anterior, cada tormenta tiene sus características y debe de tenerse en cuenta todo ello para decidir la estrategia de siembra.

En Mendoza tenemos dos tipos de siembra:

- En la base de nubes, mediante la combustión de las bengalas que tiene adosadas en las alas del avión. Este proceso da lugar a la sublimación de AgI. Esta técnica se va usar, especialmente, en las primeras fases de aparición de la convección, en los nidos de formación y por tanto se trata de una siembra muy preventiva. El avión hace recorridos largos a través de la zona de convección.



Trabajo realizado por el Dr. Viktor Makitov

Figura 18. Las elipses en rojo nos indican los 4 nidos de formación de tormentas. Las elipses coloreadas en azul nos indican las zonas en las que deberían ser sembradas desde los primeros instantes de aparición de ecos en las pantallas de radar.

- De inyección directa, en la que se utilizan cartuchos que contiene una mezcla de AgI y que se lanzan hacia abajo desde las regiones en las que la temperatura es del orden -10°C . En esas condiciones el material se dispersa primero hacia abajo y luego hacia arriba gracias a la acción de las corrientes descendentes. En esta técnica se intenta que el material de siembra quede colocado solamente en las zonas de crecimiento formando embriones de granizo. Hay que procurar evitar colocarlo en la corriente principal pues, al ser más intensa, lo acabaría desplazando hacia el yunque de la nube y por tanto no actuaría consistentemente con las hipótesis de competición embrionaria. Esta técnica de siembra se va a utilizar cuando las células demuestren vigor convectivo y se acerquen a zonas cercanas a los Oasis a proteger (o dentro de ellos).

¿Qué tipo de siembra debe emplearse y en qué condiciones? Vamos a distinguir dos casos:

CASO A: La convección acaba de iniciarse en los nidos de formación de tormentas o en zonas alejadas de los Oasis que representen un potencial de riesgo para que acaben desplazándose a los mismos.

La estrategia de siembra debe considerar los siguientes pasos

1. Detectar actividad convectiva con ayuda del radar de la Banda C ya que al poco tiempo será detectada por los radares de la Banda S.
2. Dada la amplia experiencia de los operadores de radares en Mendoza, cuando se observen los primeros ecos en los nidos de formación de de granizo (ver figura 18) se debe dar orden de despegue a los aviones encargados de hacer la siembra en base de la nube. Por tanto se debe actuar de forma preventiva.
3. Si la reflectividad detectada por el radar aumenta hasta niveles¹ de 35 dBZ (radar banda C) o 42 (radar banda S) el avión debe situarse en las proximidades de la tormenta.
4. El operador de radar debe determinar las zonas de crecimiento de la tormenta. Para ello debe mirar con detalle la pantalla de radar de la Banda C y alternativamente la S. Anteriormente se ha comentado que suelen encontrarse en el flanco izquierdo y trasero de la tormenta que es en donde suelen aparecer los mayores gradientes de reflectividad.
5. Si una vez en esas zonas, el avión de siembra de base de nubes detecta ascensiones verticales superiores o iguales a 500 pies por minuto, debe activar el encendido de una bengala y sembrar siguiendo trayectorias de tipo bucle (ver figura 19). Las operaciones de siembra deben hacerse de forma que el avión siga sembrando en la base de la nube a lo largo del movimiento de la tormenta (se suelen desplazar a velocidades del orden de 30 – 40 km/h).

¹ Estos valores están sometidos a cambios durante el desarrollo de las Campañas pues no se conoce con buena exactitud los niveles críticos de reflectividad a partir de los cuales comienza a haber probabilidad de que una tormenta de lugar a precipitaciones de granizo

6. La siembra se debe prolongar mientras que siga apareciendo convección (nuevos ecos en los radares) en las zonas de generación de tormentas y se cumplan las siguientes condiciones:
 - Velocidades ascendentes superiores a 500 pies/min.
 - Reflectividades superiores a 35 dBZ (radar banda C) o 42 (radar banda S).
 - Alturas máximas del contorno de 10 dBZ no inferiores a 8000 metros (ésta condición se incluye para garantizar que la precipitación que esté ocurriendo sea de tipo convectivo).
7. Un aspecto que debe de tenerse en cuenta es que, muchas veces, el piloto va a tener dificultades para observar visualmente la tormenta. Es por ello que el Asistente de Vuelo debe guiarle de forma ordenada siguiendo un protocolo establecido (ver Anexo 1)

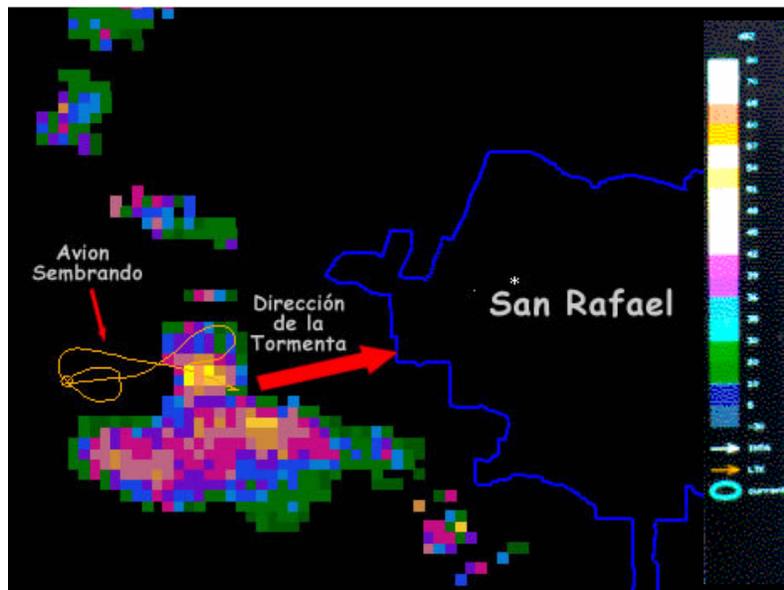


Figura 19: Trayectoria seguida por un avión en la zona de crecimiento de una tormenta.

8. Puede darse el caso que se ha representado en la figura 20: aparición de tormentas formando agrupaciones. Allí se ha representado la trayectoria que deben seguir los aviones de siembra de nubes. Como se puede observar, las tormentas son multicelulares y se han sembrado las zonas de crecimiento (en todos los casos situadas en el flanco izquierdo posterior de las tormentas). Una vez que el avión detecte las zonas de corrientes ascendentes, puede efectuar los bucles de siembra guiándose por la propia información adquirida en el vuelo. Lo que debe primarse es que la siembra afecte a un territorio en el que una o varias tormentas crezcan y que, por tanto, todas deben sembrarse preventivamente².

² Cuando aparece una tormenta en las pantallas del radar y se ordena a un avión ir a patrullarla, puede que al llegar se hayan formado, además de ella, otras en las cercanías. Como es difícil cual o cuales de ellas van a a volucionar hasta alcanzar intensidades elevadas, conviene sembrar toda la zona en la que se desarrolla la convección. De esta manera se coloca Agl en la región haciendo que las corrientes ascensionales vayan incorporando el material de siembra hacia el interior de las tormentas. Por tanto es importante sembrar toda la zona y para eso se utilizarán las bengalas. El trabajo de dispersar los núcleos de congelación queda en manos de las tormentas.

9. Es posible que la siembra en este CASO A se prolongue durante más de 2 horas. En este caso el avión de siembra de base de nubes llevará volando un tiempo algo inferior (quizás una hora y media). Dependiendo de las condiciones de los aeropuertos de origen (o alternativos)³, su tiempo de vuelo puede prolongarse alrededor de 1 hora más a lo sumo. Pasado este tiempo, el avión deberá volver al aeropuerto a cargar combustible, de forma que, en el caso de que la actividad tormentosa se prolongara más tiempo, el operador de radar debe saber que habrá un intervalo de 1 hora y media en la que ese avión no estará operativo.
10. En el supuesto caso de que la base de la nube se encuentre baja y que el área tenga problemas de seguridad, el avión puede subir unos centenares de metros hacia arriba, pero siempre intentado sembrar a lo largo de la zona con ascendencia y de crecimiento.
11. Otro aspecto interesante es que no existe ningún inconveniente para que, cuando por dificultades operacionales no haya otra manera, se proceda a sembrar en zonas de aire limpio (sin nubes) siempre que haya ascendencia y se sitúan muy próximas a la tormenta. No es el caso ideal pero puede hacerse en los casos en los que la seguridad así lo aconseje.

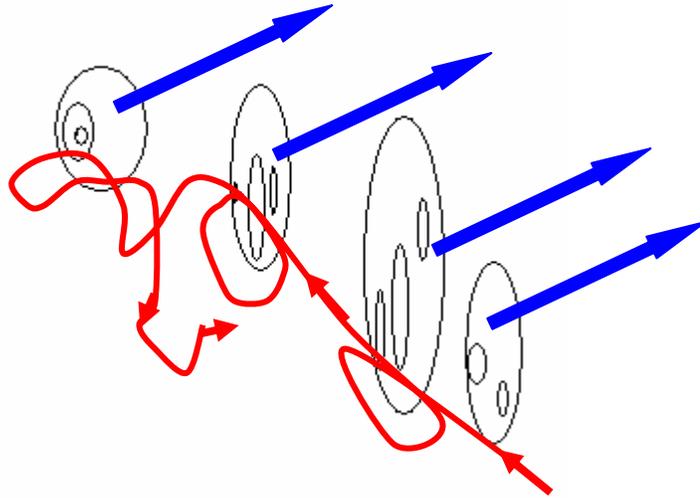


Figura 20: Trayectoria seguida por el avión (color rojo) en una zona en la que se han formado cuatro células cuyo movimiento sigue la flecha azul.

CASO B: la actividad tormentosa se incrementa en duración e intensidad y se acercan a los Oasis o se desarrollan sobre ellos.

La estrategia en este caso debe ser la siguiente:

1. En el caso de que las tormentas se acerquen al área, las operaciones de siembra de nubes por inyección directa toman el testigo a las de siembra en base.
2. Hay que intentar detectar visualmente las torres nubosas situadas en la parte alta de las zonas de nuevo crecimiento. De nuevo la labor del

³ Ver Manual de Operaciones del Escuadrón L.A.G, especialmente lo relativo al MOSCA

operador de radar es fundamental. En la figura 21 podemos observar un caso claro de este tipo de tormentas.

3. La siembra debe comenzar siempre que se den las siguientes condiciones:
 - Reflectividades de 40 dBZ (banda C) o 48 dBZ (banda S)
 - Corrientes ascendentes superiores a 1000 pies por minuto en las torres de crecimiento a la altura de -10°C
 - La tasa de siembra debe ajustarse según la velocidad del avión pero para el caso de la Pipper Navajo será de un cartucho de 20 g cada 5 segundos.
 - Las operaciones de siembra deben hacerse realizando bucles en la zonas de crecimiento, continuando hasta que:
 - se detecte la glaciación de la tormenta
 - la reflectividad máxima baje hasta situarse en valores inferiores a 40 dBZ (banda C) o 48 dBZ (banda S)
 - abandone la zona de protección
 - se alcancen los criterios de suspensión de la operación por razones de seguridad aérea.
4. Es muy probable que la siembra en esas zonas se acelere la precipitación restando materia prima (agua) a la parte principal de la tormenta.
5. El consumo de AgI es alto en este tipo de tormentas por lo que esta siembra debe restringirse a aquellos casos en que la intensidad de la tormenta aconseje su tratamiento y se sitúe en los Oasis o en sus proximidades.



Figura 21. Se puede observar un *cumulonimbus* y las torres situadas en la zona de nuevo crecimiento. La flecha indica el área en el que debe arrojarse los cartuchos de AgI

15.LIMITACIONES A LOS VUELOS

Los vuelos se van a realizar en condiciones meteorológicas adversas. Es evidente que hay que seguir los Reglamentaciones de Aviación y atenerse a ellos. No obstante los vuelos de siembra de nubes tienen algunas características especiales que los distinguen de los demás. Los pilotos deben estar preparados para volar en IFR si bien, la aproximación a las tormentas objeto de siembra deberían de ser en VFR, cuando sea posible, al objeto de detectar mejor los nuevos desarrollos y tener referencias geográficas. Esto es mucho más complicado en las actuaciones que se vayan a llevar a cabo en condiciones nocturnas.

Todos los vuelos deben hacerse **en las mejores condiciones de seguridad**, evitando riesgos que vayan más allá de lo razonable. Es por ello que los pilotos de las aeronaves de siembra cuando estén en operación deben tener en cuenta que:

1. Las imágenes del radar de la Banda C se actualizarán cada minuto y medio o dos a lo sumo para poder determinar las condiciones de evolución de la tormenta
2. Las aeronaves de propulsión a pistón, conforme a sus características, serán utilizadas, exclusivamente, en las tareas de Sembrado de Base de Nubes.
3. Cuando la reflectividad de la Nube Convectiva objeto de siembra, supere los **50 dbz en la banda C o 55 en la banda S**, desde el Centro de Operaciones se dará la orden de suspensión de operaciones de siembra.
4. La cercanía de la precordillera y cordillera andina aconseja que las Operaciones de Sembrado de Base de Nubes estarán restringidas a partir de 40 millas del VOR Mendoza al Oeste entre los radiales Rº 200 y Rº 360 que parten de este vértice. En las operaciones nocturnas se extenderá hasta el radial Rº190.
5. Así mismo deben de figurar en las pantallas del Radar de San Rafael y del de la Banda C la posición de los montes denominados **Diamante y Nevado**. Los vuelos en sus cercanías seguirán el Reglamento Aéreo.
6. No conviene efectuar operaciones de siembra cuando la velocidad vertical supere los **3000 pies por minuto**⁴. Si al hacer la entrada en los nuevos desarrollos, se detectan corrientes ascendentes de ese orden, la tripulación debe buscar otras menos intensas. Si no aparecen, deben abandonar la operación de siembra y quedar a la espera de que la corriente ascendente disminuya, bien por la evolución de la propia tormenta o por encontrar nuevos desarrollos con menor convección.

Además de los puntos anteriores, se debe consultar el Manual de Procedimiento de la Lucha Antigranizo del Escuadrón de la IV Brigada

16.SISTEMAS DE OBSERVACIÓN

Los radares meteorológicos emiten radiación electromagnética con una potencia conocida y a una frecuencia dada (en el rango de las microondas). La radiación es concentrada en un haz de 1 o 2 grados y emitida por la antena. La radiación se emite a pulsos de forma que durante un intervalo de tiempo emite y

⁴ Es probable que la tripulación no haya colocado su avión en los nuevos desarrollos. También puede ser que la tormenta esté evolucionando adquiriendo un carácter supercelular.

durante otro es capaz de recibir. Esto es lo que se llama PRF o frecuencia de repetición de pulsos.

Si la potencia emitida es P_0 y la recibida de un eco es P_1 , el radar nos dará una medida expresada en dB

$$P \text{ (dB)} = 10 \log_{10} (P_1/P_0)$$

A partir de la magnitud P lo que hay que hacer es intentar establecer los procesos de precipitación que ocurren en el interior de las tormentas. Para ello la ecuación del radar tiene en cuenta muchos aspectos relativos a la propagación de las ondas, sus características, el tipo e intensidad de la precipitación, las características de la emisión y del radar...etc. Mediante esta ecuación se obtiene el valor de Z (reflectividad)⁵ cuya medida se expresa en dBZ y que es una magnitud relacionada con la intensidad de los procesos de precipitación

En este Proyecto se van a emplear dos tipos de radares: de la Banda C ($\lambda = 5.5 \text{ cm}$) y banda S ($\lambda = 10 \text{ cm}$).

¿Por qué de dos tipos? En general se puede afirmar que:

- Los radares de la Banda C permiten detectar con más precisión que los de la Banda S todas las regiones de las tormentas que contienen hidrometeoros de tamaños precipitables
- Los radares de la Banda S tienen mayor potencia que los de la Banda C
- Los radares de la Banda S tienen menor atenuación que los de la Banda C con lo que, en aquellas situaciones en las que haya una convección generalizada, resultan más fiables.

Por tanto la utilización de dos radares permite mejorar la observación.

⁵ C. G. Collier tiene un texto denominado Applications of Weather Radar Systems editado por John Wiley & Sons en 1989 que describe los conceptos implicados con claridad y precisión. No obstante el significado físico de esta magnitud es que es igual la suma de la sexta potencia del diámetro de las gotas de agua esféricas asumiendo una serie de aproximaciones relativas a la propagación de las ondas electromagnéticas

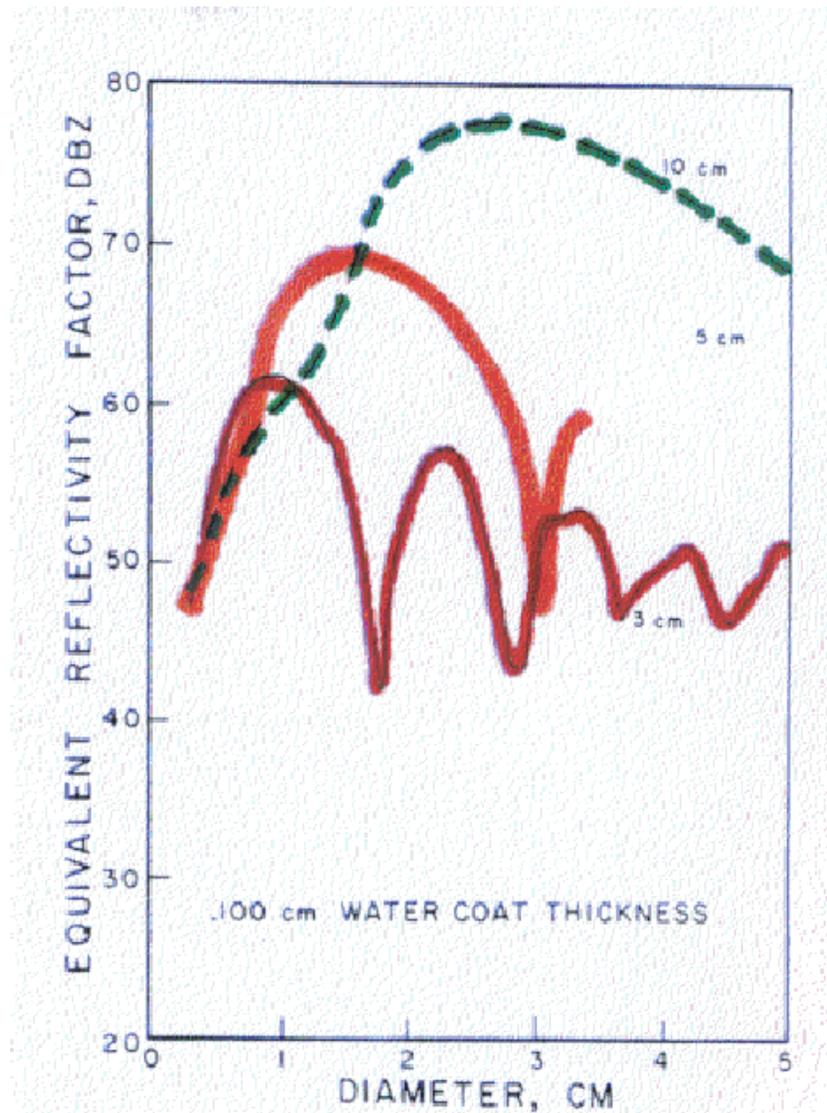


Figura 22: Reflectividad equivalente del radar para una distribución monodispersa de granizo en concentraciones del orden de 1 g/m³ estando la piedra de hielo recubierta de una espesor de agua 0.1 cm, asumiendo que además es esférica

En la Figura 22 se han representado la reflectividad obtenida por radares de banda X, C y S para supuestos diferentes de tamaño de granizo. Obsérvese que cuando los radares de la Banda C (como el que será utilizado en Mendoza) iluminan una tormenta con granizo, dependiendo del tamaño de las piedras, el eco producido da lugar a una reflectividad inferior cuando las piedras de granizo tienen tamaños grandes que cuando son pequeñas. Por ejemplo, cuando la distribución es monodispersa con piedras de 3 cm de diámetro la reflectividad producida en un radar de la Banda C se situaría en valores cercanos a los 45 o 50 dBZ, mientras que para otra situación en las que las piedras fueran de 1,5 cm de diámetro, sería superior a los 65 dBZ.

Si esas dos distribuciones son iluminadas con un radar de la Banda S, las reflectividades se situarían en unos 75 dBZ para las piedras de 3 cm de diámetro y de 65 dBZ para la de 1,5 cm.

Esto que acabamos de ver ¿es un aspecto teórico o coincide con la realidad? Para contestar a esta pregunta hay que partir del hecho de que no es cierto que en el interior de las tormentas haya piedras de un solo tamaño. Los tamaños de las piedras se distribuyen en torno a un valor de acuerdo a una distribución gamma. Sin embargo tenemos que ser conscientes de que las tormentas iluminadas con la señal emitida por un radar de la Banda C van a poderse ver con cierto detalle y habitualmente, las zonas de alimentación. En términos comparativos podemos decir que se podrán detectar mejor que con los radares de la banda S. Pero, cuando la tormenta sea muy severa y tenga mucho granizo y de gran tamaño, la discrepancia entre un radar de un tipo y de otro va ser considerable. Esta inconsistencia es fruto de la propagación de las ondas electromagnéticas a través de esferas congeladas (piedras de granizo).

17. ESTRATEGIAS DE OBSERVACIÓN MEDIANTE RADARES

El radar de la banda C estará situado en la Cruz Negra mientras que los dos de la Banda S se situarán en San Martín y La Llave.

Cada radar estará calibrado mediante los procedimientos establecidos y los resultados del mismo estarán incorporados al sistema RDAS. Los ángulos de elevación de los radares de la banda S serán los que figuran en la Tabla 5

No hay un Standard de calibración establecido para los radares meteorológicos. Es por ello que cuando un mismo blanco es observado por dos radares, la reflectividad a que da lugar suele ser algo diferente. Discrepancias de más +/- 1 dBZ son habituales. Sin embargo deben vigilarse diferencias que vayan más allá. En estos casos deben revisarse las calibraciones. Alternativamente pueden utilizarse esferas metálicas suspendidas en el aire y observar el eco al que dan lugar. Los resultados pueden aportar información útil a los técnicos encargados de mantener la calibración de los radares en orden.

Tabla 5. Niveles y ángulos de elevación de los radares de la banda S

Nivel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ángulo	0,4	1,5	2,5	4	5,5	7	8,5	10,2	12,2	14,2
Nivel	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Ángulo	17,2	20,3	23,9	27,8	32,2	37	41,9			

En las 3 sedes, los operadores de radar deberán estar las 24 horas conectados a Internet para analizar las imágenes de GOES y poder determinar la aparición de tormentas en el área o en sus proximidades. Si se detecta convektividad y formaciones nubosas, cada radar accionará el encendido, verificando que la corriente que les llega a diodos (o cristales) se encuentra en el rango adecuado. Las imágenes de los radares de la Banda S entrarán en red e irán a la web correspondiente. Cualquier actividad tormentosa lo comunicará a los otros 2 radares y al Centro de Operaciones.

18. PRONÓSTICO Y CONDICIONES METEOROLÓGICAS

En la red se encuentra numerosa información meteorológica que permite establecer un diagnóstico de las condiciones meteorológicas a escala sinóptica. Sin embargo los procesos de formación de tormenta están condicionados, además de

la distribución vertical de las capas estables e inestables, por los mecanismos de disparo, estando estos muy relacionados con la orografía del territorio. Sin embargo detectar cuando y donde se va a *disparar la convección* no es sencillo.

Del párrafo anterior podemos concluir que para poder efectuar un pronóstico de tormentas en el área debemos tener en cuenta:

1. Se precisa conocer el análisis y el pronóstico para las 12, 24 y 36 horas de las condiciones a escala sinóptica en los niveles estándar.
2. Las imágenes de satélite nos permiten cruzar la información anterior con el estado actual y así poder establecer concordancias o discrepancias entre la circulación atmosférica y los mapas que dan cuenta de la situación sinóptica.
3. Los radiosondeos aportan información a mesoscala que permiten establecer las condiciones meteorológicas y, entre otras variables, el cálculo de los índices de estabilidad.
4. Es difícil determinar la representatividad de los radiosondeos, pero parece razonable asumir que, salvo que haya un cambio de masa de aire, lo pueden ser al menos para 6 horas después de haberlos efectuado y para un territorio de unos 150 o 200 km de radio en torno al lugar donde fueron realizados.
5. Los mecanismos de disparo que tienen origen mecánico (la mayor parte de los casos originados por la orografía del territorio) suelen disparar la convección en los mismos lugares⁶.

Un buen pronosticador meteorológico es aquel que por experiencia, clasifica las situaciones y establece, con la información meteorológica, su diagnóstico meteorológico y las previsiones para las próximas horas. Sin embargo, la información de que dispone es escasa y por tanto es arriesgado seguir el pronóstico de formación de tormentas⁷. Es por ello que el análisis del pronosticador debe dar origen a 3 estados (ver tabla 6). El de menor riesgo se corresponde con el nivel 1 y el de máximo 3.

Tabla 6. Niveles de riesgo y explicación de los mismos

Nivel	Situación meteorológica	Nivel
1	No existen condiciones significativas de convección severa generalizada en las próximas horas pero no es descartable que se desencadenen algunos mecanismos de disparo a escala local	1
2.	La circulación es ciclónica y existen condiciones de inestabilidad.	2.
3	La convección se está desarrollando, detectados los mecanismos de formación de tormenta y los de disparo	3

Con el Nivel 1 los operadores de radar deberán estar permanentemente analizando las imágenes de satélite y realizando observaciones visuales desde su centro. En el caso de los pilotos y en cada una de las Bases (San Rafael y

⁶ Esta es la razón por la que surgen los nidos de formación.

⁷ Todo pronóstico y aún más el que tiene por objeto establecer la posible aparición de tormentas y precipitaciones de granizo está sometida a falsas alarmas y a situaciones de aparición súbita de convectividad no pronosticadas.

Mendoza) una tripulación debe situarse a pie de pista dispuesta a comenzar las operaciones de vuelo, si fuera requerida para ello, en un tiempo inferior a 15 minutos. Una segunda tripulación debe estar en situación de *stand by* de forma que se incorpore en un tiempo inferior a 1 hora. La tercera tripulación deberá estar preparada para incorporarse a las operaciones de vuelo antes de 3 horas.

Las operaciones de vuelo y siembra precisan que las tripulaciones tengan a su disposición información meteorológica. Al menos una vez al día, el pronosticador emitirá un informe meteorológico que pondrá disposición de la totalidad del personal involucrado en el Proyecto de Mendoza de Lucha Antigranizo.⁸