

POSIBILIDAD DE LA LLUVIA ARTIFICIAL

Por PEDRO DURÁN FARELL, Alumno de la Escuela de Caminos.

Continúa con el presente artículo el trabajo que venimos presentando a nuestros lectores, llegándose en él a exponer el procedimiento de producir la lluvia artificial y dando cuenta de las tentativas y ensayos que sobre ello se han llevado a cabo.

III

OBTENCIÓN DE LA LLUVIA ARTIFICIAL APROVECHANDO SITUACIONES METEOROLÓGICAS FAVORABLES DE CARÁCTER GENERAL

Caracteres típicos de un régimen general de bajas presiones.

En las figuras 12 y 14 del primer artículo se resumen las distintas fases del desarrollo de una depresión. Para un observador fijo, la aproximación y el paso del ciclón extratropical se denota por las fluctuaciones de la presión y de la temperatura que se indican en la figura 48. Las nubes en la depresión aparecen en el siguiente orden: Cirrus, altostratos y nimbostratos, en el frente caliente; es decir, nubes todas ellas estratiformes. En el frente frío se tienen, por el contrario, nubes de desarrollo vertical, altocúmulos y cúmulonimbos. A un observador medianamente expe-

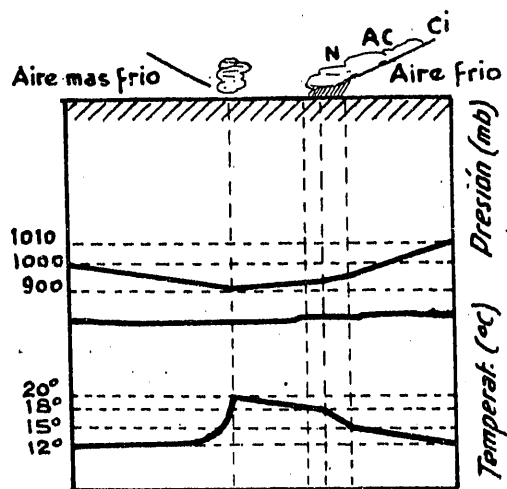


Figura 48.

bostratos, en el frente caliente; es decir, nubes todas ellas estratiformes. En el frente frío se tienen, por el contrario, nubes de desarrollo vertical, altocúmulos y cúmulonimbos. A un observador medianamente expe-

rimimentado le resulta fácil reconocer el paso de los frentes y las distintas fases de la evolución del fenómeno.

El frente frío se revela por una barrera de tormentas o turbonadas, quedando tiempo frío y soplan vientos más o menos fuertes del cuarto cuadrante, en general.

Suponemos conocidas las características de las nubes que hemos indicado. Al menos, en los términos generales indispensables para su reconocimiento. Pero dada la importancia fundamental de los altostratos en el problema de la lluvia artificial que nos ocupa, describiremos con algún detalle los caracteres más notables de estos últimos.

Los altostratos son nubes que, en la clasificación internacional, se los considera de nivel medio. Su altura oscila, según las estaciones, entre los 2 000 y 6 000 m. No están constituidas por cristales de hielo, que son el elemento característico de los cirrus. Por esta razón no dan el halo típico. Pero situados a alturas, en general, por encima de la isoterma de solidificación, están formados por gotas de agua en sub-fusión, lo que constituye su propiedad fundamental desde nuestro punto de vista.

Aparecen como de estructura fibrosa, formando bandas estriadas. El Sol y la Luna se ven a su través como en un cristal esmerilado. A veces es difícil distinguirlos de los nimbostratos, debido a que éstos se presentan también estratificados. Pero los altostratos no ocultan nunca completamente el Sol y la Luna, y son más uniformes que las nubes inferiores. Además, se distinguen de las formas cirrosas estratificadas, en que los objetos, con el cielo cubierto de altostratos, no arrojan sombra.

Un tipo de nubes determinado, si aparece sólo en la atmósfera, no revela situaciones meteorológicas generales. Aun en el caso de grandes tormentas de calor, la formación nubosa que las integra se reduce, en realidad, a un solo tipo: los cúmulus. Pero los estados depresionarios generales se presentan con un conjunto de nubes dispuestas siempre de la misma manera en el espacio y en el tiempo. Constituyen verdaderos sistemas nubosos cuya ordenación revela su proceso de formación y, en definitiva, ayuda decisivamente a la resolución del problema de su ori-

gen y de la interpretación de las distintas fases de su desarrollo.

Refiriéndonos solamente a los *altostratus*, puede decirse que no constituyen por sí solos una nube de lluvia. Sus precipitaciones raras veces alcanzan el suelo. Pero constituyen una fase importante del "efecto cirrus". Son realmente nubes precursoras de lluvia cuando se presentan con una ordenación determinada respecto de otras nubes. Si después de la aparición de formaciones cirrosas que van espesándose progresivamente, se presentan los *altostratus*; existe un 80 por 100 de probabilidades de que dentro de las seis u ocho horas siguientes se producirán lloviznas o lluvias. Por lo que vamos a tratar en este artículo, puede conseguirse que la probabilidad alcance el 100 por 100 y que siempre se produzcan lluvias.

Los *altostratus* y su papel fundamental en la producción de la lluvia artificial.

Arenberg, D., publicó en 1939, en el *Bull. Am. Meteorolog. Soc.*, un estudio de la penetración en un medio determinado de gotas de varios tamaños lanzadas a distintas velocidades. Cuando una gota es arrastrada por un remolino y penetra en una masa de aire de distinta calidad, por efecto del impulso que recibe del torbellino, la pérdida de energía cinética debe ser igual al trabajo desarrollado en vencer los rozamientos y la viscosidad en el nuevo medio ambiente. Sobre esta base, Arenberg ha calculado que una gota de 10^{-4} cm. de radio, con una velocidad inicial de 10 m./seg., tendrá una penetración de 0,12 milímetros, suponiendo condiciones medias. Y una partícula de 10^{-3} cm. alcanzará 12 mm., etc. De esta manera, las gotas de distintos tamaños no se detienen a un tiempo y se producen frecuentes choques entre sí.

Estas observaciones de Arenberg parecen quedar confirmadas por los recientes estudios de Houghton y Radford, que, sirviéndose de una técnica especial de microfotografía, han demostrado que las gotas existentes en las nieblas y en las nubes forman una sucesión continua de tamaños (fig. 49). Esto demuestra que existe, efectivamente, el choque entre gotas de distintos tamaños, como se deduce de las consideraciones teóricas de Arenberg, en oposición a las ideas clásicas de Köhler, que, por sus investigaciones, parecía demostrar que el crecimiento de las gotas se hacía por choque de gotas del mismo tamaño, de tal modo que los volúmenes observados estarían en las relaciones de 2, 4, 8, 16, etc.

Para desmentir los resultados obtenidos por Köhler, las observaciones de Houghton y Radford tienen un gran valor porque se realizaron sobre nieblas normales, sin la coexistencia de partículas de hielo y gotas subfundidas. Por ello no cabe pensar en el cre-

cimiento continuo de gotas con núcleo inicial de hielo a expensas de las gotas subfundidas.

Como vimos e indicamos en el primer artículo, existen unas causas que introducen un régimen turbulento en las corrientes del contraaliso que discurre sobre la inmensa solera que denominamos tropopausa.

En estas zonas de turbulencia es donde las gotas en subfusión chocan entre sí, con arreglo a las consideraciones de Arenberg. En el choque se produce la rotura de la subfusión y aparecen los cristales de hielo que integran las nubes que se han formado: los cirrus. En nuestro primer artículo indicábamos que, cuando la abolladura de la tropopausa es debida a la presencia en la troposfera de masas de aire de distinta clase, la aparición del cirrus tiene lugar en una zona normal al "frente" o contacto de dichas masas. La realidad confirma este hecho.

La teoría de Bjerknes supone que la formación del frente nuboso es debida, como se sabe, a que el aire del sector caliente monta sobre el frío. Indicamos ya en el primer artículo las objeciones más importantes que ponemos a la interpretación del fenómeno, según Bjerknes. Hoy se reconoce por gran número de meteorólogos que, por lo menos los cirrus, no pueden tener el origen indicado por la teoría noruega. Y se cree que su formación es debida a la elevación en masa del aire superior por empuje mecánico de la cuña del aire frío (fig. 50).

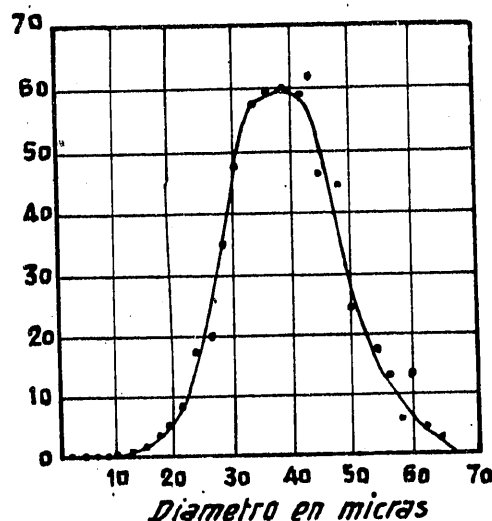


Figura 49.

Sin embargo, oponemos a este criterio la realidad observada de que los cirrus son efectivamente nubes de hielo, y los *altostratus*, nubes de gotas en subfusión, y lo mismo que aquéllos, están situados por encima de la isoterma de solidificación. Además, los ci-

rrus se producirían en un estado de menor turbulencia que los *altostratus*, los cuales se consideran formados por efecto directo del contacto de las masas de aire que determina el frente de la depresión. Y es sabido que la turbulencia facilita la rotura de la subfusión.

Existe una numerosísima bibliografía relativa al estudio del problema de la condensación y precipitación. El conocimiento exacto de estos fenómenos nos conduciría, en definitiva, a la resolución efectiva de los problemas de la meteorología moderna. La diversidad de teorías es grandísima. Se ha pretendido recientemente atribuir una importancia fundamental al papel de los núcleos de condensación y sublimación. Según ideas actuales, el paso de vapor a sólido (*cirrus*) tendría lugar sobre núcleos especiales isomorfos con el hielo, siendo su tamaño del orden de la cienmilésima de milímetro, y por tanto, es posible que abunden en la alta atmósfera. Sin embargo, si realmente esto es así, no se comprende por qué existen dichos núcleos en la zona de los *cirrus* y no en la de los *altostratus*.

Nosotros creemos que no hacen falta tales núcleos, y los choques de gotitas en subfusión con arreglo a las consideraciones de Arenberg, dan las partículas de hielo sobre las cuales se opera el mecanismo del efecto *cirrus*, que ya describimos en líneas generales. Como los choques se producen entre gotas de todos los tamaños, se obtendrán igualmente núcleos de hielo de todos los tipos que hagan falta para una sublimación óptima.

Ya se sabe que 1 gr. de agua en subfusión a -1°C. , origina $\frac{1}{80}$ gr. de hielo. En la figura 51 damos unas curvas obtenidas por Junge, C. ("Übersättigungsmessungen an atmosphärischen Kondensationskernen"), que dan el tamaño del núcleo de condensación en relación con el tanto por ciento de supersaturación que toleran. Cuanto más pequeños son los núcleos, tanto mayor es la supersaturación que requiere para que se produzca la condensación.

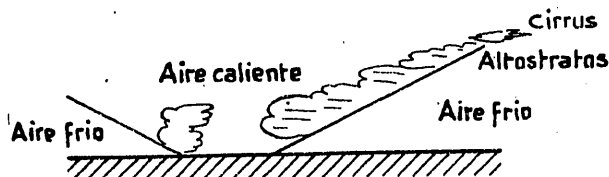


Figura 50.

Se nos puede argumentar que es posible que falten en la alta atmósfera las gotas en subfusión, y en este caso no tendríamos la posibilidad de la for-

mación de núcleos de hielo. Aparte de que, por efecto del contraaliso, existe por encima de la troposfera local una canalización de agua en dicho estado, la alimentación de la alta atmósfera de gotas de subfusión se realiza por el siguiente mecanismo: en la baja atmósfera tiene lugar diariamente la formación de nubes y, por consiguiente, las agrupaciones de gotas líquidas. Gran parte de ellas se reevaporan al disiparse la nube. Pero como la evaporación va acompañada de enfriamiento del medio ambiente, se en-

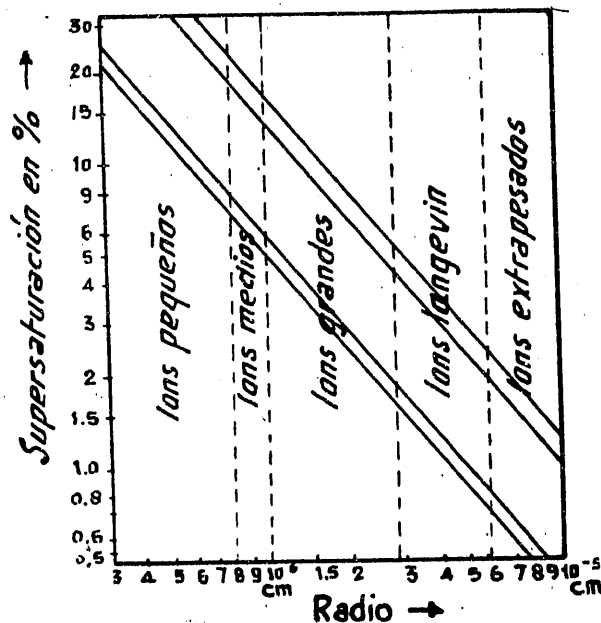


Figura 51.

cuentran las gotas que no se disiparon en el primer momento, ante un ambiente más frío y se elevan según la adiabática que corresponde a su temperatura, arrastradas por el aire circundante inmediato a ellas. Esto es posible a causa de la gran capacidad calorífica del agua. La gota en cuestión, absorbente de la radiación infrarroja en mayor medida que el aire ambiente, va elevándose a regiones cada vez más frías hasta alcanzar el estado de subfusión. Su ascenso es, en realidad, la integral de las ascensiones infinitesimales a que su poder calorífico la somete sucesivamente.

Resulta, por lo tanto, que en nuestra opinión los *cirrus* se forman por choque entre partículas en subfusión en el límite superior de la troposfera; los cristales de hielo quedan "engarzados" en esta capa límite, formando los velos cirrosos característicos, es decir, nubes esencialmente planas y sin sombras.

Las nubes de hielo o *cirrus* tienen una tendencia característica a dar precipitaciones. La lluvia de hielo produce los siguientes fenómenos (fig. 52):

1.º Sea A un cristal de hielo que se ha formado en un punto a -20°C . En el momento inicial se encuentra a 0°C . En el descenso se va enfriando hasta llegar a B , en que alcanza la temperatura ambiente. Si en lugar de considerar un solo cristal consideramos una lluvia de hielo desde la isoterma de A , podemos suponer que la curva temperatura-altura (1) se desplaza hasta la (3), media entre la del ambiente (1) y la ley (2) de descenso de las partículas de hielo.

2.º Desde el punto B hacia abajo, el cristal de

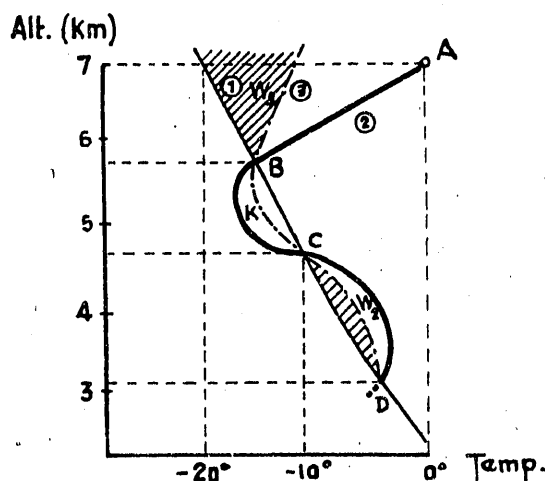


Figura 52.

hielo sometido a una intensa ventilación se va enfriando según la ley que se indica en la figura. Pero, siendo más frío que el aire ambiente, puede actuar como núcleo de condensación o sublimación, incluso independientemente de la existencia o falta de supersaturación. Al desprenderse el calor de cambio de estado, se produce un calentamiento de la partícula en descenso hasta alcanzar sucesivamente los puntos C y D , en que desaparece por evaporación. Todos estos fenómenos tienen lugar por encima de la isoterma de solidificación, y como indicamos en el primer artículo, la ascensión de las zonas rayadas, según las adiabáticas correspondientes, da origen a los *altostratus*.

Veamos ahora un hecho fundamental: los *altostratus* se encuentran a una temperatura media de unos -13°C . Es aproximadamente a la altura correspondiente al punto C de la figura 52. A esta temperatura la tensión del vapor de agua puede alcanzar 2,13 m. b., que es mayor que los 2 m. b. que requiere la saturación sobre el hielo y menor que los 2,25 m. b. que exige la saturación sobre el agua. De este modo se produce evaporación de las gotas de

agua y condensación sobre los cristales de hielo. El gradiente de paso del agua desde las gotas subfundidas a los cristales de hielo es máxima a -13°C .

Aparte de gotas subfundidas totalmente líquidas tenemos, pues, gotas subfundidas con núcleo de hielo. Éste facilitará la rotura de la subfusión en cuanto se produzca un régimen turbulento en los *altostratus*.

En la zona W_2 tenemos gotas en subfusión, debidas:

1.º A las gotas que han alcanzado la zona W_2 por efecto de la ascensión de las masas de aire a causa de la succión originada por la subida de W_2 , según la adiabática correspondiente. Debido a dicha subida se condensa el vapor de agua, encontrándose con temperaturas inferiores a la temperatura de solidificación. La subfusión no se rompe porque la elevación se realiza en masa por la succión uniforme y, por tanto, sin turbulencia. Los *altostratus* están constituidos, efectivamente, por grandes cantidades de agua en subfusión.

2.º A las gotas con núcleo inicial de hielo, engrosadas a expensas de otras gotas subfundidas sin núcleo inicial. Como se ve, el efecto de la caída de cristales de hielo desde los cirrus es crear una fuerte inestabilidad que origina los *altostratus*. Éstos constituyen un enorme depósito de gotas subfundidas y, por tanto, una gran reserva de energía que puede liberarse súbitamente. El fenómeno descrito en la figura 52 es la deformación superior de la curva temperatura-altura dentro del "efecto cirrus" indicado en el primer artículo.

Nuestras observaciones comprueban que las tormentas que han dado precipitaciones más copiosas se han desarrollado rompiendo las capas de *altostratus*. La tormenta, de desarrollo vertical, actúa en el sentido de perforar los *altostratus*, y a causa de la turbulencia que se produce se rompe la subfusión, originándose un violento "efecto cirrus".

Las tormentas indicadas, de frente caliente, son poco frecuentes por encontrarse con una atmósfera superiormente estable en términos generales y con una escasa insolación en el suelo por la propia capa de nubes. Sin embargo, circunstancias locales determinan a veces la producción de tormentas de calor. Dan precipitaciones copiosísimas por el efecto que hemos indicado antes.

Mientras exista la formación constante de cirrus, por debajo de ellos se van constituyendo los *altostratus* y se mueve el sistema con arreglo al desplazamiento de la causa que lo produce. Las gotas subfundidas dan una precipitación que reproduce aproximadamente las zonas K y W_2 de la figura 53, en la atmósfera por la que descienden. Sin embargo, la zona W_2 es notablemente más débil porque no existe el fenómeno de la coexistencia de hielo y agua sub-

fundida. Por lo demás, falta en absoluto la zona equivalente a la W_1 . Es decir, que los fenómenos se desarrollan como en una especie de miniatura de lo descrito anteriormente para el sistema cirrus-*altostratus*. Adquieren, no obstante, una efectividad muy grande porque tienen lugar en una atmósfera cada vez más rica en vapor de agua.

Sin embargo, cabe pensar en producir una agitación violenta de la capa de *altostratus* para que la rotura de la subfusión reproduzca por debajo de ellos la realidad de la figura 52, aumentada incluso por la mayor cantidad existente de vapor de agua. En el artículo anterior indicábamos cómo el bombardeo de la altura crítica, h_c , podía cebar un gran número de tormentas que, sin tal ayuda, se disiparían sin dar precipitación. Ahora se ve, por lo dicho, que si las cumbres de los *cúmulus congestus* alcanzan la zona de subfusión, el bombardeo deberá dirigirse también contra ellas, al propio tiempo que a la altura crítica.

Nuestra convicción de la posibilidad de obtener un notable aumento del régimen de precipitaciones al paso de una depresión, reside en las características de constitución de los *altostratus*. Creemos que un bombardeo de los mismos determinará el máximo aprovechamiento de la oportunidad que constituye el paso de una depresión. La realidad observada de las tormentas con "cubierta" de *altostratus*, nos lo hace creer así.

El bombardeo de cualquier otro tipo de nubes inferiores a la isoterma crítica, no puede dar ningún resultado apreciable. Produciría una agitación local que seguidamente sería absorbida por el inmenso espacio atmosférico: es la pequeñez del esfuerzo humano frente a la inmensidad de la Creación. Pero los *altostratus* son un arsenal de energía que el hombre puede hacer estallar fácilmente.

Las tentativas recientes en torno al problema de la lluvia artificial.

En el artículo anterior indicábamos que la General Electric Co. había conseguido producir nevadas bombardeando las nubes desde un avión con píldoras de hielo seco. El experimento fué llevado a cabo por Vincen J. Schaefer.

Los técnicos de la G. E. Co. descubrieron que el hielo seco no era imprescindible para hacer llover, y que podía ser suficiente la agitación de una nube. El Dr. Bernard Vonnegut, de dicha entidad, disparando un revólver en una niebla subfundida, produjo nieve en un radio de 10 ó 12 m.

En los últimos tiempos, en los laboratorios de la G. E., se han hecho repetidos ensayos en una "cá-

mara fría", inyectando en ella toda clase de sustancias finamente pulverizadas. La experimentación se ha dirigido especialmente a encontrar los núcleos óptimos de condensación o sublimación. Se encontró que el yoduro de plata, aun en cantidades pequeñísimas, convierte la niebla de la "cámara" en nieve. No se ha realizado todavía el experimento en el campo. Pero va a tener lugar muy en breve, con ayuda de las fuerzas aéreas de los Estados Unidos. Según la G. E., con partículas del diámetro óptimo de una millonésima de pulgada bastarían 200 libras de yoduro para impregnar la totalidad de la atmósfera de los Estados Unidos, en la proporción de 100 000 núcleos por pie cúbico.

La G. E. Co. se ha propuesto llevar a la práctica un plan del Dr. Langmuir para impedir las granizadas. Consiste en cargar el aire de las tormentas de yoduro de plata, y así las gotas subfundidas se transformarían en nieve y no podrían alimentar el crecimiento del granizo.

Desde luego, la experimentación dirá, en definitiva, la última palabra sobre las tentativas para conseguir la lluvia artificial. Sin embargo, somos bastante escépticos sobre la eficacia de núcleos de una constitución determinada, en el problema que nos ocupa. La realidad, en nuestra opinión, creemos que parece demostrar que la condensación y sublimación en la atmósfera tienen lugar sobre núcleos de hielo. Repetimos de nuevo aquí el hecho fundamental de la existencia de *altostratus* y cirrus por encima de la isoterma crítica. Creemos que lo que tiene una importancia fundamental es el tamaño de los núcleos, y la existencia de toda la gama de tamaños y temperaturas en las gotas subfundidas asegura la posibilidad de que existan en la atmósfera los núcleos óptimos.

La condensación del vapor de agua al paso de los electrones en la cámara de Wilson, es un hecho. Demuestra igualmente que no es precisa la persistencia del núcleo para la condensación y que es suficiente la agitación. Wilson demostró que es necesaria una gran sobresaturación para que llegue a producirse la condensación sobre partículas descargadas o neutras. Los estudios de Aitken (*Collecter Scientific Papers*) y Wigand (*Über die Natur die Kondensationsskerne in der Atmosphäre*) parecen confirmar estas ideas.

Pero, aun admitiendo este hecho, la observación actual sobre la subfusión confirma nuestra teoría de que las gotas subfundidas constituyen el germen de los núcleos realmente efectivos de la condensación y sublimación. Al paso de un avión por una zona subfundida, y principalmente alrededor de la isoterma de -10°C. , se producen unas chispas en las alas que adquieren a veces gran importancia y llegan a agu-

jerear la estructura del aparato. Es sabido, además, que a veces al paso del avión se produce la primera descarga eléctrica en la tormenta.

No se conocen las causas de estos fenómenos. Pero creemos que son debidos a que al producirse el choque de las gotas subfundidas contra el aparato, se origina la solidificación de las mismas, y esta ordenación geométrica de las moléculas inherente a la cristalización, da lugar a la creación de campos eléctricos alrededor de cada gota. La realidad comprueba que las primeras descargas eléctricas tienen lugar en la zona de coexistencia y paso de las gotas subfundidas a cristales de hielo, y que en nuestras latitudes corresponde aproximadamente a la isoterma de -10°C . Si hace falta, pues, la ionización del aire por efecto de campos eléctricos, la subfusión la da

también. Es probable que si no es fundamental, este hecho es, al menos, importante.

Bombardeando los *altostratus* se obtendría, probablemente, el incremento máximo posible de las precipitaciones y seguramente con fenómenos eléctricos que contribuirían al objeto propuesto. Las precipitaciones que se desarrollan en una tormenta y en una depresión, difieren esencialmente en cuanto al orden de magnitud de la intensidad de su causa local. Hay que igualar las intensidades de estas causas. Con el método de aprovechamiento de las depresiones que proponemos, tratamos, por lo tanto, de *injertar* una sucesión de tormentas en el seno de la depresión. Tenemos el convencimiento de que la experimentación directa que realizaremos nos dará resultados definitivos.
