

CAPÍTULO IV

PRECIPITACIONES

A) FORMACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES

137. Generalidades. — Por *precipitación* se entiende el agua que en estado líquido, sólido o cristalino cae a tierra; en estado líquido, en forma de gotas y gotitas de agua; en estado sólido, en forma de granos de hielo, y en estado cristalino, en forma de nieve. La caída de gotas de agua produce la lluvia; la caída de gotitas, la llovizna; la caída de los granos de hielo, la granizada y la pedrea, y la caída de los copos de nieve, la nevada.

Las precipitaciones representan, de este modo, el exceso de vapor de agua que hubo en el aire, y que por medio de los procesos de condensación y sublimación fué extraído de sus entrañas y reunido en pequeñas gotitas de agua o cristales de hielo, y que, al proseguir su crecimiento, han alcanzado un peso tal que los ha capacitado para separarse de las nubes y “precipitarse” a tierra.

Esta caída es motivada por la *gravedad*. Por esta razón, todo producto de condensación debería llegar a tierra. Sin embargo, no sucede siempre así. Muchas veces quedan flotando en el aire, sostenidos por las corrientes aéreas, como por ejemplo las gotas y gotitas que forman las nubes. Otras veces se evaporan durante la caída, antes de llegar a tierra, dentro de las capas de aire calientes y relativamente secas que atraviesan.

Entre las precipitaciones deben incluirse también el *rocío* y la *escarcha*, a pesar de que, al depositarse, la eliminación del vapor de agua sobrante del seno de la atmósfera es directa, sin previa formación de gotitas de agua o de cristales de hielo.

138. Formación de las gotas de agua. — Las nubes están formadas por “gotitas de agua”; las lluvias, por “gotas de agua”. Aquéllas crecen por “adhesión” de partículas de vapor de agua, o sea por el proceso de *condensación*; éstas, por “unión de las gotitas entre sí”, proceso llamado *coagulación*. Sólo de esta manera pueden formarse, en un tiempo razonable, gotas de agua de cierta magnitud.

W. Findeisen ha deducido el tiempo T que sería necesario para la formación de gotitas y gotas de agua, de determinados radios r , por el proceso de con-

densación, en un ambiente común, caracterizado por una temperatura de $+5^{\circ}$, presión atmosférica de 675 mm, y humedad específica de 6 gr/kg, o sea una sobresaturación de 0,5 %. A los valores calculados agregamos, a título ilustrativo, el número n de partículas de vapor de agua que componen las gotas.

$r = 10^{-4}$ cm,	$T = 1$ segundos	$n = 2,8 \cdot 10^{10}$
$= 3 \cdot 10^{-4}$ „	$= 9$ „	$= 7,6 \cdot 10^{11}$
$= 10^{-3}$ „	$= 100$ „	$= 2,8 \cdot 10^{13}$
$= 3 \cdot 10^{-3}$ „	$= 14$ minutos	$= 7,6 \cdot 10^{14}$
$= 10^{-2}$ „	$= 1,9$ horas	$= 2,8 \cdot 10^{16}$
$= 3 \cdot 10^{-2}$ „	$= 10$ „	$= 7,6 \cdot 10^{17}$
$= 10^{-1}$ „	$= 54$ „	$= 2,8 \cdot 10^{19}$

La formación de una gota de un diámetro de 2 mm requeriría, de este modo, 54 horas. La observación demuestra, especialmente en el caso de las tormentas, que las lluvias se producen con mayor rapidez. Este solo hecho justifica ya la intervención de un nuevo factor en la formación de las precipitaciones: la *coagulación*.

Las *causas* que producen la unión de gotitas de agua entre sí, y con ello la formación de gotas de agua, son:

- a) su movimiento browniano;
- b) la turbulencia del aire;
- c) la distinta velocidad de la caída;
- d) la atracción hidrodinámica;
- e) la atracción eléctrica entre ellas.

Las gotitas de agua, igual que las partículas sólidas que se encuentran en el aire, son continuamente chocadas por las moléculas de aire; como consecuencia, efectúan un *movimiento* irregular, caprichoso, llamado *browniano*. Durante este movimiento, naturalmente, chocan también entre sí, quedando unidas después del encuentro.

Análogo es el efecto de la *turbulencia del aire*, o sea de la "intranquilidad" que existe en el aire, debido a las desigualdades térmicas que se producen sin cesar en su seno y lo mantienen en permanente agitación, agitación que facilita el encuentro y la unión de las gotitas.

Mayor importancia tienen, tal como lo demuestra la observación directa, los factores restantes, particularmente la distinta *velocidad de caída*, condicionada por el tamaño de las gotitas. Las gotitas nacen en distintos momentos y en distintos lugares del espacio, y crecen también a distintas velocidades. Su tamaño es, por estas razones, desigual, y desigual es también la velocidad de su caída. Por esta razón, las gotitas grandes alcanzan a las pequeñas, uniéndose con ellas si caen por las mismas trayectorias o por trayectorias muy cercanas.

Por supuesto, gotitas de igual tamaño caen con igual velocidad. Si en determinado momento se encuentran a la misma altura, el espacio entre ellas es reducido, y por consiguiente, la velocidad de flujo de aire a través del mismo incrementada. Pero un fluido en movimiento ejerce menor presión que otro en reposo. A un aumento de velocidad corresponde, pues, una disminución en la presión que ejerce. Por esta razón, las dos gotitas están aparentemente bajo la influencia de una atracción mutua, que tiende a unir las. Llámase este fenómeno *atracción hidrodinámica*. Su intensidad crece sobremanera con el acercamiento de

las gotitas (fig. 136). Se unen sólo gotitas de igual tamaño. Por esta razón, como lo demostró Defant, en una lluvia "prevalecen" las gotas cuyo peso está en relación, como 1:2:4:8, etc. La razón es sencilla: dos gotitas de peso 1, al unirse forman una gotita de peso 2; dos de éstas, una de peso 4, que a su vez, unidas, forman una de peso 8, y así sucesivamente.

La atracción hidrodinámica suele ser debilitada, y a veces hasta anulada, por la *repulsión eléctrica* que ejercen entre sí las gotitas cargadas de electricidad del mismo signo. Pero anulada el campo eléctrico por una descarga suficientemente potente, acompañada de un fuerte trueno —y por consiguiente, también de una convulsión del aire—, la atracción hidrodinámica se intensifica y la coagulación se acelera. Un incremento de la lluvia, en forma de caída de gotas más grandes, es su consecuencia.

139. Velocidad de caída de las gotas.

— Si el espacio fuese vacío, todas las gotas caerían con la misma velocidad, proporcional al tiempo transcurrido, independientemente de su tamaño. Pero el

espacio está ocupado por aire de creciente densidad conforme se aproxima a la tierra. Las gotas, en su caída, tienen que abrirse camino a través de este ambiente. Esto lo consiguen tanto más fácilmente cuanto más pesadas son. Por esta razón, las gotas grandes caen con mayor velocidad que las pequeñas.

La resistencia que las gotas encuentran en el aire crece con la velocidad de la caída. Llega así un momento en que la resistencia iguala a la fuerza motriz del movimiento, representado por el peso de la gota. Desde este momento la velocidad no puede aumentar más; las gotas caen con una velocidad constante, invariable, llamada *velocidad límite*.

Designando con g la aceleración de la gravedad, y con t el tiempo transcurrido desde la iniciación del movimiento, la velocidad de caída, v , en el espacio vacío sería:

$$v \text{ m/sec} = gt = 9,81 \cdot t^{\text{seg}}$$

o sea, aproximadamente, de 10 m al final del primer segundo, 20 m al final del segundo, y así progresivamente.

En el espacio ocupado por aire, la velocidad de caída crece hasta el momento en que el peso, P , de la gota llega a ser igual a la resistencia encontrada, R .

Designando con r el radio de la gota, y con δ' la densidad del agua, entonces se tiene, para el peso de la gota:

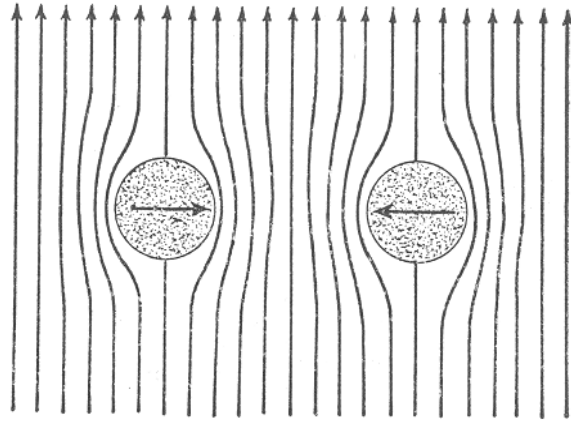


FIG. 136. — Atracción hidrodinámica entre dos gotas, producida por el estrechamiento del espacio disponible para el flujo del aire.

$$P = \frac{4}{3} r^3 \pi \delta' g$$

Para la resistencia se tiene, según Stokes, designando con U el perímetro de la gota, con v la velocidad de caída, y con μ el coeficiente del rozamiento interior de la gota:

$$R = 3 \mu U v = 3 \mu 2 \pi r v$$

Igualando las dos fuerzas se tiene:

$$\frac{4}{3} r^3 \pi \delta' g = 3 \mu 2 \pi r v$$

de donde:

$$v = \frac{2 \delta'}{9 \mu} g r^2$$

Siendo la densidad del agua $\delta' = 1$, $g = 9,81 \text{ m/sec}^2$, y $\mu = 17,3 \cdot 10^{-5} \text{ g/cm sec}$, la velocidad de caída resulta:

$$v = 1,27 \cdot 10^6 r^2 \text{ m/sec.}$$

La fórmula llamada *fórmula de Stokes*, es válida para gotas de mediano tamaño, con radio inferior a 10μ . Para gotas mayores, W. Schmidt estableció una fórmula empírica, válida hasta un radio de 1,5 mm, que reza:

$$v = \frac{10^6 r^2}{0,787 + 503 r^{\frac{3}{2}}}$$

Si el radio de la gota es pequeño, el segundo término del denominador puede ser despreciado, con lo cual se obtiene:

$$v = 10^6 r^2 : 0,787 = 1,27 \cdot 10^6 r^2$$

o sea la fórmula de Stokes misma.

Las *velocidades límites* de la caída de las gotas, observadas cerca de la superficie de la tierra, son:

diámetro d = 0,02 mm	r = 0,01 mm	v = 0,013 m/sec
= 0,1 „	= 0,05 „	= 0,26 „
= 0,2 „	= 0,10 „	= 0,78 „
= 0,4 „	= 0,20 „	= 1,81 „
= 1,0 „	= 0,50 „	= 4,25 „
= 2,0 „	= 1,00 „	= 5,99 „
= 3,0 „	= 1,50 „	= 7,55 „
= 4,5 „	= 2,25 „	= 8,00 „

Estos mismos valores se encuentran representados en la figura 137.

Como lo indica la fórmula de Stokes, la resistencia que una gota de agua encuentra en el aire crece con la velocidad de la caída, y con ella crece también la dificultad de evacuar el aire que choca en su camino.

Por esta razón, frente a la gota se forma un colchón de aire, que obstaculiza la caída. Alcanzada la "velocidad límite", correspondiente a la igualdad entre el peso de la gota y la resistencia encontrada, la gota

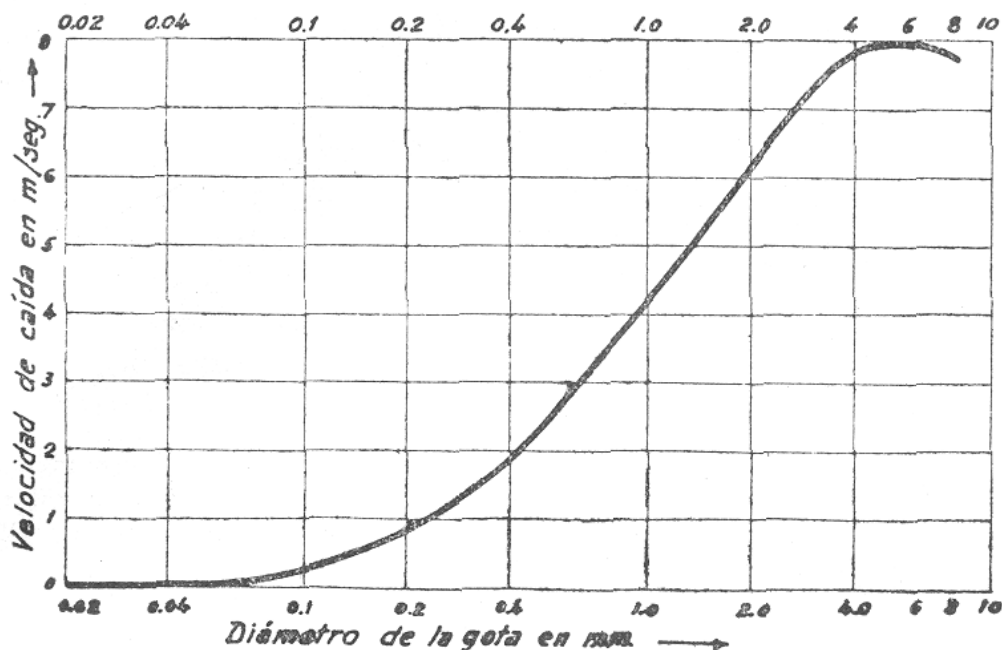


FIG. 137. — Velocidad límite de caída de una gota, en dependencia de su tamaño.

se deforma, achatándose, y si el aumento de velocidad prosigue, hasta se pulveriza (fig. 138). Por esta razón, existe un límite para el tamaño de la gota y otro para la velocidad de su caída que no pueden ser sobrepasados:

El límite de tamaño es = 4,5 mm;
 El límite de velocidad de caída es = 8 m/sec.

La velocidad capaz de pulverizar las gotas puede provenir también de las corrientes aéreas, tanto verticales como horizontales. De este modo, el viento puede dificultar o retardar la caída de una lluvia. Con corrientes ascendentes de una velocidad de 8 m/sec, no puede caer lluvia. Las gotas de agua están suspendidas en el espacio. Si la velocidad es mayor, hasta son elevadas. Por esta razón, cuando el viento amaina la lluvia se intensifica. Con viento, sólo pueden caer gotas grandes; sin viento, también las pequeñas. Puede decirse, en consecuencia, que:

El viento dificulta la lluvia;
 La calma facilita la lluvia.

140. Formación de la nieve. — La formación de la nieve se inicia con el proceso de sublimación, o sea pasando el vapor de agua del estado gaseoso al estado sólido, sin intervención del proceso de condensación. El primer producto de sublimación es el *crystal de hielo*, de forma hexagonal. Si el crecimiento de éste prosigue, se ob-

tiene el *crystal de nieve*¹. El cristal de nieve es tanto más compacto cuanto menos sobresaturado estaba el aire "con respecto al hielo"; y tanto más ramificado cuanto más sobresaturado se encontraba. Hallándose la sobresaturación cerca de la "saturación respecto del agua", los cristales de nieve crecen en todas direcciones, formándose entonces cristales esféricos, llamados también *nieve granulada*.

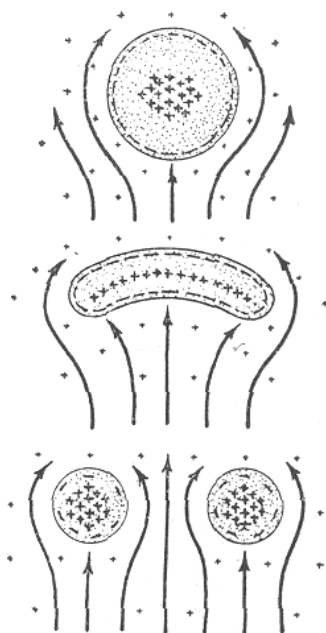


FIG. 138. — Estados sucesivos de la "pulverización" de las gotas. Los signos + y - indican cargas eléctricas.

Los cristales de nieve se forman principalmente por coagulación de los cristales de hielo. La unión de los cristales de nieve produce los *copos de nieve*. Las causas que producen esta unión son las mismas que motivan la coagulación de las gotitas de agua, formando gotas.

La unión se produce de la siguiente manera: al chocar dos cristales de nieve se produce calor. Este calor es suficiente para licuar un trocito de ellos. El agua así obtenida es, una vez congelada, la materia que mantiene unidos los dos cristales. En este proceso desempeñan papel de importancia "fuerzas moleculares" de diversa índole.

La caída de los copos de nieve semeja la de pequeños trozos de papel; se verifica de plano, oscilando con respecto a la vertical y girando a la vez (fig. 139). Las velocidades observadas son, en caso de:

copos pequeños	d = 6 mm,	v = 1,1 m/sec
„ medianos	= 15 „	= 1,5 „
„ grandes	= 20 „	= 1,8 „

Para que la nieve pueda llegar a tierra, es necesario que la temperatura del aire atravesado sea inferior a 0° en todo su trayecto. Si es superior, puede derretirse. Muchas lluvias son sólo nieve derretida (fig. 140).

141. Formación del granizo. — El granizo sólo se puede formar en nubes de "desarrollo vertical", o sea en las *nubes de tormenta*, originadas por la elevación de aire caliente y húmedo, dentro de un ambiente inestable, con gradiente térmico superior a $-1^{\circ}/100$ m.

Si el nivel de condensación se encuentra por debajo de la isoterma de 0°, los primeros productos de condensación son gotitas de agua. Estas gotitas son arrastradas por las corrientes verticales, y elevadas dentro del espacio situado encima de esta isoterma, donde se enfrían, aunque **sin** solidificarse, **sin** congelarse, permaneciendo por esta razón en estado de sobresaturación. Si la humedad del ambiente sigue siendo superior a 100 %, la eliminación del vapor de agua prosigue, por el proceso de condensación, también en este espacio.

¹ Ver página 139.

Sólo después de superada la isoterma de -22° se inicia el proceso de sublimación, y con ello la formación de cristales de hielo y de cristales de nieve. Las gotitas en estado de sobrefusión que penetran en esta parte del espacio, en que sólo existe sobresaturación respecto del hielo, mas no respecto del agua, se evaporan, contribuyendo así al crecimiento de los cristales de nieve.

En la figura 141 se encuentran representados gráficamente estos procesos. El aire que se eleva del suelo se enfría progresivamente, hasta alcanzar su "nivel de condensación". Debajo de la nube de tormenta se encuentra, pues, una *capa de aire húmedo*. Entre el nivel de condensación y la isoterma de 0° , el vapor de agua sobrante es eliminado por el proceso de condensación. Esta capa de la nube puede llamarse, en consecuencia, *capa de gotitas de agua*. También más arriba de esta isoterma, y hasta alcanzar la isoterma de -22° , prosigue la condensación, pero la particularidad de esta capa consiste en que las gotitas de agua se encuentran muy enfriadas. Ésta es, pues, la *capa de gotitas sobrefusionadas*. Encima de la isoterma de -22° , y hasta la altura del "nivel de equilibrio", la eliminación del vapor de agua sólo prosigue por intermedio del proceso de sublimación, formándose cristales de hielo. Esta parte de la nube se llama, por consiguiente, *capa de cristales de hielo y de nieve*.

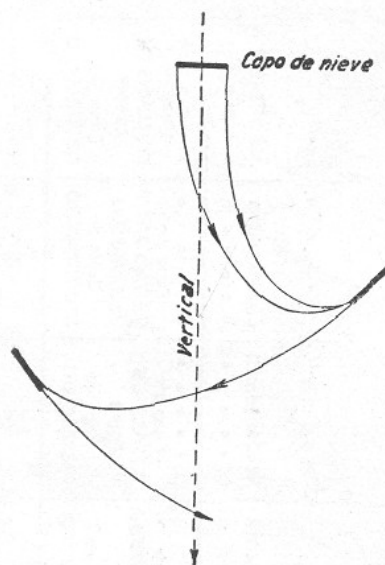


FIG. 139. — La caída de un copo de nieve se verifica de plano, oscilando alrededor de la vertical.

Terminado el crecimiento de la nube, forzosamente se produce el

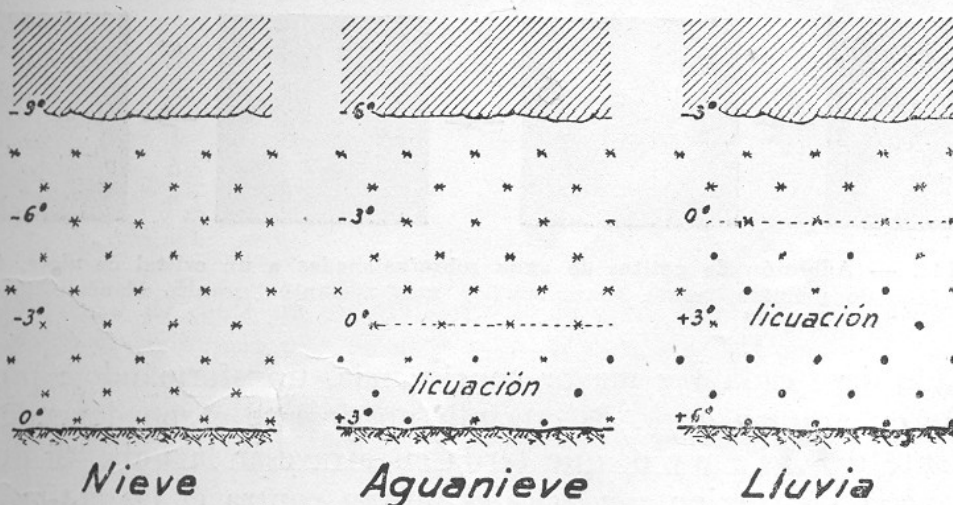


FIG. 140. — La nieve, cayendo a través de aire caliente, se licua y llega a la superficie de la tierra como "aguanieve" o "lluvia".

debilitamiento de las corrientes verticales. El efecto se manifiesta primero en la cúspide de la nube, cerca del "nivel de equilibrio". Los

crisales de nieve, reunidos ya en menudos *copos*, y transformados en parte en *nieve granulada*, se hunden cada vez con mayor velocidad, penetrando de este modo en la capa media, llena de gotitas sobrefusionadas.

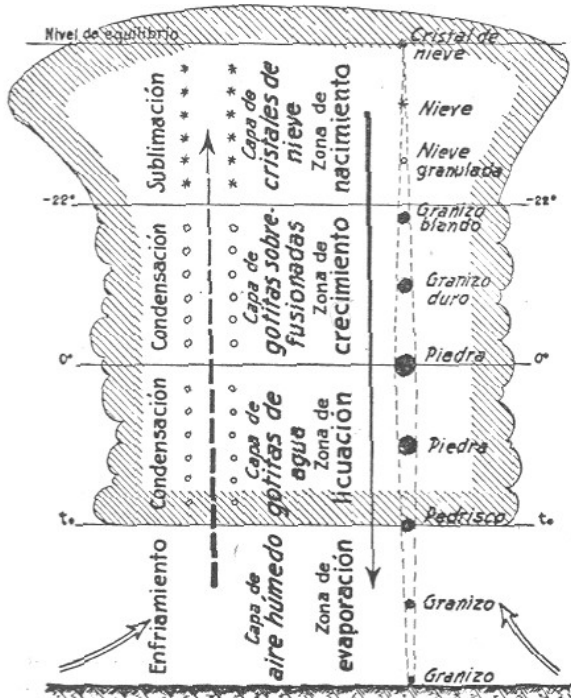


FIG. 141. — Capas y zonas en que puede dividirse una nube de tormenta. Fases que atraviesa un grano de piedra desde su formación hasta su licuación.

El agua que éstas encierran tiene tiempo de desparramarse por el grano, antes de congelarse. En esta fase de formación del granizo ya no quedan espacios libres; el

El choque con ellas es suficiente para captarlas y congelarlas. Su transformación en un granito de hielo es inmediata en caso de gotitas pequeñas, y un tanto retardada en caso de gotitas mayores, debido a la mayor cantidad de "calor de congelación" libertado en este proceso. La nieve granulada pronto es envuelta así por una capa de granitos finísimos, algo espaciados entre sí, transformándose de este modo en *granizo blando*, desmenuzable todavía con los dedos. A medida que estos granos caen, crecen rápidamente, ya que las gotitas que encuentran en el trayecto son cada vez mayores. El agua que éstas encierran tiene tiempo de desparramarse por el grano, antes de congelarse. En esta fase de formación del granizo ya no quedan espacios libres; el

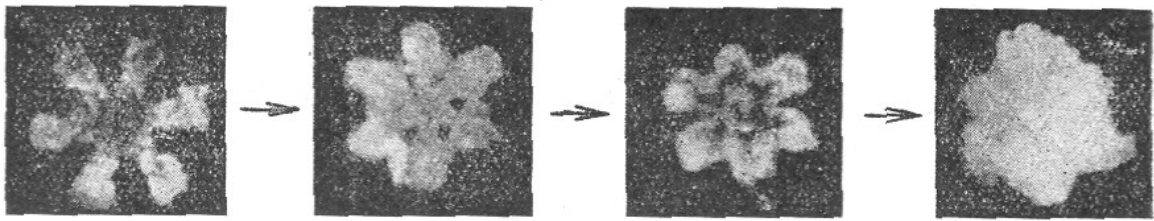


FIG. 142. — Adhesión de gotitas de agua sobrefusionadas a un cristal de nieve, formando primero "nieve granulada" y más adelante "granizo blando".

grano adquiere cada vez mayor consistencia, transformándose progresivamente en *granizo duro*. El crecimiento de este grano depende principalmente del tiempo que tarda en atravesar la nube. Si durante esta travesía las corrientes verticales lanzan contra él las gotitas líquidas que se encuentran en la parte inferior de la nube, su crecimiento es rápido. El agua que contienen estas gotitas se desparrama por el grano, y después de enfriarse se congela, cubriéndolo así con una capa de hielo transparente. De este modo, el grano se transforma, primero

en *pedrisco*, y si las condiciones para su crecimiento siguen siendo favorables, también en *piedra*, pudiendo alcanzar considerables dimensiones. Atravesada definitivamente la isoterma de 0° y penetrado ya en una capa de aire relativamente caliente, principia la licuación de la *piedra*, proceso que se intensifica progresivamente, hasta el momento en que se estrella contra el suelo. La parte licuada se evapora. Por esta causa, la *piedra* disminuye de tamaño, transformándose primero en *pedrisco*, y si el proceso perdura suficiente tiempo, en *granizo*. Cuando la temperatura de la capa aérea que cubre el suelo es elevada, el granizo puede derretirse totalmente, disgregarse por completo y precipitarse a tierra en forma de grandes *gotones*.

También en esta fase de evolución de una nube de tormenta pueden distinguirse varias "capas", igual que en la fase de su crecimiento. La capa superior, llena de cristales de nieve, puede llamarse *zona de nacimiento* del granizo. La capa media, ocupada por gotitas sobrefusionadas, que al ser chocadas se adhieren al grano, solidificándose a su vez, puede designarse como *zona de crecimiento* del granizo. La capa baja, que contiene gotitas de agua que con su calor contribuyen a licuar el granizo, *zona de licuación*. Y por último, la capa de aire debajo de la nube, *zona de evaporación* del granizo.

Para la comprensión del fenómeno de *congelación de las gotitas de agua*, consideremos que la gotita chocada tuviera un volumen de 1 cm^3 , por consiguiente, una masa de 1 gramo, y que su temperatura fuese de -10° . Cuando esta gota se ha solidificado totalmente, quedaron libertadas, en forma de "calor de congelación", 80 calorías. El empleo que se ha hecho de este calor es el siguiente: 10 calorías se han gastado en elevar la temperatura de la gota de -10° a 0° , y las 70 restantes en la evaporación de una pequeña parte de ella. Para evaporar un gramo de agua se requieren 590 calorías. Las 70 calorías se gastan, por consiguiente, en la evaporación de $1/12$ de gramo. La evaporación de más o menos una décima parte de una gotita es, por esta razón, suficiente para producir su congelación.

El *espacio* que las gotitas atraviesan mientras se prepara su congelación depende de su tamaño, y es aproximadamente el siguiente:

radio $r = 2$ mm;	diámetro $d = 4$ mm;	espacio $E = 69$ m
$= 1$ "	$= 2$ "	$= 34$ "
$= 0.5$ "	$= 1$ "	$= 17$ "
$= 0.2$ "	$= 0.4$ "	$= 7$ "
$= 0.1$ "	$= 0.2$ "	$= 3$ "

La *velocidad de caída* de un grano de hielo crece también sólo hasta el instante en que la resistencia que encuentra en el aire iguala a su peso. Desde este momento ella es "constante", y, como es natural, tanto mayor cuanto más grande es el grano. Mediciones directas permitieron establecer la siguiente fórmula, dependiente del diámetro D del grano:

$$V \text{ m/sec} = 8,8 \sqrt{D \text{ cm}}$$

fórmula que da para:

$D =$	1	2	3	4	6	8	10	cm;
$v =$	8,8	12,4	15,2	17,6	21,5	24,9	27,8	m/sec.

Piedras de 8 cm de diámetro, o sea del tamaño de una naranja, caen con frecuencia. La piedra más grande de que se tiene noticia cayó en China. Pesaba 4 1/2 kg. Tenía, por consiguiente, el tamaño de un melón, o sea un diámetro de unos 20 cm.

El *tiempo* que los granos de hielo tardan en llegar a tierra depende de la intensidad de las corrientes verticales. Si la velocidad de éstas es "menor" que la velocidad de su caída, la caída es retardada; si es "mayor" transformada en elevación. La caída de un grano es, por esta razón, un fenómeno complejo. La alternación de capas opacas y capas transparentes que frecuentemente se observa en su envoltura, es un indicio de que pasó repetidas veces la isoterma de 0° en una y en otra dirección (fig. 143).

142. Formación del rocío. — Durante la noche, la superficie de la tierra y los objetos y plantas que la cubren se enfrían. Sin embargo, el enfriamiento es desigual; depende de la forma de los objetos, de su calor específico y de la mayor o menor facilidad con que es reemplazado el calor irradiado por el calor que sube del suelo. Por su contacto con la superficie de la tierra, también se enfría el aire cercano a ella. Si este enfriamiento pasa del "punto de rocío", se produce un pequeño excedente de vapor en el aire, que se adhiere en los puntos de mayor enfriamiento. Esta condensación del vapor de agua en la superficie de la tierra, en forma líquida y en un ambiente de temperatura superior a 0°, se llama *rocío*.

La cantidad de rocío que se forma depende de la humedad del aire y del descenso de temperatura que se ha operado. El viento, con la mezcla de aire que produce, dificulta su formación.

La cantidad de agua que el rocío suministra es relativamente pequeña: término medio, de 0,1 a 0,3 de mm. En un año, el reino vegetal obtiene así una cantidad de agua que puede estimarse en unos 30 a 50 mm.

La formación de rocío en los desiertos tiene gran importancia, porque es casi la única fuente de provisión de agua para las plantas. La intensidad del rocío suele ser allí considerable; no tanto por la humedad del aire, que es moderada, como por el acentuado descenso de la temperatura que se produce durante la noche.

Donde la humedad es grande, como por ejemplo en las islas tropicales, es también grande la cantidad de rocío que se forma. Por la mañana, los árboles chorrean agua, sin que haya nubes en el cielo.

143. Formación de escarchas. — Si la humedad del aire es tan reducida que su "punto de rocío" se encuentra por debajo de 0°, entonces la pequeña cantidad de vapor sobrante que se produce, cuando se enfría el suelo, y por su intermedio el aire que lo cubre, se deposita en la superficie de la tierra, no ya en forma de agua, sino de hielo. Este depósito del vapor de agua, en forma cristalina, que se produce en un ambiente de temperatura inferior a 0°, se llama *escarcha*.

El paso del vapor de agua del estado gaseoso al estado sólido puede ser directo,

y verificarse sólo por el proceso de sublimación. Esta posibilidad existe, cuando el ambiente llega a ser muy frío y el grado de humedad tal que el aire esté sobresaturado respecto del hielo, pero **no** respecto del agua. Siendo desigual el enfria-



FIG. 143. — Granizo en tamaño natural. En algunos se observan cáscaras transparentes, formadas por la congelación de gotitas de agua, chocadas durante su caída.

miento de la superficie de la tierra, existen centros esporádicos que desempeñan el papel de "núcleos" para la formación de cristales de hielo. La escarcha así obtenida tiene gran semejanza con la nieve. Se la denomina *escarcha cristalina*. Se forma sin nubes y sin neblina.

En montañas, donde la superficie de la tierra puede estar en contacto con las nubes, la escarcha no sólo se forma por sublimación del vapor de agua, sino también por adhesión de pequeñas gotitas sobrefusionadas, que luego se congelan, o por adhesión de cristales de hielo y de nieve. Si la nube es de nieve, el viento pega los cristales con-

tra los objetos que se le oponen, formando con ellos la llamada *escarcha de nieve*. Cuando esta escarcha es iluminada por el sol, se tiene ante la vista uno de los fenómenos más bellos de la Naturaleza.

Si la nube está formada por gotitas de agua sobrefusionadas, éstas, al chocar contra los objetos, se congelan, quedando adheridas como granitos de hielo. La escarcha así formada, debido a los vacíos que quedan entre los granitos, es *o p a c a y b l a n d a*. Puede ser desmenuzada con los dedos. Tiene mucha semejanza con el "granizo blando", por lo cual se la denomina *escarcha o cencellada blanda*. La temperatura que más facilita su formación es de -10° .

Si las gotitas son mayores, su congelación es algo retardada por el calor libertado, de manera que tienen tiempo de extenderse por el objeto antes de solidificarse. La escarcha así formada es ya *m á s c o m p a c t a*, *m á s l i s a*, *d e a s p e c t o l e c h o s o*. Tiene mucha semejanza con el "granizo duro", por lo cual se la llama *escarcha o cencellada dura*.

Puede formarse escarcha también, cuando la temperatura de la nube es superior a 0° , siempre que la de la superficie de la tierra sea inferior a 0° . Las gotitas se desparraman por el suelo y se congelan, a medida del enfriamiento que experimentan, debido al contacto con la superficie, y en mayor escala todavía, a causa del enfriamiento producido por la evaporación, favorecida por el viento. De este modo, la lluvia misma puede producir una escarcha. De ahí su nombre: *escarcha de lluvia*. Esta escarcha es *t r a n s p a r e n t e*, *d e s u p e r f i c i e l i s a*, *p u l i d a y d e a s p e c t o v í t r e o* (fig. 151).

La *cantidad de escarcha* que se puede formar en condiciones apropiadas —viento fuerte y persistente, nube o neblina densa, formada por gotitas o cristales de nieve ya crecidos— es muy grande. Si se produce en primavera, cuando la vegetación está adelantada, puede ocasionar considerables daños. Bajo su peso se doblan árboles, y son aplastados bosques enteros.

En la figura 144 se encuentran representadas las condiciones atmosféricas propicias para la formación de las distintas escarchas.

B) ACUMULACIÓN DE HIELO SOBRE LOS AVIONES

144. **Condiciones que favorecen la formación de hielo.** — Ciertas partes del avión, especialmente las expuestas al viento, como ser: los bordes de ataque de las alas y del timón, las palas de la hélice, las tomas de aire, los parabrisas y la antena de la radio, suelen cubrirse de *hielo* cuando atraviesa nubes de nieve o de gotitas de agua sobrefusionadas. Las defensas contra esta acumulación de hielo no son todavía absolu-

tamente eficaces, de manera que desde el momento en que se inicia su formación, el vuelo resulta cada vez más difícil y peligroso. Frecuente-

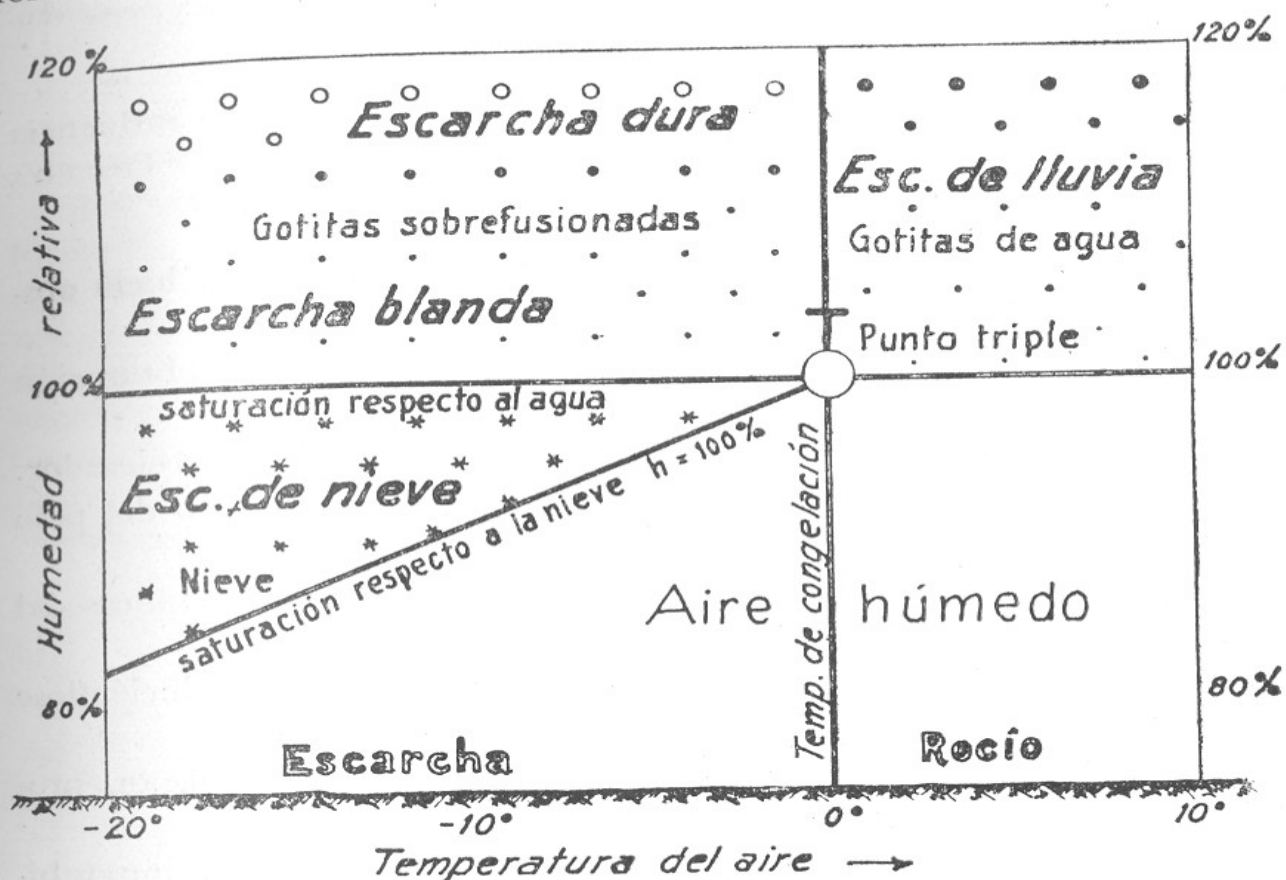


FIG. 144. — Condiciones atmosféricas propicias para la formación de las distintas clases de escarchas.

mente no hay otra alternativa que aterrizar, si todavía se está a tiempo. Muchos accidentes fatales se deben a la tardanza en realizar esta operación.

Para que pueda formarse hielo sobre los aviones, debe haber exceso de humedad en el aire, en forma de vapor de agua, cristales de nieve o gotitas sobrefusionadas. Además debe reinar baja temperatura, de manera que la temperatura exterior del avión sea inferior a 0°. Esto ocurre cuando se vuela alto, o cuando se ha descendido de una capa aérea muy fría y el avión no ha tenido tiempo aún para acomodarse a la temperatura del ambiente. En último término, el avión se puede enfriar bajo 0° también por la evaporación de una delgada capa de agua, producida por una lluvia, de temperatura cercana a 0°. En general, el hielo se forma en un ambiente sobresaturado, en temperaturas bajas, comprendidas entre +3° y -30°. La temperatura más favorable parece ser -6°.

Como se ve, el HIELO que se forma sobre los aviones es la misma precipitación que en meteorología se designa con el nombre genérico de ESCARCHA. En efecto:

se forma *escarcha* cuando cristales de nieve o gotitas de agua sobrefusionadas, arrastradas por el viento, chocan contra algún objeto. Y se forma *hielo* cuando el objeto —en este caso el avión, impulsado por la fuerza de su motor— choca contra un mar de cristales de nieve o gotitas de agua sobrefusionadas.

145. Influencia del hielo sobre el avión y el vuelo. — La influencia del hielo formado, sobre el avión y el vuelo, es múltiple. Los efectos más peligrosos son:

- a) El rendimiento del motor disminuye a medida que el hielo obstruye la entrada del aire en el carburador;
- b) El instrumental queda fuera de servicio, debido a la obturación de la toma de aire;
- c) La mariposa se endurece, quedando inmovilizado el acelerador;
- d) La resistencia al avance se agranda, debido al aumento del peso del avión;
- e) El perfil de las alas se modifica, las calidades aerodinámicas del avión disminuyen;
- f) También cambia el perfil de las palas de la hélice, reduciéndose su eficacia;
- g) Al desprenderse hielo de las palas, éstas se desequilibran, produciéndose vibraciones peligrosas;
- h) El manejo de los comandos queda dificultado, si no imposibilitado;
- i) El tren de aterrizaje, si es retráctil, puede quedar inmovilizado;
- j) El parabrisas se cubre de hielo, impidiendo la visibilidad;
- k) La antena puede cortarse, por el peso del hielo;
- l) El hielo forma “puentes” por encima de los aisladores, dificultando las radiocomunicaciones.

146. Clasificación del hielo formado. — El hielo que se forma en los aviones puede ser denominado según la naturaleza de los productos de condensación de las nubes en que se acumula. Si la nube está compuesta de cristales de nieve, el nombre del hielo debe ser: *escarcha de nieve*. Si está formada por gotas de agua de temperatura superior a 0°, corresponde llamarlo *escarcha de lluvia*. Se carece de un término apropiado para designar la escarcha que se forma dentro de una nube de gotitas sobrefusionadas. Las variantes de esta escarcha son: la *escarcha blanda* y la *escarcha dura* (fig. 144).

a) **ESCARCHA DE NIEVE.** — El hielo del tipo de “escarcha de nieve” se forma en una nube de nieve, en un ambiente muy frío, cercano a -10° , y con un grado de humedad tal que el aire está sobresaturado sólo

respecto del hielo, pero no respecto del agua. Debido a la gran velocidad del avión, los cristales de nieve chocados se adhieren fuertemente a éste, formando así una escarcha cristalina áspera, parecida a la nieve. Su desprendimiento ofrece bastante resistencia.

b) ESCARCHA BLANDA. — El hielo del tipo de “escarcha blanda” se forma en una nube de temperatura inferior a 0° , en la que el aire está sobresaturado respecto del agua, de manera que las gotitas de agua de que se compone están en estado de sobrefusión. En tal medio, las gotitas chocadas por el avión se congelan rápidamente. Los bordes de ataque del avión se cubren, por esta razón, de una capa de hielo rugosa, opaca, de superficie áspera, un tanto granulosa, no muy bien adherida, y algo blanda, debido a los pequeños espacios libres que quedan entre las gotitas congeladas.

c) ESCARCHA DURA. — El hielo en forma de “escarcha dura” se deposita, sobre un avión, en un ambiente de temperatura cercana, aunque todavía inferior, a 0° , cuando las gotitas de agua sobrefusionadas que contiene la nube son relativamente grandes. Estas gotitas, al ser chocadas no se congelan inmediatamente, por la considerable cantidad de calor que queda libertado, de manera que tienen tiempo de desparramarse por el avión antes de congelarse. La capa de hielo que así se forma es compacta, dura, algo transparente y lisa. Suele estar fuertemente adherida al avión. Esta escarcha es el mayor peligro para el vuelo (fig. 145).

d) ESCARCHA DE LLUVIA. — El hielo del tipo de la “escarcha de lluvia” puede formarse de dos maneras:

1. Si un avión cuya temperatura es *inferior a 0°* —caso frecuente, después de un descenso rápido desde gran altura— atraviesa una nube de agua, o si está expuesto a una lluvia, las gotitas se desparraman por él, congelándose a medida de su enfriamiento, debido a la pérdida de calor por evaporación, cubriéndose de esta manera con una escarcha transparente, lisa, dura y compacta, de aspecto vidrioso.

2. Igual escarcha se puede formar, aun cuando la temperatura del avión sea algo *superior a 0°* , siempre que la pérdida de calor producida por la evaporación parcial del velo de agua originado por las gotas desparramadas sea suficiente para reducir su temperatura por debajo de 0° .

Para que pueda formarse escarcha de un determinado tipo, la temperatura del aire y la naturaleza de los productos de condensación deberán ser iguales en toda

la trayectoria del avión dentro de la nube. Esta condición, raras veces se cumple. En consecuencia, la escarcha formada no suele ser de un solo tipo. Prevalece una mezcla de ellas.

147. **Nubes propicias a la formación de hielo.** — Nubes “propicias” a la formación de hielo son las nubes medias, limitadas por las isotermas de 0° y -22° , que se encuentran en nuestro medio geográfico entre 2

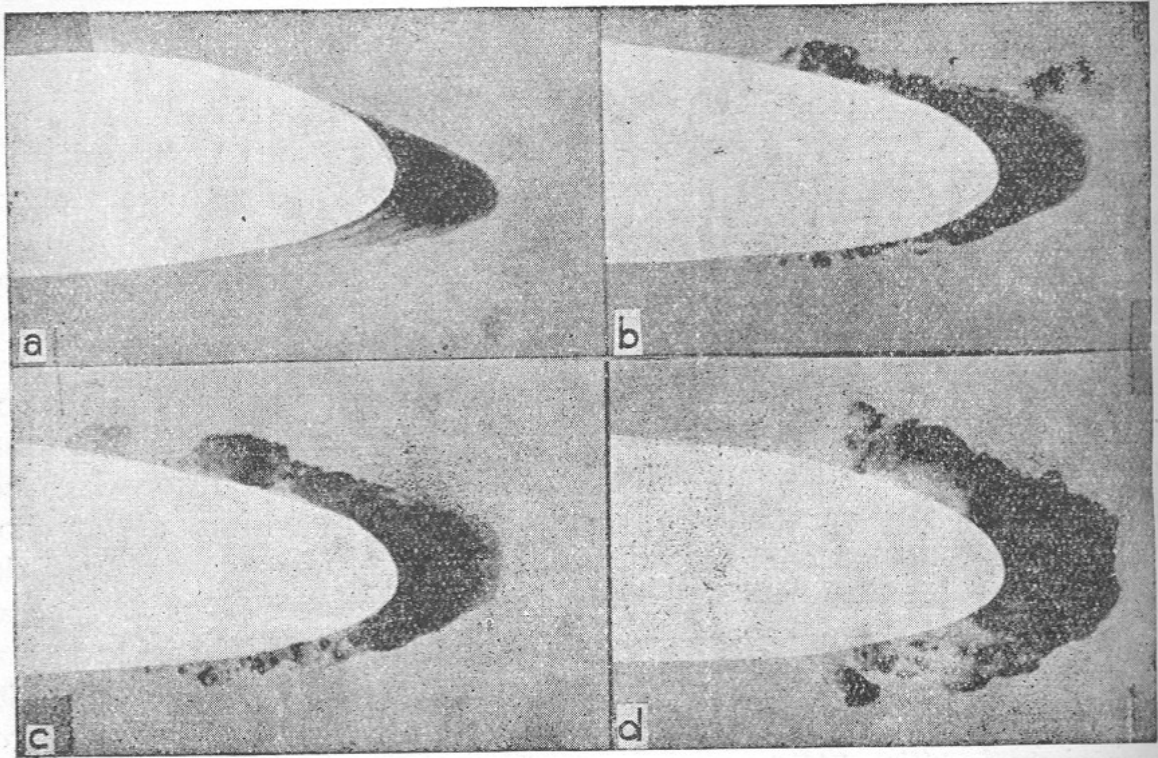


Fig. 145. — Formación progresiva de una “escarcha dura” sobre el borde de ataque de las alas.

y 6 km de altura, aproximadamente, formadas por gotitas de agua en estado de sobrefusión. Estas nubes son las *altostratus*, *stratocúmulus* y *nimbostratus*.

También atravesando otras nubes se puede formar hielo, siempre que la exigencia fundamental —temperatura del avión, inferior, o por lo menos cercana, a 0° —, esté cumplida. Aun atravesando espacio sin nubes se puede formar hielo, pasando el vapor de agua sobrante al estado sólido directamente, por el proceso de sublimación, depositándose como *escarcha cristalina* sobre el avión. La importancia de esta formación, desde luego, es pequeña.

La *cantidad de hielo* que se forma sobre un avión depende de la masa de aire afectada por el avión, y luego de las *condiciones hígricas* de la misma. Cuanto más velozmente se vuela, más rápida es la formación de hielo. Nubes densas producen escarchas espesas; nubes ralas, escarchas delgadas.

Volando, por ejemplo, a una velocidad de $360 \text{ km/hora} = 100 \text{ m/sec}$, 1 cm^2 de la superficie frontal del avión atraviesa un espacio de 1 m^3 en 100 segundos. En consecuencia, si la nube atravesada contiene, en forma de gotitas, 2 gramos de

agua por metro cúbico, en sólo 50 segundos se forma una capa de hielo de 1 cm de espesor. Si se duplica la velocidad de vuelo, este tiempo se reduce a la mitad, o sea a 25 segundos.

148. Vuelo en condiciones que favorecen la formación de hielo. — Teniendo en cuenta las condiciones en que suele formarse hielo sobre los aviones, pueden deducirse las siguientes *directivas* para el vuelo:

a) Volar a través de un espacio frío, de temperatura inferior a 0° , y estar expuesto a una lluvia, es extremadamente peligroso, porque la lluvia se hiela al tomar contacto con el avión, pudiendo formarse así, en poco tiempo, una gran cantidad de hielo.

b) Descender desde gran altura y con mucha velocidad a través de una nube es peligrosísimo, porque el avión conserva todavía la baja temperatura, lo que facilita la formación de hielo.

c) El cruce de una nube favorable a la formación de hielo conviene efectuarlo lo más rápidamente posible, tratando por todos los medios de ganar altura.

d) Si la masa nubosa es muy potente, de manera que no puede ser sobrevolada, conviene atravesarla en el sentido de su menor extensión.

e) Atravesar una nube de temperatura muy baja, por ejemplo entre -10° y -22° , es inofensivo, porque contiene pocos productos de condensación, de manera que la cantidad de hielo que se puede formar es pequeña.

f) Cuanto más alto se vuela, menor es el peligro de que se forme hielo en cantidad peligrosa.

g) En invierno conviene volar un par de centenares de metros "por encima" de las nubes capaces de producir hielo; o por lo menos, volar a una altura en que la temperatura del aire es ya inferior a -15° .

h) En verano es aconsejable volar "por debajo" de las nubes peligrosas, o sea a poca altura, aprovechando la temperatura elevada de la capa atmosférica cercana al suelo, siempre que las condiciones orográficas lo permitan.

Hay que tratar de salir con la mayor rapidez de la zona de formación de hielo; por esto, ¡VUÉLESE LO MÁS VELOZMENTE QUE SEA POSIBLE!, y si hay ya acumulación de hielo en el avión, ¡ATERRÍCESE MIENTRAS SE PUEDA!

149. Protección técnica contra la formación de hielo. — Para impedir la formación de hielo, la industria aeronáutica ha ideado varios procedimientos.

a) PROCEDIMIENTO MECÁNICO. — Consiste en acomodar neumáticos en los bordes de ataque del avión. Con su inflado y desinflado alternados se consigue aflojar el hielo formado y desprenderlo del avión. El inconveniente de este procedimiento consiste en la modificación de las condiciones aerodinámicas del perfil de las alas, pues aumentan la resistencia en un 15 % si están desinflados, y en 100 % si están inflados.

b) PROCEDIMIENTO QUÍMICO. — Consiste en untar los bordes de ataque de la hélice con un fluido especial, que permanece en estado líquido aun a temperaturas muy bajas, de manera que el hielo no puede adherirse a ellos. Esta película protectora tiene que ser renovada continuamente, porque el viento y la lluvia la destruyen con facilidad, exigencia que es difícil cumplir.

b) PROCEDIMIENTO TÉRMICO.— Consiste en el calentamiento de los bordes de ataque, sea por una corriente eléctrica o por el calor de los gases de escape, de manera que se derrita la capa de hielo en contacto con el avión, desprendiéndose en consecuencia todo el hielo formado. Si bien la cantidad de calor necesario es grande —80 calorías por cada centímetro cúbico de hielo a derretir—, este procedimiento da buen resultado, siempre que se elija para los bordes de ataque un material adecuado, de poca resistencia eléctrica y de escaso calor específico.

Es necesario calentar también los vidrios de la cabina, la toma de aire y la tubería del instrumental.

Uno de los elementos vitales del avión es el CARBURADOR. Su funcionamiento no puede ser interrumpido, ni aun aminorado, sin grave peligro para el vuelo. Por esto el carburador exige una atención especial cuando se vuela en condiciones propicias para la formación de hielo.

Una buena carburación exige una relación constante entre la cantidad de aire aspirado y la cantidad de combustible pulverizado, y una perfecta mezcla entre estos dos elementos, la que sólo se consigue a temperatura algo elevada. La formación de hielo en la tubería de aspiración disminuye la cantidad de aire que penetra en el carburador, con lo cual la mezcla detonante resulta demasiado rica, su combustión retardada, y en consecuencia, disminuido el rendimiento del motor. La rapidez con que se forma el hielo aumenta con la cantidad de gotitas sobrefusionadas que hay en el aire. También es perjudicial la baja temperatura del aire que penetra en el carburador, porque dificulta la evaporación de la nafta, y con esto la formación de una mezcla detonante perfecta. Todas estas circunstancias son agravadas por el hecho de que la vaporización del combustible insume mucho calor, con lo cual se facilita la formación de hielo. Por estas razones puede ya formarse hielo en el carburador cuando la temperatura del ambiente es todavía cercana a $+18^{\circ}\text{C}$.

La *defensa del carburador* contra la formación de hielo consiste en el calentamiento de la cámara de combustión y de las tuberías de admisión con agua o aceites calientes, o con el calor de los gases de escape por una parte, y por otra, en la preparación de una mezcla no-congelable, que se consigue inyectando alcohol al carburante, en el momento de su pulverización.

150. Protección meteorológica contra la formación de hielo.— La formación de hielo sobre el avión puede ser evitada *no volando* a través de nubes que puedan producirlo. Los servicios meteorológicos de los campos de aviación pueden señalar a los aviadores las alturas y las capas de nubes peligrosas para el vuelo, en que es probable la formación de hielo. Asimismo, pueden indicar las alturas convenientes para el vuelo, inclusive la ruta a seguir, por las que, según toda probabilidad, el avión no corre ningún peligro.

Para poder prestar esta ayuda, el servicio meteorológico tiene que estar informado sobre las condiciones atmosféricas reinantes en las distintas alturas, especialmente en lo que se refiere a temperatura, grado de humedad, nubosidad y naturaleza de los productos de condensación. Esta información se puede obtener:

- a) por medio de aviones de exploración;
- b) „ „ „ sondeos meteorológicos completos;
- c) „ „ „ observaciones de altura.

Si no es posible obtener esta información, resulta útil el conocimiento de las condiciones atmosféricas imperantes en el suelo. Con estos datos y con la ayuda del diagrama de Neuhoff pueden ser deducidas con bastante aproximación las temperaturas que reinan en los distintos niveles, particularmente en el nivel de condensación. Las temperaturas así deducidas permiten opinar sobre la naturaleza de los productos de condensación existentes, y su mayor o menor peligrosidad para la formación de hielo. Especial valor tiene el conocimiento de la altura de la isoterma de 0° .

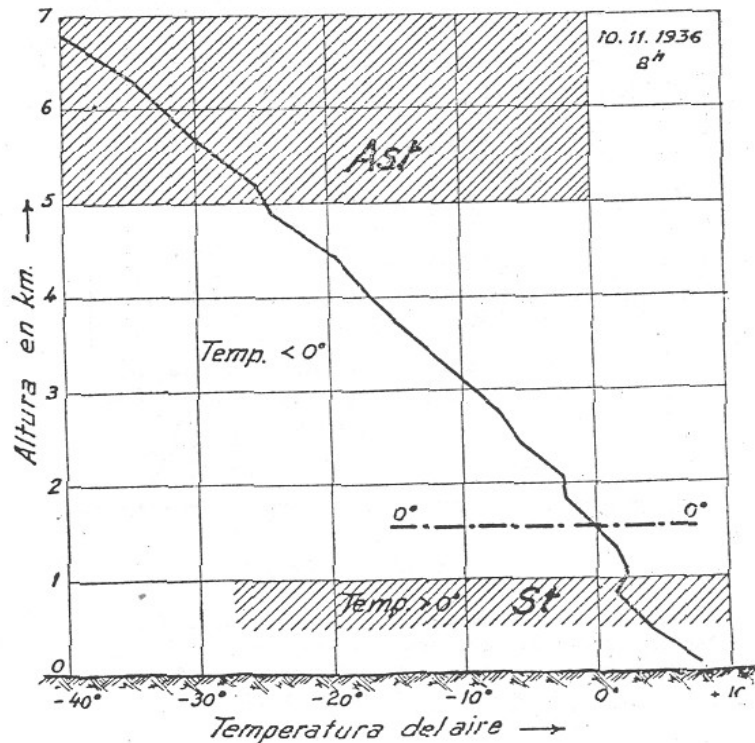


FIG. 146. — Ningún peligro de formación de hielo. La nube *St* es demasiado caliente y la nube *Ast* demasiado seca para que pudiera formarse hielo en cantidad apreciable.

A continuación presentamos cuatro estados de tiempo registrados en el campo de aviación de Le Bourget, Francia, sacados del *Manuel de meteorologie du pilot*, de G. Dédébant y A. Viaut, que ilustran bien sobre la utilidad que el servicio meteorológico puede prestar a la aviación.

1er. caso (fig. 146). — Existen dos nubes stratus, una entre 500 y 1000 m de altura, designada con *St*, y otra, más voluminosa, encima de los 5000, designada con *Ast*. En la primera nube “no puede haber” formación de hielo, porque su temperatura es superior a 0° . Sólo si el avión penetrara en esta masa muy enfriado, como resultado de un rápido descenso desde gran altura, “podría haber” peligro de tal formación. En la nube *Ast* “puede” haber formación de hielo, pero sólo en pequeña cantidad. Debido a la baja temperatura reinante, inferior a -25° , no puede haber en ella muchos productos de condensación. El hielo que se formara sería “escarcha de nieve”, entremezclada con “escarcha cristalina”.

2º caso (fig. 147). — En la nube *St*, de poca altura, no hay que temer la formación de hielo. Su elevada temperatura, término medio $+5^{\circ}$, lo impide. No así en la gran masa nubosa *Nbst*, que se extiende entre 1000 y 5000 m de altura. Esta nube representa un caso típico de nube peligrosa para la aviación. Desde la isoterma de 0° , o sea desde 1200 m de altura para arriba, el peligro de que se forme

hielo es sumamente grande. El avión que penetrará en esta masa pronto quedaría afectado por una escarcha formada por las gotitas sobrefusionadas que contiene la

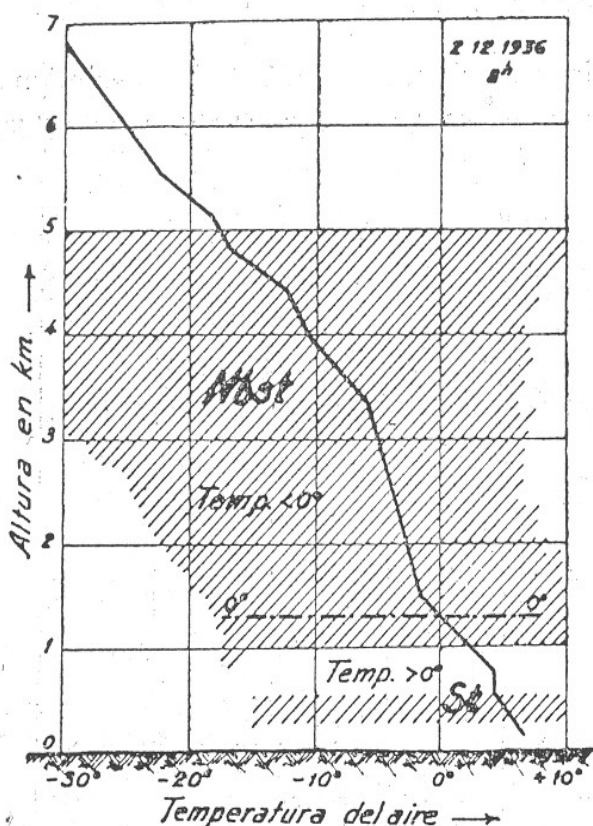


FIG. 147. — En la nube *St* no se puede formar hielo porque su temperatura es elevada. En oposición, la nube *NbSt* es peligrosísima desde la isoterma de 0° para arriba.

entre los 200 y 700 m de altura, porque dentro de ella reina una temperatura inferior a 0° . Volando más alto que 700 m, no existe peligro alguno; la temperatura es superior a 0° .

nube, adquiriendo así las características de una "escarcha blanda" o "dura", según la altura del vuelo.

3er. caso (fig. 148). — Hay una sola nube entre los 4 y 5 km, *Ast*, compuesta de gotitas de agua sobrefusionadas. Volando a través de esta masa se formaría hielo, del tipo de "escarcha blanda". Pero también debajo de esta nube existe peligro, siempre que llueva desde la nube, excepto en el espacio entre 700 y 2000 m, limitado, tanto en su base como en su techo, por la isoterma de 0° , porque la temperatura es superior a 0° . El peligro consiste en que al ser chocadas las gotitas de agua se congelarían, formando a la larga una "escarcha" en los bordes de ataque del avión. La altura más favorable para el vuelo se encuentra, en este caso, a 1300 m de altura.

4º caso (fig. 149). — Existe una nube *Stcu* entre 200 y 1000 m de altura. Peligro de formación de hielo sólo existe dentro de la capa comprendida entre

C) CARACTERÍSTICAS DE LAS PRECIPITACIONES

En la descripción que sigue se tuvo en cuenta, en lo posible, el trabajo de TOR BERGERON: *Definición de los hidrometeoros*. No existiendo todavía una terminología adecuada en idioma español, se dan también las respectivas designaciones en las otras lenguas —inglés, francés, italiano y alemán—, entresacadas del *Diccionario Meteorológico*, en seis idiomas, del mismo autor.

151. La lluvia. — Por "lluvia" se entiende, en general, toda precipitación que llega a la superficie de la tierra en forma líquida. El tamaño de las gotas de lluvia oscila entre

0,15 y 4,5 mm de diámetro; la velocidad de caída, entre 0,5 y 8,0 m/sec.

Las principales variedades de lluvia son:

a) LLUVIA (en inglés: RAIN; en francés: PLUIE; en italiano: PIOGGIA; en alemán: REGEN); suele ser de mediana duración y de mediana densidad. Abarca superficies de regular extensión. Se compone de gotas mayores de 0,5 mm de diámetro, que caen con una velocidad superior a 3 m/sec. La nube que la genera es la nimbostratus. Según su mayor o menor intensidad, se las denomina *lluvia fuerte, moderada o liviana*.

b) LLUVIA GENERAL (ingl.: STEADY RAIN, O CONTINUOUS RAIN; fr.: PLUIE ÉTENDUE O CONTINUE; it.: PIOGGIA GENERALE O CONTINUA; al.: LANDREGEN); es una lluvia de larga duración (de 3 a 48 horas) y de mucha densidad (de 10 a 200 mm), que abarca grandes extensiones, comúnmente provincias o países enteros. Es lluvia producida por la elevación de masas aéreas calientes y húmedas. La elevación puede ser "activa", o sea efectuada por sus propios medios, escalando una masa aérea fría que se encuentra en su camino, o "pasiva", siendo elevada ella misma por una masa aérea fría que avanza, sin que el gradiente térmico sea superadiabático. Aquéllas son lluvias producidas en el "frente caliente" (fig. 128); éstas, en el "frente del pampero" (fig. 130). Las nubes que originan las lluvias generales son las nimbostratus y las altostratus precipitans. Estas lluvias son muy frecuentes en las altas latitudes, como la Patagonia, Tierra del Fuego y sur de Chile, especialmente durante la estación de invierno, y particularmente de noche. En los mares ocurren en verano. Las gotas que las componen son relativamente grandes.

c) LLOVIZNA (ingl.: DRIZZLE; fr.: BRUINE; it.: PIOVIGGINE; al.: NIESELN); suele ser también de larga duración, pero siempre es de poca densidad, no pasando de 1 mm por hora. Las lloviznas se producen en igualdad de condiciones que las lluvias generales, pero las masas aéreas de que provienen, o no son muy húmedas o no fueron elevadas muy alto. En general, las lloviznas son precipitaciones uniformes, formadas sólo por gotitas menores de 0,5 mm de diámetro, las que, debido a la pequeña velocidad de caída que tienen (inferior a 3 m/sec), parecen flotar en el aire, expuestas a ser arrastradas por el viento.

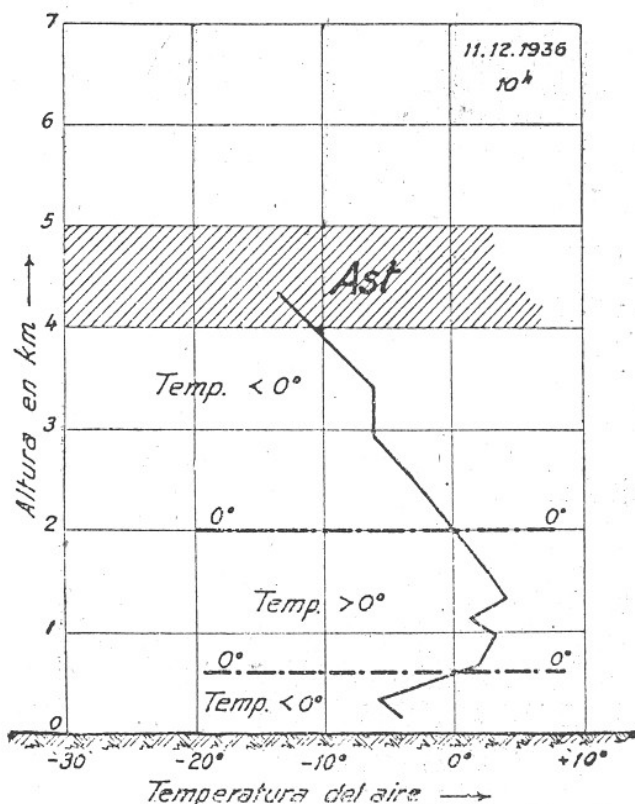


FIG. 148. — Cayendo lluvia de la nube Ast, el espacio debajo de ella es peligroso para el vuelo, excepto la parte comprendida entre las dos isotermas de 0°, en que la temperatura es un tanto elevada. La altura más favorable para el vuelo es de 1300 m.

d) **GARÚA** (ingl.: DRIZZLING FOG; fr.: BROUILLARD BRUINANT; it.: NEBBIA PIOVIGGIOSA; al.: NEBELREISSEN); es una "llovizna de niebla". Las neblinas de suelo y las neblinas de altura suelen ser sus alimentadoras. No afecta mayormente la visibilidad. Moja de todos los lados. Contra ella, el paraguas no defiende. La cantidad de agua que suministra es, desde luego, pequeñísima. Las garúas son muy frecuentes en las costas chilenas, especialmente durante los meses de agosto y septiembre, época en que las neblinas suelen tener un espesor de 300 a 400 m.

e) **CHAPARRÓN** o **CHUBASCO** (ingl.: SHOWER; fr.: AVERSE; it.: ROVESCIO O PIOVACO; al.: SCHAUER); son lluvias breves y poco densas.

f) **AGUACERO**; es también una lluvia breve, pero a diferencia del chaparrón, muy abundante. Sus variedades más importantes son:

f') **AGUACERO FUERTE** (ingl.: DOWNPOUR; fr.: PLUIE BATAVANTE; it.: ACQUAZZONE FORTE; al.: PLATZREGEN); es una lluvia breve, muy fuerte, y reducida a una pequeña zona; y

f'') **AGUACERO TORRENTIAL** (ingl.: CLOUDBURST; fr.: AVERS TORRENTIELLE; it.: NUBIFRAGIO; al.: WOLKENBRUCH); es breve, pero fortísimo. Suele producir daños materiales.

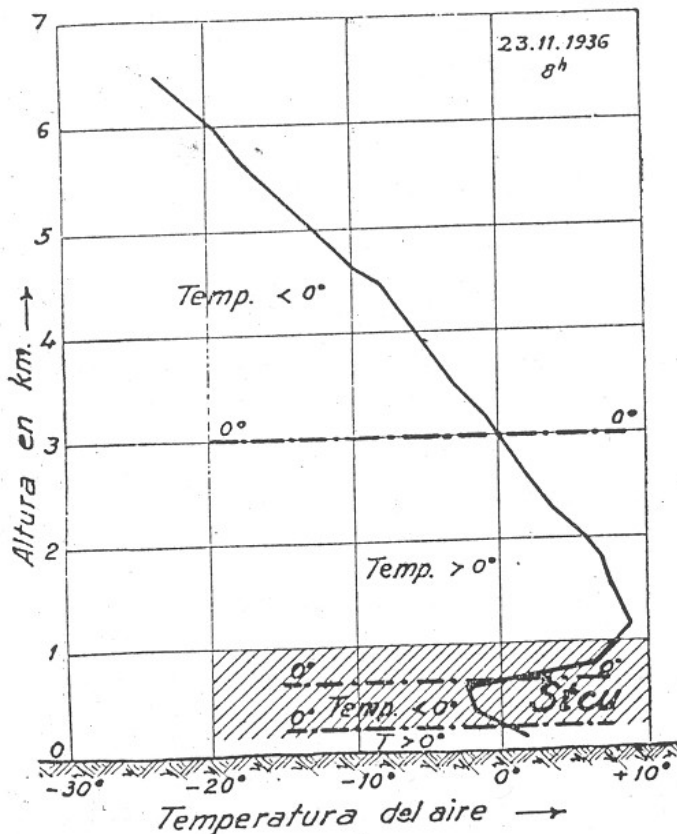


FIG. 149. — Peligro de formación de hielo existe en la nube *Stcu* sólo entre 200 y 700 m de altura, por la baja temperatura reinante. Arriba de los 700 m no existe ya peligro alguno.

-1°/100 m. Cubren siempre sólo pequeñas extensiones de la superficie de la tierra. Desde luego, tales lluvias únicamente pueden producirse en los días muy calientes y muy húmedos, o sea "tormentosos". Son frecuentes en la estación de verano y en las horas de mayor calor. Ocurren principalmente sobre los continentes, en regiones situadas dentro o por lo menos cerca de la región tropical y subtropical. Sobre los mares se producen de preferencia en el invierno. Las nubes que las engendran son las cúmulonimbos, que forman las "tormentas de calor" (figs. 127 y 141), y las tormentas en el "frente frío" (fig. 129) y en el "frente del pampero" (fig. 130), cuando el acomodo de las masas aéreas calientes es "inestable". Estas lluvias se caracterizan por la repentina forma como comienzan y finalizan, y también por rápidos cambios en su intensidad.

152. **Nieve.** — Por "nieve" se entiende, en general, toda precipitación que llega a la superficie de la tierra en

forma *crystalina*. La caída de nieve no es muy frecuente, porque suele perder sus características durante la caída, sea fundiéndose, sea transformándose en granizo.

Las variedades de nieve son:

a) NIEVE COMÚN (ingl.: SNOW; fr.: NEIGE; it.: NEVE; al.: SCHNEE); es vapor de agua cristalizado en sistema hexagonal. Los cristales de hielo primitivos crecen y se agrupan, formando cristales de nieve de formas bellísimas, que a su vez, durante la caída, se coagulan en copos de nieve. La nieve se puede formar a cualquier temperatura por debajo de 0° ; los copos de nieve, sólo cerca de la temperatura de fusión. El tamaño de los copos de nieve puede alcanzar a 12 cm. El tamaño grande dificulta la caída. La velocidad de caída no pasa los 2 m/sec.

b) AGUANIEVE (ingl.: SLEET, RAIN AND SHNOW; fr.: NEIGE ET PLUIE MÊLÉES; it.: NEVE E PIOGGIA MISTE; al.: SCHLACK, REGENSCHNEE); es una mezcla de nieve y lluvia, que se produce cuando la nieve atraviesa una capa aérea caliente, en que los copos pequeños han tenido tiempo suficiente para licuarse (fig. 140).

c) NIEVE GRANULADA (ingl.: GRANULAR SHNOW; fr.: NEIGE EN GRAINS; it.: NEVE GRANULOSA FINE; al.: GRIESEL); está formada por granos blancos, opacos, algo aplanados, cuya dimensión no pasa de 1 mm. Cuando tocan tierra no rebotan, ni se rompen. La nieve granulada representa una formación intermedia entre la nieve y el granizo blando. Su esqueleto primitivo lo forman cristales de nieve, que luego son recubiertos por las gotitas de agua en estado de sobrefusión con que chocan durante su caída (fig. 142). La nieve granulada cae, en general, en temperaturas debajo de 0° , pero en un ambiente sobresaturado respecto del agua, o sea de humedad relativa superior a 100 %.

d) AGUJAS DE HIELO (ingl.: ICE CRYSTALS, ICE NEEDLES; fr.: AIGUILLES DE GLACE, POUDRIN DE GLACE; it.: AGHI DI GUIACCIO; al.: EISNADELN); son cristales de hielo muy pequeños, no ramificados, que tienen formas de escamas o de bastoncitos, y son tan pequeños, que parecen flotar en el aire. Se notan fácilmente cuando brillan en el sol, como "polvo de diamante", produciendo variados fenómenos ópticos. Es una precipitación que sólo se forma en temperaturas muy bajas. Las regiones polares y las altas capas atmosféricas son sus verdaderos dominios.

La nieve, con todas sus variedades, es un producto típico de las nubes *stratus*. En nubes comunes se forma sólo a gran altura, donde la temperatura es inferior a -22° .

153. Granizo. — Por "granizo" se entiende, en general, toda precipitación que llega a la superficie de la tierra en forma *sólida, amorfa*. El granizo no es ninguna forma original de la precipitación, sino que se deriva de la nieve (fig. 141).

Las variedades de granizo son:

a) GRANIZO BLANDO (ingl.: SOFT HAIL; fr.: GRÉSIL MOU; it.: NEVE GRANULOSA FRIABILE; al.: REIFGRAUPELN); grano blancuzco, opaco, quebradizo y desmenuzable con los dedos. Al tocar el suelo rebota; a menudo se rompe. Su tamaño oscila entre 2 y 5 mm. Se forma por adhesión de gotitas de agua sobrefusionadas a un cristal de nieve.

b) GRANIZO DURO (ingl.: SMALL HAIL; fr.: GRÉSIL DUR; it.: GRAGNUOLA; al.: FROSTGRAUPELN); granizo blando, recubierto ya por una capa de hielo. Se forma cuan-

do el granizo blando atraviesa una nube de agua. Las gotitas de agua se desparra- man sobre el mismo, antes de congelarse. Su aspecto es vidrioso, semitransparente; no se aplasta fácilmente. No se rompe ni rebota cuando toca el suelo. Se forma prin- cipalmente en nubes cúmulus.

c) GRANIZO y PIEDRA (ingl.: HAIL; fr.: GRÊLE; it.: GRANDINE; al.: HAGEL); gra- nos de hielo de considerable tamaño. Los de menos de 2 cm de diámetro se llaman granizo; los mayores, piedra. El granizo suele tener una estructura homo- génea, mientras que en la piedra se observa comúnmente una alternancia de cá- scaras transparentes con otras opacas. Estas cáscaras se forman en una nube de tem- peratura inferior a 0° y compuesta por gotitas de agua sobrefusionadas; aquéllas, en nubes de tempestad superior a 0° , y compuestas de gotitas de agua líquida.

Tanto el granizo como la piedra son productos de los días de mucho calor y de mucha humedad, o sea de los días tormentosos. Se forman en las grandes "nubes de tormenta", en los cúmulo- nimbus potentes (fig. 141). Su mayor frecuencia se observa, como es natural, durante la es- tación de verano, durante las horas de la tarde. Son precipi- taciones características de los continentes. En los mares, ra- ras veces cae granizo.

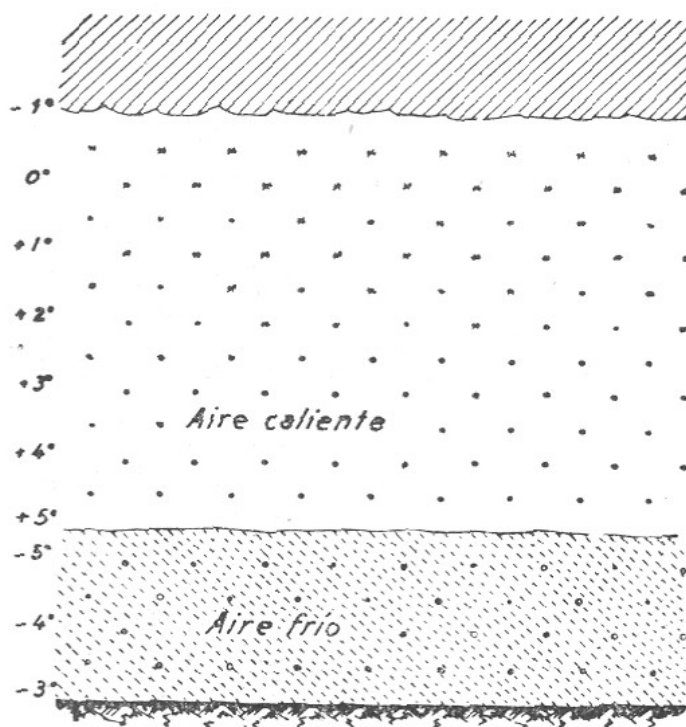


FIG. 150. — Cuando las gotas de agua atraviesan durante su caída una capa aérea fría, se conge- lan parcial o totalmente, llegando en el primer caso como "lluvia congelada" y en el segundo como "garrotillo" a la superficie de la tierra.

d) GARROTILLO (ingl.: GRAINS OF ICE, SLEET; fr.: GRAINS DE GLACE; it.: GRANELLI DI GUIAC- CIÒ; al.: EISKÖRNCHEN); granos de hielo de 1 a 4 mm de diá- metro, comúnmente transpa- rentes o translúcidos, duros, que cuando tocan el suelo re- botan. Son gotas de lluvia que se han congelado al atravesar una capa de aire frío que cu- bre el suelo, y cuya tempera- tura es inferior a 0° (fig. 150).

Si las gotas de agua no tien- nen tiempo de congelarse total- mente, o si el espesor de la capa de aire frío es pequeño, las gotas llegan a tierra en- vueltas en una cáscara de he- lo, que se rompe al chocar contra el suelo, desparramán-

dose el agua que encerraba. Esta variedad de lluvia se llama LLUVIA CONGELADA.

154. Rocío. — Por "rocío" se entiende la precipitación que se deposita sobre la superficie de la tierra, y los objetos y plantas que están en ella, en forma líquida, en temperatura superior a 0° .

Las variedades de rocío son:

a) ROCÍO COMÚN (ingl.: DEW; fr.: ROSÉE; it.: RUGIADA; al.: TAU), que consiste en pequeñas gotitas de agua formadas durante la noche en la superficie de los

cuerpos enfriados, como resultado del proceso de condensación del vapor de agua sobrante en la capa aérea contigua al suelo, enfriada ésta por contacto.

b) EMPAÑAMIENTO (ingl.: SWEATING; fr.: DÉPÔT DE BUÉE; it.: APPANNAMENTO; al.: BESCHLAG), formado por una fina película de agua, adherida a superficies frías, sombrías, pedregosas, como asimismo a muros y árboles, si contra ellos choca una corriente caliente y muy húmeda. La tierra desnuda o cubierta de vegetación no la produce.

155. **Escarcha.** — Por “escarcha” se entiende toda precipitación que se deposita sobre la superficie de la tierra, y los objetos y plantas que la cubren, en forma *sólida*, cristalina o amorfa, en una temperatura inferior a 0°.

Las variedades de escarcha son:

a) ESCARCHA PLATEADA (ingl.: SILVER THAU; fr.: GIVRE; it.: APPANNAMENTO GELATO; al.: FROSTBESCHLAG), que consiste en vapor de agua sublimado en forma de cristales de hielo. Se deposita, en tiempo despejado, sobre los objetos fríos expuestos a corrientes de aire sobresaturado respecto del hielo, a cualquier hora del día.

b) ESCARCHA CRISTALINA (ingl.: HOAR FROST; fr.: GELÉE BLANCHE; it.: BRINA; al.: REIF); es parecida a la escarcha plateada, y está constituida también por vapor de agua sublimado. Se forma en tiempo despejado y calmo, pero sólo a la mañana, cuando el enfriamiento nocturno del aire pasó el punto de rocío, siempre que éste se encuentre por debajo de 0°.

c) ESCARCHA DE NIEVE, o simplemente NIEVE (ingl.: SNOW; fr.: NEIGE; it.: NEVE; al.: SCHNEE); se compone de cristales de nieve, que se adhieren fuertemente a los objetos expuestos al viento en una neblina o nube.

d) ESCARCHA BLANDA (ingl.: SOFT RIME; fr.: GIVRE MOU; it.: GALAVERNA; al.: RAUHREIF); se forma en una nube o neblina, por adhesión y congelación de pequeñas gotitas de agua sobrefusionadas. Es opaca, blanda, y algo áspera. Crece contra el viento.

e) ESCARCHA DURA (ingl.: HARD RIME; fr.: GIVRE DUR; it.: CALABROSA; al.: RAUHFROST); también se forma en una neblina o nube, como consecuencia de la congelación retardada de las grandes gotitas de agua sobrefusionadas. Es más transparente, lisa y dura que la anterior.

f) ESCARCHA DE LLUVIA (ingl.: GLAZE, GLAZED FROST; fr.: VERGLAS; it.: VETRO-NE, GELICIDIO; al.: GLATTEIS); es una capa de hielo homogéneo y transparente, que se forma cuando llueve si la temperatura del suelo es inferior a 0° (fig. 151).



FIG. 151. — “Escarcha de lluvia” formada sobre una planta de temperatura inferior a 0°.

D) CONJUNTOS DE PRECIPITACIONES

156. Generalidades. — El proceso más eficaz para producir un exceso de vapor de agua en el aire es su enfriamiento. El enfriamiento más rápido lo produce la elevación. Ésta puede realizarse por distintas causas. Cada causa origina “ciertas formas” de nubes y su agrupación en “determinados sistemas”. A cada sistema corresponden, a su vez, determinados “tipos de precipitaciones”. Por estas razones, las precipitaciones pueden ser clasificadas también conforme a la causa que ha ocasionado la elevación del aire.

Esta causa puede ser: un obstáculo natural que se opone al fluir del aire, como por ejemplo una loma, una montaña o serrañía; un obstáculo fortuito, formado por la presencia de una masa aérea fría; el encuentro con otra masa aérea de iguales características físicas, y por último, la caída de una masa fría, pesada, de la altura, y su derramamiento por la superficie de la tierra, desalojando al aire caliente y liviano que cubre el suelo. Las denominaciones de los conjuntos respectivos son:

- a) precipitaciones orográficas;
- b) precipitaciones frontales;
- c) precipitaciones ciclónicas;
- d) precipitaciones convectivas o de tormenta.

Las precipitaciones originadas por otras causas, por ejemplo, por pérdida de calor por irradiación, o por contacto con suelo frío, son de escasa importancia. De ellas nos hemos ocupado en el capítulo III, C: Formación de neblinas.

Los pormenores de cada elevación están determinados por el *estado de equilibrio* en que se encuentra el aire. Si el gradiente térmico es menor de $-1^{\circ}/100$ m, este estado es “estable”. El aire sólo puede elevarse mediante la fuerza que posee en su energía de movimiento. Esta elevación origina únicamente precipitaciones moderadas, un tanto uniformes, que cubren grandes extensiones. Si, por lo contrario, el gradiente térmico es mayor de $-1^{\circ}/100$ m, el estado de equilibrio es “lábil”; el aire puede elevarse por sus propios medios. Estas elevaciones suelen ser violentas y alcanzar grandes alturas; las precipitaciones originadas son, por lo común, abundantes y muy variadas, pero sólo cubren pequeñas extensiones.

Las precipitaciones pueden ser clasificadas también, por esta razón, según el *grado de estabilidad* que poseen las masas aéreas antes de iniciar el ascenso, distinguiendo:

- a) precipitaciones de masas aéreas “estables”;
- b) precipitaciones de masas aéreas “inestables”.

Las precipitaciones convectivas o de tormentas sólo pueden producirse cuando el estado de equilibrio de las masas aéreas es “lábil”. Las precipitaciones orográficas y frontales, también en el caso de que el

equilibrio sea "estable"; las precipitaciones ciclónicas, en cualquier estado de equilibrio.

157. **Precipitaciones orográficas.** — Si una masa aérea en movimiento encuentra un obstáculo orográfico, se eleva. Durante la elevación se enfría. Alcanzado el punto de rocío, principia la eliminación del vapor de agua excedente. Los productos de condensación, gotitas de agua o cristales de nieve, según la temperatura reinante, crecen progresivamente, hasta que por último, debido a su peso, se precipitan a tierra.

Las neblinas y nubes que se forman de esta manera y la clase de precipitaciones que ocurren, dependen del estado térmico del aire con respecto al suelo.

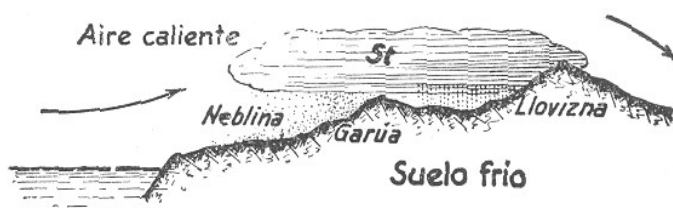


FIG. 152. — Precipitación orográfica producida en una masa aérea "estable".

a) **SUELO FRÍO, AIRE CALIENTE.** — Si la masa aérea que se mueve es un tanto caliente y el suelo frío, la capa que está en contacto con el suelo se enfría más de lo que corresponde a la elevación. Su acomodo es "estable".

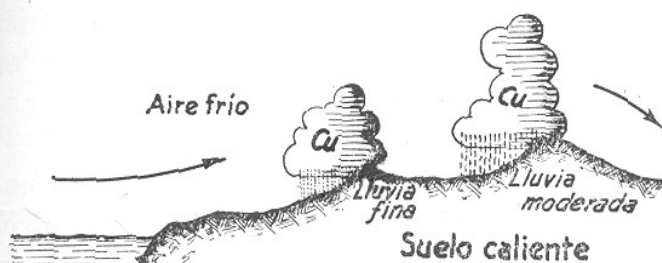


FIG. 153. — Precipitación orográfica producida en una masa aérea "inestable".

Alcanzado el punto de rocío, principia la formación de neblinas o de nubes estratificadas. Las precipitaciones que pueden ocurrir son sólo garúas, lloviznas y lluvias moderadas o nevadas (fig. 152).

b) **SUELO CALIENTE, AIRE FRÍO.** — Si, por lo contrario, la masa aérea que se mueve es fría y el suelo caliente, la capa de aire que está en contacto con el suelo se enfría menos de lo que corresponde a la elevación. Su acomodo resulta "inestable". Alcanzado el punto de rocío, se forman nubes esporádicas, de tipo cúmulus. Las precipitaciones que ocurren son más variadas y más dispersas, consistiendo en chaparrones o, en casos extremos, en granizadas. En la estación de invierno predominan, naturalmente, las nevadas (figura 153).

Las precipitaciones orográficas están ligadas a la configuración del terreno. Su intensidad y composición varía conforme se modifica el estado termohigrico de las masas aéreas que las producen.

EJEMPLOS de *precipitaciones orográficas* de ambas clases se tienen en el sur de Chile, donde masas aéreas venidas del Pacífico chocan contra la cordillera de los Andes y sus estribaciones, en su marcha hacia el Atlántico. En invierno, la tierra es fría y los océanos, relativamente calientes; las masas aéreas que invaden las costas, templadas. Su acomodo, debido al enfriamiento en su base, es "estable". Ésta es la época de las neblinas y las garúas en las costas, y de lloviznas y lluvias moderadas, pero persistentes y uniformes, en las cordilleras. En verano, la tierra es caliente, y los océanos, relativamente fríos; el aire que penetra, frío. Debido al calentamiento que experimenta en su base, su estado de equilibrio es "lábil". Hay menos uniformidad en las precipitaciones, pero mayor abundancia. Es la época de los chaparrones y de las granizadas en las cumbres cordilleranas.

158. Precipitaciones frontales. — Encontrándose masas aéreas en movimiento, las frías representan verdaderos obstáculos para las calientes. El resultado es siempre la elevación de la masa caliente, puesto que es más liviana que la fría. El enfriamiento originado es motivo de formación de nubes, y si existe humedad suficiente, también de precipitaciones. Los "sistemas de nubes" que se forman y los "conjuntos de precipitaciones" que se producen dependen de la dirección del movimiento de las masas y de su estado de equilibrio.

a) **PRECIPITACIONES DEL FRENTE CALIENTE.** — Si una masa aérea caliente se mueve aproximadamente en la misma dirección que una masa aérea fría, pero con mayor velocidad, se eleva por su propia fuerza, radicada en su energía cinética. Durante la elevación se enfría. El conjunto de nubes que se forma en la superficie de separación de las dos masas es el llamado sistema de nubes del frente caliente (fig. 128).

En este caso, el aire caliente, motivo de la formación de estas nubes, se encuentra en movimiento. Está bien revuelto, y por consiguiente, en la mayoría de los casos, en un estado de equilibrio *estable*. Por esta razón, las precipitaciones que se producen suelen ser uniformes, y consisten en lluvia, llovizna o nevada, conforme sea la temperatura que reina en la superficie de la tierra (ver fig. 140). Raras veces, y sólo por excepción, el estado de equilibrio suele ser *lábil*, y en consecuencia, las precipitaciones más violentas y desiguales. La escasez de truenos y relámpagos es una comprobación inequívoca de ello.

b) **PRECIPITACIONES DEL FRENTE FRÍO.** — Si es la masa aérea fría la que avanza por la superficie de la tierra, con su frente eleva el aire caliente que encuentra en su camino. Debido al enfriamiento que se produce durante esta elevación, se forma un conjunto de nubes, llamado sistema de nubes del frente frío (figura 129).

En la mayoría de los casos, el aire caliente afectado se encuentra en reposo, o sólo en movimiento lento, concordante con el del aire frío. En estas condiciones, el aire que se halla en contacto con el suelo puede estar muy calentado, por lo cual el gradiente térmico supera el valor de $-1^{\circ}/100$ m. El estado de equilibrio del aire caliente es, en este caso, *inestable*, LÁBIL. Por esta razón, las precipitaciones que se producen son desiguales, muy variables y algo violentas, y consisten en chaparrones o chubascos formados por lluvia, y muchas veces acompañados de granizo.

c) PRECIPITACIONES DEL FRENTE DEL PAMPERO. — Si la masa aérea fría que avanza se enfrenta con una masa caliente en movimiento, como frecuentemente sucede en la gran llanura argentina, se desarrollan análogos fenómenos. La masa caliente es elevada y enfriada. El conjunto de nubes que se forma es el llamado sistema de nubes del frente del pampero.

Este sistema de nubes parece compuesto de dos partes. La *parte delantera*, formada en la cabeza del pampero mismo, suele tener las características del sistema de nubes del frente frío (fig. 129) y estar acompañada también por el conjunto de precipitaciones ligadas al mismo. La *parte trasera*, formada sobre el dorso de la masa fría que avanza, suele tener los rasgos del sistema de nubes del frente caliente (fig. 130) y estar escoltado por las precipitaciones correspondientes. La razón es sencilla: el aire frío encuentra a veces en su avance aire caliente inestable, y por esta razón adquiere las características de un frente frío, pero este aire, después de la elevación y revoltillo a que es expuesto, uniforma sus condiciones térmicas y se estabiliza; de manera que al ser elevado nuevamente por el dorso de la masa aérea fría, los fenómenos higróscopos carecen ya de la violencia de los anteriores.

El conjunto de precipitaciones que se observa en la cabeza del frente del pampero suele estar compuesto por chaparrones y chubascos; el conjunto que se observa más adelante, por lluvias tranquilas y uniformes.

Las precipitaciones frontales, igual que los sistemas nubosos correspondientes, como formaciones ligadas a las "superficies de separación" de las masas aéreas, participan en el *traslado* de los frentes por la superficie de la tierra, fenómeno que reviste importancia para la comprensión de la evolución del tiempo, y en mayor grado aún para su previsión.

Teniendo en cuenta que en nuestro ambiente geográfico los *cambios del tiempo* los produce una masa aérea polar que avanza en forma de viento PAMPERO, en el Capítulo VII nos ocuparemos más detenidamente de los fenómenos que hasta aquí hemos esbozado.

159. Precipitaciones ciclónicas.— La superficie de la tierra se calienta en forma desigual. Sobre las regiones más calentadas, el aire se dilata, disminuyendo de densidad. También se reduce la presión bajo la cual se encuentra. Hacia estas regiones de baja presión, llamadas antes *regiones ciclónicas*, fluye el aire de los alrededores. Si este aire no acusa diferencia en su temperatura y densidad, no existe

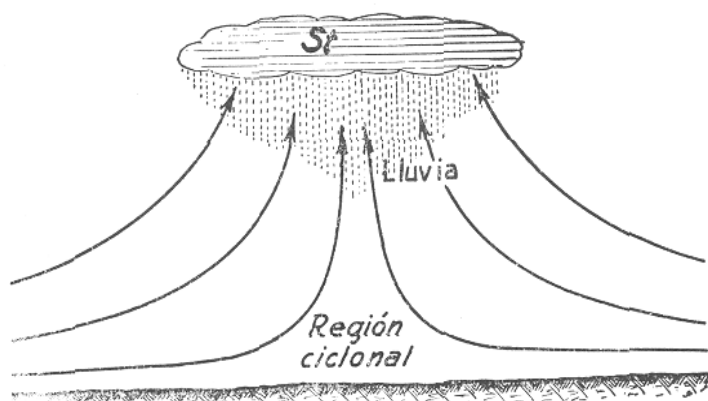


FIG. 154. — Precipitación ciclónica; lluvias finas hasta moderadas, originadas por la elevación de aire convergente.

motivo para una elevación preferencial. Por la "Ley de Continuidad", todo el aire es obligado a elevarse. Las nubes que se forman suelen ser altas, estratificadas; las precipitaciones que ocurren, moderadas (figura 154).

En el pasado se atribuía mucha importancia a esta manera de producirse precipitaciones. La investigación minuciosa ha demostrado, sin embargo, que la supuesta igualdad de condiciones de las masas aéreas en flujo **no** existe. Más frecuente es la presencia de discontinuidades en la atmósfera, que la dividen en masas aéreas individuales, con características físicas diferenciadas.

160. Precipitaciones de tormenta. — Para que pueda formarse una "nube de tormenta" y desprenderse de ella precipitaciones de consideración, es necesario que se eleve del suelo una masa aérea muy caliente y húmeda. Esto ocurre sólo cuando el gradiente térmico es superior a $-1^{\circ}/100$ m, o sea cuando el acomodo de las masas aéreas es inestable, lábil. El impulso necesario proviene ¹ de alguna pequeña masa aérea fría que se mueve por la superficie de la tierra, o de una masa fría pesada, caída de la altura. Cualquiera sea la causa, la elevación suele ser violenta, alcanzando frecuentemente una velocidad de 30 m/sec. Como consecuencia, el enfriamiento del aire es rápido, y la formación de la "nube de tormenta", impetuosa (fig. 127).

Las precipitaciones que caen de la "nube de tormenta" suelen ser breves, pero abundantes, y consisten en chaparrones, chubascos, aguaceros fuertes, de vez en cuando torrenciales, y frecuentemente, también granizo y piedra. La caída se efectúa en determinado orden. La serie se inicia con una granizada, continúa con una lluvia fuerte, prosigue con lluvia moderada, para terminar, antes de finalizar la tormenta, en lluvia fina.

¹ Ver página 167.

Estas etapas en la evolución de una tormenta se encuentran representadas, según W. Findeisen, en el conjunto de la figura 155. En ella, las capas de gotitas de agua, situadas debajo de la isoterma de 0° , se encuentran rayadas hacia la izquierda; las capas de nieve, situadas encima de la isoterma de -22° , rayadas hacia la derecha, y las capas de gotitas sobrefusionadas, rayadas a trazos. El género de precipitación que llega al suelo depende del espesor de esta última capa. Mientras ella es potente, las condiciones son favorables para la formación del granizo, por las razones expuestas en pág. 196. Con

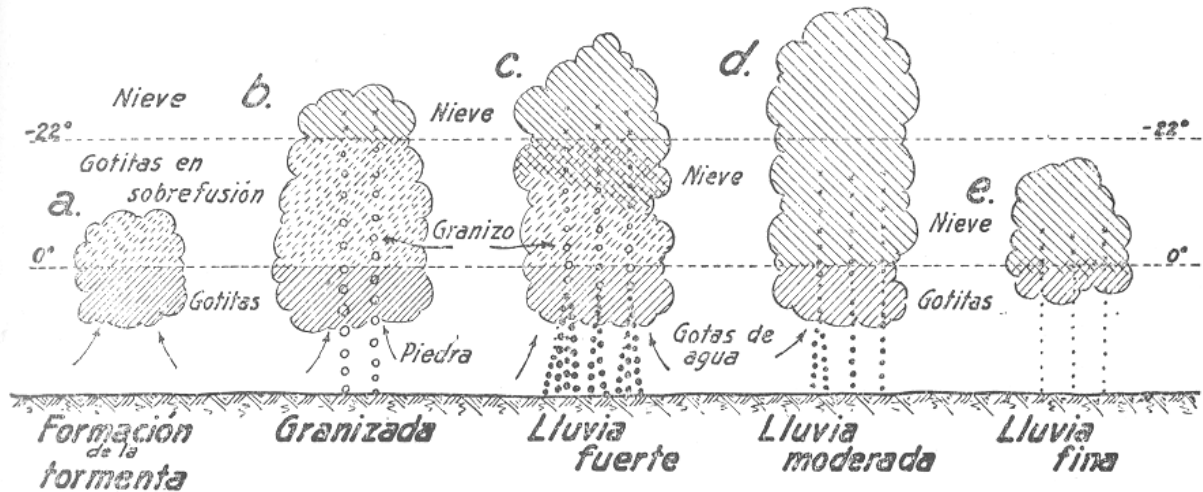


FIG. 155. — Etapas que recorre una tormenta desde su formación hasta su extinción.

su debilitamiento, el tamaño del granizo disminuye, facilitándose de esta manera su licuación en las capas aéreas cercanas al suelo, ya más calientes. A la *lluvia fuerte* sigue la fase de la *lluvia moderada*, y a ésta la de *lluvia fina*.

161. Importancia de la nieve. — La formación de las gotitas de agua por los procesos de condensación y coagulación es lenta. Hasta que se forme una gotita de 2 mm de diámetro transcurren unas 50 horas. Debe existir, por consiguiente, algún otro fenómeno que favorezca su crecimiento. Este fenómeno es la caída de nieve dentro de una nube de gotitas sobrefusionadas.

Los cristales de nieve, y más aún los copos de nieve, tienen un tamaño relativamente grande, por lo cual, al caer dentro de una nube sobrefusionada, chocan con muchas gotitas, atrayéndolas y congelándolas a la vez. Su transformación en granos de hielo es, de este modo, un proceso rápido. La licuación de estos granos en las capas aéreas calientes, cercanas al suelo, produce las grandes gotas de que se componen las lluvias fuertes. La nieve resulta de este modo un elemento indispensable para la formación de las grandes precipitaciones.

La figura 156, confeccionada también con observaciones de W. Findeisen, presenta claramente esta relación. Existe una extensa nube de *Stcu*, de unos 1 200 m de espesor, más o menos a 2 km de altura. De una parte de esta nube llueve moderadamente. Esta lluvia local se explica por la presencia de una nube de nieve, *Ast*, que se encuentra a gran altura y que precipita. Pero sólo la nieve que procede de

su parte central, combada, alcanza a la nube de agua, antes de evaporarse. Esta nieve, al penetrar en la nube, rápidamente se transforma en granizo, que luego, al pasar la isoterma de 0° , principia a licuarse, llegando a tierra en forma de gotitas de agua. No llueve de las partes de la nube en que no ha alcanzado a penetrar la nieve.

162. Producción de lluvias artificiales. — Teniendo en cuenta que las precipitaciones intensas sólo ocurren cuando cae nieve dentro de una nube de gotitas sobrefusionadas, existe la posibilidad de provocar lluvias artificialmente, sembrando, desde un avión, finísimas partículas sólidas higroscópicas —humo de yoduro de plata—, o pequenísimos cris-

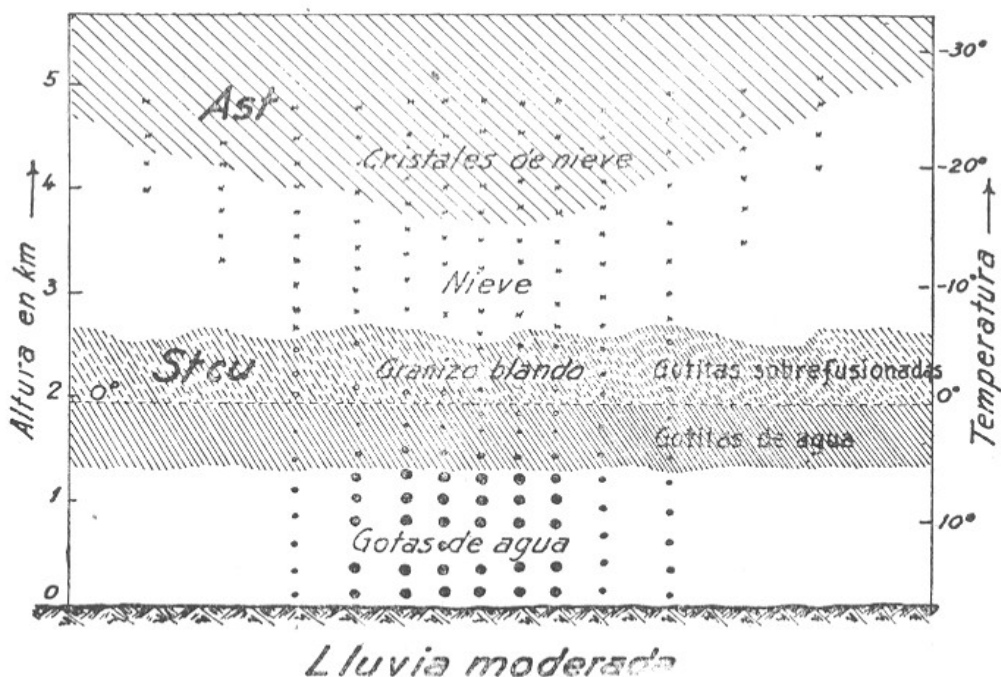


FIG. 156. — Precipitaciones originadas por la caída de cristales y copos de nieve dentro de una nube de gotitas de agua.

tales de anhídrido carbónico $-\text{CO}_2$ pulverizado, llamado “hielo seco”—, sobre una nube apropiada, produciendo granizo en caso de una nube *Cunb*, y lluvias moderadas en caso de *St*.

El procedimiento, ideado por A. Veraart de Reykjavik, Islandia, hace unos veinte años, pero abandonado por su ineficacia, fué empleado con algún éxito durante la segunda guerra mundial, por lo que se abrigaba la esperanza de que su empleo se generalizase, en beneficio de la economía de los pueblos. Estas esperanzas no se han cumplido. De antemano queda descartada la intervención en una “nube de tormenta”, *Cunb*, por el peligro de producir una granizada y no una lluvia. Pero aun en el caso de una nube baja, *St*, *Stcu* o *Nebst*, las posibilidades de éxito son escasas. Para que se produzca una lluvia provechosa, la nube debe ser espesa, contener muchas gotitas de agua ya de tamaño apreciable, y de preferencia en estado de sobrefusión. Además, la capa de aire entre la nube y la tierra tiene que ser fría y húmeda, para que las gotas de agua no se evaporen durante la caída. Por estas razones, sólo en contados casos se puede originar una precipitación de consideración.

Lo desfavorable de este juicio se agrava todavía, si la intervención se produce en presencia de nubes de nieve, porque en este caso sólo se consigue adelantar la lluvia algún tiempo y descargarla en otro lugar que a aquel que la Naturaleza le tenía prefijado. La intervención del hombre puede suscitar en estos casos, particularmente en las comarcas secas, controversias jurídicas de la misma índole que el uso indebido del agua de riego.

El empleo de este procedimiento en la Argentina, sería aconsejable sólo en la región costanera del Atlántico, al sur del río de la Plata, a fin de evitar que, en época de sequía, las nubes de agua se alejen del ambiente sin descargar su contenido.

La designación misma de esta intervención, a la que se llama "lluvia artificial", es objetable, ya que con ella no se produce lluvia donde no existe una nube apropiada. Para hacer llover artificialmente sería necesario aumentar previamente la humedad del aire, lo que será posible una vez dominada la energía atómica, si se la emplea en el calentamiento y, por intermedio de éste, en la intensificación de la evaporación en aquellas partes de los mares que nos proveen de humedad, elemento vital para nuestra vida desde el principio de los siglos.

E) MEDICIÓN DE LAS PRECIPITACIONES

163. Principio de la medición. — El conocimiento del espesor de la capa de agua que, en los casos de precipitación, de no evaporarse, infiltrarse en la tierra o escurrirse hacia las hondonadas del terreno, habría llegado a cubrir el suelo, es de suma importancia. El aparato que se usa para la medición se llama *pluviómetro* (del gr. PLUVIA = lluvia, y METRON = medida). La medición misma debe efectuarse en estado líquido. Si la precipitación se produjo en forma sólida o cristalina, granizo o nieve, respectivamente, debe ser licuada antes de procederse a su medición. La unidad de medida empleada es el MILÍMETRO. Sólo se emplea el centímetro en climatología, donde se indica la precipitación acumulada de todo un mes o año.

Para obtener una medida exacta, tiene importancia la calidad del aparato que se emplea en la recolección y conservación de la precipitación hasta el momento de la medición. Hay que tratar de reducir la evaporación de la precipitación. Para ello, conviene preservar el recipiente del calor exterior. Es importante también, reducir en lo posible la pérdida por el mojado de las paredes del recipiente, particularmente cuando se trata de precipitaciones de escasa cantidad.

164. Pluviómetro común. — El pluviómetro de tipo común consta de un cilindro de latón, de unos 46 cm de altura y 16 cm de diámetro. La parte superior del mismo, llamada "sombrero", termina en un aro de bronce, que posee una sección de 200 cm². Por esta abertura penetra la precipitación en el aparato. Un embudo que se encuentra en el interior de esta pieza, conduce la precipitación a un recipiente colector, ubicado en la parte inferior del cilindro. Entre este colector y el cilindro exterior existe un vacío, para evitar que la precipitación almacenada

se caliente fuertemente. Con el mismo fin, todo el aparato está pintado, además, de color blanco (fig. 157).

Existen pluviómetros de distintas formas, calidades y tamaños. El descrito es el modelo más usual en la actualidad. En el pasado se empleaba mucho el pluviómetro tipo Babinet (fig. 158), por su cómodo manejo, a pesar de que el agua recogida en su interior puede calentarse más de lo admisible y acusar pérdida por la canilla vaciadora. En la actualidad, los pluviómetros se construyen de material plástico, transparente, simplificándose con ello su atención y aun la medición.

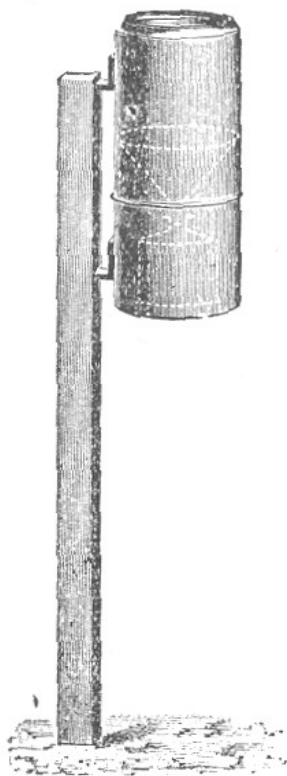


FIG. 157. — Pluviómetro común, con el embudo y recipiente colector, armado sobre un poste, a 1 m del suelo.

Todo pluviómetro debe estar instalado de tal manera que su abertura quede horizontal. Conviene esté incrustado en el suelo mismo, ya que se trata de saber la cantidad de agua que éste recibe. Por razones de comodidad se los instala a 1 m de altura, en un lugar suficientemente abierto, libre de edificación, alejado de muros y de árboles, de modo que pueda captar toda la lluvia que cae. Su instalación en descampado no conviene. El viento, que sopla allí con más intensidad, reduce la cantidad de agua recogida. Los pluviómetros instalados en distintos lugares y alturas recogen igual cantidad de precipitación sólo en tiempo calmo. La diferencia aumenta con la velocidad del viento, y varía con la dirección del mismo.

En regiones donde suelen producirse fuertes nevadas es conveniente usar pluviómetros más voluminosos, con una abertura de 500 cm², e instalarlos a dos metros de altura (fig. 159). Para evitar que el viento pueda sacar del recipiente la nieve ya depositada, se acomoda una cruz metálica en su boca. Ésta reduce notablemente el efecto pernicioso de los remolinos que se forman en el mismo. De los remolinos que se elevan del suelo defiende un cono protector, aplicado a la parte superior del aparato. Los pluviómetros instalados en lugares alejados y de difícil acceso, en que se recogen y conservan las precipitaciones acumuladas en todo un año, se llaman *totalizadores*. La licuación de la nieve y del granizo que penetra en los mismos, y su conservación en estado líquido, se consigue con una pequeña dosis de clorcalcio, y la reducción de la evaporación, con el agregado de aceite.

165. **Medición de la precipitación.** — La cantidad de lluvia recogida por un pluviómetro puede ser medida "directamente"; la cantidad de nieve o granizo, sólo previa licuación en un lugar templado. La

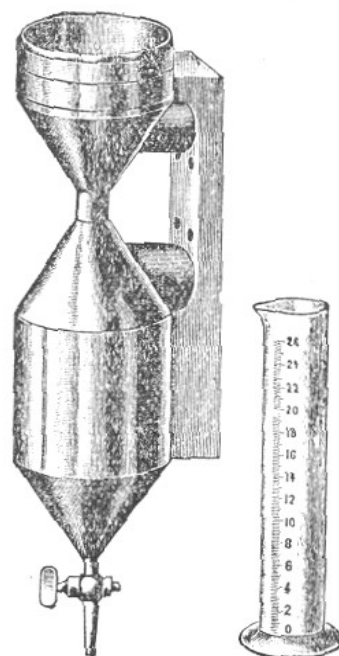


FIG. 158. — Pluviómetro tipo Babinet, con la probeta para la medición de la cantidad de agua caída.

medición se realiza por medio de un vaso de cristal, llamado **probeta**, graduado nominalmente en milímetros; de manera que la lectura de la misma indica la altura de la capa de agua que cubriría el suelo.

Para efectuar la medición se levanta el sombrero del pluviómetro y se saca el recipiente colector del mismo, volcando su contenido en la probeta y leyendo la altura alcanzada en ella, de acuerdo con la graduación que lleva. Si la precipitación fué abundante, la medición se realiza por partes, llenando la probeta cuantas veces sea necesario. La suma de las mediciones parciales es la cantidad total de la precipitación.

En caso de NIEVE, además de expresar la cantidad de agua que suministra, derretida totalmente, o sea su "equivalente en lluvia", es conveniente indicar también el *espesor del manto* con que cubre el suelo. La medición se efectúa con una vara de madera, dividida en centímetros, en varios lugares adecuados.

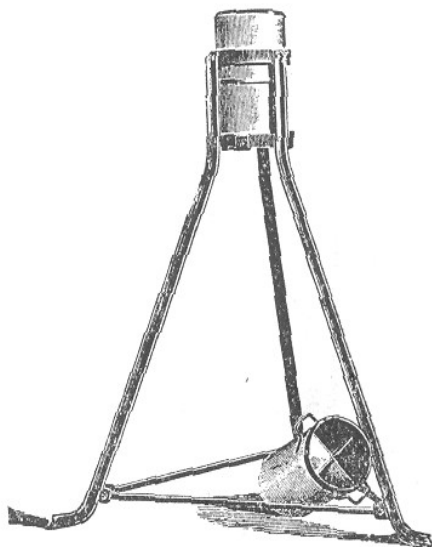


FIG. 159. — Pluviómetro de tamaño grande, destinado a recoger nieve en gran cantidad, o acumular las precipitaciones de todo un año. En este último caso llámase "pluviómetro totalizador".

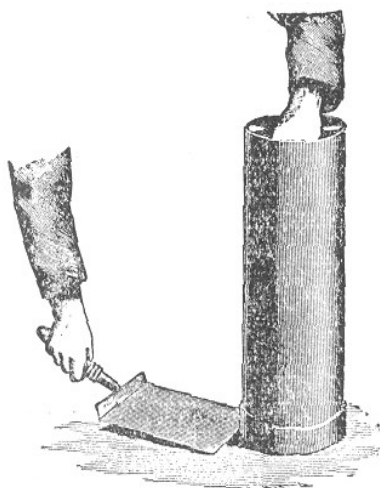


FIG. 160. — Cilindro y pala usados en la extracción de nieve, con fines de determinar su "equivalente áqueo".

Para conocer también su "equivalente áqueo", o sea el contenido en agua de una capa de nieve de 1 cm de espesor, se procede de la siguiente manera: Por medio de un cilindro manuable, de latón, de igual sección que el pluviómetro, o sea 200 cm², y con ayuda de una pala (fig. 160), se corta un determinado volumen de nieve, que es derretido. Dividiendo la cantidad de agua obtenida y medida con la probeta, por la altura de la capa de nieve, se obtiene el valor buscado.

Si ha caído GRANIZO, además de conocer la hora del comienzo y fin del fenómeno, corresponde medir el espesor de la capa que ha cubierto el suelo, así como el tiempo que ha tardado en desaparecer. El tamaño de los granos se puede apreciar comparándolos con circunferencias de diámetro conocido.

Mejor resultado se obtiene si se recoge un determinado número de granos y se los pesa inmediatamente; o se los conserva en un recipiente hasta que se hayan derretido, midiendo después la cantidad de agua que han producido. Siendo el peso específico del granizo aproximadamente 0,8 gr/cm³, a cada gramo de agua

corresponde un volumen de $1,25 \text{ cm}^3$. Dividido el volumen total por el número de granos, se obtiene el volumen medio unitario. Suponiendo que la forma del granizo asemeja a una esfera, el diámetro medio correspondiente puede ser calculado.

EJEMPLO: Se han recogido 7 piedras. Una vez derretidas, el agua producida fué medida con la probeta, dando una altura de 13,2 mm. La probeta corresponde a un pluviómetro de 200 cm^2 de sección, por lo cual el volumen del agua es $1,32 \times 200 = 264 \text{ cm}^3$. El volumen de las piedras, debido a su reducido peso específico, fué mayor: $264 \times 1,25 = 330 \text{ cm}^3$. Como las piedras eran 7, el volumen medio de ellas es $330 : 7 = 47,2 \text{ cm}^3$. Una esfera de este volumen tiene un diámetro de 4,5 cm. Éste fué el tamaño de la piedra caída.

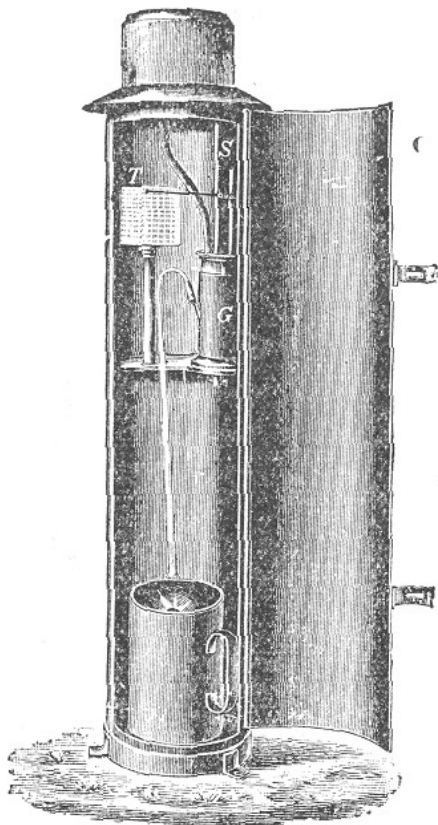


FIG. 161. — Pluviógrafo modelo Hellmann, para el registro continuado de la cantidad e intensidad de las precipitaciones.

166. Pluviógrafo. — Aparatos que permiten registrar tanto la cantidad de la lluvia caída como la intensidad que ha tenido en distintos momentos, se llaman *pluviógrafos*. La figura 161 muestra el clásico modelo de Hellmann. En el mismo, la lluvia es recogida en el pequeño recipiente G, provisto de un flotador, cuya altura se registra, por medio de una varita S, a la cual va adherida una pluma, en una hoja de papel, adherida a un tambor cilíndrico T, movido por una máquina de relojería. Llenado el recipiente hasta el tope —que es el caso cuando la precipitación ha alcanzado 10 mm de altura—, se vacía automáticamente por medio de un sifón, prosiguiendo el registro de la lluvia en la forma descripta.

Un recipiente de dimensiones mayores, que se encuentra en la parte inferior del aparato, recoge y totaliza el agua evacuada por este sifón. La medición de la cantidad acumulada controla el funcionamiento del aparato.

Los registros de los pluviógrafos ilustran acerca de la hora exacta de iniciación y finalización de una precipitación, y sobre la intensidad de la misma en cualquier momento de su desarrollo.

Teniendo suficientemente caliente este aparato, por medio de una lámpara eléctrica, pueden registrarse también las nevadas. Si el aparato es calentado deficientemente, tarda en licuar la nieve; si es calentado excesivamente, intensifica la evaporación.

167. Modos de expresar la magnitud de una precipitación. — La mayor o menor magnitud de una precipitación puede ser expresada de varias maneras, por ejemplo:

a) Por el *espesor o altura* de la capa de agua que habría podido

cubrir el suelo, independientemente del tiempo empleado. Esta medida nos la facilitan el pluviómetro y la probeta.

b) Por la *cantidad* de agua caída por unidad de superficie. La superficie de referencia suele ser el metro, y a veces la hectárea o el kilómetro cuadrado. El volumen de una capa de agua de 1 mm de altura o espesor es igual a

$$1 \text{ litro/m}^2 = 10 \text{ m}^3/\text{ha} = 1\,000 \text{ m}^3/\text{km}^2$$

Considerando que las precipitaciones son a veces abundantes, 200 mm de altura en un solo día, por ejemplo, y que frecuentemente cubren millares de kilómetros cuadrados, se deduce que la cantidad de agua que llega al suelo, en ciertos casos, es formidable.

c) Por el *volumen* de la precipitación, que se obtiene multiplicando la altura de la capa de agua por la superficie cubierta.

Teniendo presente que la altura de la capa de agua es nula por el contorno de la superficie llovida, y que la máxima altura se encuentra en algún punto interior de la misma, el cálculo respectivo debe ser efectuado con prolijidad, descomponiendo la capa total en "capas elementales", de poco espesor, y considerando la extensión de cada una de ellas.

d) Por la *intensidad* de la precipitación, o sea por la relación que existe entre la altura de la capa de agua, obtenida con la probeta, y el tiempo de su duración. La relación suele ser referida a un minuto o una hora, en caso de aguaceros, y a un día en caso de lluvias generales.

El 4 de enero de 1949 cayeron en Córdoba, a las 17, en un lapso de 28 minutos, 33,8 mm de agua. La intensidad de este aguacero fué, por consiguiente, de:

$$\begin{aligned} 33,8 : 28 &= 1,21 \text{ mm/min;} \\ 1,21 \times 60 &= 72,6 \text{ mm/hora.} \end{aligned}$$

La lluvia más intensa de que se tiene conocimiento cayó en Opid's Camp, cerca de Los Ángeles, el 5 de abril de 1926: 26 mm en 1 minuto.

La mayor cantidad de agua caída en un día fué registrada en Cherrapunji, en el norte de la India, del 14 al 15 de junio de 1876; en total, 1 037 mm.

En nuestro medio geográfico, la mayor cantidad de lluvia caída en 24 horas fué, según G. DAVIS, *Clima de la Argentina*, 1901, en:

Paraná, 327 mm; Formosa, 223 mm; Buenos Aires, 125 mm; Córdoba, 143 mm; Tucumán, 140 mm; Mendoza, 49 mm, y Rawson, 72 mm. En Montevideo fueron registrados 172,4 mm.

168. Medición de la evaporación. — Una considerable parte de las precipitaciones *se evapora*, es decir, pasa del estado líquido al gaseoso, y se disipa nuevamente en el espacio. El conocimiento exacto de esta cantidad reviste importancia, pues orienta sobre el mayor o menor grado de SEQUEDAD DEL AIRE. Pero, como hemos visto ¹, la evaporación es un fenómeno complejo. La cantidad de

¹ Ver página 96.

agua evaporada depende de muchos factores. Por esta razón, su medición resulta dificultosa y es poco exacta.

Una información global sobre la intensidad de la evaporación la suministra un sencillo aparato, usado mucho en el pasado: el *evaporímetro de Wild* (fig. 162). Se asemeja a un pesacartas, cuyo platillo está transformado en un recipiente de agua. La graduación que lleva es tal, que la diferencia de dos lecturas indica el espesor de la capa de agua evaporada durante el tiempo transcurrido entre ellas. El aparato suele ser ubicado dentro de la casilla meteorológica, para preservarlo de los rayos solares y las precipitaciones.

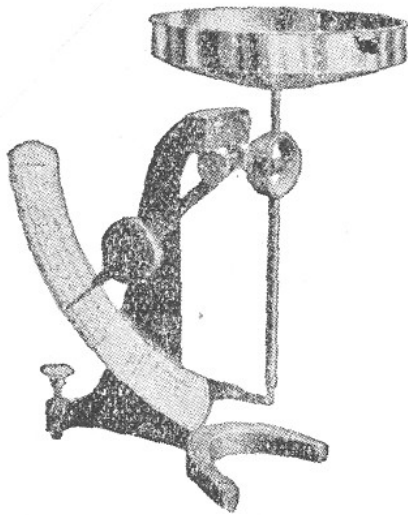


FIG. 162. — Balanza evaporadora de Wild, llamada "evaporímetro".

En Córdoba, este aparato registra en un año una evaporación de 1 300 mm, mientras que las precipitaciones alcanzan a sólo 700 mm. No pudiendo evaporarse más agua que la precipitada, se entiende que sus datos no tienen aplicación directa para el conocimiento del régimen hídrico del suelo, cubierto de plantas. Sus indicaciones son de "valor relativo", y sólo permiten "comparar" el grado de sequedad reinante en los distintos lugares.

Datos más concordantes con la realidad los suministra el *evaporímetro de Piche*, que consiste en un tubo de vidrio, llenado con agua hasta el tope y tapado con una hoja de papel secante. Invertiendo el aparato y colgándolo, esta hoja queda humedecida constantemente, evaporando en proporción con la sequedad del ambiente. La cantidad de agua evaporada entre dos observaciones se obtiene por la diferencia de las lecturas de la graduación que lleva el tubo. Los resultados son más verídicos que los que suministra la balanza de Wild, porque no es ya una superficie de agua que evapora, sino una hoja de papel pastoso, semejante a la tierra de cultivo y a las plantas. Su deficiencia reside en que acusa poco la influencia de la ventilación del lugar. Este inconveniente es salvado en el modelo de *Leistner*, en que el cuerpo evaporador es una esfera pastosa, de 100 cm² de superficie (fig. 163), envuelta en mu-

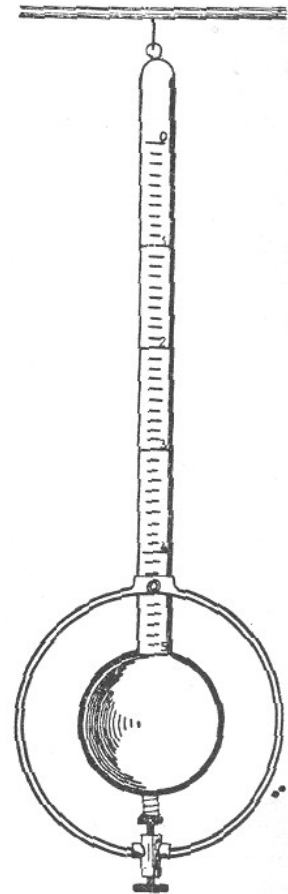


FIG. 163. — Evaporímetro de Leistner, tipo Piche mejorado. La esfera cuya superficie es de 100 cm², está envuelta en muselina.

selina, de manera que su temperatura es la indicada por el termómetro húmedo. Este aparato tiene la ventaja de que de cualquier lado que sople el viento, la evaporación es siempre proporcional a su intensidad.

Tampoco las indicaciones de este aparato son un fiel reflejo de la realidad, porque también en él el cuerpo evaporador dispone de una cantidad ilimitada de agua para la evaporación, condición que en la Naturaleza no existe. Por esta razón, el aparato mide solamente la "capacidad" que posee un determinado ambiente para acoger agua, pero **no** la cantidad que realmente evapora la superficie del suelo. Esta "capacidad" puede ser, y lo es realmente, muy grande en las regiones desérticas, mientras que la *evaporación efectiva* es reducida, por falta de agua suficiente en el suelo.

Para conocer la cantidad de agua realmente evaporada, es menester delimitar un gran bloque de tierra —1 m³, por ejemplo—, cuidar su estructura, estado de labranza y capa vegetal, y tenerlo sobre una balanza. La disminución de su peso informará sobre la intensidad de la evaporación; el aumento, sobre la cantidad de las precipitaciones. Las dificultades inherentes a esta medición entorpecen la aplicación de este procedimiento.