

## La Aviación y las lluvias

*En la apertura del curso 1945-46, en la Universidad de Valladolid, pronunció una conferencia el Catedrático de Química Orgánica don Teófilo Gaspar y Arnal, de la que, con permiso del ilustre conferenciante, entresacamos unos párrafos en los que aludía a la posible producción de lluvia artificial, con auxilio de la Aviación, y que pueden servir de prólogo al artículo que sobre este mismo tema publicamos a continuación.*

El por qué llueve no es problema que se ha llegado a dominar; sin embargo, se tienen muchas observaciones: los cambios de presión, de temperatura, vientos reinantes, puntos de rocío y de hielo, etc., son datos muy tenidos en cuenta por los meteorólogos. Que la Meteorología está prestando grandes servicios a la Humanidad, es cosa del saber humano.

El hombre, frente a la lluvia, se halla en una actitud no diremos que pasiva (el beneficio del árbol le lleva a la repoblación forestal), sino más bien su actitud es de resignación, de impotencia.

El hombre de España sabe que en Grazalema (Cádiz) llueve mucho; lo mismo sucede en el norte y en el noroeste de España. Tampoco ignora que en las Islas Canarias llueve con gran vehemencia en La Laguna de Tenerife y que el Sur se agosta de sed. La altura no es suficiente en latitudes análogas para explicar diferencias; por ejemplo, en Chío (Tenerife), a mayor altura que La Laguna, no se disfruta con igual intensidad del agua que en la ciudad de abolen-go universitario.

Llama la atención el Picón Canario, que presenta una superficie seca y el interior se halla empapado en agua. El engarzar cosas que todos conocéis sería largo y poco nos habría de ilustrar.

Voy a hablaros de algo que tenéis derecho a considerar como utópico; más cosas utópicas para nuestros antepasados nos están llamando, como quien dice, a la puerta, produciendo estremecimientos de alegría y también de terror. Algo parecido puede suceder con la lluvia.

Es frecuente leer en las informaciones meteorológicas de nuestros observatorios "que existe una barrera atmosférica, de altas presiones, que impide el paso a grandes masas de aire cargadas de humedad".

Pues bien: esas barreras pueden ser perforadas por masas de aviones de gran potencia y abrir paso a otras masas de aire más favorables para la lluvia.

Según es conocido, existe vapor de agua en la atmósfera; para la lluvia lo que más interesa es el llamado "estado higrométrico", el cual, sin cambiar la cantidad de vapor de agua existente en la atmósfera, puede variar con la temperatura. Por tanto, en un momento determinado, un enfriamiento brusco puede favorecer la precipitación acuosa.

Con la Aviación, los pueblos quizá dispongan de un instrumento adecuado para influir en la lluvia. La industria del frío ha conseguido extraordinarias realizaciones: aire líquido, amoníaco líquido, nitrógeno líquido, oxígeno líquido, etc. Proyectando estos líquidos desde las alturas que la experiencia aconseje, al expandirse dichas sustancias pueden producir enfriamientos locales lo suficientemente intensos para que cooperen a la finalidad buscada.

Los explosivos pueden también desempeñar en la ruta esbozada misiones muy beneficiosas para la civilización. Naturalmente que las explosiones no han de ser de las del tipo afflictivo, sino de explosivos, que tengan su acción en el aire, provocando contracciones y dilataciones en grandes masas atmosféricas que contribuyan de esta forma a que la lluvia bienhechora empape a la tierra y ésta nos pueda suministrar el sustento.

Parece ser que la existencia del vapor de agua en la atmósfera en condiciones higrométricas adecuadas (1) es condición nece-

(1) De hecho, se precipitan grandes cantidades de agua sobre la tierra por causas diversas, sin el aparato de la lluvia y según la temperatura, etc., aparecen el rocío, la escarcha, etc.

saría, pero no suficiente, para que la lluvia se produzca. Por lo menos se precisan, además, puntos de precipitación, núcleos de agrupamiento, etc. En condiciones normales, la ionización del aire, el polvillo atmosférico, el arbolado, etc., juegan un papel importante en el fenómeno.

Recordando lo que hemos referido acerca de la deshidratación de los petróleos, podrían los aviones, aparte de provocar fenómenos eléctricos, lanzar diversas sustancias pulverizadas, tanto metálicas como salinas, etcétera, que podrían formar núcleos adecuados para que se produjese la lluvia.

Nada es permitido decir de los coeficientes de acción, pues eso correspondería a la experimentación que se hiciera en ese sentido.

Los escarceos utópicos que acabo de hacer pueden ser tenidos como tema de charla por los más indulgentes y hasta considerarlos como uno de los medios para habilitar el Sáhara y otros espacios desérticos (recuérdese el proyecto de desecación del Mediterráneo). Mas en algunos países, por

ejemplo en el nuestro, se pueden originar situaciones que, sin buscarlas, se presenten en formas angustiosas por lo imprevistas.

Para nadie es un secreto, y para muchos esperanza muy acariciada, que los océanos del aire van a ser surcados, en la paz, por enjambres de aeroplanos de todas clases y cargas.

La Península Ibérica, por su situación, ha de ser, Dios mediante, lugar de grandes concurrencias aviatorias. Cabe pensar que el simple movimiento aéreo no sea causa de grandes perturbaciones atmosféricas. ¿Y si lo fuera? Dada la configuración de nuestro suelo, las torrenteras podrían ser devastadoras, por lo que no sería tiempo perdido pensar en defensas para formar cauces por donde pudieran discurrir las aguas, y en construir embalses, para que las fuerzas dislocadas fueran aprovechadas beneficiosamente.

Esta situación pudiera presentarse también si las lluvias se produjeran empleando diversos artificios.

---

## L l u v i a   a r t i f i c i a l

Por JOSE MARIA JANSÁ

Se acaba de poner de actualidad el tema de la provocación artificial de la lluvia, y con este motivo aparece ante la atención mundial un nuevo rasgo de colaboración íntima de la Meteorología con la Aviación. Efectivamente, según las noticias recogidas por la Prensa, los primeros ensayos tuvieron lugar en Australia, seguidos pronto por otros en Inglaterra y nuevamente en Australia, y por último, también en Norteamérica, y todos consistieron en la *siembra* de partículas de nieve carbónica en el seno de una nube de condiciones adecuadas, utilizando, naturalmente, el avión. Es natural que se haya despertado la curiosidad por conocer el fundamento de estos experimentos para juzgar de su posible alcance con conocimiento de causa. Con estas líneas pretendemos satisfacer esta curiosidad del modo más claro posible, pasando revista a los antecedentes científicos del problema y delimitando concretamente sus soluciones.

No se trata, naturalmente, de ningún invento inesperado; hoy día no se producen ya esta clase de inventos; se trata de la puesta en práctica de algunas conclusiones teóricas que no pueden sorprender a quienes hayan seguido el desarrollo de las ideas en el campo de la Meteorología pura. Siempre ha sido aspiración del hombre actuar sobre la Naturaleza, aunque los fenómenos atmosféricos son tan desmesurados que durante largo tiempo ha parecido una quimera pretender intervenir sobre ellos. La intervención más activa la viene ejerciendo el hombre sobre su propio cuerpo, contando en Medicina con potentes recursos para desviar el curso natural de las cosas; pero ¿qué significan los más poderosos medios de que el hombre es capaz de echar mano en comparación con el huracán desencadenado, la tempestad devastadora o la inundación irresistible? La desproporción parece en este caso demasiado grande. Compá-

rese el más gigantesco de nuestros aviones con la más modesta de las nubes, y el resultado es deprimente; parece que con los meteoros no puede aspirarse sino a esquivarlos, en modo alguno a gobernarlos; parece soberbia ridícula hablar de terapéutica en Meteorología.

Sin embargo... no puede haber aquí demasiada aprensión. Lo desconocido asusta; pero hay una manera de quitarse el susto, y es investigar. Sería temerario enfrentarse con la fuerza terrible de los elementos sin saber nada de ellos, pero no lo será tanto después de estudiarlos. Hay que tener en cuenta que la atmósfera ha sido para el hombre hasta hace poco la gran incógnita; en estas condiciones el temor está justificado; pero la ciencia le busca a la Naturaleza su tendón de Aquiles, y la técnica se encarga luego de herirla en el punto vulnerable.

La primera intervención humana contra las fuerzas atmosféricas fué en los albores mismos de la Meteorología científica: en 1752, cuando Franklin inventó el pararrayos. Nada menos que el mismo fuego del cielo se dejaba avasallar; lo demás parece que debía ser fácil. Viene después la discutible lucha del cañón contra las trombas, y con mejores auspicios también contra el granizo; las medidas para suprimir las heladas, y bastante recientemente, durante la última guerra, la disipación artificial de la niebla con indiscutible éxito positivo, por más que sea de alcance local muy limitado.

Todos estos inventos son de carácter defensivo; la lluvia artificial es otra cosa; se trata ahora de actuar sobre el tiempo *positivamente*. El P. Ignacio Puig, S. J., en dos artículos publicados en la revista *Ibérica* (1), ha hecho historia de los proyectos e inventos anteriores a la actual etapa de la cuestión. Estos inventos estaban mal enfocados, porque pretendían sencillamente imitar a la Naturaleza, tratando de reproducir artificialmente todo el proceso mediante el cual la lluvia se produce. Ya hemos dicho que todas las energías de que dispone la Humanidad son despreciables para conseguir tal objeto. Hay una experiencia a este respecto que ha sido muy discutida, y es el efecto de los grandes bombardeos realizados durante la guerra sobre el equilibrio atmosférico en general, y en particular sobre el régimen pluviométrico. A

(1) "Intentos de provocar artificialmente la lluvia". Año I (segunda época), tomo I, pág. 233. "¿Se llegará a provocar artificialmente la lluvia?" Idem íd. íd., pág. 257.

propósito de la guerra 1914-18, ya se puso esta cuestión sobre el tapete. El conalmirante don José Riera y Alemany publicó en la *Revista General de Marina* un documentado artículo haciéndose cargo de las discusiones habidas en la Academia de Ciencias de París, y cuyos extremos más interesantes es oportuno destacar. El problema había sido planteado por Deslándres en la sesión del 23 de abril del año 1918, y sobre el mismo informó ampliamente el General Seberrt en la sesión del 30 del mismo mes. Se citan numerosas batallas que terminaron en lluvia, entre ellas las de Wattigniés, Crezy, Austerlitz, Sadowa, Constantina, Ligny y Solferino, en todas las cuales había intervenido ampliamente la artillería. El informante opinaba que esta acción de la artillería podía dar razón, no sólo de las lluvias locales, sino de muchos cambios atmosféricos, que pueden ocurrir hasta en lugares lejanos, aunque el hecho no tenga por ahora explicación científica. La acción local fué admitida como muy probable por Deslándres, Lemoine y Hildebrandson, apuntando el primero como agentes determinantes de la precipitación la elevación de temperatura, el rozamiento mecánico de la onda explosiva, el polvo proyectado en el aire, y sobre todo, el desprendimiento de gases ionizados. Hildebrandson citó una antigua experiencia realizada en los Estados Unidos el 25 de noviembre de 1892, que consistió en la explosión de 2.000 kilos de minas terrestres, 150 bombas y ocho globos explosivos, con cielo nublado, que se repitió el 26 aumentando la cantidad de explosivo, pero con cielo despejado, siempre con resultado negativo. Si se considera que el fenómeno de la ionización puede ser el principal, es admisible un efecto retardado, como el que se observa en la acción de las manchas solares o en la actuación del polvo volcánico.

A propósito de nuestra Guerra de Liberación, y sobre todo a propósito de la última conflagración mundial, el problema ha reaparecido, conquistando incluso la atención de la gran Prensa en varias ocasiones, y ahora planteado en términos de mayor alcance, no sólo por la mayor masa de artillería que interviene en las batallas modernas, sino, sobre todo, por la intervención de un elemento nuevo, prácticamente inoperante en las guerras anteriores; y de orden excepcional a este respecto, cual es la Aviación. La convección atmosférica que es capaz de producir hoy día un bombardeo aéreo, ya no parece tan despreciable en comparación con la masa de la atmósfera.

Capítulo aparte merece todavía la bomba atómica, de la cual se sabe, por las experiencias de Bikini, que es capaz de engendrar un auténtico cúmulo-nimbus en escala natural, o quizá superior, sin suponer en la atmósfera ninguna predisposición para ello. Es claro que a este precio la lluvia artificial no interesa; pero conviene dejar sentado que con la energía atómica, dirigida concretamente a este fin, no se ve que pueda haber ningún obstáculo realmente prohibitivo, pues dicha forma de energía supera incomparablemente a todas las antes conocidas y pone en manos del hombre por primera vez una fuerza de categoría cósmica. Los ensayos de lluvia artificial de que ahora vamos a ocuparnos no tienen nada que ver con este asunto y se desenvuelven dentro de una esfera mucho más modesta.

\* \* \*

La pretendida acción de la artillería, y en general de toda clase de explosiones, sobre la lluvia, se basa en una confusión, debida a un conocimiento imperfecto del mecanismo de la precipitación, que no ha podido ser aclarado hasta muy recientemente. Vamos a ver por qué el método de las explosiones no puede dar buen resultado, y al mismo tiempo cuál es el sencillo camino emprendido, que conducirá seguramente al éxito. Las condiciones esenciales que se requieren para producirse la lluvia son:

- 1.º Una corriente ascendente de aire húmedo.
- 2.º Número suficiente de núcleos de condensación para servir de soporte al vapor condensado, y
- 3.º Gérmenes de precipitación que destruyan el equilibrio coloidal de la nube. Si falta cualquiera de estos requisitos, no puede haber precipitación. Estudiemos, sucesivamente, cada uno de ellos, y veamos las oportunidades que para la intervención humana puede ofrecer cada fase.

Los movimientos ascensionales eficaces para la producción de la lluvia son de dos clases: verticales, o convectivos, e inclinados, o de deslizamiento. Los movimientos convectivos dependen de la estabilidad o inestabilidad de la estratificación del aire, es decir, del gradiente vertical de temperatura. Es bien sabido que la temperatura, ordinariamente, va descendiendo a medida que se sube, descenso que solamente se ve interrumpido, algunas veces, en algún corto tramo por alguna capa isoterma o alguna inversión.

Por otra parte, siempre que una masa de aire se encuentra a mayor temperatura que el resto que la rodea, sufre el empuje de la fuerza de Arquímedes, que vale  $g(\rho - \rho')$ , siendo  $g$  la intensidad de la gravedad, y  $\rho$  y  $\rho'$  las densidades del aire ambiente y de la masa considerada, respectivamente. Obedeciendo a esta fuerza, la masa cálida se eleva verticalmente, y entonces sufre también, a su vez, como simple consecuencia de esta elevación, un enfriamiento continuo. Teniendo en cuenta que tanto la masa que sube como el aire ambiente están siempre en equilibrio de presión, resulta que la variación relativa de la diferencia  $\rho - \rho'$ , es decir, de  $\frac{\rho - \rho'}{\rho'}$  (que justamente es la medida de la aceleración), dependerá tan sólo de la de sus respectivas temperaturas, es decir, de la diferencia entre el enfriamiento experimentado por unidad de espacio recorrido verticalmente por el aire que sube, y el gradiente vertical de temperatura del aire en reposo. Tanto dicho enfriamiento (llamado, aunque impropriamente, también *gradiente*) como el gradiente vertical propiamente dicho, son, pues, funciones definidas en la altura. Si llamamos  $\gamma$  a dicho enfriamiento,  $\Gamma$  al gradiente y  $z$  a la coordenada vertical,  $T$  y  $T'$  a las temperaturas absolutas, se tendrá:

$$T = T_o - \int_o^z \Gamma(z) dz,$$

$$T' = T_o' - \int_o^z \gamma(z) dz;$$

y por consiguiente:

$$\frac{\rho - \rho'}{\rho'} = \frac{T' - T}{T} = \frac{T_o' - T_o - \int_o^z \gamma(\gamma - \Gamma) dz}{T_o - \int_o^z \Gamma dz}$$

Siempre se verifica  $\gamma > \Gamma$ , y por consiguiente si el numerador se anulara para cierto valor de  $z$ , que en general no anula al denominador. Por consiguiente, la aceleración cesará a cierta altura, tanto mayor cuanto menor se mantenga la diferencia  $\gamma - \Gamma$ . Si  $\gamma$  y  $\Gamma$  fuesen constantes, esta altura valdría:

$$z = \frac{T_o' - T_o}{\gamma - \Gamma}.$$

Ahora bien: es evidente que el hombre no puede modificar la forma de las funciones  $\Gamma(z)$  ni  $\gamma(z)$ ; por consiguiente su única posibilidad

en esta fase es actuar sobre la temperatura  $T'$ , es decir, calentar artificialmente una porción de aire para que se inicie el movimiento convectivo. La amplitud de este movimiento depende ya entonces solamente de la forma de dichas funciones, o lo que es lo mismo, de las condiciones de estabilidad de la estratificación del aire, y por consiguiente escapa al control humano. De aquí resulta que en días de mucha estabilidad no hay nada que hacer; en días de suficiente inestabilidad (revelada por el sondeo termodinámico de la mañana) sería posible *cebar* el movimiento convectivo, adelantando el momento de producirse, pues de todos modos es casi seguro que, más o menos tarde, se establecería también espontáneamente. No se crea que este procedimiento carece por completo de importancia económica, aunque ignoramos que se haya hecho ningún ensayo para ponerlo en práctica, pues la localización de los movimientos convectivos, aun muy intensos en días de fuerte inestabilidad, es bastante aleatoria, bastando pequeñas variaciones en las condiciones iniciales para trastornarla por completo. El chubasco tiene que caer en alguna parte, pero el motivo que determina que sea más bien en un sitio que en otro, es de poca monta; de modo que un gasto relativamente modesto de energía sería suficiente para establecerlo sobre un punto arbitrario.

Acciones de mayor alcance dentro de esta primera fase de preparación de la lluvia podrían conseguirse con mayores dispendios de energía que fuesen suficientes para transformar en efectivas ciertas inestabilidades virtuales que a veces se descubren en la atmósfera; pero esto, como dijimos, queda reservado para un futuro más o menos remoto, cuando la energía atómica se haya convertido en una realidad industrial.

En cuanto a las ascensiones de deslizamiento, tanto de carácter orográfico como frontal, quedan todavía mucho más al margen de las posibilidades humanas por estar enlazadas con los inmensos circuitos de la circulación general.

\* \* \*

Tanto la ascendencia convectiva como la de deslizamiento, cuando se prolongan suficientemente, desembocan en la segunda fase del fenómeno: la formación de la nube. El aire ascendente se expansiona para ponerse en equilibrio de presión con el ambiente, de donde resulta el enfriamiento, del cual ya hemos hablado; juntamente con el aire se enfría también el vapor de agua de que va cargado, y lo hace con

más rapidez que si estuviese solo, acercándose así al estado de saturación. Cuando en el laboratorio una masa de vapor se hace saturante, inmediatamente empieza su condensación sobre las paredes del recipiente que lo contiene; pero al aire libre las condiciones son distintas: allí estas paredes faltan y los productos de la condensación no tienen donde agarrarse; el resultado es que pueden alcanzarse enormes sobresaturaciones sin que la condensación se produzca; las moléculas del vapor son incapaces de asociarse directamente entre sí para formar el primer núcleo de una gota, aunque, en cambio, sean capaces de depositarse sobre una gota ya empezada y asegurar su desarrollo. De aquí la necesidad de la presencia de pequeñas partículas sólidas, llamadas núcleos de condensación, que puedan servir de cebo al cambio de estado, necesidad reconocida de antiguo y que juega un papel considerable. Los mejores núcleos de condensación son partículas de sales higroscópicas, las cuales se encuentran en gran abundancia en el humo producido durante las combustiones, tanto espontáneas como artificiales. Alrededor de cada partícula se constituye una gotita líquida, con más o menos facilidad, según la naturaleza y el tamaño de la partícula. A cada especie de partículas corresponde un valor de la humedad relativa, alcanzado el cual nace la gota. Este valor oscila a un lado y a otro del que corresponde al estado de saturación ordinario, que, como se sabe, se toma como término de referencia y se representa por 100. El tamaño que pueden alcanzar las gotas depende del número de ellas y de la cantidad de vapor disponible. Por eso un exceso de núcleos puede ser en cierto modo perjudicial, pues al dar lugar a un número exorbitante de gotitas, daña a su tamaño; así nacen, por ejemplo, las clásicas nieblas de Londres, que se nutren de los humos industriales de sus cercanías.

Es evidente que para llegar a la lluvia hace falta que se forme nube; interesa, pues, que haya núcleos de condensación allí donde la nube se va a formar, o sea en el llamado nivel de condensación. Tiene que haberlos en cantidad y calidad adecuados. Además, hay que tener presente que si la nube llega a precipitar, cada gota de lluvia se lleva consigo uno o varios núcleos, y, por consiguiente, la continuidad del fenómeno exige que los núcleos perdidos sean repuestos, o que de antemano los haya en número suficiente. El agua perdida por la nube que precipita queda compensada por la aportación de nuevas masas húmedas que la corriente

ascendente transporta; de modo que mientras esta corriente subsista el suministro de vapor condensable está asegurado; pero si los núcleos llegan a faltar o a escasear, la lluvia no podrá ser duradera y la circulación convectiva, de la cual el movimiento ascendente forma parte, cuidará de llevarse lejos el vapor de agua que al atravesar la zona crítica del nivel de condensación no se haya condensado. Una corta precipitación habrá lavado el aire, arrastrando sus núcleos y haciendo que se disipe más o menos la nube, incapaz de regenerarse por falta de ellos. Así se procede artificialmente en la cámara de Wilson cuando se la quiere purgar totalmente de núcleos ordinarios para que puedan entrar en juego como núcleos los iones gaseosos, que exigen exageradas sobresaturaciones.

La acción de la artillería y de los cohetes, si alguna tienen, corresponde a esta fase: no haría más que facilitar la formación de la nube por la gran riqueza en núcleos de condensación que poseen los humos de las explosiones, que, además, resultan depositados en el lugar adecuado. También el vuelo de un gran número de aviones tendría un efecto análogo, pues los gases de escape de los motores van también cargados de gran cantidad de núcleos de condensación. Pero todo esto resulta casi totalmente ilusorio si se piensa que los núcleos de condensación no suelen faltar nunca en la atmósfera; de modo que, en general, una nube jamás deja de formarse por falta de este requisito. La introducción artificial de núcleos de condensación será por lo menos superflua, como lo sería inyectar una pequeña cantidad de sangre a un hombre robusto para curarle de alguna enfermedad. Además, engendrar nubes no es resolver el problema de la lluvia; con frecuencia el cielo está completamente cubierto y, sin embargo, no llueve. El error que se cometía al atribuir a los bombardeos una eficacia decisiva sobre la lluvia consistía en suponer que bastan las nubes. Sin embargo, hoy se sabe, como ahora veremos, que las nubes son una condición necesaria, pero no suficiente de la lluvia. Ni siquiera basta forzar la alimentación de una nube para conseguir de ella la precipitación. El paso de la segunda a la tercera fase tampoco es automático, como no lo es el paso de la primera a la segunda; si en este caso hacen falta los núcleos de condensación, en aquél son precisos nuevos elementos, que llamaremos *gérmenes de precipitación*. El esquema clásico era demasiado sencillo; puede resumirse así: el movimiento ascendente produce enfriamiento; el enfriamiento,

cuando alcanza un grado determinado (al llegar la masa ascendente a cierto nivel), lleva a la condensación, y ésta, a su vez, cuando alcanza también un grado determinado (al llegar las gotas a cierto tamaño crítico), lleva a la precipitación. Desgraciadamente las cosas son un poco más complicadas; la corriente ascendente puede rebasar su nivel de condensación sin condensarse por falta de núcleos, cosa que, a la verdad, ocurre muy rara vez, quedando en estado de *sobresaturación*; la condensación puede prolongarse más allá de su valor crítico sin precipitarse por falta de gérmenes, quedando en un estado que podríamos llamar de *sobrecondensación*, cosa que ya suele ocurrir con mayor frecuencia.

La intervención en la segunda fase no es, pues, ni racional ni práctica.

\* \* \*

El aire nuboso puede asimilarse, a casi todos los efectos, a una suspensión coloidal, cuyas *micelas* son las gotitas líquidas del orden de magnitud de la media centésima a la décima de milímetro. Esta clase de suspensiones se manifiestan como notablemente estables mientras se mantienen homogéneas, pero se hacen inestables en cuanto aparece cualquier heterogeneidad de orden cualitativo o cuantitativo. Dicha heterogeneidad se resuelve por precipitación, previa coagulación. La coagulación consiste en la aglomeración de varias micelas para formar una partícula de mayores dimensiones.

En 1928 el meteorólogo noruego Bergeron propuso su teoría de la precipitación, que ha sido luego aceptada casi universalmente, según la cual la causa primaria de la coagulación hay que buscarla en la caída de una partícula de hielo en el seno de una nube de gotitas líquidas subfundidas. Es sabido por la Física elemental que el estado de subfusión cesa inmediatamente al contacto de un cristal de la misma sustancia; pero en nuestro caso no hace falta ni siquiera el contacto, sino que siendo menor la tensión de saturación del vapor acuoso encima del hielo que encima de agua líquida, la simple presencia del cristal tiene por efecto la condensación del vapor acuoso sobre el mismo, y de rebote la evaporación de las gotas cercanas. El proceso no cesa hasta que el copo de nieve engendrado por la primitiva partícula tiene un peso suficiente para precipitarse hacia el suelo. Según esto, toda precipitación en su origen es sólida, conservando o no este estado al llegar a

tierra, según que durante su caída haya atravesado o no la isoterma de cero grados.

Más tarde, en 1938, Findeisen perfeccionó la teoría investigando el origen de los cristallitos de referencia, que pueden denominarse *gérmenes de precipitación*, y encontrando que nacen por sublimación directa del vapor sobre partículas sólidas especiales, mucho menores que los núcleos de condensación, y que llamó *núcleos de sublimación*. El fenómeno tiene lugar ordinariamente a gran altura, explicándose de este modo la frecuencia de nubes subfundidas, y el hecho de que únicamente las expansiones superiores del yunque de un cúmulo-nimbus se encuentren en estado sólido. De acuerdo con estos puntos de vista, la precipitación se inicia a gran altura con la formación de menudos cristales de hielo alrededor de los núcleos de sublimación. Estos cristales van cayendo luego lentamente, como lluvia seca, a través del aire nuboso en estado de subfusión, actuando entonces de gérmenes de precipitación por destruir con su presencia el equilibrio coloidal. Formada así la nieve, empieza la verdadera precipitación al abandonar la nube madre antes o después de haberse fundido, según sean las condiciones de temperatura. Durante la caída puede prolongarse la aglomeración por fusión de unas gotas con otras (1).

Lo más importante de todo esto es que mientras los núcleos de condensación abundan siempre, los de sublimación escasean, y a veces faltan, manteniéndose entonces la nube en el estado que hemos llamado de *sobrecondensación*. No hay que pensar que este estado sea termodinámicamente definido como el de sobresaturación. La cantidad de agua líquida que puede contener un determinado volumen de aire nuboso no tiene más limitación que la capacidad del mismo volumen; o, dicho con otras palabras, un centímetro cúbico de aire no puede contener más de un gramo de agua líquida; pero es evidente que de hecho se mantiene siempre enormemente alejado de este límite, pues la riqueza hídrica total del aire es siempre del orden de algunos gramos por metro cúbico; es decir, casi un millón de veces inferior. Cuando la precipitación empieza, la cantidad de vapor condensado existente es muy variable. Hay nubes muy pobres y que, sin embargo, precipitan, y otras densas y compactas

que no lo hacen; una misma masa de vapor condensado puede mantenerse suspendida en el aire con tal de encontrarse dispersada en un gran número de pequeñas gotas regulares, o bien caer en forma de chubasco cuando se aglomera en un número relativamente pequeño de grandes gotas, y la transición de un estado al otro es gobernada exclusivamente por los gérmenes de precipitación. Se ha visto en algunos casos, si bien hay que reconocer que bastante raros, un potente cúmulo-nimbus que amenazaba inundar el mundo, deshincharse luego sin haber soltado gota.

Estas circunstancias son las que pueden aprovecharse para intervenir con esperanza de eficacia. Y eso es lo que se ha hecho en los ensayos realizados hasta ahora. Podían intentarse dos caminos: o introducir núcleos de sublimación para provocar la formación de gérmenes de precipitación, o introducir éstos directamente. El segundo procedimiento parece más indicado, y la experiencia le está dando su suprema sanción. Ahora bien: aunque los gérmenes naturales son cristallitos de hielo, la obtención artificial de éstos se hace muy difícil, porque un cristal, para que pueda servir de núcleo, debe encontrarse en forma muy propia; es decir, terminado por caras estrictamente cristalgráficas, lo cual no puede conseguirse sino por sublimación del vapor, y aun así, sólo para ser usado en el acto, mientras conserve sus características de cristal naciente. Habría, pues, que imitar las condiciones que reinan en la alta atmósfera, y habría que disponer de núcleos de sublimación y habría que evitar el *envejecimiento* del cristal. Esto último sería seguramente lo más difícil, pues a las superficies del cristal se adhieren toda clase de impurezas, que las desnaturalizan y las hacen ineptas para recibir sobre sí nuevas moléculas cristalinas. Para darse cuenta de cómo funciona la *máquina de la lluvia* hay que atender a las particularidades que acompañan al proceso complejo de la cristalización. Dado un primer esqueleto cristalino en el seno de la fase dispersa (sea solución o vapor), las fuerzas moleculares tienden a captar los iones de la misma para encadenarlos a los nudos de la estructura reticular. Si esta estructura se encuentra interrumpida por interposición de iones extraños, la acción de dichas fuerzas resulta perturbada y el crecimiento del cristal queda suspendido. En condiciones normales, este crecimiento se verifica, pues, por capas sucesivas paralelas a los planos cristalográficos fundamentales de la forma. Como se ve, los primeros momentos de

(1) Quien desee profundizar en esta materia, consultará con fruto: Francisco Morán, *Apuntes de termodinámica de la atmósfera*, publicado por el Ministerio del Aire. Madrid, 1944, págs. 229 y siguientes.

la cristalización son bastante delicados: cuando el cristal es ya mayor, las perturbaciones locales tienen, naturalmente, menor alcance y no llegan a impedir el crecimiento como obra de conjunto. En resumen: el uso de hielo como germen de precipitación, a pesar de que la Naturaleza lo hace, no es recomendable por vía artificial.

Por fortuna, queda todavía un recurso acudiendo al fenómeno del *isomorfismo*. El isomorfismo es la propiedad que tienen ciertas sustancias de cristalizar en el mismo sistema y de tomar precisamente las mismas formas. Para ello las redes moleculares deben ser idénticas, o, en todo caso, diferir muy poco entre sí. Los cuerpos isomorfos son capaces de formar cristales mixtos, alternando indistintamente capas de uno o de otro, cosa que se consigue llevándolos alternativamente de uno a otro cristizador; incluso pueden formar cristales homogéneos donde ambos tipos de moléculas se encuentran uniformemente mezcladas. Pues bien: el anhídrido carbónico es isomorfo del agua, con lo cual pueden sustituirse con ventaja los cristales de hielo por cristales de nieve carbónica, sustancia de la que se dispone hoy comercialmente con el nombre de *hielo seco*. El cuarzo es también isomorfo, y de cuarzo son muchos de los núcleos de sublimación; pero el uso del anhídrido carbónico resulta preferible. Un avión se remonta por encima de la nube *sobrecondensada* y la *riega* con cristales de anhídrido carbónico finamente pulverizado, que funcionarán como gérmenes de precipitación. Si la nube está suficientemente *madura*, el chubasco se producirá en el acto. Los gérmenes de nieve carbónica conservan su *actividad* mucho mejor que los del agua, y sobre todo son muy fáciles de obtener limpios y puros. Una vez iniciado el chubasco, ya puede proseguir por sí solo hasta anular la inestabilidad inicial. Los chubascos son procesos automultiplicativos, como las reacciones en cadena, tan popularizadas con motivo de la bomba atómica, pues al separarse de una nube las grandes gotas de lluvia, en vez de restablecerse el equilibrio coloidal, lo que pasa es que se acentúa la inestabilidad. Efectivamente, el crecimiento de ciertas gotas tiene lugar a expensas de las menores, tanto más intensamente cuanto más lo sean, de modo que las pequeñas desigualdades iniciales son pronto exageradas, y el equilibrio coloidal se ve seriamente comprometido y la precipitación continúa por sí sola.

Se comprende por todo lo que acabamos de

decir que lo conseguido no es mucho, aunque ya es bastante. No se puede hacer llover si la Naturaleza no ha puesto los antecedentes necesarios. Podríamos decir que la Naturaleza carga el cañón y el hombre no hace más que dispararle. Es verdad que la desproporción entre las fuerzas humanas y las fuerzas meteorológicas rebasa toda medida; pero la acción humana respeta tal desproporción, y sólo trata de aprovechar la ocasión poniendo en juego un verdadero mecanismo de disparo con un consumo de energía despreciable. Lo mismo que en esta clase de mecanismos, una acción infinitesimal desencadena una acumulación de energía formidable.

¿Qué es, pues, en definitiva, lo que cabe esperar racionalmente del método? Hacer que descargue un chubasco que por falta de gérmenes no llegaría a cuajar, o bien adelantar el principio de alguno que no descargaría hasta más tarde, escogiendo en este caso, en cierto modo, el lugar favorecido; es decir: actuar más bien sobre la distribución de la lluvia que sobre su masa total. Antes de proceder a la *siembra* de gérmenes deben examinarse las condiciones en que se encuentra la atmósfera, para ahorrar ensayos en balde.

De todos modos, los resultados serán siempre discutibles. Supongamos que las circunstancias sean favorables: se ha formado una nube densa, bien alimentada de aire húmedo, dentro de una masa de aire fuertemente inestable. Se procede a derramar dentro de ella el polvo cristalino de la nieve carbónica, y al poco rato empieza un magnífico chubasco. Preguntamos: Este chubasco, ¿es realmente obra nuestra, o habría tenido lugar lo mismo sin haber precedido la *inyección*? ¿Estamos frente a un caso de ausencia de gérmenes, es decir, de chubasco naturalmente fallido si no hubiese sido por la oportuna intervención del avión *pluviógeno*? Es claro que si en una extensa región la situación meteorológica es semejante, y sin embargo los chubascos han caído exclusivamente, o por lo menos preferentemente, en aquellos lugares *tratados* con hielo seco, la tentación de atribuir éxito al método nos parece justificada.

Pónganse de acuerdo meteorólogos y aviadores en obsequio de la Agricultura, y ofrezcan pronto a la Humanidad un progreso tan positivo, como el de la lluvia a la orden puesta a punto. El meteorólogo atisbará la oportunidad; el aviador hará la obra.