

ASPECTOS ACTUALES EN LOS ESTUDIOS DE LA FISICA DE NUBES

Emilio A. Caimi

Departamento de Meteorología, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Buenos Aires

Buenos Aires, República Argentina

R E S U M E N

1° Diversas reacciones químicas entre gases de la atmósfera dan por resultado partículas sólidas solubles. Son de especial interés las que originan partículas de nitrato a partir del NO y el O₂ y las que dan lugar a partículas de sulfatos solubles. Estas últimas difieren según que las reacciones sucedan en la tropósfera, en el interior de gotas de nubes o en la estratósfera.

El origen común para todas las reacciones que conducen a la formación de partículas de sulfatos es la oxidación del SO₂ a SO₃ sea por la acción del O (oxígeno atómico), del O₃, y en el interior de las gotas de nubes por la presencia de iones de metales pesados y NH₃ que catalizan la transformación de SO₂ en SO₄.

2° La concentración de partículas de hielo en algunas nubes cuyo tope está por encima del nivel de 0°C es varios órdenes superior a la que podría esperarse considerando la de los núcleos de congelación a la temperatura del tope. Para explicar este hecho se sugiere varios mecanismos productores de partículas secundarias de hielo; a) fractura mecánica de los cristales frágiles; b) desprendimiento de astillas durante el crecimiento escarchado de las partículas; c) ruptura y fragmentación de gotas sobrenfriadas que congelan.

2 ASPECTOS ACTUALES EN ...

3° Algunas especies de bacterias que se desarrollan en lechos de hojas en descomposición o en el plánkton marino, son capaces de actuar como núcleos de congelación a temperaturas tan altas como $-1,5^{\circ}\text{C}$. Probablemente esas bacterias reducen la resistencia de las plantas a las heladas. Son alentadoras las experiencias de protección de algunas cosechas realizadas empleando bactericidas.

4° El crecimiento de gotas por coalescencia puede tratarse a través de tres modelos: continuo, estocástico y cuasiestocástico.

En todos se hace uso de la función " núcleo de colección ":

$K(a_1, a_2) = \Pi (a_1 + a_2)^2 E_c(u_1 - u_2)$. Se plantea la conveniencia de utilizar otros núcleos para el caso de que las gotas que coalescen sean del mismo tamaño.

S U M M A R Y

1st Several chemical reactions concerning atmospheric gases produce soluble solid particles. Of particular interest are the reactions conducent to the formation of nitrates starting from the gases NO and O₂.

Also important are the reactions forming particles of soluble sulfates; these reactions differ if they occur in the troposphere inside the cloud droplets or in the stratosphere. The common starting point of all of them is the oxidation of SO₂ to SO₃ by the action of O or O₃, or by the presence of heavy metallic ions in the cloud droplets which operate as catalizers in the transformation of SO₃ to SO₄.

2nd The concentration of ice particles found in some clouds whose top lies above 0°C level is several orders larger than that of ice nuclei measured at the top temperature.

Several mechanisms are proposed to explain this peculiarity: a) mechanical fracture of fragile crystals; b) ice multiplication by rime break-up; c) breaking and fragmentation of freezing supercooled drops.

3rd Several species of bacteria which grow in plant litters or in the marine plankton are good ice nucleants at $-1,3^{\circ}\text{C}$ and some of them are probably intimately involved in reducing plant resistance to freezing. There are promising trials using bactericides in order to protect crops from frost.

4th The growth of cloud droplets by coalescence is studied through three models which are : the continuous model, the stochastic model and the quasistochastic model. All of them use the kernel function: $K(a_1, a_2) = \pi (a_1 + a_2)^2 E_c(u_1 - u_2)$

It is convenient to have a non-zero kernel function which could be of environmental dependence to explain the coalescence between equally sized droplets.

INTRODUCCION

Según Soulage (1980), la Física de las Nubes nace con el descubrimiento de los núcleos de condensación atmosféricos realizada por Coulié en 1875 y por Aitken en 1880. Comienza a tomar cuerpo con los trabajos de Bergeron (1935) y Findeisen (1938) acerca del papel desempeñado por las partículas de hielo en la formación de las lluvias de las zonas templadas.

Como disciplina independiente de la Meteorología adquiere un notable incremento a partir de la finalización de la Segunda Guerra Mundial con el descubrimiento realizado por Schaefer (1946), Vonnegut (1947) y Langmuir (1948) de la posibilidad potencial de modificar artificialmente el comportamiento de las nubes precipitantes. Se contó para ello con una poderosa arma de investigación: el radar meteorológico, que permite la observación directa de fenómenos en el interior de las nubes sin provocar perturbaciones grandes o medibles.

Los temas predominantes en las distintas conferencias internacionales celebradas a partir de 1954 van señalando los hitos que jalonaron el desarrollo de la especialidad e indicaron los caminos a seguir en su avance hacia nuevas metas. La primera conferencia tuvo lugar en Zúrich convocada por Raymond Sängner, estudioso de métodos y fórmulas para combatir el granizo. Fue seguida por la conferencia de Verona en 1959 que presidió Ottavio Vittori en la que se trató exclusivamente el problema del granizo.

En 1961 se celebró la tercera conferencia en Sydney y Canberra siendo su organizador y presidente Eugene Bowen. Bowen se destacó por sus estudios sobre la naturaleza y el origen de los núcleos de congelación y las posibilidades de provocar artificialmente la lluvia. Esos fueron los temas predominantes de la reu-

nión.

Kenji Isono y Coji Magono presidieron la cuarta que se realizó en Tokyo en 1964, reunión en la que preponderaron los trabajos sobre crecimiento de cristales de hielo y los mecanismos de precipitación de meteoros.

La quinta conferencia se celebró en Toronto en 1968. Fueron sus organizadores Roland List y Walter Hitschfield. Se expuso un considerable número de trabajos sobre modificación artificial de las precipitaciones y se concluyó en la necesidad de retomar las investigaciones fundamentales y postergar momentáneamente las aplicaciones inmediatas de modificación artificial hasta tanto sus resultados pudiesen ser interpretados correctamente.

La conferencia de Londres de 1972, presidida por sir John Mason, sólo abordó temas de investigación básica y se hizo expresa exclusión de la modificación de las precipitaciones que pasó a ser motivo de tratamiento separado y es así que en Boulder, en 1976, se realizaron sucesivamente dos conferencias: una de Física de Nubes presidida por Helmuth Weickmann y a continuación otra para tratar la Modificación Artificial del Tiempo. En ambas se reveló un considerable progreso de las técnicas observacionales y en el empleo de modelos matemáticos de experimentación.

Ultimamente tuvo lugar la octava conferencia en Clermont-Ferrand y la presidió Guy Soulage. Siguiendo la tónica de Boulder tuvo lugar a continuación la tercera de Modificación Artificial. Se dió especial énfasis a la dinámica y termodinámica de las nubes, a los procesos radiantes y sus interacciones con los procesos microfísicos.

Siendo que las nubes son el resultado visible de complicados procesos de micro y macroescala, es fácil deducir que la cantidad de fenómenos que deben estudiarse configuran un campo muy

amplio y variado. Uno fundamental es el estudio de la nucleación heterogénea del agua líquida y del hielo en el seno de la atmósfera.

Con el nombre de nucleación heterogénea se designa la formación de un germen de una nueva fase, provocada por una partícula de naturaleza extraña al sistema que condensa o congela. Es un hecho conocido que la formación de las gotitas de las nubes sólo puede ocurrir por la presencia en el aerosol de la atmósfera, de partículas higroscópicas capaces de nuclear la fase líquida aún con relaciones de saturación inferiores a uno. El primer tópico a considerarse ha de referirse a los avances realizados en la interpretación de la génesis de estas partículas, a partir de reacciones entre los gases de la atmósfera.

A continuación se expone otro problema cuya explicación es buscada por los físicos de nubes: la relación entre la concentración de núcleos glaciógenos y la de partículas de hielo en las nubes. Un tercer tema lo constituye el descubrimiento reciente que comprobó que ciertas bacterias que se desarrollan entre las hojas desprendidas de los árboles y que están en descomposición en el suelo y otras que se desarrollan en el plankton marino, resultan ser muy eficientes en la nucleación del hielo a temperaturas relativamente altas.

Finalmente se hará una breve referencia a los modelos de crecimiento de gotas de nube por colisión y coalescencia, que tratan de interpretar la transformación de las gotitas en gotas de lluvia, especialmente en las denominadas nubes calientes.

FORMACION DE PARTICULAS SOLIDAS HIGROSCOPICAS A PARTIR DE REACCIONES QUIMICAS DE LOS GASES DE LA ATMOSFERA

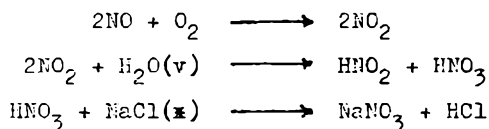
Ciertas propiedades físicas del aerosol atmosférico, como por ejemplo la constancia de su composición relativa, exigen la

presencia de fuentes y sumideros de partículas. Una de las fuentes la constituyen los gases de la propia atmósfera.

Se ha comprobado experimentalmente que en la atmósfera tienen lugar reacciones químicas denominadas "conversión gas-partícula" cuyo resultado final es la formación de un núcleo sólido de tamaño submicrónico, capaz de actuar como germen condensante del agua. Esas reacciones pueden agruparse de la siguiente manera:

Reacciones que conducen a la formación de partículas de nitratos solubles (Vohra y otros, 1970; Mohnen, 1970): Se detallan en el Cuadro N° 1.

Cuadro N°1: Reacciones de formación de nitratos solubles



(v): vapor

(x): partícula de sal marina

Reacciones que conducen a la formación de partículas de sulfatos solubles : las mismas difieren según que las partículas se originen en la tropósfera libre, en el interior de gotitas de nube o en la estratósfera.

1) En la tropósfera libre puede originarse sulfato a través de mecanismos diversos siendo los más estudiados hasta el presente:

a): por colisión entre tres cuerpos (Cadle, Powers, 1966). Los tres cuerpos en este caso son, una molécula de SO_2 , un átomo libre de oxígeno y una molécula inerte M. El SO_2 reside en la atmósfera como producto de ciertas combustiones y de erupciones volcánicas; el oxígeno atómico es el resultado de una disociación fotoquímica (incidencia de fotones) del NO_2 que da por resultado la

formación de $\text{NO} + \text{O}$. E puede ser una molécula de N_2 que debe estar necesariamente presente para que la reacción se produzca aunque esa molécula no forme parte de los productos finales.

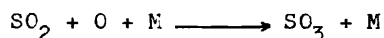
b): por generación de SO_3 en aire contaminado por el ozono (Junge, 1963).

c): como resultado de una cadena de reacciones catalizadas por la energía solar (Gerhard, Johnstone, 1955).

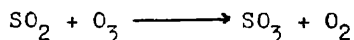
Las reacciones químicas correspondientes a los tres modos de formación del SO_3 se consignan en el Cuadro N° 2.

Cuadro N° 2 : Formación de partículas de sulfatos solubles en la tropósfera

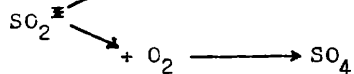
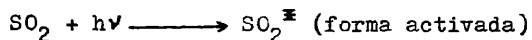
a): por colisión entre tres cuerpos



b): presencia de ozono en aire contaminado



c): por reacciones catalizadas por la energía solar



Una vez formado, el SO_3 se hidrata fácilmente en presencia de vapor de agua originando una partícula de H_2SO_4 que en presencia de vestigios de sal marina da lugar a la formación de una partícula de sulfato de sodio.

2) En el interior de gotas de nubes. Estudios realizados a bordo de aviones demostraron que la concentración de partículas de sulfatos del aerosol atmosférico aumenta considerablemente en la vecindad inmediata de las nubes en proceso de disipación. Este fenómeno puede explicarse si se considera que en el interior de las gotas de nube se producen reacciones químicas que conducen a la formación de sulfatos, los que quedan como residuos sólidos al evaporarse el agua (Hobbs, 1971).

Ha podido establecerse que la concentración de SO_2 al nivel de las nubes es algo mayor que la que debería esperarse de las determinaciones hechas a 3000 metros sobre el nivel del mar. Las medidas de los espectros de tamaños de partículas a barlovento y a sotavento de las nubes sugiere que, en algunas ocasiones, las partículas de aerosol se crean en el interior de las gotas de las nubes presumiblemente por la conversión de SO_2 en $\text{SO}_4^{=}$ en la fase acuosa.

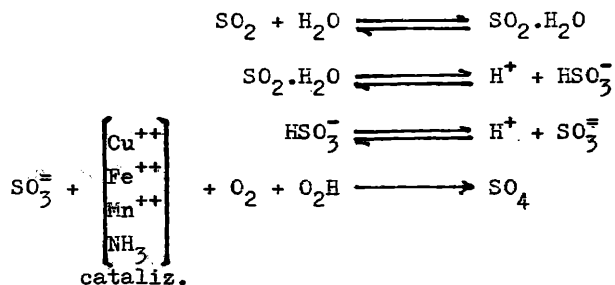
Las medidas de contenido de sulfatos en el agua de las nubes muestran ocasionalmente un significativo incremento en las muestras recogidas en el borde a sotavento con respecto a las del borde a barlovento; incluso se ha podido determinar que el grado de conversión de SO_2 a $\text{SO}_4^{=}$ en el interior de una nube puede llegar a ser de 30 % por hora (Hegg, y otros, 1980).

Experiencias de laboratorio (Barrie, 1975; Barrie, Georgii, 1976) han probado que si el SO_2 y el agua destilada forman un sistema en equilibrio se producen las reacciones que se detallan en el Cuadro N° 3.

El $\text{SO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ se forma en la fase líquida. La concentración del ión $\text{SO}_3^{=}$ está controlada por la acidez de la solución.

La presencia simultánea de algún ión metálico pesado como el Cu^{++} , Fe^{++} ó Mn^{++} , hace que la velocidad de oxidación del $\text{SO}_3^{=}$

Cuadro N° 3 : Formación de partículas de sulfatos solubles
por disolución de gases en gotas de nube



y su transformación en SO_4^- esté determinada por:

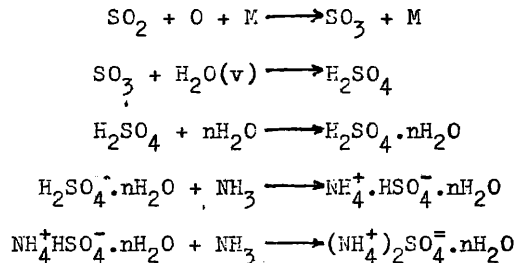
- la concentración de SO_3^- en la solución
- el tipo de ión metálico presente
- la presencia de oxígeno molecular disuelto

La formación de sulfato tiene lugar por una serie de reacciones que involucran al O_2 , al ión metálico y al radical O_2H . El NH_3 puede actuar también como catalizador positivo en la transformación de SO_3^- en SO_4^- dentro del agua. (Easter, Hobbs, 1974).

3) En la estratósfera, el proceso de conversión gas-partícula es el principal responsable de la formación de partículas de sulfatos. Sin embargo, las reacciones químicas consideradas anteriormente son demasiado lentas pese a las cantidades relativamente grandes de ozono y a la intensidad de la radiación ultravioleta que existen en la región.

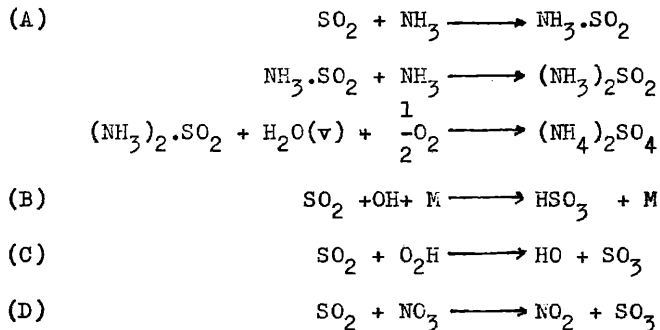
Se ha sugerido la reacción inicial entre los tres cuerpos ya mencionada, pero los átomos de oxígeno son provistos ahora por la fotodisociación de las moléculas de oxígeno. El SO_3 que resulta, en presencia de vapor de agua da lugar a un núcleo embrionario de H_2SO_4 que crece y se transforma según las ecuaciones que se indican en el Cuadro N°4.

Cuadro N^o 4: Formación de partículas de sulfatos en la estratósfera



Experiencias realizadas en laboratorio (Vance, Peters, 1976) demostraron que es factible la formación de partículas de sulfatos en la estratósfera a través de compuestos intermedios como los que se indican en el Cuadro N^o 5.

Cuadro N^o 5: Reacciones que podrían originar partículas de sulfatos en la estratósfera



Las reacciones (B), (C) y (D) fueron propuestas por Davis (1973). En la última reacción se supone que el SO₃ resultante se hidrata rápidamente formando gotitas de H₂SO₄ algunas de las cuales se neutralizan con trazas de NH₃ ya existentes.

PROCESOS DE MULTIPLICACION DE PARTICULAS DE HIELO

Si se compara la concentración de núcleos glaciógenos con la del total de partículas del aerosol atmosférico, se concluye que la aparición de la fase hielo en las nubes deberá ser un proceso muy selectivo. Por ejemplo: a temperaturas tan bajas como -20°C en la que la concentración de núcleos glaciógenos activos (NG) es alrededor de uno por litro, la relación entre núcleos glaciógenos y partículas totales del aerosol (PA) resulta ser:

$$\frac{\text{NG}}{\text{PA}} = 10^{-6}$$

Considerando que la concentración de PA decrece con la altura, se podría esperar el mismo decrecimiento para la concentración de NG. Sin embargo no siempre es así; se han observado anomalías como:

a): sobre el continente australiano la concentración de NG es significativamente mayor entre los 13 y los 27 km de altura si se la compara con la registrada al nivel del suelo.

b): una situación análoga se observó en Colorado-USA, donde en algunas ocasiones la concentración de NG resultó muy alta en las cercanías de la corriente de chorro.

c): en el hemisferio Sur se han encontrado concentraciones altas de NG en franjas de gran longitud, con un ancho de 100 a 300 km y en capas extendidas a una altura entre 4 y 11 km.

En contraposición, se ha comprobado la existencia de algunas franjas anchas con contenido de NG marcadamente deficitario en las vecindades del Ecuador entre 10 y 12 km de altura.

De la comparación entre la concentración de NG con la de partículas de hielo que contiene una nube en dos lugares muy próximos surge algo inesperado: en muchas nubes de temperatura rela-

tivamente alta, la concentración de partículas de hielo excede en varios órdenes a la concentración de NG determinada a la temperatura del tope de la nube, esto es, a la temperatura más baja que podría esperarse en el interior de la misma. Esto equivale a decir que las teorías actuales que pretenden explicar la glaciación de las nubes están lejos de ser satisfactorias.

Una explicación podría surgir si se consideran los procesos de multiplicación del número de cristales de hielo que pueden tener lugar a partir de las partículas primitivas. Para justificarlos se han propuesto diversos mecanismos (Mossop y otros, 1972):

a)- fractura mecánica de los cristales frágiles como son las dendritas, las agujas, las láminas y las columnas capiteladas. La fractura es causada por la colisión de cualquiera de ellas con partículas de granizo blando, con cristales de hielo más grandes y por consiguiente da mayor velocidad de caída, o con gotas grandes sobrenfriadas;

b)- desprendimiento de astillas durante el crecimiento escachado de los cristales, entendiéndose por tal crecimiento el que resulta de la captura y congelación instantánea de gotas sobrenfriadas sobre la superficie del cristal;

c)- ruptura y fragmentación de las gotas sobrenfriadas en proceso de congelación.

Estudios realizados en la Cordillera de las Cascadas, USA, (Hobbs, Farber, 1972) permitieron establecer que el mecanismo de fractura puede incrementar de manera significativa la concentración de partículas de hielo en el interior de las nubes. Esta conclusión queda avalada por el gran número de fragmentos de cristales de hielo recogidos dentro de las nubes y por la observación de que más del 50% de los cristales estrellados recogidos al nivel del suelo carecían de alguna rama o de una porción de ellas,

esto es que aparecían como cristales con amputaciones. Una situación similar se constató con los cristales planos que aparecieron privados de sectores completos y también las agujas con sus extremos fracturados. Incluso cristales agrupados en conjuntos radiales de varios tipos mostraron ausencia de partes enteras.

Algunas observaciones experimentales demostraron que la fractura y fraccionamiento de gotas sobrenfriadas en procesos de congelamiento, podría ser un mecanismo multiplicador de hielo muy eficiente. Pero ha podido constatararse (Ono, 1972) que el diámetro requerido para que la gota emita una espiga y se rompa, tiene que ser igual o mayor a 250 micrómetros.

Otras experiencias indicaron que el resquebrajamiento y subsiguiente estallido de la gota puede producirse con diámetros de gotas entre 50 y 100 micrómetros si la temperatura queda comprendida entre -20°C y -32°C (Hobbs, Alkezweeney, 1968). Al parecer, la ruptura de las gotas depende de la rotación sobre sí mismas durante la congelación, si su estado permite o no una dispersión radial uniforme del calor latente de congelación. Este descubrimiento abre algunos interrogantes acerca de la validez de ciertas experiencias con gotas que congelan en túneles de viento manteniéndolas suspendidas mediante una fibra y en posición fija. En tales condiciones, la parte inferior de la gota estará más fría que la superior por estar más ventilada.

Se ha observado en túneles de baja temperatura que si una gota cae con su velocidad terminal, inmediatamente a su nucleación, lo hace rotando sobre sí misma mientras recorre un camino helicoidal (Pitter, Pruppacher, 1973), provocando de esa manera una pérdida de calor en sentido radial y aproximadamente simétrica al menos en los estados iniciales de su congelamiento.

Ultimamente se han aportado evidencias experimentales en fa-

vor de la hipótesis de la ruptura de las gotas que congelan, sin necesidad de la emisión de una espiga o astilla. Se comprobó en efecto, que agregando deliberadamente a las gotas ciertas impurezas como podría ser el $\text{NH}_3 \cdot \text{HCl}$, la estructura del hielo se debilita y el caparazón externo se deforma y se rompe antes de alcanzar tamaños más grandes (Mossop, 1980).

Resultan curiosos los resultados obtenidos con gotas de agua sobrenfriadas que hacen impacto sobre una superficie de hielo en proceso de escarchamiento. En algunas ocasiones se observó una copiosa producción de astillas y en otras un resultado totalmente negativo. Esto parece depender de varios factores:

- a)- la distribución de tamaños de las gotas
- b)- el contenido de agua líquida
- c)- la velocidad con que las gotas chocan sobre el hielo escarchado.

Observaciones realizadas en cámaras de nubes con un contenido de agua líquida de 1 gramo por metro cúbico, constituido por gotitas cuyo diámetro quedaba comprendido entre 5 y 45 micrómetros y concentración de 500 por centímetro cúbico, se obtuvo una producción significativa de astillas de hielo únicamente cuando la temperatura estuvo comprendida entre -3°C y -8°C ; con diámetros de gotas mayores que 24 micrómetros y velocidades de impacto entre 1,4 y 3,0 metros por segundo (Hallet, Mossop, 1974; Mossop, 1976).

Un factor importante en la producción de partículas secundarias de hielo sería la estructura de las corrientes ascendentes, que regularían el momento de su producción. En efecto, el flujo de partículas de granizo blando que atraviesa el espesor de una nube comprendido entre -3°C y -8°C depende de dicha estructura. Medidas directas efectuadas en el interior de un cúmulus en pro-

ceso de disipación constataron una concentración de partículas de granizo blando igual a 50 por litro en el nivel de -13°C . Una concentración de ese valor debe considerarse como muy alta; sin embargo, al originarse una nueva torre nubosa a través de las celdas decadentes ya existentes, se alcanzó a medir en su interior, una concentración de 1000 cristales pequeños de hábito columnar por litro (Keller, Sax, 1980).

Otro factor que debe considerarse es el hábito cristalino de las partículas de hielo el cuál es propio de las temperaturas en las que el crecimiento escarchado va acompañado por una abundante producción de astillas. La interacción entre esas formas cristalinas extremas y las gotas podría ser causa de producción de otras partículas de hielo más pequeñas. Esta explicación tiene su justificación en estudios de la estructura de la escarcha que forman las gotas sobrenfriadas de 140 micrómetros de diámetro que chocan sobre una superficie de hielo a -3°C , con una velocidad de choque de 2,5 metros por segundo y siendo la temperatura del aire circundante de -11°C . En estas condiciones de temperatura alta del depósito de hielo y de baja velocidad de las gotas que chocan, la escarcha que se deposita es de poca densidad y está constituida fundamentalmente por espigas columnares frágiles que se rompen y se esparcen fácilmente con el choque de las gotas. Al respecto se observó que ciertas nubes contienen concentraciones altas de partículas de hielo irregulares, que observadas al microscopio revelaron ser pequeñas agrupaciones de escarcha. Sobre la base de las condiciones de ocurrencia, distribución de tamaños y morfología, su origen puede explicarse muy bien por el proceso de ruptura por el choque de las gotas contra el hielo escarchado. Este proceso conduce a una rápida glaciación de la nube que a su vez puede incrementar o disminuir la producción de precipitación según sean

las condiciones (Vali, 1980).

Se ha sugerido también, que la iniciación de la fase hielo en las nubes cuya glaciación tiene lugar a temperaturas relativamente altas, puede ser el resultado de la nucleación por contacto de las gotas sobrefriadas ubicadas en los bordes de las nubes (Young, 1974). En efecto, las partículas de arcilla muy secas cuyos diámetros oscilan entre 0,1 y 30 micrómetros tienen capacidad de nuclear gotas de agua sobrefriada a temperaturas de -3°C a -4°C .

HOJAS DE ARBOLES EN DESCOMPOSICION, PLANKTON Y BACTERIAS;
FUENTES DE NUCLEOS DE CONGELACION

Hace muy pocos años pudo comprobarse experimentalmente que ciertos suelos con alto contenido de materia orgánica son capaces de aportar a la atmósfera una cantidad mayor de núcleos de congelación que otros de menor contenido de esas sustancias. Puesto que los compuestos orgánicos de los suelos derivan principalmente de la vegetación, comenzó a estudiarse cualitativa y cuantitativamente la contribución de los vegetales y sus detritus a la población total de núcleos formadores de hielo. Se llegó a demostrar que las hojas en descomposición producen abundantes núcleos de congelación activos a temperaturas relativamente altas: -4°C .

Mucho más recientemente se ha observado que una gran cantidad de esos núcleos se encuentran asociados naturalmente con algunas especies de bacterias (Maki, Garvey, 1975) y con el plankton marino además de los lechos de hojas en descomposición; de allí la clasificación de estos núcleos biogénéticos en tres grupos (Schnell, 1976):

- Núcleos derivados de bacterias (NBD)
- Núcleos derivados del océano (NDO)
- Núcleos derivados de las hojas (HDH)

Algunos NDB son capaces de iniciar la congelación en el interior de gotas de agua a temperaturas tan altas como $-1,3^{\circ}\text{C}$ y cada centímetro cúbico de cultivo puede dar origen a 10^8 núcleos activos a -5°C (Fresh, 1973). Hasta el presente son muy pocas las especies de bacterias que han demostrado poseer esta propiedad.

Un componente de los NDB deriva de los cuerpos de una o más especies de bacterias marinas. Estas bacterias han sido aisladas en el aire marino, en las nieblas oceánicas y en los cultivos de plankton. Casi todas ellas cuando crecen en cultivo pueden inducir la congelación de gotas sobrenfriadas a -2°C .

Un aspecto curioso pero de innegables repercusiones biológicas y económicas es la observación de que la presencia de bacterias nucleantes de hielo en vegetales como cereales, lechuga y poroto hace incrementar la sensibilidad de los mismos a las heladas (Lindow y otros, 1975). Se han realizado experiencias haciendo decrecer la población natural de bacterias en un campo sembrado de maíz, mediante la pulverización de estreptomicina. Dichas experiencias demostraron que la susceptibilidad de las mieses a la helada se reduce considerablemente.

MODELOS DE CRECIMIENTO DE GOTAS DE NUBE POR EL PROCESO DE COALESCENCIA

Uno de los procesos por los que las gotas de nubes se transforman en gotas de precipitación es el crecimiento por colisión y ulterior coalescencia con gotas más pequeñas. En el caso de nubes calientes (temperatura mayor que 0°C) es tal vez el único proceso que justifica la producción de la precipitación.

El estudio teórico parte de considerar el modelo siguiente: la gota colectora de radio a_1 y velocidad terminal de caída u_1 , barre un cilindro en cuyo interior hay gotitas de radio a_2 y ve-

locidad terminal u_2 . No todas las gotitas que yacen en el cilindro son colectadas por la gota grande, habrá una eficiencia de colección que depende de los radios de las dos gotas.

La variación temporal de la masa de la gota que crece por captura de gotitas queda expresada por:

$$\frac{dm_1}{dt} = \pi (a_1 + a_2)^2 E_c (u_1 - u_2) w$$

donde,

E_c es la eficiencia de colisión,

w el contenido de agua líquida en forma de gotitas de radio

a_2

Se denomina núcleo de colección $K(a_1, a_2)$ a la expresión:

$$K(a_1, a_2) = \pi (a_1 + a_2)^2 E_c (u_1 - u_2)$$

Para simplificar se considera que la nube está constituida inicialmente por N gotas de masa m_1 y N' gotitas de masa m_2 . Se establece además que $m_1 \gg m_2$ y $N' \gg N$ y que la coalescencia es sólo posible entre gotas y gotitas. Con estas suposiciones, la masa de las gotas aumenta pero el número N permanece constante.

Se pretende describir como crecen las N gotas para lo cual el núcleo de colección resulta solamente función de m_1 , o sea:

$$K(a_1, a_2) = K(m)$$

De acuerdo a la interpretación física que se le otorgue a la expresión

$$\frac{K(m)}{V} N' dt \quad (\#)$$

siendo V el volumen de la nube, se tienen modelos para el tratamiento teórico de la coalescencia a saber (Gillespie, 1975):

- a)- (#) es el número de gotitas que colecta cualquier gota de masa m en el intervalo de tiempo dt . Corresponde al modelo denominado continuo
- b)- (#) es la probabilidad de que cualquier gota de masa m

colecte una gotita en el lapso dt . Corresponde al modelo estocástico puro. En este modelo el espectro de gotas varía con el tiempo. El primitivo espectro monomodal se transforma en otro bimodal correspondiendo la nueva moda a los tamaños de las gotas de lluvia.

- c)- (\times) es la fracción de gotas de masa m que recolecta una gotita en el lapso dt . Se lo denomina modelo cuasi estocástico

Al observar la expresión del núcleo de colección $K(a_1, a_2)$ se plantea la cuestión siguiente: cuando la gota colectora y la colectada son de igual tamaño el núcleo resulta igual a cero. Estudios recientes (de Almeyda, 1980) introdujeron diferentes condiciones de entorno que demostraron que gotas de igual tamaño pueden también chocar y coalescer y que esas colisiones dependen de las condiciones impuestas. Corresponde por lo tanto modificar la definición dada para el núcleo de colección o introducir otros que contemplen todos los casos.

BIBLIOGRAFIA

- Barrie L.A.; 1975: An experimental investigation of the absorption of sulphur dioxide by cloud and raindrops; Berichte des Institut für Meteorologie und Geophysique, Univ. Frankfurt.
- Barrie L.A., Georgii H.W., 1976: An experimental investigation of the absorption of sulphur dioxide by water drops containing heavy metals; Atmosph. Environm., 10, 743.
- Bergeron T., 1935: On the physics of cloud and precipitation; Proc. 5th. Assembly UGGI, Lisboa. vol. 12, 156.
- Cadle R.D., Powers J.W., 1966: Some aspects of atmospheric chemical reactions of atomic oxygen; Tellus, 18, 176
- de Almeyda F.C., 1980: The non-zero cloud droplet kernel function and its environmental dependence; Communications a la VIII Conference International sur la Physique des Nuages, Clermont-Ferrand; p. 59
- Easter R.C., Hobbs P.V., 1974: The formation of sulphates and the

- enhancement of cloud condensation nuclei in clouds; *Jr. atmos. sci.*, 31, 1586.
- Reindeisen W., 1938: Die kolloidmeteorologischen Vorgänge bei der Niederschlagsbildung; *Met. Zeits.*, 55, 121.
- Ressh R.W., 1973: Microbial production of freezing nuclei from decomposing tree leaves; Report AR 106, Dep. of Atmos. Resour., Univ. of Wyoming.
- Friend J.P., Meifer R., Trichon M., 1973: On the formation of stratospheric aerosols; *Jr. atmos. sci.*, 30, 465.
- Bernhard E.R., Johnstone H.F., 1955: Photochemical oxidation of sulphur dioxide in air; *Ind. Eng. Chem.*, 47, 972.
- Gillespie D.T., 1975: Three models for the coalescence growth of cloud droplets; *Jr. atmos. sci.*, 32, 600.
- Ballet J., Mossop S.C., 1974: Production of secondary ice particles during the riming process; *Nature*, 249, 26.
- Hegg D.A., Hobbs P.V., Radke L.F., 1980: A preliminary study of cloud chemistry; *Communications a la VIII Conference Internationale sur la Physique des Nuages, Clermont-Ferrand*, p. 7.
- Hobbs P.V., 1971: Simultaneous airborne measurements of cloud condensation nuclei and sodium-containing particles over the ocean; *Quart. jr. roy. meteor. soc.*, 97, 263.
- Hobbs P.V., Alkezweeny A.J., 1968: The fragmentation of freezing water droplets in free fall; *Jr. atmos. sci.*, 25, 881.
- Hobbs P.V., Farber J., 1972: Fragmentation of ice particles in clouds; *Jr. rech. atmos.*, 6, 245.
- Junge C. E., 1963; *Air chemistry and radioactivity*; Academic Press, Nueva York.
- Heller V.W., Sax R.I., 1960: Observational evidence for secondary ice generation in a deep convective cloud; *Communications a la VIII Conference Internationale sur la Physique des Nuages Clermont-Ferrand*; p. 209.
- Langmuir I., 1944: The production of rain by a chain-reaction in cumulus clouds at temperatures above freezing; *Jr. meteor.*, 5, 175.
- Window S., Barchet R.W., Upper C.d., 1975: The relationship between populations of bacteria active in ice nucleation and frost sensitivity in herbaceous plants; *EOS Trans. Agu.*, 56, 994.
- Yaki L.R., Garrey D.M., 1975: Bacterially induced ice nucleation; *EOS Trans. Agu.*, 56, 994.

- Mohsen V.A., 1970: Preliminary results on the formation of negative small ions in the troposphere; *Jr. geophys. resear.*, 75, 1717.
- Mossop S.C., 1976: Production of secondary ice particles during the growth of graupel by riming; *Quart. jr. roy. meteor. soc.*; 102, 45.
- Mossop S.C., 1980: The mechanism of secondary ice particle production during the growth of rime; *Communications a la VIII Conference International sur la Physique des Nuages, Clermont-Ferrand*, p. 117
- Mossop S.C., Cottis R.E., Bartelett E.M., 1972: Ice crystals concentration in cumulus and stratocumulus clouds; *Quart. jr. roy. meteor. soc.*, 98, 105
- Ono A., 1972: Evidence on the nature of ice crystal multiplication processes in natural clouds; *Jr. recherc. atmos.*, 6, 399.
- Pitter R.L., Eruppacher H.R., 1973: Numerical study of viscous flow past a thin oblate spheroid at low and intermediate Reynolds number; *Quart. jr. roy. meteor. soc.*, 99, 540.
- Schaeffer V.J., 1946: The production of ice crystals in a cloud of supercooled droplets; *Science*, 104, 457.
- Schnell R.C., 1976: Bacteria acting as natural ice nucleants at temperatures approaching -1°C ; *Bull. amer. meteor. soc.*, 57, 1356.
- Soullage G., 1980: Preface; *Communcations a la VIII Conference International sur la Physique des Nuages, Clermont-Ferrand*, p. V.
- Vance J.L., Peters L.K., 1976: Comments on the direct aerosol formation of ammonia and sulphur dioxide; *Jr. atmos. sci.*, 33, 1824.
- Vali G., 1980: Ice multiplication by rime breakup; *Communications a la VIII Conference International sur la Physique des Nuages, Clermont-Ferrand*, p. 227
- Vohra K.G., Vasudevan K.N., Nair P.V., 1970: Mechanisms of nucleus forming reactions in the atmosphere; *Jr. geophys. reser.*, 75, 2951.
- Vonnegut E., 1947: The nucleation of ice formation by silver iodide; *Jr. appl. phys.*, 18, 593.
- Young K.C., 1974: The role of contact nucleation in ice phase initiation in clouds; *Jr. atmos. sci.*, 31, 768.