

RELAMPAGOS

Por D. J. MALAN (1)

Los sistemáticos estudios que sobre los relámpagos se realizaron en el siglo XVIII no permitieron llegar a conocer los procesos que originan tales fenómenos. Sólo en fecha reciente y gracias a la utilización de rapidísimos instrumentos fotográficos y de oscilógrafos, cuyo funcionamiento y aplicaciones se describen en este artículo, se han comenzado a dilucidar los problemas relacionados con las descargas eléctricas durante las tormentas.

La primera investigación sistemática de la electricidad de las tormentas data de mediados del siglo XVIII, cuando Benjamín Franklin demostró que los relámpagos eran una chispa eléctrica y que un rayo se componía, ordinariamente, de electricidad negativa. Aunque los experimentos de Franklin fueron repetidos y confirmados, no hubo avance significativo en el conocimiento de los relámpagos por unos doscientos años, a causa de que una chispa tormentosa consiste en una serie de procesos muy rápidos; todo progreso ulterior tuvo que esperar al desarrollo de nuevas técnicas experimentales. Sólo métodos tales como la fotografía a gran velocidad y la oscilografía de rayos catódicos, pueden dar la alta resolución de tiempo necesaria.

Los trabajos clásicos de C. T. R. Wilson y su escuela a partir de 1916, iniciaron una era nueva de descubrimientos en el campo de la electricidad de las tormentas. Appleton, Watson-Watt y Herd, en Inglaterra, y Norinder en Suecia, fueron los primeros en utilizar oscilógrafos de rayos catódicos para el estudio de las componentes rápidas en los cambios del campo eléctrico debidos a esas descargas. Mientras tanto, C. V. Boys [1] había inventado una ingeniosa máquina fotográfica de gran velocidad, que fue utilizada con éxito notable en Sudáfrica por B. F. J. Schonland y sus colaboradores, quienes obtuvieron importante información sobre el proceso de ruptura eléctrica en la chispa.

Los descubrimientos iniciales despertaron un interés nuevo y universal en la investigación de relámpagos y problemas afines, tales como la propagación de atmosféricos, la radiogoniometría para localizar tormentas lejanas, la protección de aviones y líneas eléctricas contra daños por rayos y la meteorología de nubes tormentosas. Estos y otros estudios continúan todavía; se han mejorado los aparatos y técnicas y la invención del radar ha proporcionado a los investigadores un poderoso instrumento nuevo para investigar el interior de nubes tormentosas.

(1) Nació en Sudáfrica en 1905 y estudió en la Universidad de Cape Town y en la Sorbona. Fue Profesor de Física en la primera y en la Universidad de Witwatersrand, ingresando después, en 1946, en el Instituto de Investigación Geofísica Bernard Price, donde se dedica a la investigación sobre la electricidad atmosférica. Desde 1931 ha colaborado con B. F. J. Schonland en sus estudios sobre los rayos, tema sobre el que ha publicado numerosos trabajos.

La ocurrencia esporádica de tormentas eléctricas limita las oportunidades de observación; el estudio directo mediante experimentos de laboratorio sólo puede tener un éxito parcial; es imposible reproducir en pequeña escala las condiciones existentes en nubes grandes. Pudiera parecer que las observaciones realizadas desde aeroplanos deberían proporcionar una gran cantidad de información sobre descargas en el interior de las nubes. Sin embargo, los relámpagos constituyen un fenómeno transitorio, de forma que la probabilidad de que un avión volando a gran velocidad atraviere la región interesante de la nube en el momento oportuno, es bastante remota; incluso cuando así ocurre, sólo se investiga un volumen relativamente pequeño de la región total afectada por la descarga. Las observaciones aéreas han proporcionado, sin embargo, información valiosa acerca de las corrientes de aire, temperatura y distribución de las fases sólida y líquida del agua en partes diversas de una nube.

Hay tres tipos principales de descargas eléctricas: rayos a tierra, descargas en el aire y relámpagos en la nube. Los rayos son descargas entre la nube y el suelo y muestran ramificaciones abundantes hacia abajo. La altura de la base de la nube yace entre uno y dos kilómetros, pero la longitud total de la trayectoria visible es más grande debido al camino tortuoso de la chispa. Las descargas en el aire son chispas que salen de la nube y que, en vez de alcanzar el suelo, terminan en cargas espaciales en el aire. Algunas veces las descargas en el aire, que se mueven horizontalmente debajo de la base de la nube, alcanzan 15 kilómetros de longitud. Los relámpagos son descargas entre centros de carga en el interior de la nube. Estas descargas causan una iluminación difusa de la nube y sus canales de descarga son raramente visibles.

Las investigaciones recientes por medio de radar han revelado que las descargas en el interior de bancos de nubes largas se extienden a menudo durante 50 y a veces 150 Km. [2]. En este tipo de chispa se ve empezar la iluminación en un extremo de un banco largo de nubes y moverse hacia el otro extremo. Se pensaba antes que los centros de carga aislados y completamente separados se iban descargando en sucesión mediante la acción encadenada de los efectos fotoeléctrico y electrostático de la descarga precedente, pero las observaciones por medio de radar han mostrado que la descarga es, en efecto, continua.

La fotografía a gran velocidad.

Hoffert en 1890 y Walter en 1903 utilizaron el simple recurso de hacer girar una cámara fotográfica ordinaria alrededor de un eje vertical para estudiar la estructura de un relámpago. Pudieron demostrar que un rayo consiste ordinariamente de una serie de descargas sucesivas a lo largo de la misma trayectoria; también pudieron detectar una pre-descarga. Tal aparato sólo podía dar resultados cualitativos. La máquina de Boys, que significa un progreso muy considerable, ha representado un papel tan importante en el estudio de los relámpagos que daremos una descripción breve de ella antes de proceder al examen de los resultados obtenidos.

La figura 3.^a muestra la combinación de cámaras fotográficas utilizadas en Sudáfrica [3]. La cámara central grande es la de Boys; tiene dos lentes, montadas diametralmente opuestas sobre un disco circular que gira a gran velocidad movido por la correa de la polea grande.

Consideremos lo que pasa cuando se fotografía un rayo que empieza en la nube y progresa verticalmente hacia abajo. En todo momento las lentes de la cámara de Boys se mueven en direcciones opuestas. Por lo tanto, si las lentes están en oposición horizontal en el

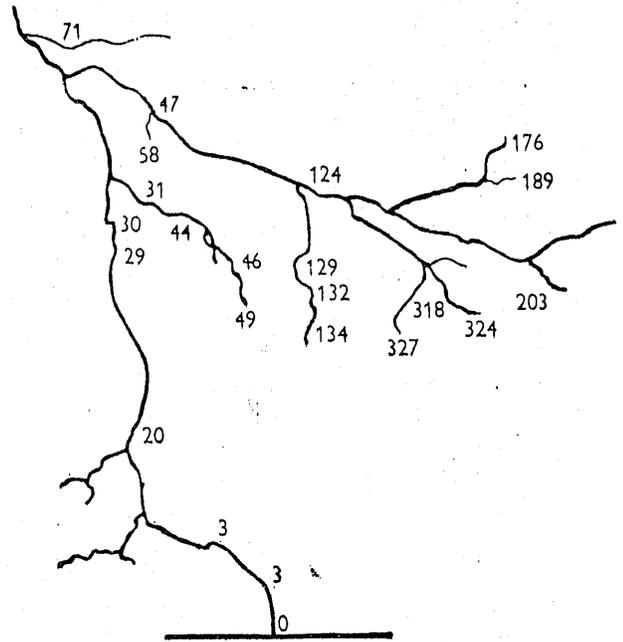
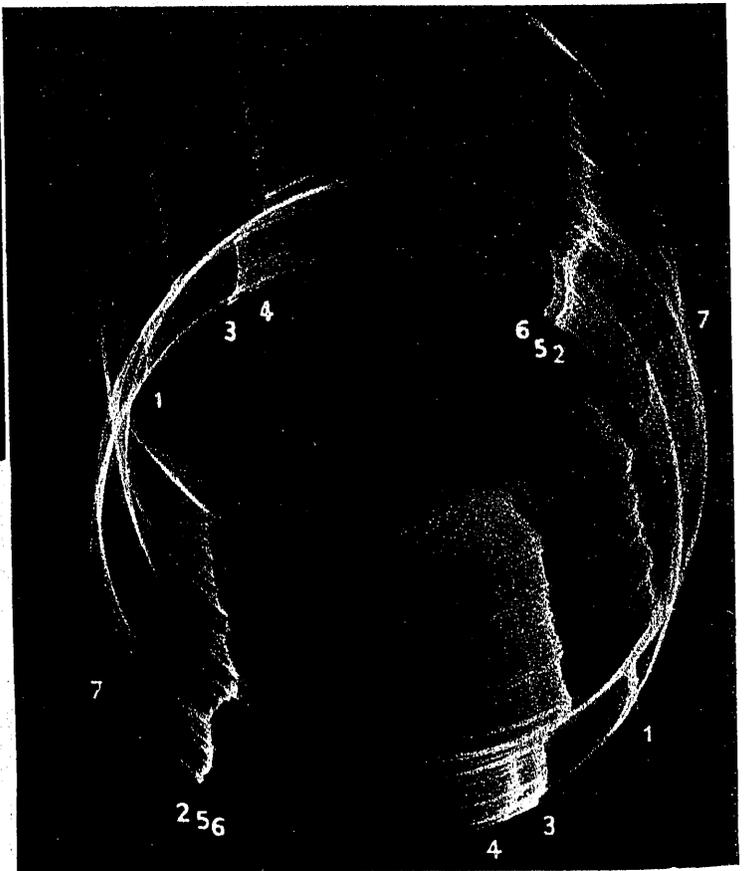


Fig. 1.^a — Horario, en microsegundos, del avance de una descarga de retorno hacia la nube a lo largo de las ramificaciones.



(a)

Fig. 2.^a — (a) Fotografía de un rayo con siete descargas en orden 1 a 7, tomada con la cámara lenta de la figura 3.^a. (b) Fotografía del mismo rayo tomada con la cámara rápida de Boys de dos lentes. Las lentes giran en la dirección de las agujas del reloj. Sólo la descarga 1 presenta ramificaciones.



(b)

momento en que empieza la descarga, una lente se moverá hacia abajo y la otra hacia arriba. La lente que se mueve hacia abajo, en la dirección de la descarga, alarga la imagen fotográfica en una magnitud igual a la distancia recorrida por la lente durante el tiempo necesitado por la descarga para llegar al suelo. La otra lente, por el contrario, acorta la imagen en la misma magnitud. El tiempo empleado por la descarga en llegar al suelo puede pues obtenerse dividiendo la diferencia entre las longitudes de las imágenes por el doble de la velocidad lineal de las lentes.

Si las lentes están en cualquier otra posición cuando empieza la descarga, una lente se moverá hacia la derecha y otra hacia la izquierda, de modo que las imágenes del extremo móvil del rayo serán distorsionadas hacia la derecha y hacia la izquierda, respectivamente. Midiendo estas distorsiones es posible establecer un horario del progreso del rayo y determinar en qué dirección se movía. Las lentes de la cámara de la figura 3 giran a 50 revoluciones por segundo, haciendo así posible medir intervalos de tiempo con una precisión de muy pocos microsegundos.

Las cámaras se utilizan corrientemente durante la noche, de tal forma que los obturadores pueden permanecer abiertos en espera de un rayo. También pueden tomarse fotografías durante el día, utilizando la perturbación producida en un receptor de radio al comienzo del rayo para operar un relé que abre el obturador al cabo de un tiempo determinado. Se han diseñado otros tipos de cámara con el propósito de obtener un movimiento lineal de las lentes respecto a la película, en vez de circular, pues así los resultados son más fáciles de interpretar.

Cuando el relámpago consiste de varias descargas consecutivas, las lentes de la cámara de Boys ejecutarán más de una revolución durante el curso de la descarga y no será posible seleccionar en la fotografía el orden de sucesión de las descargas. Se utiliza la pequeña cámara superior para vencer esa dificultad. Es similar en construcción a la cámara principal de Boys, pero sólo tiene una lente en su disco, que, mediante correas y poleas, sólo gira a una revolución por segundo. Como la mayoría de los rayos duran menos de un segundo las imágenes de sucesivas descargas aparecen en orden cronológico sin montarse. Sabiendo la relación de velocidades de las cámaras es fácil correlar las descargas fotografiadas con la cámara rápida con las de la lente. La tercera cámara que aparece a la derecha en la figura 3.^a es una cámara ordinaria que se utiliza para obtener una fotografía en reposo del rayo. La figura 2.^a (a y b) muestra un conjunto de fotografías de un rayo tomadas, respectivamente, con las cámaras lenta y rápida de la figura 3.^a, que consistió de 7 descargas, que se siguen en orden sucesivo de 1 a 7.

Resultados de los estudios fotográficos.

Como ya se ha dicho, los rayos pueden consistir de varias descargas sucesivas siguiendo la misma trayectoria. En Johannesburgo (Sudáfrica) el 50 por 100 de todos los rayos tienen más de cuatro descargas y no son raras las chispas de 20 descargas. En Inglaterra, por el contrario, la mayoría de los rayos tienen sólo una descarga [4]; la diferencia se debe evidentemente a la mayor actividad de las tormentas tropicales. Ordinariamente sólo la primera descarga tiene ramificaciones (fig. 2.^a, descarga 1). El intervalo más frecuente entre descargas es de 30 a 50 milisegundos.

Cada descarga es doble. Una descarga débilmente luminosa, llamada centella-guía, surge primero de la base de la nube y se desplaza hacia abajo. Cuando llega cerca del suelo se encuentra con una descarga muy brillante e intensa llamada descarga de retorno, que surge del suelo y se mueve hacia arriba a gran velocidad a lo largo del canal-guía previamente formado.

La primera guía inicia la ruptura eléctrica entre la base de la nube y el suelo y no tiene, por tanto, trayectoria preparada a través del aire. Las cámaras fotográficas de gran velocidad muestran que avanza rápidamente durante unos 20 m. y entonces parece pararse. Después de un intervalo de unos 50 μ seg surge repentinamente hacia delante otros 20 m. en forma de descarga relativamente brillante y se detiene de nuevo. Estos avances intermitentes, como pasos, se repiten hasta que la guía llega finalmente al suelo, siguiendo entonces la brillante descarga de retorno. Las cifras citadas son valores medios [3].

a figura 4.^a muestra una fotografía de una guía escalonada obtenida con la cámara de Boys. La rotación de la lente es de derecha a izquierda y pueden verse los escalones de la guía a la derecha de la descarga de retorno, cuya imagen aparece mucho más ancha, pues dura mucho más tiempo que los escalones de la guía. El diámetro del canal de la descarga de retorno es mucho menor que el de la guía escalonada, a causa del efecto de contracción magnética debido a su gran corriente [13].

El hecho de que la velocidad media de avance de una guía escalonada sea notablemente constante sugiere que los pasos brillantes van precedidos de una débil centella-piloto que avanza continuamente durante lo que parecen intervalos de reposo. Cuando tal centella-piloto se ha abierto paso una decenas de metros, necesita una corriente más intensa, con lo que su luminosidad aumenta de repente y aparece como un paso brillante. La presencia de esta débil centella-piloto avanzando a una velocidad de unos 2×10^7 cm./sec. ha sido deducida mediante razonamientos teóricos, pero aún no se ha demostrado fotográficamente con éxito completo.

El descubrimiento de la guía escalonada constituyó un gran avance para llegar a comprender cómo podía

saltar un rayo un par de kilómetros entre la nube y el suelo. El potencial total es del orden de 100 millones de voltios y el gradiente medio de potencial es sólo una fracción diminuta del necesario para una chispa de ruptura entre electrodos metálicos en el laboratorio.

Se han sugerido varias teorías para explicar el

en el aire, que se han originado de descargas puntuales desde el suelo. El suelo, que es un buen conductor, adquiere una carga positiva inducida debajo de la guía negativamente cargada que se aproxima. Cuando ésta llega al suelo, la carga negativa distribuida a lo largo de su camino será neutralizada por la descarga de

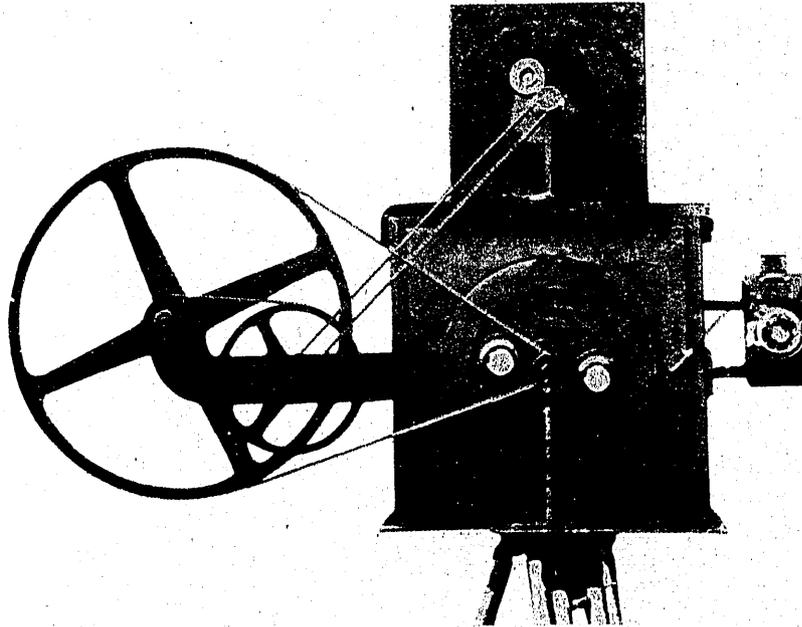


Fig. 3.ª -- Juego de cámaras utilizado en Sudáfrica. Abajo, cámara rápida de Boys de doble lente; arriba, cámara lenta de lente única; derecha, cámara fija.

mecanismo del salto brillante, especialmente las de B. F. J. Schonland [5] y C. E. R. Bruce [6]. Aunque difieren algo en detalle conducen a la misma conclusión general. Al final de un escalón existe una ruta de alta conductividad entre la nube y el extremo móvil del escalón, de tal forma que el potencial es del mismo orden de magnitud que el de la nube. La concentración de líneas de fuerza en la punta de la guía hace posible que una corriente débil avance una distancia limitada. La intensa corriente que sigue restablece el alto potencial en la punta, de tal forma que la centella-piloto puede abrirse paso en un nuevo escalón. No existe razón alguna que impida que tal corriente escalonada, una vez empezada, no proceda indefinidamente, si la nube puede proporcionar la carga necesaria. Esta conclusión viene apoyada por la existencia en el aire de descargas horizontales enormemente largas que, como los estudios fotográficos han demostrado, avanza en forma de guía escalonada.

Durante el avance de la guía escalonada la carga negativa de la nube desciende. La centella-piloto en su camino hacia el suelo forma ramificaciones laterales hacia concentraciones de carga espacial positiva

retorno, que puede ser considerada como una carga positiva que se mueve hacia arriba a lo largo del canal, y hacia afuera a lo largo de las ramificaciones formadas previamente por la guía. La luminosidad de la descarga de retorno se desplaza hacia arriba a velocidades que varían de un décimo a un tercio de la de la luz.

La figura 1.ª muestra el horario en microsegundos del progreso de una descarga de retorno. Mientras que la luminosidad tarda 71μ seg. en alcanzar la nube, llega al extremo inferior de la rama larga de la derecha sólo al cabo de 327μ seg.

La intensa corriente (unos 30 kA.) en la primera descarga de retorno causa una gran ionización del canal del rayo, que permanece conductor durante unos 100 mseg. después de cesar el flujo de corriente. Si ocurre una segunda descarga en este intervalo de tiempo, se encuentra preparada una ruta de baja resistencia a lo largo de la cual su guía avanza rápida y continuamente en forma de dardo brillante que va directamente al suelo por el canal principal primero, sin ramificarse. Esta guía en dardo también distribuye carga negativa a lo largo de su trayectoria y va



Fig. 4.ª — Guía escalonada. El movimiento de la lente es de derecha a izquierda. A la derecha, puede verse el avance paso a paso hacia abajo de la guía. La imagen de la brillante descarga de retorno a la izquierda, está ensanchada debido a su luminosidad continuada. Las rayas horizontales de la izquierda están causadas por el desvanecimiento desigual de la luminosidad debido a las curvas del canal.



Fig. 5.ª — Guía en dardo. El movimiento de la lente es de derecha a izquierda. La guía empieza arriba, a la derecha, y procede hacia tierra, donde es seguida por la descarga de retorno a la izquierda. El movimiento de la lente distorsiona la imagen y da la fotografía en forma de V.

seguida de una descarga intensa hacia arriba desde el suelo; ésta es semejante a la primera descarga de retorno, pero sin sus ramificaciones.

Otras descargas subsiguientes presentarán también guías en dardo, cuyas velocidades son aproximadamente diez veces las de las guías en escalones. La figura 5.ª muestra una guía en dardo a la derecha y la descarga de retorno siguiente a la izquierda. El movimiento de la lente fotográfica es de derecha a izquierda. Si el intervalo que ha transcurrido desde la última descarga de retorno se acerca a 100 mseg., la ionización restante en la parte alta del canal es apenas suficiente para dirigir la guía, que entonces se convierte de nuevo en una escalonada, con longitudes cortas de escalones e intervalos. Cuando la guía llega

a la parte baja del canal éste ha perdido, en general, su ionización, de tal manera que no tiene efecto dirigente. La guía se convierte entonces en verdadera guía escalonada y sigue en su avance ulterior una ruta independiente y cae en un punto diferente del de las descargas anteriores.

Los centros principales de carga en las nubes.

Se ha convenido en considerar como positivo el campo eléctrico en el suelo causado por una carga en una nube cuando la carga es positiva y negativo cuando es negativa. En el caso de nubes reales se ha encontrado que el campo es negativo cuando la

nube está cerca y positivo cuando está más distante. Puede atribuirse este efecto a la presencia de dos regiones cargadas, una encima de la otra, y de polaridad opuesta: la región inferior (N) está cargada negativamente; la superior (P) positivamente.

Una chispa causa un cambio repentino en el campo eléctrico. Con raras excepciones, los rayos originan cambios positivos del campo, indicando que la nube posee menos carga negativa al final y que los rayos vacían pues el centro de carga negativa o N y transportan electricidad negativa a la tierra. Los relámpagos, al contrario, originan cambios positivos del campo cuando la nube está cerca del suelo y negativos cuando está distante; de esa observación se deduce que los relámpagos son descargas entre los centros N y P . Aparte de demostrar que la región cargada positivamente está más alta que la cargada negativamente, estas observaciones no dan indicación alguna de las alturas a que están situadas las regiones.

El cambio en el campo eléctrico debido a una chispa eléctrica tal como se mide en un puesto de observación en el suelo depende de la distancia D de la chispa, de la magnitud Q de la carga transportada a tierra o neutralizada en la nube y de la altura inicial H de la carga. D puede medirse a partir del intervalo de tiempo entre el relámpago y el trueno. Es, pues, evidente que las dos incógnitas Q y H no pueden ser determinadas a partir de una única observación, sino que se requieren dos medidas independientes de los cambios del campo a distancias distintas. En el caso de relámpagos entre cargas a alturas diferentes son necesarias al menos tres medidas.

Distribución de las cargas.

La primera determinación directa de la altura de las distintas cargas en las nubes se debe a Simpson, Scrase y Robinson [7], que enviaron globos-sonda provistos de un ingenioso aparato, al que llamaron alti-electrógrafo, para medir campos eléctricos. Este aparato consiste esencialmente de un cable largo y fuerte en el que se hace un corte cerca de su extremo superior. Se conectan los extremos cortados a electrodos que se apoyan en papel buscapolos. Los campos intensos originan una corriente eléctrica entre los extremos del alambre; uno de los electrodos coloreará el papel, según la dirección del campo. El papel se desplaza mediante un mecanismo de relojería, y la anchura de la marca coloreada sirve de medida de la intensidad del campo.

Estos sondeos mostraron que los centros de carga negativa están situados encima de la base de la nube, en una región donde la temperatura está por debajo de 0°C ., y que el centro principal de carga positiva está más arriba, cerca de la cúspide de la nube. Esos investigadores realizaron también el importante descubrimiento de que hay a menudo otra

carga positiva pequeña en la base de la nube cuando la temperatura es allí superior a 0°C .

La presencia de esta carga positiva baja (ϕ) explica el hecho de que el campo eléctrico inmediatamente antes de un rayo sea frecuentemente pequeño e incluso positivo: la carga positiva pequeña inmediatamente encima contrarresta los efectos de una carga negativa mucho mayor a más altura. Los sistemas de alarmas que tocan un timbre o encienden una luz cuando el campo es intenso pueden, pues, fallar en sus predicciones cuando es inminente una descarga muy cercana.

Los globos-sonda tienen el inconveniente de que no es posible controlar su trayectoria de vuelo y de que tardan mucho tiempo en atravesar la nube, en comparación con la duración de los procesos eléctricos. Los resultados obtenidos son, por lo tanto, difíciles de interpretar. Debido a esto se utilizó posteriormente en Sudáfrica [8] un método diferente para la investigación de la distribución de carga, demostrándose que era posible calcular cómo estaba distribuida la carga negativa principal en las nubes mediante el estudio en el suelo de la variación en razón de la distancia de los cambios en el campo electrostático debidos al proceso de descarga mediante una guía, o de las amplitudes relativas de las variaciones del campo debidas a la guía y a la descarga de retorno, o bien los cambios lentos del campo que tienen lugar en los intervalos entre las descargas sucesivas de un rayo.

Estos métodos de investigación condujeron al inesperado descubrimiento de que la carga negativa está distribuida en una columna aproximadamente vertical de unos 5 Km. de altura que se extiende desde 3,5 a 8,5 Km. de altitud. También se encontró que la primera descarga de un rayo se alimentaba de una región limitada de carga, situada a unos 3,5 kilómetros de altitud, y que las descargas sucesivas se alimentaban progresivamente de regiones más y más altas de la columna de carga negativa. Es éste un descubrimiento sorprendente, pues previamente se creía que las descargas sucesivas se alimentaban de regiones cargadas completamente separadas y aisladas, distribuidas horizontalmente en la base de la nube.

Toda la columna negativa está en una región de temperaturas bajo cero; su extremo superior alcanza a menudo el nivel correspondiente a -40°C . (fig. 6.^a). Esta temperatura tiene un significado especial, porque es la temperatura más baja a la que puede sobreenfriarse una gota de agua sin congelarse. Por consiguiente sólo hay partículas de hielo a temperaturas inferiores a -40°C ., mientras que en la columna negativa pueden coexistir gotas de agua y partículas de hielo, hecho que debe tener importancia en los procesos físicos que ocurren en la electrificación de la nube.

Puede también estudiarse la distribución de cargas eléctricas en los rayos mediante el radar, pues

las cargas de la nube van siendo vaciadas por una multitud de centellas que crean regiones altamente ionizadas que pueden reflejar impulsos de radar. Estudios recientes con radar [9] han confirmado la presencia de una columna alta de carga negativa y han demostrado que su diámetro es del orden de uno a dos kilómetros.

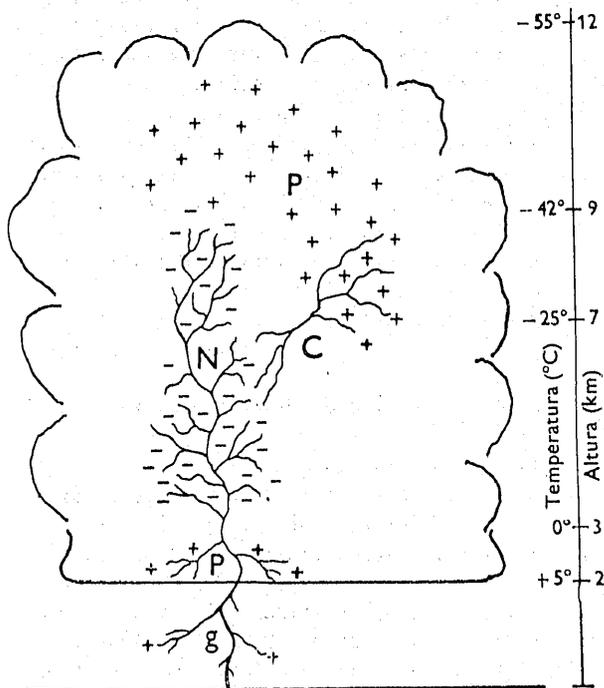


Fig. 6.^a—Distribución probable de las cargas principales en una nube en Johannesburgo; altura, 2 000 m. sobre el nivel medio del mar. *P*, carga positiva superior; *N*, columna negativa; *p*, carga positiva inferior; *g*, rayo hacia tierra que se alimenta de la columna negativa en etapas desde la base hacia arriba; *C*, relámpago entre las regiones *N* y *P*.

La columna negativa va acompañada en la nube de una célula o chimenea de fuertes corrientes de aire ascendente. Las partículas grandes de hielo o agua que están cargadas negativamente tienden a caer por acción de la gravedad, mientras que las partículas más pequeñas que están cargadas positivamente son acarreadas hacia arriba para formar la carga positiva superior, como se explicará más tarde. Es probable que algunas de las partículas positivas ligeras desbordeen el extremo superior de la chimenea y sean arrastradas a regiones más bajas por las corrientes descendentes que existen en la región posterior de una nube tormentosa completamente desarrollada. Esta conclusión viene confirmada por observaciones con radar, que muestran que las descargas dentro de una nube entre los centros de carga *N* y *P* muy a menudo no llegan a alcanzar la misma altitud que las descargas finales en forma de rayos, mostrando así que

no toda la carga *P* está por encima de la columna negativa.

La figura 6 ilustra la distribución probable de las cargas en una célula de una nube, habiéndose utilizado toda la información disponible hasta ahora. Una nube grande puede tener varias células activas. En Johannesburgo, que está en una meseta a 1 800 m. sobre el nivel medio del mar, las cúspides de las nubes alcanzan altitudes de 12 000 m. sobre el nivel del suelo. En latitudes más templadas las nubes no alcanzan generalmente una altitud tan grande, de tal forma que la columna negativa puede ser más corta.

Procesos de ruptura eléctrica en la nube.

Las regiones de una nube cargadas eléctricamente contienen gotas de agua y partículas de hielo que portan cargas, pero que están aisladas unas de otras por el aire interpuesto. No puede descargarse tal región antes de establecerse contacto eléctrico entre las partículas individuales cargadas para agrupar y reunir sus cargas en un canal ionizado conductor que puede entonces avanzar en forma de chispa eléctrica. La siguiente explicación del proceso mediante el que se forma el canal conductor en el caso de un rayo fue sugerida por L. B. Loeb [10] a partir de deducciones teóricas. Sus predicciones fueron confirmadas posteriormente por el trabajo experimental de N. D. Clarence y nosotros [11].

La región entre la base de la columna negativa *N* y la carga positiva inferior *p* (fig. 6.^a) en la base de la nube, contiene gotas de agua grandes en un campo eléctrico creciente. Se induce una carga positiva en la superficie superior y una carga negativa en la superficie inferior de la gota, que se alarga debido a las atracciones eléctricas opuestas de las cargas *N* y *p* de la nube.

Al acumularse las cargas en la nube aumenta el campo y las gotas se alargan más y más hasta que el campo alcanza un valor de 10 kV./cm. Entonces la gota es inestable y un filamento largo de agua salta de su extremo positivo, una descarga luminosa empieza en el extremo fino de este filamento que entonces se rompe dejando una nube de gotas diminutas cargadas e iones. La gota continúa desprendiendo filamentos hasta que su diámetro se reduce a 1 mm. [12]. Sólo es necesaria una gota situada convenientemente en la nube para iniciar la pulverización, que luego se extiende de gota a gota mediante una reacción en cadena, hasta que se establece un canal conductor entre los centros de carga *N* y *p*. Esto completa la primera etapa en el proceso de ruptura eléctrica.

A continuación sigue la neutralización de la carga *p*, después de lo cual, el canal conductor, que se extiende hasta la base de la nube se carga negativamente; esta carga negativa está suministrada por centellas que radian dentro y se alimentan de la colum-

na negativa. Al continuar cargándose, el campo eléctrico enfrente del extremo inferior del canal conductor continúa aumentando hasta que alcanza 60 kV./cm., que es el campo requerido [5] para iniciar la centella-piloto y la ruptura en guía escalonada a través del aire hacia el suelo.

Causa de las descargas múltiples.

La distribución de carga en la columna negativa es continua, pero no de densidad uniforme. Sería de suponer que tal columna negativa se descargase continuamente una vez que la guía ha establecido contacto eléctrico con el suelo, y no en una serie intermitente de descargas, como sucede ordinariamente. Se encontró la respuesta a este sorprendente enigma al examinar los cambios lentos en el campo

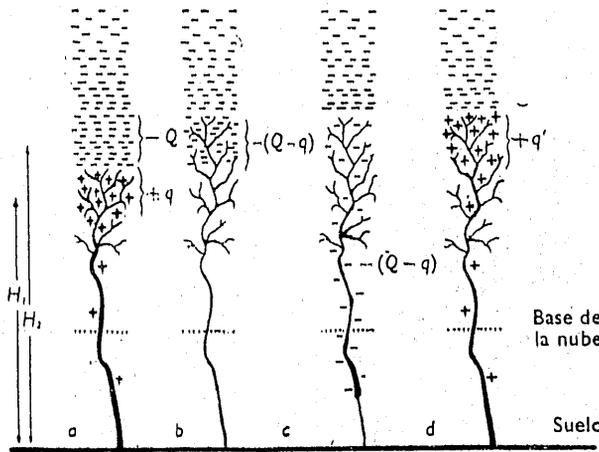


Fig. 7.^a — Diagrama ilustrativo de los procesos eléctricos que tienen lugar en la nube durante el intervalo entre dos descargas sucesivas de un rayo.

electrostático entre las descargas sucesivas de un rayo [8]. Estos cambios del campo de unión, o campos J , como se les llama, muestran que la carga positiva se eleva a una velocidad de 3×10^6 cm./seg., siendo neutralizada en el proceso. Las etapas del proceso J que ocurren en el intervalo entre dos descargas sucesivas de un rayo aparecen ilustradas en la figura 7.^a (a, b).

La figura 7.^a, a) muestra la distribución de cargas al finalizar una descarga de retorno que ha traído una carga positiva $+q$ a las centellas ramificadas muy conductoras de la cúspide del canal, a una altura media H_1 . En el intenso campo entre $+q$ y $-Q$ empiezan penetrando centellas positivas en $-Q$ hasta que la carga positiva $+q$ ha quedado neutralizada, dejando una carga residual negativa $-(Q-q)$ en una región que han hecho conductora las centellas a una altura media H_2 , según aparece en b.

Esta carga negativa fluye ahora hacia abajo a lo largo del canal como una guía en dardo (c). La descarga de retorno que sigue lleva de nuevo una carga positiva a la cúspide del canal (d). Las condiciones ahora son semejantes a las de a. Todo el proceso J se repite sucesivamente, extrayéndose carga de regiones cada vez más altas de la columna negativa, hasta que su carga se agota. Las investigaciones por medio de radar han mostrado que además de los procesos J en la cúspide del canal (fig. 7.^a), la desaparición de cargas residuales negativas situadas más abajo en la nube continúa durante el rayo.

Puesto que los rayos que han tenido sólo una o dos descargas van a menudo seguidos de una corriente continua al suelo de 50 a 80 A, que dura algunos centenares de milisegundos, se ha sugerido que, en estos casos, la columna negativa se agota de una forma continua debido a que su densidad de carga es excepcionalmente alta, a causa de factores meteorológicos aún desconocidos.

Procesos de electrificación.

Hasta hace unos doce años se creía que la teoría de la electrificación al caer las gotas, desarrollada por C. T. R. Wilson, podía explicar la separación de las cargas principales positiva y negativa en una nube. Según esta teoría, una gota grande de una nube tendría una carga positiva inducida en su superficie inferior y una carga negativa en su superficie superior, debidas al campo eléctrico normal. La gota es sostenida o cae despacio en una fuerte corriente ascendente de aire, que contiene normalmente un número aproximadamente igual de iones positivos y negativos. Cuando un ión negativo se mueve hacia la gota, será atraído por la carga positiva inferior y se pegará a la gota. Un ión positivo, al contrario, será desviado y tendrá que rodear la gota antes de entrar en el campo de atracción de la superficie superior de la gota. La movilidad de los iones positivos es, sin embargo, baja, comparada con la velocidad del viento, con el resultado de que no serán capaces de volverse hacia la gota, sino que pasarán de largo. Por medio de esta captura selectiva de iones negativos, las gotas se cargan negativamente y forman el centro inferior de carga negativa o N . El aire que se desplaza hacia arriba tendrá un exceso de iones positivos que formarán el centro superior de carga positiva o P . Sin embargo, cuando se dispuso de más datos acerca del desarrollo de las células tormentosas, se encontró que el proceso de Wilson sólo era demasiado lento para producir la separación de cargas en el tiempo disponible.

Una nube contiene vapor de agua, gotas de agua grandes y pequeñas y partículas de hielo grandes y pequeñas, algunas secas y otras mojadas. Las gotas y las partículas de hielo están a temperaturas que varían muy ampliamente, y en un estado de torbellino

causado por las intensas corrientes de aire de la nube. Los experimentos de laboratorio han demostrado que las cargas eléctricas pueden ser separadas por reacciones varias entre los diferentes constituyentes de la nube.

La fricción entre partículas de hielo de tamaños diferentes general electricidad, pero la reacción depende de la diferencia de temperatura entre las partículas que chocan y también de su estado de contaminación por substancias disueltas. No se presta, pues, a evaluaciones cuantitativas.

Cuando una partícula de hielo crece por sublimación de vapor de agua, puede crear pequeñas astillas de hielo; entonces la partícula principal adquiere una carga negativa y las astillas positiva. Las salpicaduras producidas cuando una gota grande de agua choca con una piedra de granizo y se hiela parcialmente, crean una carga negativa en el granizo y una carga positiva en el efluvio de gotitas.

Cuando gotitas pequeñas sobreenfriadas chocan con una partícula de hielo, se congelan en ésta, que adquiere entonces una carga negativa, mientras el aire se carga positivamente. Que este proceso es, al menos parcialmente, la causa de la separación de carga en las nubes, parece ser confirmado por la observación, ya citada, de que la columna negativa de carga se extiende sólo hasta el nivel correspondiente a -40° centígrados, por encima del que no puede existir agua en la fase líquida. Cualquiera de estos procesos de generación de carga causa que la carga negativa se reúna en las partículas más grandes y la positiva en las más pequeñas, de tal forma, que la separación

de las cargas respectivas puede efectuarse por la acción de la gravedad. Las partículas más pesadas y cargadas negativamente, tienden a caer, mientras que las más ligeras son arrastradas hacia la cima de la nube por corrientes ascendentes.

Referencias.

1. Boys, C. V.: *Nature*, Lond., 118, 749, 1926.
2. Ligda, M. G. H.: *J. atmos. terr. Phys.*, 9, 329, 1956.
3. Schonland, B. F. J.; Malan, D. J., y Collens, H.: *Proc. roy. Soc.*, A, 168, 455, 1938.
4. Pierce, E. T.: *Quart. J. R. met. Soc.*, 81, 211, 1955.
5. Schonland, B. F. J.: *Proc. roy. Soc.*, A, 164, 132, 1938; 220, 25, 1953.
6. Bruce, C. E. R.: *Ibid.*, 183, 228, 1944.
7. Simpson, G. C., y Scrase, F. J.: *Ibid.*, 161, 309, 1937. Simpson, G. C., y Robinson, G. D.: *Ibid.*, 177, 281, 1940.
8. Malan, D. J., y Schonland, B. F. J.: *Ibid.*, 206, 145, 1951; 209, 158, 1951.
9. Hewitt, F. J.: *Proc. phys. Soc. Lond.*, B, 70, 961, 1957. Miles, V. G.: *J. atmos. terr. Phys.*, 3, 258, 1953.
10. Loeb, L. B.: Informe del Departamento de Física, Universidad de California, 1953.
11. Clarence, N. D., y Malan, D. J.: *Quart. J. R. met. Soc.*, 83, 161, 1957.
12. Macky, W. A.: *Proc. roy. Soc.*, A, 133, 565, 1931.
13. Allen, J. E.: *Endeavour*, 17, 117, 1958.