

TRABAJO ESPECIAL DE LICENCIATURA

Estudio experimental de campo de las cargas eléctricas y tamaño de las partículas de precipitación

FACULTAD DE MATEMÁTICA, ASTRONOMÍA, FÍSICA
Y COMPUTACIÓN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Andrés Yamil López

Director: Dr. Rodolfo Guillermo Pereyra

Septiembre de 2018



Estudio experimental de campo de las cargas eléctricas y tamaño de las partículas de precipitación por Andrés Yamil López y Rodolfo Guillermo Pereyra se distribuye bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Agradecimientos

Institucionales/Académicos

- A Rodolfo Pereyra por su guía, paciencia y toda su ayuda, y a Eldo Ávila por darme la oportunidad de trabajar en este proyecto y por sus valiosos aportes.
- A Rodrigo Bürgueser y Guillermo Aguirre Varela, por facilitar y ayudar con los programas usados en este trabajo y por su ayuda en el laboratorio. Además quiero agradecer especialmente a Guille por haberme prestado la tarjeta analógico-digital para este trabajo.
- A Analía Pedernera y los demás integrantes del grupo de atmósfera por su apoyo, sugerencias y consejos.
- A José Barcelona por su permanente ayuda en el laboratorio.
- A Gabriela Pozo López, Jorge Revelli y Sergio Ceppi por sus atinadas observaciones y críticas constructivas.
- A Maximiliano Ivaldi del taller mecánico por la construcción del aparato, que fue fundamental para este proyecto.
- A todos los profesores, compañeros y seres queridos que me ayudaron en la realización de este trabajo y me apoyaron en todo momento.
- A la universidad pública y a quienes apuestan por la educación pública, gratuita y laica.

Finalmente quiero agradecer a mi familia, mis amigos, compañeros, tutores y aquellos que me acompañaron en la vida, por su presencia, su ayuda, su cariño y sus consejos, sin los cuales nada hubiese sido posible. Quisiera también recordar a las personas valiosas que ya no están y agradecer lo que dejaron en nuestras manos.

Resumen

En este trabajo experimental sobre la electrificación de las nubes se estudió la carga eléctrica y el tamaño que poseen las partículas de precipitación cuando llegan al nivel del suelo. Se diseñó y construyó el instrumento de medición, junto con los componentes de electrónica y *software* necesarios. El dispositivo experimental se calibró, y luego se utilizó en lluvias que ocurrieron en Córdoba Capital, en el período de marzo de 2017 a marzo de 2018, a modo de prueba. De trece lluvias que se midieron, cinco fueron analizadas; para este análisis se calcularon diversos parámetros y se elaboraron gráficos que ayudaron a la comparación de los resultados.

De las mediciones y los análisis realizados, se desprenden algunas características que se consideran importantes. Algunas de éstas son que las lluvias, en todos los casos, transportan carga eléctrica neta positiva a tierra; también que los observables meteorológicos tienen una relación directa con el comportamiento eléctrico de la precipitación, de manera que la precipitación más activa eléctricamente (mayor carga por gota y cantidad de gotas cargadas) para eventos más intensos, pero a su vez se observan diferencias importantes entre lluvias que parecen tener un mismo carácter meteorológico.

Finalmente se concluye que a futuro es necesario realizar nuevas mediciones, de forma más sistemática y constante, para lluvias diversas y a lo largo de todo su tiempo de duración. Además de medir una mayor cantidad de parámetros meteorológicos, con mayor precisión y regularidad. Aunque los resultados obtenidos no permiten plantear hipótesis sólidas y respaldadas por lo observado, este trabajo es importante por ser el primero de su tipo realizado en el Grupo de Física de la Atmósfera de FaMAF, constituyendo un precedente para futuros trabajos y facilitando el instrumental necesario.

Abstract

In this experimental work on the electrification of clouds we studied the electric charge and the size of precipitation particles at ground level. We also designed and built the measuring instrument (experimental device), including the necessary electrical and software components. After its calibration, the experimental device, was used to study raindrops from rains in Córdoba Capital between March 2017 and March 2018. Out of thirteen rains that were recorded, five were analyzed by calculating and plotting several parameters for comparison.

From the measurements and the analyses, several important characteristics emerged: (i) in

all cases the rains carried net positive charge to the surface, (ii) the meteorological observations were directly related to the electrical behavior of the rain, in that the more intense the rain, the larger the electrical activity, although there were instances of large differences between rains that seemed to have the same meteorological behavior.

Finally, in order to put forward or analyze hypothesis based on the data, more systematic studies are needed of additional types of rains and during their whole duration, as well as measuring a larger number of parameters with higher accuracy and regularity, . Despite the limitations of this pilot study, this work is important as it is the first of its kind in the Grupo de Física de la Atmósfera de FaMAF, and will help future works by this research group.

Índice general

1. Introducción	7
1.1. Objetivos	8
1.2. Marco teórico	8
1.2.1. Nubes y partículas atmosféricas	8
1.2.2. Características eléctricas de la atmósfera	9
1.2.3. Estructura eléctrica de la nube	11
1.2.4. Teorías de electrificación de nubes	13
1.2.5. Mecanismo de captura selectiva de iones de Wilson	14
1.2.6. Carga máxima en las gotas y velocidad máxima de caída	16
1.3. Antecedentes	17
1.3.1. Takahashi (1973)	18
1.3.2. Chauzy y Despiau (1980)	18
1.3.3. Kamra y Sathe (1982)	19
1.3.4. Despiau y Houngninou (1997)	20
1.3.5. MacGorman y Rust (1998)	21
2. Método Experimental	23
2.1. Descripción del dispositivo de medición	23
2.2. Análisis de la señal de los amplificadores	25
2.3. Calibración	27
2.4. Determinación del diámetro de las gotas	29
3. Resultados y Discusión	31
3.1. Descripción de mediciones realizadas	31
3.2. Resultados	33
3.2.1. Lluvia 1	37
3.2.2. Lluvia 2	41
3.2.3. Lluvia 3	41
3.2.4. Lluvia 4	44
3.2.5. Lluvia 5	46
3.2.6. Comparación de todas las Lluvias	49

3.2.7. Comparación con otros autores	50
4. Conclusiones	55
Bibliografía	57

Capítulo 1

Introducción

Desde tiempos inmemoriales, la lluvia y las tormentas con sus rayos y truenos, junto con otros fenómenos naturales asociados con la electricidad atmosférica, han gravitado de manera decisiva en la historia de la humanidad, no sólo en el aspecto económico sino también en la esfera social, espiritual y cultural. Como es de esperar, estos fenómenos despertaron la curiosidad y el interés científico, y a lo largo de la historia numerosas teorías trataron de explicar su origen. No fue sino hasta principios del siglo XVIII, cuando se descubrió la electricidad, que muchos notaron la similitud en el sonido y aspecto de las chispas con los rayos y los truenos. Algunos científicos sugirieron, entonces, que las nubes de tormenta de alguna forma generaban electricidad, que luego se evidenciaba en los relámpagos y rayos (que producían los truenos). Así fue como en los siglos que siguieron hasta la actualidad se produjeron grandes avances en esta área del conocimiento que mejoraron nuestro entendimiento de los procesos físicos involucrados y que dieron también lugar a nuevas preguntas.

Varias son las motivaciones para interesarnos en la carga eléctrica que tienen las partículas de precipitación (gotas y granizos), una de ellas es comprender mejor los procesos de carga eléctrica de las nubes y su evolución temporal. Hay tres formas de encarar este problema: el trabajo de investigación en el laboratorio, las simulaciones numéricas y las observaciones de campo de las propiedades eléctricas de la nube. Empleando esta última estrategia, para este trabajo se realizaron mediciones desde la superficie terrestre, donde se midieron las cargas eléctricas transportadas y las velocidades de caída de las partículas de precipitación durante la lluvia.

Muchos de los trabajos previos que midieron estas mismas variables, comunicaron valores discrepantes y hasta contradictorios. Aunque es probable que en gran parte estas diferencias puedan atribuirse a las limitaciones en las técnicas experimentales y a la gran variabilidad de las condiciones de medición, también pueden reflejar los distintos tipos de lluvias, en cuanto a sus propiedades eléctricas o a las distintas etapas de una misma nube a lo largo de su ciclo de vida, ya que las nubes son entidades dinámicas en el espacio y el tiempo.

1.1. Objetivos

Los objetivos específicos de este trabajo final de Licenciatura en Física son:

- Diseñar y construir un aparato para la determinación de las cargas eléctricas y los diámetros de partículas de precipitación (gotas y granizos), incluidos sus componentes electrónicos y de *software*.
- Utilizar el aparato mencionado en pruebas piloto con tormentas en la ciudad de Córdoba, para intentar clarificar las propiedades eléctricas de las nubes de tormenta y las discrepancias entre distintos conjuntos de datos, por ejemplo la correlación entre carga eléctrica y tamaño de las gotas, o el cociente entre la cantidad de cargas negativas y positivas.

1.2. Marco teórico

La ciencia atmosférica es una disciplina que investiga la estructura y la evolución de la atmósfera planetaria y los distintos fenómenos que ocurren en ésta. Según la forma en que cambia la temperatura con la altura (es decir, el gradiente térmico vertical), la atmósfera se divide en capas. La capa más baja se llama troposfera, empieza en la superficie terrestre y termina en la tropopausa ($\sim 10\text{ km}$). En esta primera capa de la atmósfera hay una circulación vertical de sus componentes, que están mezclados homogéneamente. En la troposfera ocurren la mayoría de los fenómenos meteorológicos que nos interesan y en ella se encuentra aproximadamente el 80% de la masa atmosférica y casi la totalidad del agua (atmosférica) en sus tres estados.

1.2.1. Nubes y partículas atmosféricas

Una nube es una aglomeración visible de diminutas partículas de agua y/o hielo suspendidas en el aire atmosférico. Las nubes se pueden clasificar según la altitud a la que se forman, sus características morfológicas o su capacidad para producir lluvias, ver figura 1.1. En su clasificación se usa los siguientes prefijos y sufijos: «*nimbo*» (nubes que producen lluvias), «*cúmulo*» (forma algodonosa y/o contorno redondeado), «*estrato*» (gran extensión horizontal), «*cirro*» (formadas por partículas de hielo, por lo general nubes a gran altura), «*alto*» (localizadas a media altura de la troposfera). Con éstos, se nombran a las nubes como *altocúmulo*, *nimboestrato*, *estratocúmulo*, *cirroestrato*, *cúmulonimbo*, etc. Las cúmulonimbos son en general las nubes que presentan gran actividad eléctrica y provocan las tormentas eléctricas.

En una nube podemos encontrar vapor de agua, partículas de agua (líquida o sólida) de precipitación, partículas de agua (líquida o sólida) de nube y aerosoles atmosféricos. Los aerosoles son partículas en suspensión que pueden ser sólidas o líquidas; son producidos por diversas fuentes, como las industriales y la erosión, entre otras. Los aerosoles son fundamentales para la

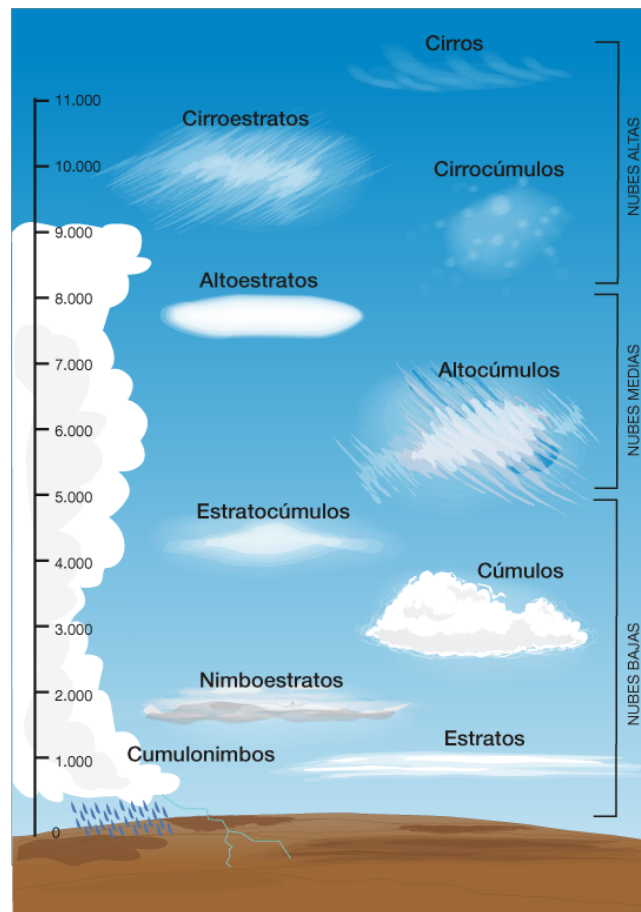


Figura 1.1: Dibujo simplificado de las nubes troposféricas. Imagen obtenida de [1].

formación de partículas de nube. La unión de las partículas de nube dará lugar a las partículas de precipitación, que crecieron lo suficiente como para escapar de aquella.

Podemos clasificar las partículas de agua como:

- **Partículas de nube:** diámetro $< 0.1 \text{ mm}$ y velocidad de caída $< 0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Las **líquidas** son las gotas de nube, mientras que las **sólidas** son los cristales de hielo y las gotas de nube congeladas.
- **Partículas de precipitación:** diámetro $> 0.1 \text{ mm}$ y velocidad de caída $> 0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Las **líquidas**, se dividen según el diámetro en gotas de llovizna ($0.1 - 0.25 \text{ mm}$) y gotas de lluvia ($> 0.25 \text{ mm}$). Las **sólidas**, se dividen según su velocidad de caída en copos de nieve ($0.3 - 1.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), granizos pequeños ($1.5 - 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) y granizos grandes ($> 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$).

1.2.2. Características eléctricas de la atmósfera

La radiación de alta energía proveniente del sol es absorbida en una capa de la atmósfera llamada **ionósfera**. Su nombre se debe a que esta capa se encuentra permanentemente ionizada, debido a que la luz solar ultravioleta interactúa con las partículas presentes en ella, proceso llamado fotoionización. La ionósfera empieza aproximadamente a los 60 km de altu-

ra y se extiende hasta unos $\sim 600 \text{ km}$ de la superficie terrestre. La altura en que empieza varía según la concentración de iones y electrones, que a su vez depende de la hora del día, la latitud, el momento del ciclo solar, etc. En la ionósfera, los electrones e iones libres hacen que ésta se comporte como un buen conductor eléctrico. Los electrones libres son los que provocan la mayor conductividad del medio ya que son los de mayor movilidad. Su permanencia en la atmósfera depende del camino libre medio, que a su vez depende de la densidad del medio.

Por debajo de la ionósfera la conductividad eléctrica es apreciablemente menor, por la ausencia de fotoionización y la mayor densidad del aire. Sin embargo no es nula, gracias a las pequeñas concentraciones de iones generados por los rayos cósmicos y la radiación proveniente del material radioactivo terrestre. Debido a la mayor densidad de esta región, los electrones libres se recombinan rápidamente (creando iones negativos o neutralizándose), de modo que la conductividad está dada sólo por los iones livianos. Los diámetros de éstos son de 10^{-9} m a 10^{-10} m y su carga es la elemental ($1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$). En esta capa, pese a la pequeña magnitud de los campos eléctricos, estos generan fuerzas suficientes para vencer la fuerza gravitatoria y así mover los iones livianos, generando una corriente.

Las propiedades eléctricas de las capas por debajo de la ionósfera son importantes para el objetivo de nuestro estudio, ya que es la zona donde ocurren todos los fenómenos de nuestro interés. La superficie terrestre junto con la ionósfera se comportan como dos superficies conductoras cargadas eléctricamente (de diferente polaridad), con un campo eléctrico entre ellos (equivalente a un capacitor esférico). En tiempo bueno, es decir con cielo despejado o nubes no electrificadas, existe un campo eléctrico que apunta hacia la superficie terrestre (dirección definida como negativa) denominado **campo eléctrico de tiempo bueno**, esquematizado en el lado izquierdo de la figura 1.2. La diferencia de potencial en este sistema eléctrico es aproximadamente constante (promedio en el tiempo en una escala de horas y en el espacio en una escala de cientos de metros), pero existe una densidad de corriente gracias a la débil conductividad en esta región. Esta densidad es pequeña, pero ocurre en toda la superficie terrestre donde haya tiempo bueno y es capaz de neutralizar las diferentes polaridades de las superficies en cuestión de minutos, sin embargo esto no ocurre.

En 1920 Wilson [2] propuso un mecanismo para explicar cómo se mantiene esta diferencia de potencial entre la superficie terrestre y la ionósfera, pero aún al día de hoy el funcionamiento de este proceso no se comprende del todo. Wilson propuso que las tormentas eléctricas y las lluvias electrificadas son las encargadas de mantener esta diferencia de potencial. Las nubes muy electrificadas invierten localmente la polaridad del campo eléctrico terrestre y, por lo tanto, invierten la densidad de corriente que circula, esquematizado en el lado derecho de la figura 1.2. Además causan fenómenos como los rayos, el punto de descarga y la corriente eléctrica debida a la precipitación, cada uno de los cuales produce un flujo eléctrico. El efecto neto de

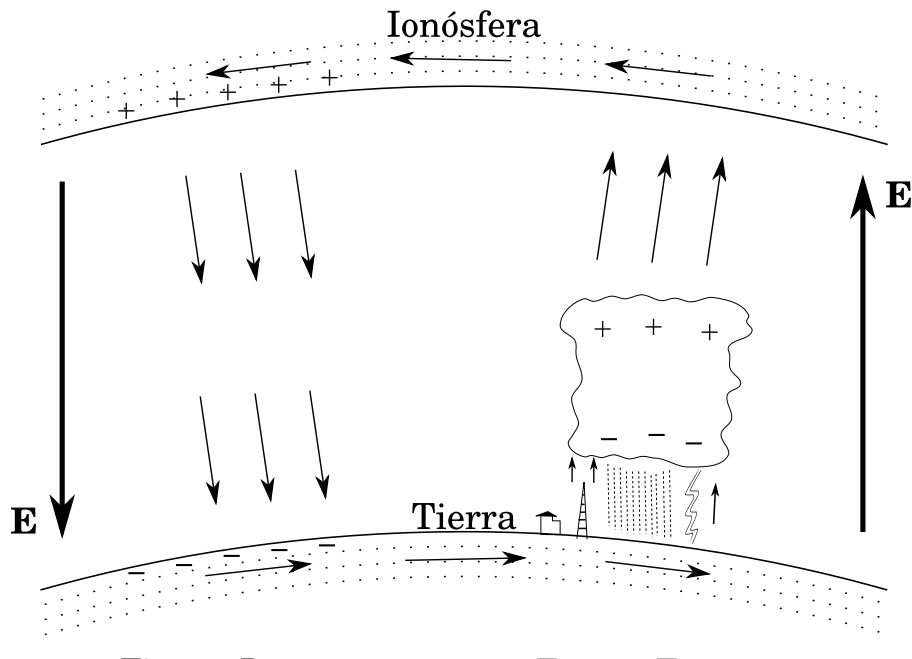


Figura 1.2: Esquema del circuito eléctrico global. El lado izquierdo corresponde a tiempo bueno y el derecho a tiempo con presencia de tormentas eléctricas.

las corrientes producidas por las tormentas y las lluvias electrificadas logra contrarrestar a las producidas en tiempo bueno. La circulación eléctrica que se da globalmente en las regiones de tiempo bueno y las regiones con tormentas es lo que se llama **circuito eléctrico global**; la figura 1.2 muestra un esquema de este sistema.

1.2.3. Estructura eléctrica de la nube

La estructura eléctrica de las nubes es muy variable, según el tipo de nube, su ubicación geográfica, la estación del año, su tiempo de duración y muchos otros factores. Estas pueden tener desde actividad eléctrica nula hasta lograr invertir el campo eléctrico terrestre de tiempo bueno, provocando diferencias de potencial que ocasionan la ruptura dieléctrica del medio (aire), transformándolo en conductor. Estas últimas, en su mayoría, son las llamadas cúmulonimbos, que tienen grandes extensiones verticales que les permiten ocupar regiones con distintas temperaturas, lo que da lugar a la presencia de partículas de agua en distintas fases termodinámicas. Esta mezcla de fases es necesaria para que las cargas eléctricas alcancen las magnitudes detectadas en los tiempos observados. Por otro lado, debido a los vientos convectivos, habrá una mayor circulación de partículas, que colisionarán entre sí y se mezclarán, creciendo por condensación, deposición, agregación, acreción, etc.

Si bien la distribución de cargas dentro de una nube de tormenta es muy variable, en algunos aspectos existen patrones repetidos o característicos. Un modelo conceptual para la estructura eléctrica de las nubes que prevalece hoy en día como primer nivel de aproximación es el de la estructura dipolar/tripolar (figura 1.3). Este consiste en regiones de carga opuesta,

separadas verticalmente, con una región principal de carga positiva en la parte superior, una región principal de carga negativa debajo de ésta y por último una tercer región de carga positiva (de algunos órdenes de magnitud menor a las otras dos) en la parte inferior (localizada centralmente en el plano horizontal). En un mayor grado de detalle, se pueden resumir las características típicas de la estructura eléctrica general de las nubes de tormenta en los siguientes puntos [3]:

- Región de carga negativa, dominante en la parte baja de la nube de tormenta y en general en regiones con un rango de temperatura que varía entre los $-10^{\circ}C$ y hasta los $-25^{\circ}C$ (usualmente de $< 1 km$ de alto).
- Región de carga positiva, típicamente arriba de la región de carga negativa principal, con mayor extensión vertical y con carga total del mismo orden que la negativa.
- Otra región de carga positiva de menor intensidad, debajo de la región de carga negativa principal que generalmente se encuentra en la zona de precipitación.
- Muchas veces hay una capa de carga llamada capa de apantallamiento (*'screening layer'*), de unos cientos de metros de espesor en las fronteras de la nube, sobre todo en fronteras superiores calmas, donde esta capa es negativa.
- Típicamente, las máximas densidades de carga observadas, inferidas por las mediciones de campo eléctrico, son $\lesssim 10000 pC m^{-3}$, y se detectan a lo largo de una distancia vertical de menos de $1 km$.
- Los perfiles verticales de campo eléctrico usualmente indican (en un nivel más alto de detalle) más de tres regiones con polaridad neta (de carga) dispuestas verticalmente (diferentes polaridades entre regiones vecinas).
- En ocasiones se ven diferentes polaridades de carga lado a lado (misma altura).

No obstante lo mencionado, algunas mediciones de los perfiles verticales del campo eléctrico arrojan resultados tan complejos que se alejan de la estructura general de las nubes de tormenta que postulan estos modelos, lo que revela la gran complejidad subyacente a estos fenómenos meteorológicos.

Nicoll y Harrison (2018) [5] presentaron datos que muestran que las nubes estratiformes pueden contener carga en sus regiones superior e inferior, debido a los flujos verticales de corriente eléctrica en la atmósfera. En promedio, se encuentra carga positiva en el límite superior y negativa en el límite inferior. Sin embargo, se observan grandes variaciones tanto en la localización como en la polaridad de la carga, que los autores suponen que se deben a otros procesos dentro de la nube. Además, Nicoll y Harrison hallan una asimetría entre la carga espacial en

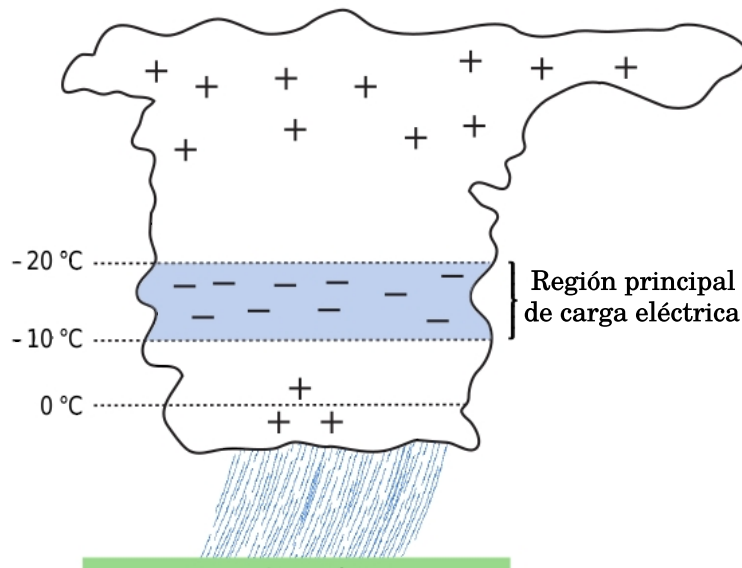


Figura 1.3: Esquema de la estructura dipolar/tripolar. *Imagen obtenida de [4].*

la parte superior (en promedio 32 pCm^{-3}) y la base (en promedio -24 pCm^{-3}), típicamente mayor en la primera.

1.2.4. Teorías de electrificación de nubes

Desde que se empezó a estudiar el rol de las nubes en la electrificación de la atmósfera, se han realizado numerosas investigaciones de laboratorio ([6]; [7]; [8]; [9]), observaciones de campo ([10]; [11]) y estudios teóricos ([12]) para entender los mecanismos de este fenómeno. Las escalas de los distintos procesos intervinientes van desde la microescala (p. ej., propiedades de los iones y las moléculas de agua) hasta la escala de las tormentas (p. ej., patrones del viento y trayectorias de las partículas), mientras que la magnitud de las cargas adquiridas por las partículas de precipitación pueden estar comprendidas en el rango de cero hasta más de 1000 pC . En particular en las tormentas eléctricas severas, las magnitudes de las distintas variables pueden cambiar drásticamente en minutos, por lo que es común encontrar diferencias en las mediciones de momento a momento y según el lugar. Esto resalta la extrema complejidad de las tormentas y explica por qué la investigación de la estructura eléctrica de las nubes tiene tanta importancia en las ciencias de la atmósfera, además de ser una pieza clave para los estudios del circuito eléctrico global.

Se han propuesto muchas teorías para explicar la estructura eléctrica de las nubes, algunas con mayor éxito que otras. La teoría precipitativa no inductiva es la de mayor aceptación en la actualidad debido a su coherencia con las observaciones experimentales. En esta teoría se consideran varios mecanismos, que no requieren un campo eléctrico, sino que son producto de

la interacción entre partículas de la nube. El mecanismo que parece tener el rol principal es la interacción que involucra granizos que crecen por acreción y colisionan con cristales de hielo. Estos cristales de hielo al colisionar, rebotan y durante el corto tiempo de contacto entre las superficies se produce una separación de cargas. Finalmente, cada una de estas partículas se distancian en diferentes regiones de la nube debido a sus distintas masas y tamaños, y por efecto de los vientos convectivos y la fuerza de la gravedad. La dependencia observada con los parámetros atmosféricos (p. ej. la humedad relativa y el contenido de agua líquida) en estudios de laboratorio de la carga adquirida por los granizos y los cristales, parece explicar de forma cualitativa y cuantitativa la estructura eléctrica vista en las nubes. Entonces las cargas eléctricas que transportan las partículas de precipitación podrían ser resultado de algunos de los mecanismos mencionados. Es importante aclarar que en general estas partículas son líquidas al llegar a la superficie pero muchas de ellas fueron sólidas en la nube y se fundieron durante su caída.

Los siguientes son puntos de concordancia entre los distintos trabajos de investigación sobre el mecanismo de carga eléctrica durante la interacción entre el granizo y cristales de hielo [3]:

- Se produce una carga significativa sólo cuando la partícula de mayor tamaño está creciendo por acreción de gotas de nube.
- Si la nube tiene un alto contenido de agua líquida, el granizo se carga positivamente, y tiende a cargarse negativamente si hay un bajo contenido de agua líquida.
- A temperaturas cercanas a $0^{\circ}C$, el granizo se carga positivamente para la mayor parte del rango del contenido de agua líquida en la nube.
- La cantidad de carga transferida en las colisiones aumenta con el tamaño de los cristales de hielo, y alcanza un límite para radios efectivos grandes.
- Las cargas transferidas en una misma situación pueden variar mucho entre choque y choque, por variaciones microscópicas. Debido a que nos interesan las características macroscópicas, este proceso debe ser entendido como estocástico.
- Los contaminantes pueden afectar significativamente los resultados.

1.2.5. Mecanismo de captura selectiva de iones de Wilson

La carga transportada en las partículas de precipitación, también puede ser causada por la captura de iones que están presentes en la atmósfera. En particular, Wilson [2] propuso un mecanismo por el cual las partículas de precipitación capturan iones de un determinado signo, conocido como el ‘mecanismo de captura selectiva de iones de Wilson’ (Mecanismo C.S.I. de Wilson). En él, las partículas de precipitación son polarizadas por el campo eléctrico externo y

cuando se mueven verticalmente, tanto dentro (como fuera) de la nube, capturarán los iones del signo opuesto al acumulado en la mitad que actúa como frente de la gota. En el caso particular de las gotas que precipitan fuera de la nube, la parte inferior de éstas tendrá carga neta positiva para el campo eléctrico de tiempo bueno y negativa para el campo invertido, ver figura 1.4. Por lo tanto al precipitar, en el primer caso las partículas capturarán principalmente iones negativos y en el segundo caso iones positivos. A medida que una partícula captura iones (siempre de un mismo signo), la carga adicional aportada por éstos se moverá a la parte de arriba de la misma, lo que desplazará hacia abajo el límite entre las cargas superficiales de distinto signo. Esto disminuirá la atracción de nuevos iones del mismo signo y llegará un momento en que el campo eléctrico no será suficiente para que haya más captura iónica. Whipple y Chalmers [15] mostraron que si la velocidad de la gota es mucho mayor que la velocidad de los iones, la magnitud máxima de la carga adquirida por una gota de radio r , en un campo eléctrico \vec{E} es:

$$q_{max} = 12\pi\epsilon|\vec{E}|r^2$$

Donde ϵ es la permitividad del vacío.

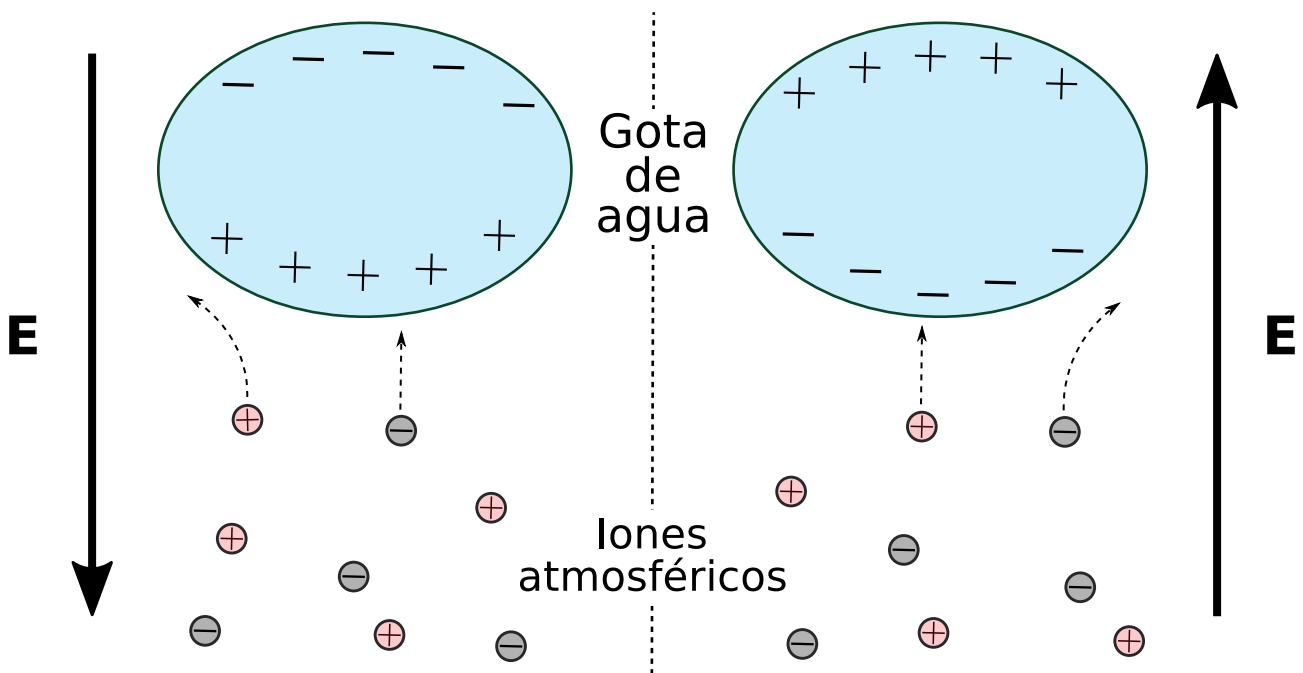


Figura 1.4: Esquema del mecanismo de captura selectiva de iones de Wilson. El lado izquierdo corresponde al caso de tiempo bueno y el derecho al de tiempo con presencia de tormentas eléctricas que invierten el campo eléctrico terrestre.

El mecanismo de captura de iones, para campos eléctricos pequeños como el de tiempo bueno, se cree que no es efectivo. Sin embargo, para las magnitudes alcanzadas por los campos eléctricos en las tormentas eléctricas, este mecanismo no es despreciable y muy probablemente cumple un rol importante en la carga eléctrica de la precipitación.

1.2.6. Carga máxima en las gotas y velocidad máxima de caída

Existe una carga máxima que una gota puede transportar antes de romperse. Esta ruptura ocurre cuando la fuerza de repulsión electrostática entre las cargas del mismo signo en la superficie de la gota alcanza un valor superior a la fuerza de cohesión resultante de la tensión superficial. Esta condición, que recibe el nombre de carga límite de Rayleigh y fue determinada experimentalmente por Lord Rayleigh [13], se formula matemáticamente como:

$$q_{Ray} = 8\pi(\varepsilon\zeta r^3)^{1/2}$$

q_{Ray} : La carga máxima de Rayleigh.

ε : La permitividad del vacío.

ζ : La tensión superficial del agua.

r : El radio de la gota.

En dinámica de fluidos, la velocidad límite o terminal es la velocidad máxima que puede alcanzar un cuerpo que se desplaza en el seno de un fluido infinito bajo la acción de una fuerza constante. Las bases físicomatemáticas para la velocidad terminal y la forma de las gotas en caída libre (en el aire), están dadas por las ecuaciones de Navier-Stokes del movimiento. Además estas ecuaciones determinan el movimiento para el aire que fluye alrededor de las gotas, así como el movimiento del agua en la gota sujeta a las condiciones dinámicas y cinemáticas de borde apropiadas.

Este problema se vuelve rápidamente muy complejo, sin solución analítica, en especial para las partículas de precipitación. Beard [14] analizó la velocidad terminal para gotas de los tres siguientes rangos de tamaño de gotas: (1) gotas de nube pequeñas ($0.5 - 19 \mu m$); (2) gotas de nube grandes y gotas de precipitación pequeñas ($0.019 - 1.07 mm$); (3) gotas de precipitación grandes ($1.07 - 7 mm$). Para el primer rango hace una aproximación de las ecuaciones antes dichas y para los otros dos rangos empleó fórmulas semiempíricas.

Las ecuaciones resultantes para la velocidad terminal en función del diámetro esférico equivalente para los dos rangos más grandes (que son los que usaremos en este trabajo) son:

R 2. $19 \mu m \leq d_o \leq 1.07 mm$

$$\mathbf{V}_\infty = \eta \mathbf{N}_{Re} / (\rho \mathbf{d}_o)$$

$$N_{Re} = C_{sc} \exp(Y)$$

$$C_{sc} = 1 + 2.51l/d_o$$

$$Y = b_0 + b_1X + \dots + b_6X^6$$

$$b_0 = -0.318657E + 1$$

$$b_1 = +0.992696$$

$$b_2 = -0.153193E - 2$$

$$b_3 = -0.987059E - 3$$

$$b_4 = -0.578878E - 3$$

$$b_5 = +0.855176E - 4$$

$$b_6 = -0.327815E - 5$$

$$X = \log_e(N_{Da})$$

$$N_{Da} = C_2 d_o^2$$

$$C_2 = 4\rho\Delta\rho g / (3\eta^2)$$

R 3. $1.07 mm \leq d_o \leq 7 mm$

$$\mathbf{V}_\infty = \eta \mathbf{N}_{Re} / (\rho \mathbf{d}_o)$$

$$N_{Re} = N_p^{\frac{1}{6}} \exp(Y)$$

$$N_p = \zeta^3 \rho^2 / (\eta^4 \Delta\rho g)$$

$$Y = b_0 + b_1X + \dots + b_5X^5$$

$$b_0 = -0.500015E + 1$$

$$b_1 = +0.523778E + 1$$

$$b_2 = -0.204914E + 1$$

$$b_3 = +0.475294$$

$$b_4 = -0.542819E - 1$$

$$b_5 = +0.238449E - 2$$

$$X = \log_e(B_o N_p^{\frac{1}{6}})$$

$$B_o = C_3 d_o^2$$

$$C_3 = 4\Delta\rho g / 3\eta$$

con:

d_o : El diámetro esférico equivalente de la gota;

ρ : Densidad del aire;

V_∞ : La velocidad terminal;

$\Delta\rho$: Diferencia entre densidades del agua y el aire;

ζ : La tensión superficial del agua;

η : La viscosidad del aire;

$l \approx 6.62 \times 10^{-6} cm$;

N_{Re} : Número de Reynolds ($\equiv \rho V_\infty d_o / \eta$);

C_{sc} : Factor de corrección deslizante;

N_{Da} : Número de Davis ($\equiv 4\rho\Delta\rho g d_o^3 / 3\eta^2$);

N_p : Número de propiedad física ($\equiv \zeta^3 \rho^2 / (\eta^4 \Delta\rho g)$);

B_o : Número de Bond modificado.

1.3. Antecedentes

A continuación se presentan brevemente los resultados de algunos trabajos de campo en los cuales se realizaron mediciones parecidas a las de este trabajo. Debido a la falta de artículos científicos actuales sobre el tema, se citan artículos anteriores al año 2000.

1.3.1. Takahashi (1973)

Tsutomu Takahashi en su trabajo de revisión [16] analizó diversos estudios sobre la electrificación de las gotas de nube, de llovizna, de lluvia y copos de nieve. Para simplificar la notación, se definirá el parámetro p_i : proporción de gotas con carga de signo i , sobre el total.

En el rango de tamaño de las *gotas de llovizna*, Takahashi [17] y Takahashi y Craig [18] vieron, para las nubes cuyo límite superior se encontraba por debajo de la altura de congelamiento del agua (llamadas *nubes calientes*), una fuerte predominancia de cargas negativas, mientras que para las nubes que estos autores calificaron como ‘tormentas eléctricas’, las positivas son las que priman. El valor de p_- fue ≈ 0.9 para el primer caso y ≈ 0.38 para el segundo caso. También estos autores calcularon el promedio de la carga eléctrica en las gotas sobre el total, incluyendo las que no contenían carga eléctrica. Los promedios de las negativas y positivas fueron del orden de $10^{-4} pC$, siendo un poco inferior los de las positivas. Se tuvo registro de una gota con una carga de magnitud $\sim 0.1 pC$, en [18].

Para *gotas de lluvia*, Takahashi y Fullerton [19] hallaron que en *nubes calientes* la precipitación presentó el valor $p_- \approx 0.73$ para partículas con un radio efectivo entre 0.75 y 1.4 mm, y el valor ≈ 0.43 entre 1.4 y 2.1 mm; las magnitudes de las cargas eléctricas observadas fueron del orden de $3 \times 10^{-3} pC$. En *tormentas eléctricas*, Simpson [20] determinó que la carga dominante es positiva ($p_- \approx 0.3$). Gunn [21] observó que el número de ambos signos era casi igual (0.56) y además que la carga promedio fue $\sim 3 pC$. Finalmente en su revisión, Takahashi [16] concluyó que es necesario realizar más mediciones, a lo largo de las distintas etapas de la evolución de la nube, considerando su envergadura y los aspectos espaciales (2 o 3 dimensiones), entre otras características.

1.3.2. Chauzy y Despiau (1980)

Estos investigadores [22] realizaron mediciones al nivel del suelo, con dos instrumentos, un pluviómetro y un aparato para detectar las cargas transportadas por las gotas (sólo cargas mayores a $5 pC$) y su velocidad de caída. Estudiaron 6 lluvias de tormenta en primavera, en el período de marzo y abril de 1976 en la Universidad de Toulouse. Las temperaturas (a nivel del suelo) variaron entre 8 y $14^\circ C$, durante los distintos eventos. Las nubes eran cúmulonimbos, en todos los casos se escucharon truenos y una de ellas presentó pequeños granizos. En este trabajo se definieron algunos parámetros eléctricos, de los cuales aquí mencionamos dos: la ‘actividad eléctrica global’: $Q = (\Sigma|q_+| + \Sigma|q_-|)S^{-1}$ y la carga promedio de todas las gotas cargadas (en valor absoluto): $C = (\Sigma|q_+| + \Sigma|q_-|)/(N_+ + N_-)$, donde N_i es la cantidad de gotas con carga de signo positivo o negativo, q_i es la carga de signo ‘ i ’ (+ o -) y S es el área transversal del instrumento experimental.

Los valores absolutos que encontraron para la carga promedio de sólo cargas negativas o positivas yacieron en el intervalo de 6 a 40 pC . El promedio de las negativas (positivas) fue de $-17.4 pC$ ($+18.9 pC$). Sin embargo, los investigadores mostraron que no fueron estos promedios los que definieron la carga neta transportada por la lluvia, sino la proporción numérica de gotas de determinado signo, como se explica en lo que sigue: Chauzy y Despiau [22] observaron dos comportamientos marcadamente contrastantes en cuanto a las p_i . Algunas tormentas presentaron un valor de p_- chico (~ 0.22), y otras de valor alto (~ 0.75), mostrando dos patrones claramente diferenciados, a los cuales estos autores los llamaron comportamiento ‘positivo’ y ‘negativo’ respectivamente. Estos autores no descifraron qué condiciones establecen estos dos hábitos. En cuanto a los valores de Q , éstos cambiaron entre 0.19 y 6.41 μCm^{-2} (promedio de 2.12 μCm^{-2}).

Los autores también se interesaron en la relación entre la carga eléctrica de las gotas y su diámetro. Para ello analizaron dos tormentas separadamente, cada una con uno de los dos comportamientos antes dichos. En la precipitación de comportamiento ‘positivo’, no apareció ninguna correlación entre la carga eléctrica y su diámetro. Pero para el otro caso, de comportamiento ‘negativo’, los datos se ajustaron linealmente a la ecuación $d(mm) = -0.096 \times Q(pc) + 1.05$ con un coeficiente de determinación algo bajo: $r = -0.23$. Los autores comentaron que cualquiera de las teorías que plantea carga negativa para las partículas grandes y positiva para las chicas, por ejemplo la teoría de la carga inductiva de Paluch y Sartor [23], son compatibles con sus observaciones.

Por último, los autores advirtieron una relación directa entre la intensidad de las precipitaciones y la magnitud de C . En un análisis a lo largo del tiempo, en intervalos de 1 minuto, observaron que la relación entre estas dos variables tiene un coeficiente de determinación de 0.49. Estos hallazgos indican que no sólo la carga neta transportada a tierra por las precipitaciones aumenta con la intensidad de las mismas, sino que también lo hace la carga individual llevada por cada gota cuando la cantidad de lluvia aumenta.

1.3.3. Kamra y Sathe (1982)

En este trabajo [24] se midieron las cargas eléctricas (en el rango 7.5×10^{-3} a $7.5 \times 10^{-1} pC$), el campo eléctrico y la intensidad de la lluvia, en un área abierta de la estación de montaña Mahabaleshwar (1390 m sobre el nivel del mar) en el Ghats occidental de India, desde el 25 al 28 de agosto de 1980. Esta región, durante la temporada del monzón del sudoeste, está casi siempre cubierta de nubes que se extienden hasta el nivel del suelo y llueve frecuentemente, con predominancia de los tipos de nube estrato y stratocúmulo, sin rayos ni truenos. Durante esta temporada, la mayoría de las nubes bajas en esta región tienen sus límites superiores por

debajo del nivel de congelamiento.

Estos autores registraron un total de 2503 gotas cargadas en cinco tormentas, de este total, el 71 % correspondía a cargas negativas. Los valores promedio de las negativas y positivas fueron respectivamente -0.181 y $+0.079$ pC , mientras que Q tomó valores entre 0.007 y 0.048 μCm^{-2} . Algunas de las cargas (7.6 %) fueron subestimadas debido a que las mismas superaron la apreciación máxima del instrumento. Ellos concluyeron que el efecto neto de la precipitación es cargar negativamente el suelo.

Kamra y Sathe compararon sus resultados con otras mediciones en la misma estación (Selvan et al. [25]) y encontraron diferencias en la polaridad dominante de la lluvia, sin poder explicarlas, pero también semejanzas en otras variables. Kamra y Sathe observaron que el 71 % de las gotas tenían carga negativa, mientras que Selvan y colaboradores por su parte vieron que el 90 % eran positivas. También contrastaron sus resultados con los de Chauzy y Despiau [22] (visto en subsección 1.3.2). A diferencia de los autores franceses, no sólo no obtuvieron las distintas modalidades en el comportamiento eléctrico pluvial (la carga neta transportada fue siempre negativa), sino que los valores promedio en todos los parámetros eléctricos fueron mucho menores, discrepancias que fueron atribuidas a la menor electrificación en las nubes monzónicas investigadas. Kamra y Sathe plantearon que tales diferencias no son sorprendentes, dados los diferentes escenarios experimentales. En un caso (Kamra y Sathe) estudiaron nubes estrato y estratocúmulo (sin truenos) y los datos provinieron de la base de la nube, mientras que en el otro caso (Chauzy y Despiau) las nubes fueron cúmulonimbo (con truenos) y los datos fueron adquiridos a nivel del suelo.

1.3.4. Despiau y Houngninou (1997)

Estos autores [26] midieron las cargas eléctricas en las gotas de lluvia y el campo eléctrico, a nivel del suelo, en la costa atlántica del oeste de África en la ciudad de Abidjan (Costa de Marfil). En el lugar no había árboles ni estructuras que pudieran alterar las líneas del campo eléctrico. Las mediciones acontecieron en un período de lluvias y tormentas eléctricas intensas, desde octubre de 1988 a enero de 1990. Se usaron tres sensores que consistían en anillos de inducción eléctrica, versiones mejoradas de los empleados por Chauzy y Despiau [22] (subsección 1.3.2). A partir de estos datos, también calcularon la densidad de corriente eléctrica debida a la precipitación. Para la detección del campo eléctrico usaron un molino de campo, en el rango entre -20 y $+20$ kVm^{-1} .

Se publicaron los resultados de 13 eventos de los 24 registrados durante el período de la campaña. El análisis les permitió clasificar los eventos en dos tipos, '*tormentas eléctricas*' y '*lluvias*'. Las '*tormentas eléctricas*' correspondieron a nubes cúmulonimbo, como resultado de

actividad convectiva y duraron 32 minutos en promedio. Presentaban grandes extensiones verticales ($> 10 \text{ km}$), fuertes vientos a nivel del suelo ($8 - 10 \text{ m/s}$), descensos de temperatura de ($5 - 7^\circ\text{C}$), lluvias intensas y rayos. Las ‘*lluvias*’ se originaron en capas de nubes estratocúmulo, su desarrollo vertical era menor ($< 8 \text{ km}$), y también fueron menores los vientos y las variaciones de temperatura a nivel del suelo que en los casos anteriores, presentaron muy pocos rayos y duraron 11 minutos en promedio.

De un total de 1543 gotas de lluvia medidas, 1150 fueron de *tormenta* y 383 de *lluvia*. El detector podía medir cargas mayores a 2.6 pC y las precipitaciones duraron entre 6 y 59 minutos. En las *tormentas eléctricas* las cargas en las gotas estuvieron entre -60 y $+220 \text{ pC}$, y al menos el 50% de las mismas entre $+20$ y $+80 \text{ pC}$. El promedio por tormenta de las cargas positivas (negativas) varió entre $+77.6$ y $+107.5 \text{ pC}$ (-10.9 y -37.8 pC), el promedio global de todas juntas fue de $+86.4 \text{ pC}$ (-22.5 pC). El parámetro Q fue en promedio $(8.2 \pm 3.9) \mu\text{Cm}^{-2}$ y el número de gotas positivas sobre el número total de gotas cargadas fue en promedio 0.9. Las *lluvias*, por otro lado, tuvieron valores de carga en el intervalo -80 a $+120 \text{ pC}$; los valores de Q estuvieron en el intervalo $0.9 - 2.5 \mu\text{Cm}^{-2}$, $1.65 \mu\text{Cm}^{-2}$ en promedio. Las cargas promedio de ambas polaridades fueron siempre del orden de 30 pC y la cantidad de cargas de cada signo fue similar.

1.3.5. MacGorman y Rust (1998)

MacGorman y Rust, en su libro ‘*The Electrical Nature of Storms*’ [3], realizaron una revisión de la electrificación en nubes de tormenta y otros temas relacionados.

En nubes de tormenta, Simpson [27] observó que la corriente eléctrica de precipitación y del campo eléctrico, por debajo de la nube, tenían tendencias similares pero con polaridad opuesta, a lo que llamó efecto ‘imagen reflejo’ (*mirror image*). Este fenómeno también fue reportado por Ramsay y Chalmers [28] y Rust y Moore [29], entre otros. Luego, los distintos autores llegaron a la conclusión de que la precipitación que llega a la superficie es modificada eléctricamente desde que deja la nube, por un mecanismo dependiente del campo eléctrico terrestre; cambio que podría ser atribuible a la captura de iones de Wilson.

Por otro lado, Stow [30] vió el efecto imagen reflejo y encontró magnitudes de carga en la precipitación comprendidas en el rango de $6 - 200 \text{ pC}$, mientras que para Rust y Moore [29] estaban en el rango -5 y $+5 \text{ pC}$. Este investigador, halló además que el espectro de valores evidenciados en su trabajo no encajaba con el esperado por el mecanismo de Wilson y concluyó que el origen de las cargas grandes es diferente al de las chicas para la precipitación a nivel del suelo. También Magono [31] planteó que el mecanismo de captura de iones de Wilson y otros procesos de captura de iones son inadecuados para explicar el efecto imagen reflejo.

En nubes nimboestrato, Chalmers [32] reportó que en precipitación continua de más de una hora el campo eléctrico dentro de la nube es diferente para nieve que para gotas de agua. Las cargas en las gotas de agua eran usualmente positivas, mientras que en la nieve eran negativas. Reiter [33] realizó mediciones en campos eléctricos sin punto de descarga en nubes altoestrato en el instante previo y luego en el proceso de transformación a nubes nimboestrato. En los momentos previos a que la nube comience a precipitar (altoestrato), la base de ésta tenía carga negativa. En contraste, durante la precipitación constante de lluvia o nieve (nimboestrato), el autor publicó que ocurría el siguiente fenómeno: tanto dentro de la nube como fuera de ésta (abajo) \vec{E} y la carga predominante en la nieve eran negativas a temperaturas inferiores a la de congelamiento ($\lesssim 0^{\circ}C$), mientras que para temperaturas mayores a $+1^{\circ}C$, \vec{E} y la carga dominante en la lluvia eran positivas.

Capítulo 2

Método Experimental

En este trabajo se diseñó, construyó y utilizó un dispositivo experimental que consistió en un instrumento para medir la carga eléctrica y la velocidad de caída de partículas de precipitación individuales, se puede ver una fotografía de éste en la figura 2.1. El mismo está basado en el principio del anillo de inducción eléctrica, usado inicialmente por Gunn y Kinzer [34].



Figura 2.1: Foto del dispositivo experimental.

2.1. Descripción del dispositivo de medición

Se esquematiza nuestro dispositivo en la figura 2.2 (el dibujo no está a escala), el mismo consiste en 6 anillos conductores de bronce, de 10 *cm* de diámetro, 5 *cm* de alto y 1 *mm* de espesor (5 y 6 en figura 2.2). Estos anillos yacen ajustados sobre la superficie externa de un tubo de teflón (4 en figura 2.2) cuya pared tiene 4 *mm* de espesor, separados a una distancia de 2 *mm*, de modo tal que no hay contacto eléctrico entre ellos. Dos de estos anillos, a los que llamaremos ‘activos’ (5 en figura 2.2), se conectan a un circuito amplificador de corriente-voltaje inversor

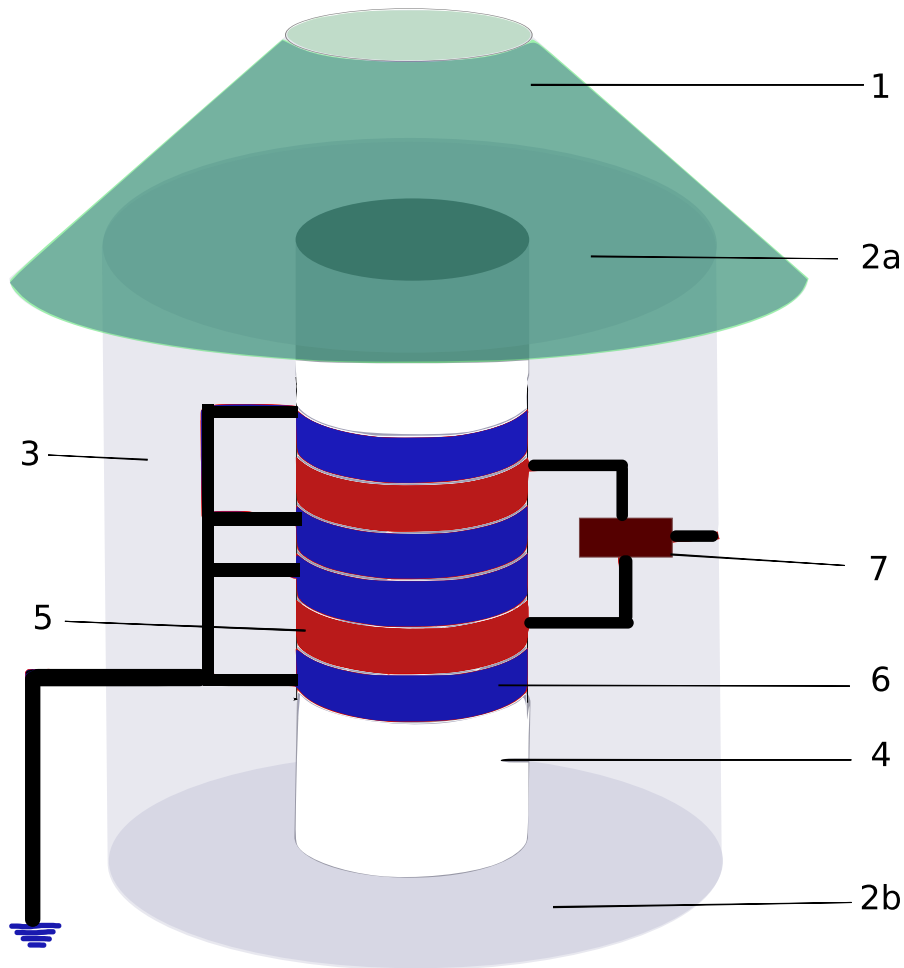


Figura 2.2: Esquema del dispositivo experimental, con sus componentes: [1]: Cono protector; [2a y b]: Tapa superior e inferior de la estructura cilíndrica; [3]: Estructura cilíndrica; [4]: Tubo de teflón; [5]: Anillos ‘activos’ (indicados en color rojo); [6]: Anillos ‘pasivos’ (indicados en color azul); [7]: Circuito amplificador corriente-voltaje inversor, detallado en figura 2.3.

de $2nA/V$ de ganancia (7 en figura 2.2), detallado en la figura 2.3. Los otros cuatro anillos están conectados a masa (anillos pasivos) (6 en figura 2.2). La distancia entre los centros de los dos anillos activos es de $(15.6 \pm 0.2) \text{ cm}$, valor medido con regla milimetrada (entre los anillos activos hay dos anillos pasivos). El amplificador se conecta a una tarjeta conversor analógico-digital (AD) MEASUREMENT COMPUTING USB-1608FS-Plus, que se empleó conectada a una computadora con el *software* necesario para registrar los datos (LabVIEW).

El tubo de teflón con los anillos y el circuito amplificador están dentro de una estructura cilíndrica conductora de aluminio (3 en figura 2.2). Este cilindro de aluminio está cerrado herméticamente por dos tapas perpendiculares a su eje (2 en figura 2.2), para protección contra el agua y la humedad, y además actúa como una jaula de Faraday para reducir el ruido electromagnético procedente del exterior. El eje del tubo de teflón con sus anillos coincide con el eje del cilindro de aluminio. Las tapas superior e inferior del cilindro de aluminio tienen dos orificios circulares, del mismo diámetro que el tubo de teflón, de modo que las partículas de precipitación pueden ingresar al aparato y atravesar el tubo a lo largo de su eje longitudinal. En

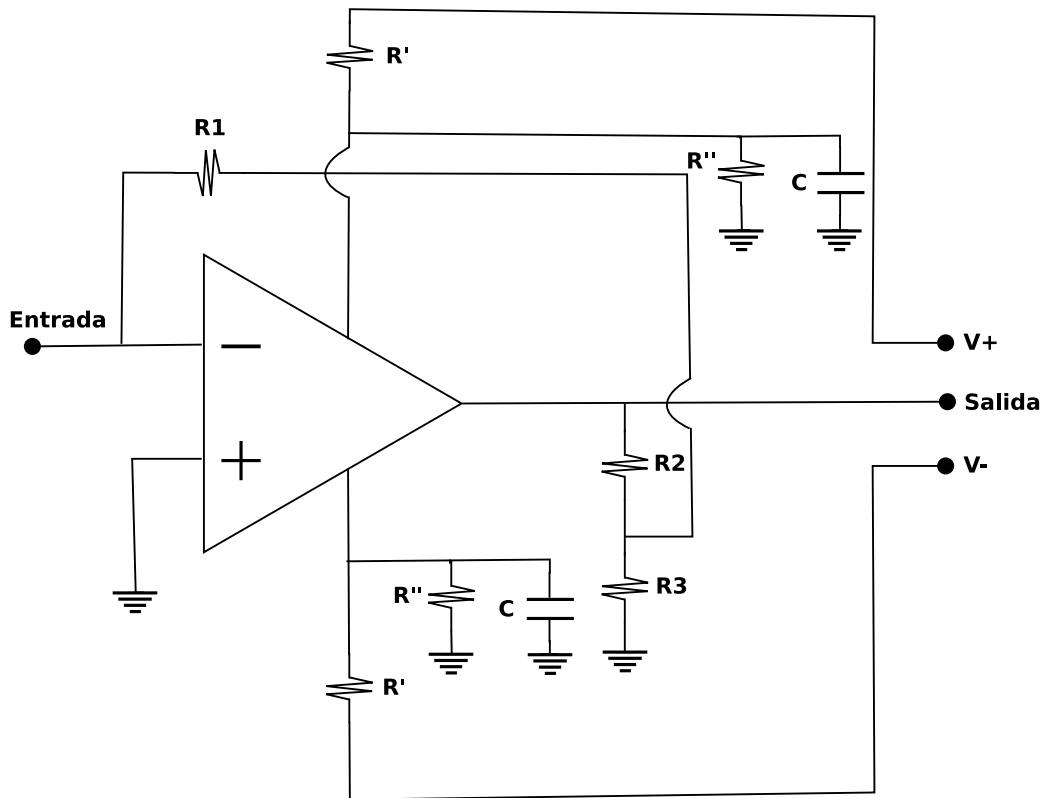


Figura 2.3: Esquema detallado del circuito amplificador, donde $R1 = 5\text{ M}\Omega$, $R2 = 10\text{ k}\Omega$, $R3 = 100\ \Omega$, $R' = 68\ \Omega$, $R'' = 100\ \Omega$, $C = 0.1\text{ F}$.

la parte superior del cilindro de aluminio hay un cono (1 en figura 2.2) con un orificio circular en su punta (de diámetro ajustable), cuyo propósito es funcionar como filtro contra partículas de precipitación de trayectoria oblicua (no paralela al eje del tubo de teflón) para evitar que impacten contra las paredes internas del tubo de teflón. Además, el cono evita que las gotas impacten directamente en la tapa de la parte superior del cilindro (2a en figura 2.2), lo cual reduce el ruido generado por los impactos y además ayuda a que no se acumule agua que podría derramar luego por las paredes del tubo de teflón.

Por último, el cilindro de aluminio está sostenido con dos bujes a cada lado del mismo, en un eje perpendicular al eje del cilindro, como se puede apreciar en la fotografía de la figura 2.1. Mediante bridas (con tornillos de fijación) estos dos bujes están sostenidos por una estructura de hierro, que es la que se asienta en el suelo. Por lo tanto, el cilindro puede girar alrededor del eje que pasa por los bujes, lo que permite apuntar el tubo en la dirección en que caen las gotas. Esta estructura mantiene la base inferior del cilindro de aluminio elevada a aproximadamente 40 cm del suelo.

2.2. Análisis de la señal de los amplificadores

El campo eléctrico que genera una partícula cargada eléctricamente, al pasar por el anillo de inducción eléctrica provoca un pulso de corriente que tiene una forma de onda descendente y

ascendente, o ascendente y descendente, según el signo de la carga (figura 2.4a). Esta corriente es traducida a voltaje al pasar por el amplificador de corriente-voltaje (inversor) y se registran junto con el tiempo cada 0.001 s.

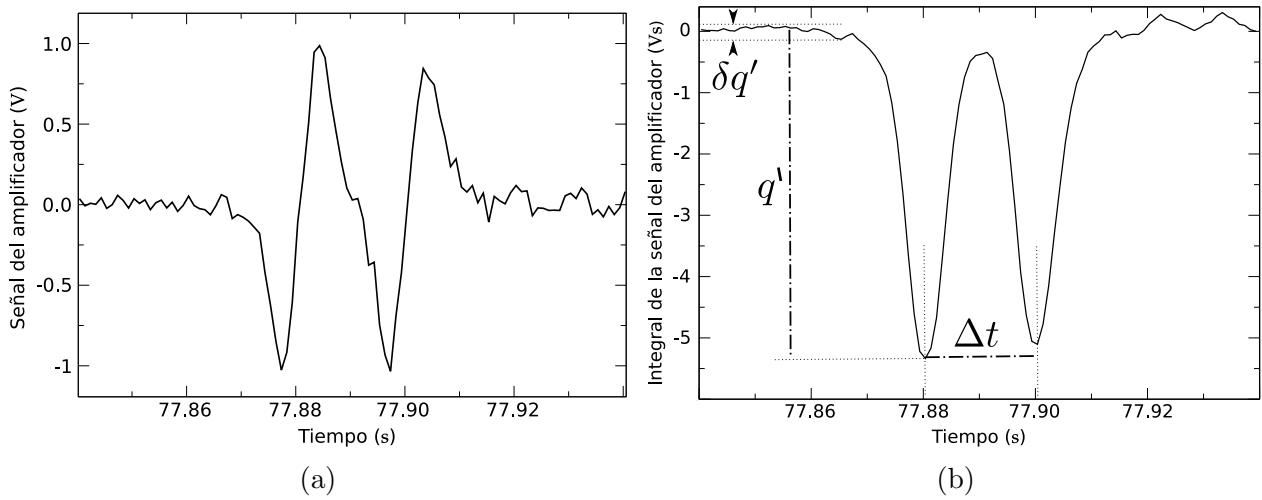


Figura 2.4: Un ejemplo de la señal obtenida con el dispositivo experimental al pasar una gota cargada, con (a) la señal de salida del amplificador y (b) la integral en el tiempo de esta señal; además se indican las magnitudes que se miden (Δt , q' y $\delta q'$).

La señal tiene la forma que ilustra la figura 2.4a, el cual es un caso particular. Se observan dos pulsos que indican el acercamiento y posterior alejamiento (pasaje) de la gota cargada eléctricamente en cada uno de los anillos activos. Si se integra esta señal (que es proporcional a la corriente) conseguiremos una señal proporcional a la carga acarreada por la gota (con signo opuesto). En la figura 2.4b aparecen estos dos picos (en este caso serán de signo negativo, que corresponden a una carga de signo positivo), que indican el pasaje de la gota por cada anillo activo y que con su altura (q' en figura 2.4b) nos permiten medir un valor proporcional a la carga transportada. A fin de aclarar cómo es el efecto del pasaje de una gota cargada a través del anillo en la figura 2.5 se presenta unos dibujos esquemáticos que lo resumen.

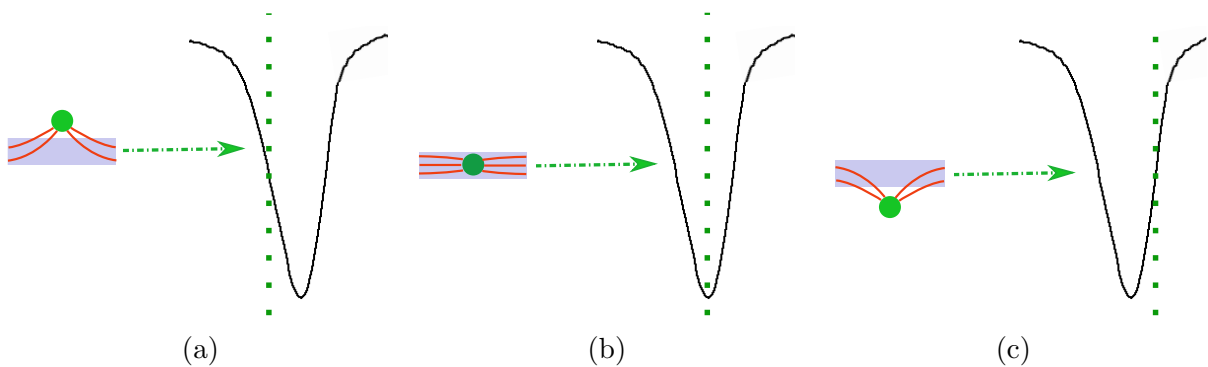


Figura 2.5: Esquema del pasaje de una carga eléctrica por un anillo de inducción eléctrica, donde en (a) la carga se acerca del anillo, (b) la carga está al medio del anillo y (c) la carga se aleja del anillo.

La incertidumbre asignada para q' ($\delta q'$) se determinó estimando el rango de variación del

ruido previo al primer pulso, como se muestra en la figura 2.4b. Los picos además permiten saber el tiempo que tarda la gota en recorrer la distancia entre los centros de los anillos (Δt en figura 2.4b). La incertidumbre para Δt se asignó como 0.001 s para los casos en que era posible identificar con precisión los instantes de tiempo que ocurrían los extremos de ambos pulsos. En los casos en que para alguno o ambos pulsos, sólo era posible determinar un intervalo de tiempo en donde ocurría su extremo, se tomó como incertidumbre de Δt a la suma de estos intervalos. Con este tiempo se puede calcular la velocidad terminal de caída, como se explicará más adelante.

Un inconveniente de que las señales de ambos anillos se registren en el mismo canal es que éstas se superponen en alguna medida, además después del pasaje de la gota por el primer anillo la señal del segundo pico presenta más ruido, como se puede observar levemente en la figura 2.4b. Por lo tanto, decidimos usar el primer pico para calcular el valor de la carga de cada gota, y usar el segundo pico solamente para determinar la velocidad de caída y como testigo, para inferir si es una gota cargada, ruido o una partícula extraña. En este trabajo descartamos los casos en que la medición presentaba un único pico o cuando, si bien tenía dos picos, el segundo era muy diferente al primero. Consideramos que dos picos eran muy diferentes cuando la altura del más chico era menor al 60 % de la altura del otro pico.

2.3. Calibración

El voltaje de salida del amplificador es proporcional a la corriente inducida en el anillo, por lo tanto cuando se integra la señal del voltaje se obtiene una señal que en su máximo es proporcional a la carga eléctrica. La constante de proporcionalidad se determinó mediante un procedimiento de calibración.

Para la calibración se empleó otro tubo con anillos de inducción conectados a amplificadores, ya calibrados, que posee el Grupo de Física de la Atmósfera, al cual llamaremos "dispositivo patrón". Se colocó el dispositivo patrón arriba del nuestro, con sus ejes alineados verticalmente, de modo que al dejar caer un objeto cargado, éste pase por ambos tubos. Como objetos de prueba, procedimos a lanzar bolitas de plástico de tres tamaños distintos (diámetros iguales a 0.3; 0.5 y 0.6 cm (± 0.1 cm)), que habían sido previamente cargadas eléctricamente por frotación (efecto triboeléctrico) con el cabello. Se varió la carga eléctrica de las bolitas de plástico cambiando el tiempo de frotación. Esta variabilidad tuvo un doble propósito: que abarquen el rango de las cargas eléctricas transportadas por las gotas y detectar limitaciones o fallas del dispositivo experimental usado.

Para ver si había diferencias en las mediciones según la distancia entre la trayectoria de caída y el eje central del cilindro, procedimos a dejar caer a las bolitas de calibración en tres regiones circulares concéntricas de la sección transversal del tubo. En todos los casos las bolitas caían por el centro del tubo patrón, por esto los ejes de ambos tubos siempre fueron paralelos pero no siempre estuvieron alineados. Las diferentes regiones se indican en la figura 2.6: (1) región central, (2) intermedia y (3) externa. La región 1 se encuentra dentro del círculo de radio $R_1 = 1.5 \text{ cm}$, la región 2 dentro del círculo hueco determinado por el radio $R_2 = 3.5 \text{ cm}$ y el radio R_1 ; por último, la región 3 está fuera del círculo de radio R_2 . La región 1 abarca el 9%, la región 2 el 49% y la región 3 el 42% del área del círculo delimitado por el tubo de teflón (ver figura 2.6).

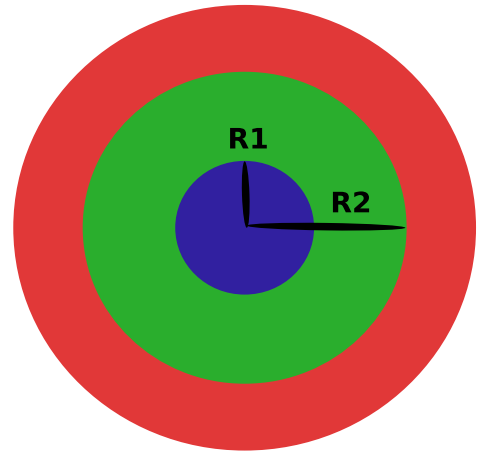


Figura 2.6: Esquema de la sección transversal del tubo de teflón, con las tres áreas diferenciadas.

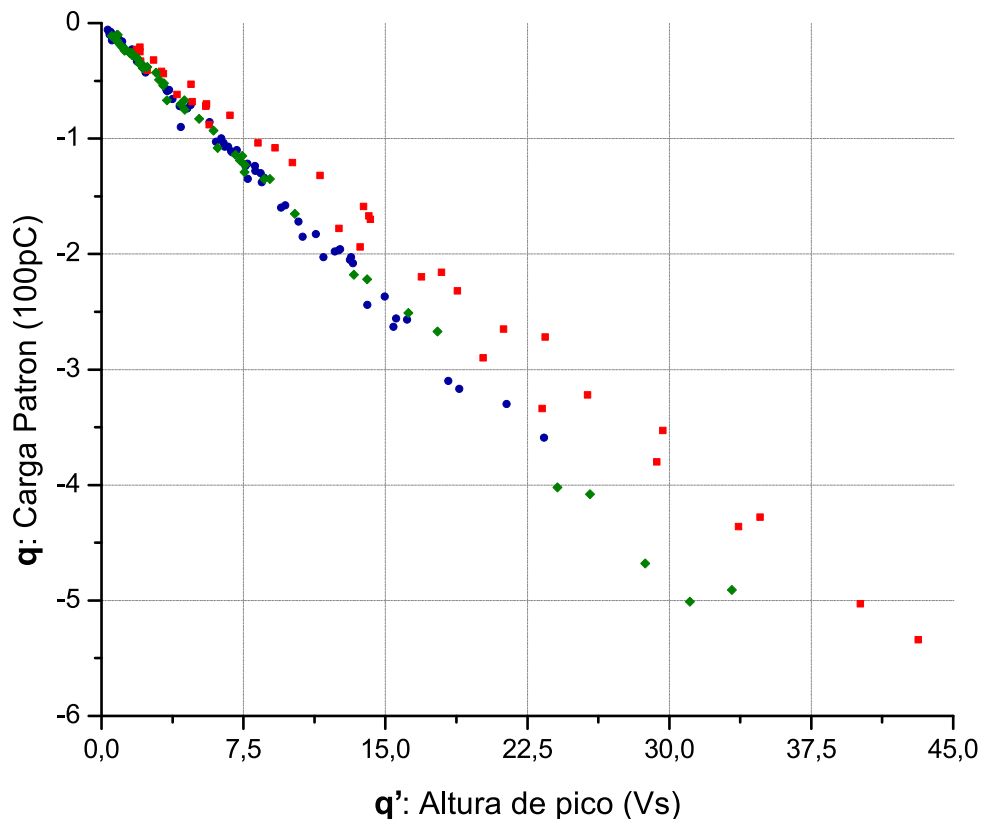


Figura 2.7: Resultados de los ajustes para cada conjunto de datos, que corresponden a las regiones señaladas en 2.6 respetando los colores de esa figura: **azul** corresponde a la región central, **verde** a la intermedia y **rojo** a la externa.

La figura 2.7 muestra un gráfico de los resultados para las tres regiones, la carga medida por el dispositivo patrón en función de la altura del primer pico de la integral de la señal del amplificador (q'). Para los tres casos se observó un comportamiento lineal, con el signo cam-

biado (como es de esperar debido a que se usa un amplificador inversor) y con una ordenada al origen aproximadamente igual a cero. Por este motivo, para cada una de las regiones circulares concéntricas se hizo un ajuste lineal con la ordenada al origen fija en cero. Los números resultantes de estos ajustes se presentan en la siguiente tabla:

$q = a q'$	Región 1	Región 2	Región 3
$a \left[\frac{pC}{Vs} \right] (*)$	$-(16.15 \pm 0.05)$	$-(15.78 \pm 0.05)$	$-(12.58 \pm 0.05)$
r^2	0.9977	0.9979	0.9959

(*) V_s : Voltio por segundo, que es la unidad de la integral de la señal del amplificador corriente-voltaje

Para obtener la calibración general, teniendo en cuenta las tres regiones, la pendiente global se calculó mediante el promedio ponderado de las tres pendientes anteriores, en donde los valores de ponderación correspondieron al cociente entre el área de cada región con el área total de la sección transversal del tubo de teflón. El valor obtenido resultó en:

$$a = (-14.47 \pm 0.05) \frac{pC}{Vs}$$

2.4. Determinación del diámetro de las gotas

La velocidad de caída de las partículas de precipitación será constante debido a la acción conjunta de la gravedad y la viscosidad del aire, como se explica en la subsección 1.2.6. Estas velocidades se calcularon como $v = \Delta x / \Delta t$, donde el tiempo (Δt) corresponde al tiempo transcurrido entre el paso por el primer y segundo anillo activo, y la distancia (Δx) es aquella existente entre los anillos activos (desde la mitad del primero a la mitad del segundo), que es de $(15.6 \pm 0.2) \text{ cm}$. Para determinar el diámetro de las gotas de lluvia se emplearon las fórmulas mencionadas en la subsección 1.2.6 dadas por Beard [14], de la velocidad en función del diámetro para distintos tamaños o rangos de gotas de interés (2 y 3). Con éstas, dado que no se podía despejar analíticamente el diámetro en función de la velocidad, se generó una tabla de datos de velocidad frente al diámetro (mediante un programa en Fortran) con saltos de $5 \mu\text{m}$ en el diámetro. Para las velocidades que no aparecían en la tabla, se interpoló linealmente con los valores más próximos.

Los datos obtenidos se grafican en la figura 2.8.

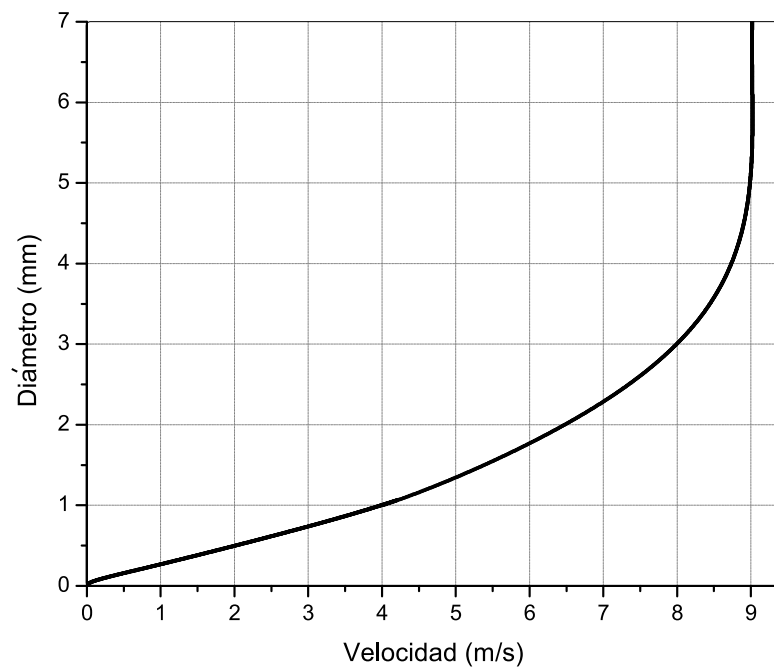


Figura 2.8: Diámetro de una gota cayendo en aire en función de la velocidad terminal resultante de graficar las ecuaciones dadas por Beard (1976, [14]), en los rangos de interés (2 y 3).

Capítulo 3

Resultados y Discusión

3.1. Descripción de mediciones realizadas

En el período de marzo de 2017 a marzo de 2018 las mediciones se realizaron en 13 días con lluvia, de variadas particularidades. En todos los casos, se dispuso el dispositivo experimental al aire libre, en un sitio lo más alejado posible de árboles y edificios que nos permitía el cable de conexión (15 m). Las mediciones se realizaron en tramos de aproximadamente 4 minutos, registrando en simultáneo características cualitativas del tiempo: presencia de truenos, intensidad de la lluvia (en escala cualitativa), si había o no granizos e información en Córdoba de la temperatura, humedad, presión, entre otros datos, registrado en la estación meteorológica localizada en el techo de FaMAF, o utilizando los datos *online* de <https://www.accuweather.com/es/ar/cordoba>. Además se monitoreo la señal del amplificador en tiempo real para controlar si se estaba detectando lo esperado o no, y entonces saber si la dirección de la lluvia hacía que las gotas peguen en las paredes, etc.

El tiempo en que estuvo precipitando a lo largo de un día con lluvia, con posibles pausas al medio en la precipitación pero sin que la nube deje de estar presente, fue en unos casos del orden de una hora y en otros a lo largo de ocho horas (con varias pausas). De los 13 días de lluvia, en algunas no se midió ninguna carga debido a que, o no había gotas cargadas, o ellas eran pequeñas como para ser diferenciadas del ruido de fondo; en otras ocasiones la intensidad de la lluvia fue tan alta que el amplificador se saturó o dejó de funcionar por problemas técnicos. En particular, en todas las lluvias de 2017, hubo inconvenientes con la conexión a masa; cuando se detectó este problema se solucionó y se lograron mejores resultados en el año 2018. En suma, sólo en 5 lluvias (señaladas con un subrayado) se obtuvo un buen número de datos que fueron analizados y tenidos en cuenta en este trabajo. Para diferenciar los días de lluvia analizados entre sí, los llamaremos *Lluvia 1*, *2*... A continuación se detallan las particularidades de cada uno de los 13 días de lluvia:

1. **Día 30/03/2017** [11:15 a 11:25 hs y 11:33 a 12:00 hs]. Llovizna de intensidad variada,

no se oían truenos ni se veían relámpagos, estaba completamente nublado y se constató visualmente que hubo gotas de lluvia que pasaron por el tubo. La señal tenía mucho ruido y pulsos variados que parecían no corresponder al pasaje de partículas cargadas, había problemas con la conexión a tierra. **No se analizó.**

2. **Día 11/05/2017** [16:41 a 16:45 hs]. Llovizna fina, parecida a la anterior. No se detectó ninguna señal correspondiente al pasaje de gotas, quizás porque las mismas no estaban cargadas o porque sus magnitudes no eran apreciables frente al ruido. Aquí se incorporó el cono a la parte superior del dispositivo. **No se analizó.**
3. **Día 18/05/2017** [15:40 a 16:20 hs y 16:35 a 17:00 hs]. Lluvia variable, desde muy intensa a moderada, con truenos, se vieron relámpagos y granizo de unos centímetros de diámetro a nivel del suelo (sólo en los inicios de la lluvia). Hubo una pausa de unos quince minutos. Por fallas de conexión a tierra el ruido empeoraba a medida que pasaba el tiempo, de modo que sólo los inicios de la primera y segunda parte fueron analizables, a los que llamaremos primer y segundo intervalo. **Se analizó, *Lluvia 1*.**
Las condiciones meteorológicas de cada intervalo fueron:
 - 1º intervalo: **Temperatura:** 15.2°C; **Humedad:** 83.6%; **Presión:** 954.3 hPa; **Viento:** 13.4 km/h (E);
 - 2º intervalo: **T:** 14.0°C; **H:** 86.9%; **P:** 954.0 hPa; **V:** 13.4 km/h (E).
4. **Día 27/09/2017** [11:25 a 11:40 hs]. Llovizna fina y constante, todo el cielo cubierto de nubes, descenso de temperatura, sin truenos. Se registró sólo una carga de un orden de magnitud mayor a las más pequeñas encontradas en las lluvias analizadas, por lo que se puede inferir que probablemente hubo cargas más chicas y que el ruido las apantalló. **No se analizó.**
5. **Día 28/09/2017** [Pocos minutos]. Parecida a la lluvia anterior, así que no se siguió midiendo. **No se analizó.**
6. **Día 11/10/2017** [20:05 a 20:54 hs]. Lluvia poco abundante, sin truenos, ni granizo. Se vieron pocas gotas con cargas y el ruido era problemático. **No se analizó.**
7. **Día 12/10/2017** [08:50 a 09:53 hs]. Lluvia variable que en algunos momentos llegó a ser abundante, sin truenos, ni granizo. Por los problemas ya mencionados muy pocas de las cargas se registraron sin problemas. **No se analizó.**
8. **Día 13/01/2018** [11:30 a 11:45 hs ; 14:50 a 15:00 hs ; 15:25 a 15:34 hs y 19:24 a 19:35 hs]. Llovizna intermitente, cielo todo cubierto de nubes y sin truenos, ni granizo, estuvo húmedo todo el día. Se solucionó en parte el problema de la conexión a tierra. **Se analizó, *Lluvia 2*.**

- 1° intervalo: No se registro información de **T**, **H**, **P** y **V**;
- 2° intervalo: **T**: 21°C; **H**: 85 %; **P**: 1011 hPa; **V**: 17 km/h (SO);
- 3° intervalo: **T**: 22°C; **H**: 82 %; **P**: 1011 hPa; **V**: 15 km/h (SSE);
- 4° intervalo: **T**: 21°C; **H**: 82 %; **P**: 1011 hPa; **V**: 28 km/h (SSO).
9. **Día 14/01/2018** [21:28 a 21:53 hs y 22:40 a 22:50 hs]. En el primer período se veían caer muy pocas gotas, luego en el segundo empezó a llover en más cantidad. No se oían truenos, ni se veían granizos, estaba todo el cielo cubierto de nubes. **Se analizó**, Lluvia 3.
10. **Día 17/01/2018** [11:08 a 11:28 hs y 12:16 a 12:26 hs]. Llovió poca cantidad en dos períodos, no se oían truenos, tampoco se veía granizo y el cielo estaba totalmente nublado. Se resolvieron completamente los problemas de la conexión a tierra. **Se analizó**, Lluvia 4.
- 1° intervalo: **T**: 16°C; **P**:1019 hPa; **V**: 13 km/h (OSO);
- 2° intervalo: **T**: 16°C; **P**:1018 hPa; **V**: 11 km/h (ONO).
11. **Día 21/01/2018** [15:45 a 15:50 hs]. Caían pocas gotas y muy chicas, no llegaban a mojar las superficies, pocas nubes. No se captó el pasaje de ninguna partícula cargada que se diferencie del ruido de fondo. **No se analizó**.
12. **Día 22/01/2018** [18:06 a 18:25 hs y 18:36 a 18:44 hs]. Al principio caían pocas gotas pero grandes, luego la intensidad de la lluvia aumentó y disminuyó en varias ocasiones, se oyeron truenos. La señal estaba libre de ruido. **Se analizó**, Lluvia 5.
- 1° intervalo: **T**: 32°C; **H**: 37 %; **P**: 1003 hPa; **V**: 22 km/h (ESE);
- 2° intervalo: **T**: 27°C; **H**: 53 %; **P**: 1004 hPa; **V**: 3 km/h (NE).
13. **Día 28/01/2018** [20:39 hs, pocos minutos]. Fue parecida a la lluvia del día 21/01/2018. A lo lejos había truenos y rayos, sólo que la tormenta no pasó por donde estaba ubicado el dispositivo. No se veía ninguna pulso correspondiente al pasaje de una carga eléctrica en la señal. **No se analizó**.

De los *observables meteorológicos*, recién mencionados, se puede plantear que la Lluvia 1 y la 5 tuvieron una actividad eléctrica mayor a las 2, 3 y 4, por lo que las primeras serán llamadas Lluvias de 'alta actividad eléctrica' (por simplicidad: AAE) y las últimas de 'baja actividad eléctrica' (BAE).

3.2. Resultados

En el análisis de los datos se calcularon los siguientes parámetros, la mayoría de estos, ya empleados por Chauzy y Despiau [22].

- Δt : Duración del intervalo de medición.
- N : Cantidad de gotas medidas.
- N_i : Cantidad de gotas medidas de signo i (+, -).
- p_i : Proporción de gotas con carga de signo i , sobre el total.

$$p_i = \frac{N_i}{N_+ + N_-}$$

- \bar{q} : Carga eléctrica promedio de todas las gotas cargadas.

$$\bar{q} = (\Sigma q_+ + \Sigma q_-)/(N_+ + N_-)$$

- \bar{q}_i : Carga eléctrica promedio de signo i .

$$\bar{q}_i = (\Sigma q_i)/N_i$$

- q_{iM} : Carga eléctrica máxima (máxima magnitud) de signo i .

- Q : ‘Actividad eléctrica global’. (*)

$$Q = (\Sigma |q_+| + \Sigma |q_-|)S^{-1}$$

- Q_t : ‘Tasa de actividad eléctrica’.

$$Q_t = Q/\Delta t$$

- D : ‘Carga excedente’.

$$D = (\Sigma q_+ + \Sigma q_-)S^{-1}$$

- J : ‘Densidad de corriente transportada a tierra por la precipitación’.

$$J = D/\Delta t$$

- \bar{d} : Diámetro esférico equivalente promedio para todas las gotas.

- \bar{d}_i : Diámetro esférico equivalente promedio de las gotas con polaridad i .

- d_{iM} : Diámetro esférico equivalente máximo de las gotas con polaridad i .

(*): Para que este parámetro tenga sentido, deberían medirse todas las gotas que atraviesan el dispositivo de medición y a lo largo de todo el tiempo que dura la tormenta, obviamente esto no ocurre en este trabajo, sin embargo lo tuvimos en cuenta para hacer comparaciones cualitativas.

En las tablas 3.1 y 3.2 se presentan los valores de los parámetros calculados para cada una de las lluvias analizadas, separadas por tipo de lluvia (AAE y BAE respectivamente). Se pueden ver diferentes comportamientos cuando comparamos las lluvias AAE con las BAE. En general las magnitudes de los parámetros que dan cuenta de la electrificación son mayores para las primeras. Por ejemplo, para los distintos tipos de promedios (\bar{q} , \bar{q}_+ y \bar{q}_-), son siempre mayores

	Lluvia 1			Lluvia 5		
	Total	I1	I2	Total	I1	I2
Δt (min)	7.3 ± 0.7	2.3 ± 0.2	5.1 ± 0.5	22 ± 2	19 ± 2	3.7 ± 0.4
N	274	45	229	155	88	67
N_+	213	43	170	112	51	61
N_-	61	2	59	43	37	6
p_-	0.22	0.04	0.26	0.28	0.42	0.09
p_+	0.78	0.96	0.74	0.72	0.58	0.91
\bar{q} (pC)	65 ± 6	90 ± 20	60 ± 7	33 ± 6	40 ± 10	25 ± 7
\bar{q}_+ (pC)	101 ± 8	90 ± 20	103 ± 8	50 ± 8	75 ± 15	28 ± 7
q_{+M} (pC)	496 ± 7	496 ± 7	308 ± 7	410 ± 40	410 ± 40	330 ± 30
\bar{q}_- (pC)	-63 ± 6	-24 ± 15	-65 ± 6	-10 ± 2	-11 ± 2	-6.2 ± 1.7
q_{-M} (pC)	-186 ± 6	-39 ± 3	-186 ± 6	-68 ± 1	-68 ± 1	-13.9 ± 0.4
Q ($\frac{nC}{m} \times 10$)	320 ± 30	51 ± 5	270 ± 30	76 ± 8	54 ± 5	23 ± 2
Q_t ($\frac{nC}{ms} \times 100$)	270 ± 40	130 ± 20	320 ± 50	20 ± 2	17 ± 2	37 ± 4
D ($\frac{nC}{m} \times 10$)	220 ± 20	50 ± 5	180 ± 20	65 ± 7	44 ± 4	22 ± 2
J ($\frac{nC}{ms} \times 100$)	190 ± 30	130 ± 20	200 ± 30	17 ± 0.3	14 ± 2	35 ± 5
\bar{d} (mm)	2.7 ± 1.2	2.5 ± 1.1	2.8 ± 1.2	1.9 ± 0.3	2.0 ± 0.3	1.8 ± 0.3
\bar{d}_+ (mm)	3.0 ± 1.3	2.5 ± 1.1	3.1 ± 1.4	2.0 ± 0.3	2.1 ± 0.3	1.9 ± 0.3
d_{+M} (mm)	6 ± 2	6 ± 2	6 ± 2	6 ± 2	6 ± 2	6 ± 2
\bar{d}_- (mm)	1.9 ± 0.8	3.1 ± 1.4	1.8 ± 0.8	1.7 ± 0.3	1.8 ± 0.3	1.0 ± 0.2
d_{-M} (mm)	6 ± 2	3.9 ± 0.7	6 ± 2	2.8 ± 0.4	2.8 ± 0.4	1.6 ± 0.4

Tabla 3.1: Resultados obtenidos para los parámetros definidos al inicio de la sección 3.2, para cada una de las lluvias AAE y sus respectivos intervalos.

	Lluvia 2				Lluvia 3		Lluvia 4				
	Total	I1	I2	I3	I4	Total	I1	I2	Total	I1	I2
Δt (min)	35 ± 4	15 ± 2	3.5 ± 0.4	4.6 ± 0.5	11 ± 1	16 ± 2	7.7 ± 0.8	8.4 ± 0.8	14 ± 1	6.9 ± 0.7	7.5 ± 0.8
N	79	30	12	23	14	139	20	119	172	89	83
N_+	78	29	12	23	14	132	20	112	118	56	62
N_-	1	1	0	0	0	7	0	7	54	33	21
p_-	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.06	0.31	0.37	0.25
p_+	0.99	0.97	1.00	1.00	1.00	0.95	1.00	0.94	0.69	0.63	0.75
\bar{q} (pC)	16.9 ± 1.5	10.8 ± 1.7	19 ± 4	23 ± 4	17 ± 3	9.3 ± 1.2	12.4 ± 1.6	8.8 ± 1.2	4.8 ± 0.8	4.9 ± 1.3	4.7 ± 1.1
\bar{q}_+ (pC)	17.1 ± 1.5	11.4 ± 1.6	19 ± 4	23 ± 4	17 ± 3	10.0 ± 1.3	12.4 ± 1.6	9.5 ± 1.2	9.0 ± 1.1	10.3 ± 1.2	7.8 ± 1.2
q_{+M} (pC)	67 ± 4	45 ± 3	41 ± 1	67 ± 4	38 ± 1	60.8	29 ± 1	60 ± 6	55 ± 3	55 ± 3	51 ± 4
\bar{q}_- (pC)	-4.9 ± 0.4	-4.9 ± 0.4	-	-	-	-3.0 ± 0.5	-	-3.0 ± 0.5	-4.4 ± 0.5	-4.3 ± 0.7	-4.4 ± 0.5
q_{-M} (pC)	-4.9 ± 0.4	-4.9 ± 0.4	-	-	-	-5.2 ± 0.3	-	-5.2 ± 0.3	-24 ± 1	-24 ± 1	-10.0 ± 0.6
Q ($\frac{mC}{m} \times 10$)	17 ± 2	4.1 ± 0.4	2.9 ± 0.3	6.8 ± 0.7	3.1 ± 0.3	17 ± 2	3.2 ± 0.3	1.4 ± 0.1	17 ± 2	9.1 ± 0.9	7.4 ± 0.7
Q_t ($\frac{mC}{m} \times 100$)	2.9 ± 0.4	1.6 ± 0.2	5.0 ± 0.8	9 ± 1	1.7 ± 0.3	6.4 ± 0.9	2.5 ± 0.4	10 ± 2	7 ± 1	8 ± 1	5.9 ± 0.9
D ($\frac{mC}{m} \times 10$)	17 ± 2	4.1 ± 0.4	2.9 ± 0.3	6.8 ± 0.7	3.1 ± 0.3	17 ± 2	3.2 ± 0.3	1.3 ± 0.1	10 ± 1	5.5 ± 0.5	5.0 ± 0.5
J ($\frac{mC}{ms} \times 100$)	2.9 ± 0.4	1.6 ± 0.2	5.0 ± 0.8	9 ± 1	1.7 ± 0.3	6.4 ± 0.9	2.5 ± 0.4	10 ± 2	4.4 ± 0.7	4.5 ± 0.7	4.0 ± 0.6
\bar{d} (mm)	0.84 ± 0.17	0.85 ± 0.17	0.91 ± 0.18	0.78 ± 0.16	0.85 ± 0.17	1.3 ± 0.2	0.6 ± 0.1	1.4 ± 0.3	1.1 ± 0.2	1.1 ± 0.2	1.1 ± 0.2
\bar{d}_+ (mm)	0.84 ± 0.17	0.85 ± 0.17	0.91 ± 0.18	0.78 ± 0.16	0.85 ± 0.17	1.3 ± 0.2	0.6 ± 0.1	1.4 ± 0.3	1.1 ± 0.2	1.1 ± 0.2	1.1 ± 0.2
d_{+M} (mm)	2.0 ± 0.2	1.6 ± 0.2	1.9 ± 0.3	1.8 ± 0.4	2.0 ± 0.2	2.3 ± 0.7	1.2 ± 0.4	2.3 ± 0.7	2.2 ± 0.2	2.0 ± 0.3	2.2 ± 0.2
\bar{d}_- (mm)	0.6 ± 0.1	0.6 ± 0.1	-	-	-	1.3 ± 0.2	-	1.3 ± 0.2	1.1 ± 0.2	1.1 ± 0.2	1.0 ± 0.2
d_{-M} (mm)	0.6 ± 0.1	0.6 ± 0.1	-	-	-	2.0 ± 0.5	-	2.0 ± 0.5	1.6 ± 0.2	1.6 ± 0.2	1.4 ± 0.2

Tabla 3.2: Resultados obtenidos para los parámetros definidos al inicio de la sección 3.2, para cada una de las Lluvias BAE y sus respectivos intervalos.

para las AAE que para las BAE, en algunos casos lo son por un orden magnitud. Lo mismo ocurre para las cargas máximas por polaridad (q_{+M} y q_{-M}), donde las AAE son aproximadamente un orden de magnitud mayor a las BAE. También hay diferencias claras para Q y Q_t , con un notable contraste entre la Lluvia 1 y las demás. Respecto al tamaño de las gotas, tanto los valores promedio como los diámetros máximos son en su mayoría mayores para el grupo de alta actividad que para los de baja. En cuanto a la proporción de gotas con carga de diferente signo, a excepción de la Lluvia 4, las BAE presentan muy poca cantidad de cargas negativas frente a las positivas (menores al 5%). En cambio, en las AAE la p_- fue cercana al 25%. Aunque la Lluvia 4 fue catalogada como BAE, tiene en este aspecto un parecido a las de alta actividad.

Para todos los casos y en todos sus respectivos intervalos, siempre hubo más cargas positivas que negativas ($p_+ > p_-$), además D , J y \bar{q} también arrojaron resultados positivos. Por otro lado se observa que el \bar{q}_+ es siempre mayor al \bar{q}_- en todas las ocasiones. De esta forma se ve un comportamiento positivo en la polaridad de la precipitación en todos los casos analizados.

Entre las Lluvias AAE (1 y 5) hay algunas distinciones notables. Todos los parámetros relacionados a la electrificación son mayores para la 1, en particular para Q_t y J hay un orden de magnitud de diferencia. Para los promedios \bar{q}_+ y \bar{q}_- , que son siempre notablemente mayores para la Lluvia 1. Se desconocen las disparidades estructurales finas entre estas dos lluvias, pero es importante enfatizar la presencia de granizos a nivel del suelo en la Lluvia 1 y no en la 5.

A continuación en las siguientes subsecciones, se analizarán con mayor detalle las principales características de las cinco lluvias estudiadas.

3.2.1. Lluvia 1

Con el objetivo de analizar el comportamiento en el tiempo de las gotas medidas en cada situación, en la figura 3.1 se muestran los gráficos de carga y diámetro vs tiempo de ocurrencia para la Lluvia 1. Los datos presentados en esta figura no presentan barras de error, para mayor comodidad en el análisis. Se tomó el mismo criterio en todas las figuras de carga y diámetro en función del tiempo para las demás Lluvias. Las incertidumbres porcentuales para las cargas varían entre 1 y 30% y son mayores para las más pequeñas; para los diámetros varían entre 7 y 40% para diámetros menores que 8.5 mm y entre 18 y 110% para los mayores. Se realizó un corte en la escala horizontal para poder apreciar los detalle de cada intervalo.

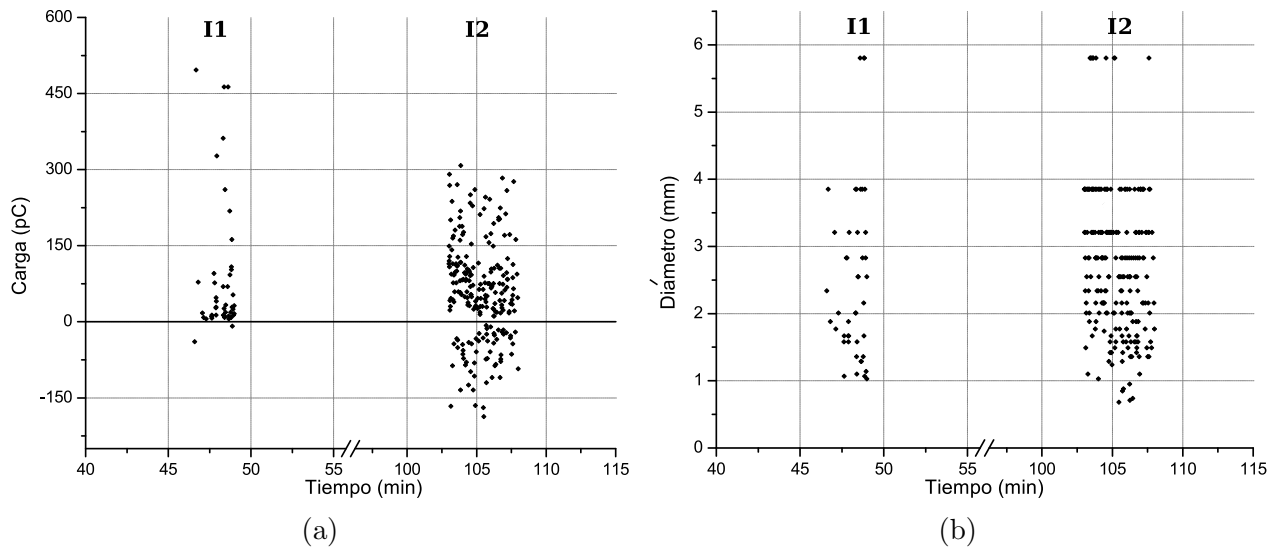


Figura 3.1: Comportamiento en el tiempo de la carga eléctrica (a) y el tamaño de las gotas (b), para la Lluvia 1. Hay un corte en la escala temporal para poder apreciar en más en detalle la distribución de datos.

En el intervalo 1 se aprecia la presencia de una gran cantidad de cargas positivas pequeñas ($< 50 \text{ pC}$), junto con algunas pocas partículas de carga $> 300 \text{ pC}$. Esto podría deberse a que en el intervalo de tiempo considerado pasaron por el dispositivos partículas de dos tipos diferentes (por ejemplo gotas y granizos). Vale la pena recordar que esta lluvia fue la única en la que se observó caída de granizos y que éstos lo hicieron sólo al principio del Intervalo 1. Además es importante mencionar que el pulso correspondiente al evento de mayor carga observada ($\sim 500 \text{ pC}$, ver figura 3.1a en el tiempo 46.5 s) ocurrió en simultáneo a la caída de un granizo a través del tubo.

Si bien se cuenta con muy escasa información sobre otras variables, como por ejemplo el campo eléctrico a nivel del suelo (que no se midió), las diferencias entre intervalos podrían ser a causa del mecanismo C.S.I. de Wilson (ver subsección 1.2.5). Esta tormenta fue particular, como ya se ha dicho, ya que fue la de mayor actividad eléctrica que se analizó, por lo que se puede especular que el campo eléctrico local estaba invertido respecto al de tiempo bueno, es decir, el mismo apuntaba hacia arriba. Bajo esta condición, las partículas capturarían iones positivos en su caída, por el mecanismo de Wilson. Se puede suponer que en el intervalo 1 este proceso efectivamente ocurre por la gran abundancia de gotas cargadas positivamente que se observan, mientras que en el intervalo 2, que ocurrió luego de más de una hora de continua precipitación, el proceso ya no resultaría efectivo pues ha disminuido la concentración de iones por la captura previa de la precipitación. Entonces esto explicaría el mayor número de gotas negativas que aparecen, en este intervalo. Por supuesto, todo esto no es más que una especulación, debido a la falta de información y escasa cantidad de datos.

Otra explicación plausible para las discrepancias entre intervalos, podría deberse a que para las primeras caídas de agua (intervalo 1) la precipitación estaba compuesta predominantemente

por partículas con carga positiva pertenecientes a la parte baja de la nube. Después de este primer momento (intervalo 2), las partículas que descendieron, provinieron de distintas partes de la nube, donde son más variadas, con ambos signos y un amplio rango de cargas. En el segundo intervalo, las cargas aparecieron de forma uniforme a lo largo del tiempo, lo cual nos podría estar diciendo que la lluvia ha alcanzado un estado estacionario.

En cuanto al comportamiento de los diámetros, no se aprecian diferencias entre los dos intervalos. En la figura 3.1b se puede ver que para tamaños grandes ($> 3\text{ mm}$) hay datos sólo para algunos valores particulares, mostrándose como franjas horizontales de puntos. Esta disposición se debe a que a medida que la velocidad terminal se aproxima a $\sim 9 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ pequeñas variaciones en la misma provocan grandes variaciones en el diámetro esférico equivalente (ver figura 2.8). Entonces, las incertidumbres en la velocidad, que para los casos extremos es en general mayor a $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, tienen mucho peso.

Para un mayor entendimiento de las distribuciones de carga y diámetro, en las figuras 3.2a y 3.2b presentamos los histogramas de estas dos variables para cada intervalo de esta lluvia.

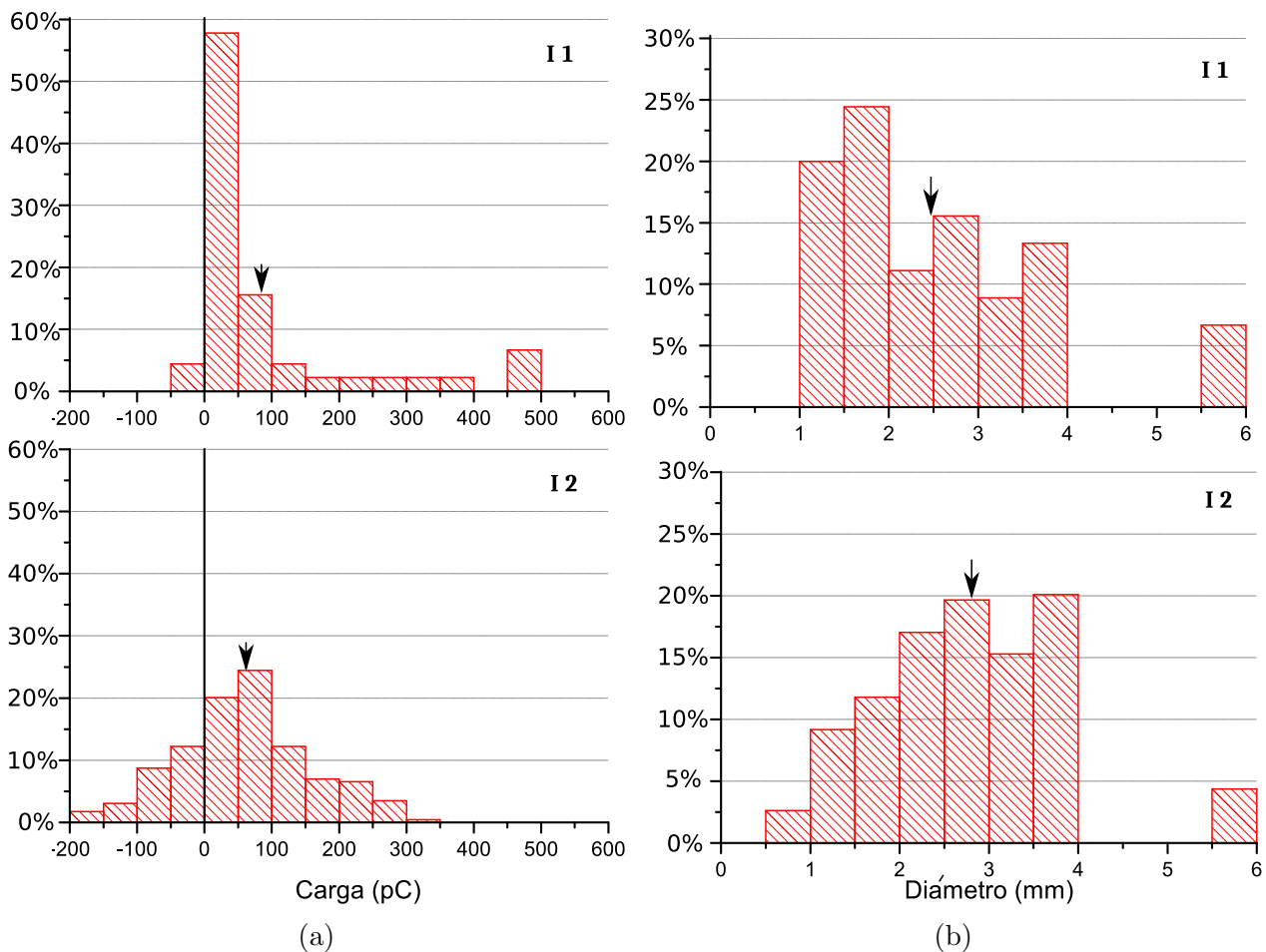


Figura 3.2: Histogramas separados por intervalos, de la carga (a) y del diámetro (b) para la Lluvia 1. Los valores promedio respectivos están indicados con una flecha.

En los histogramas se pueden percibir aspectos que son visibles en los gráficos anteriores,

pero que aquí aparecen con mayor claridad y concisión. En el intervalo 2, ver figura 3.2a, las cargas tienen una distribución algo parecida a una gaussiana centrada en 65 pC en un rango desde -200 hasta 350 pC . Por el contrario el primer intervalo tiene una forma muy asimétrica, con un pico modal en las cargas pequeñas positivas ($\sim 50 \text{ pC}$) y un pequeño pico en las cargas positivas grandes ($\sim 450 \text{ pC}$). En cuanto a los histogramas del diámetro de las gotas, las diferencias son menos notables, el intervalo 2 presenta un leve aumento del diámetro promedio respecto al primer intervalo (ver las flechas sobre los histogramas), sin embargo ambas distribuciones son indistinguibles si tenemos en cuenta la incertidumbre del promedio (ver tabla 3.1).

Por último, para analizar la relación entre el diámetro y la carga de cada gota, se grafican las dos variables en la figura 3.3, junto con la carga máxima que puede tener una gota, dada por Rayleigh (subsección 1.2.6).

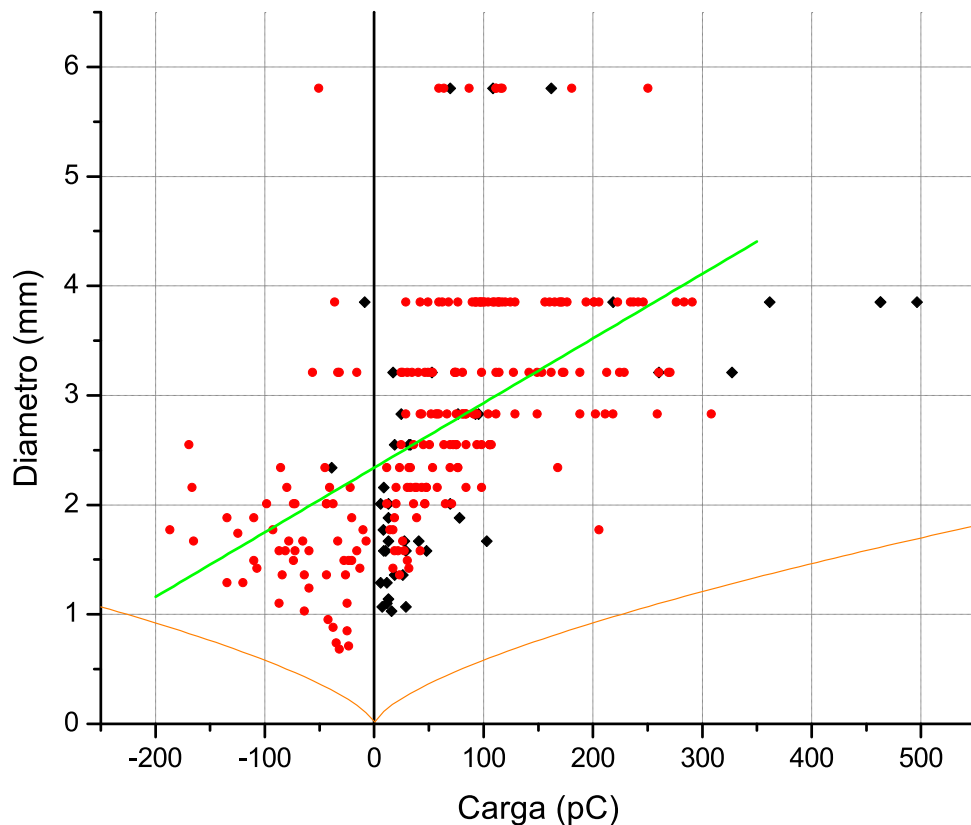


Figura 3.3: Gráfico de diámetro de la gota en función de la carga, donde se encuentran diferenciados los intervalos para la Lluvia 1, con color negro (rombos) el $I1$ y rojo (círculos) el $I2$. Además se grafica la carga máxima (para un diámetro dado) de Rayleigh con una línea continua naranja y la recta de color verde correspondiente al ajuste lineal de todos los datos.

A partir de este momento (para simplificar) se emplearán en ocasiones las letras d y q para nombrar a los diámetros y las cargas respectivamente, \vec{E} para denotar el campo eléctrico y también $I1$, $I2$, etc, para identificar a los distintos intervalos. Para la figura 3.3, no se dibujan las barras de error al igual que en la figura 3.1, por el mismo criterio y lo mismo cumple para todas las demás figuras del diámetro en función de la carga.

En la figura 3.3 puede observarse, que en *I1* las partículas con q menor a $50 pC$ tienen diámetros entre 1 y $4 mm$, unas pocas partículas tienen cargas mucho mayores (del orden de $400 pC$) y tienen además mayores tamaños. Estos eventos con tamaños y cargas grandes, son los mismos que observamos en la figura 3.1a, que se especula que podrían ser granizos. Además hay que tener en cuenta que si estas partículas son granizos, el cálculo del diámetro a través de su velocidad sería erróneo, pues éste es válido sólo para gotas de agua. Como los granizos son menos densos que las gotas de agua, es muy probable que haya un error sistemático de subestimación del d .

En el *I2*, los diámetros de la cargas negativas son en promedio más pequeños que los de carga positiva, por otro lado para las cargas positivas y negativas, los diámetros mínimos aumentan con el valor absoluto de la carga transportada, en una tendencia parecida a la curva del límite de Rayleigh, pero desplazado para d más grandes. En cuanto a la disposición de la totalidad de los eventos (*I1* y *I2*) en el plano d vs q , pareciera que existe una tendencia a aumentar d a medida que q se hace más positiva. Para cuantizar este hecho, en el mismo gráfico se muestra la recta obtenida por ajuste de cuadrados mínimos (la función $d(q)$) mostrando un claro crecimiento de la misma. Esta recta se muestra en la figura 3.3 como una línea continua de color verde y sus parámetros de ajuste son:

$d = a q + b$	
a [$\frac{mm}{pC}$]	(0.0059 ± 0.0005)
b [mm]	(2.34 ± 0.07)
r^2	0.30695

3.2.2. Lluvia 2

Las figuras 3.4, 3.5 y 3.6, resumen los resultados obtenidos para la Lluvia 2, de la misma forma a los mostrados en la Lluvia 1.

De las figuras 3.4 y 3.5 pareciera que la distribución de q y d es similar entre intervalos, en particular sus promedios en casi todos los casos no se distinguen experimentalmente (ver tabla 3.2). En la figura 3.6 no parece haber ninguna correlación entre el d y la q en ningún intervalo y son muy similares de intervalo a intervalo, pues los puntos se mezclan entre si, sin mostrar un patrón particular. Esto podría sugerir que el mecanismo de electrificación de las gotas es el mismo siempre y que este proceso se halla en un estado estacionario durante todo el tiempo que duró la lluvia; no es claro el origen de esta carga positiva.

3.2.3. Lluvia 3

Las figuras 3.7, 3.8 y 3.9 muestran todos los datos correspondientes a la Lluvia 3. En este caso, los dos intervalos parecen tener características notablemente diferentes, como puede apre-

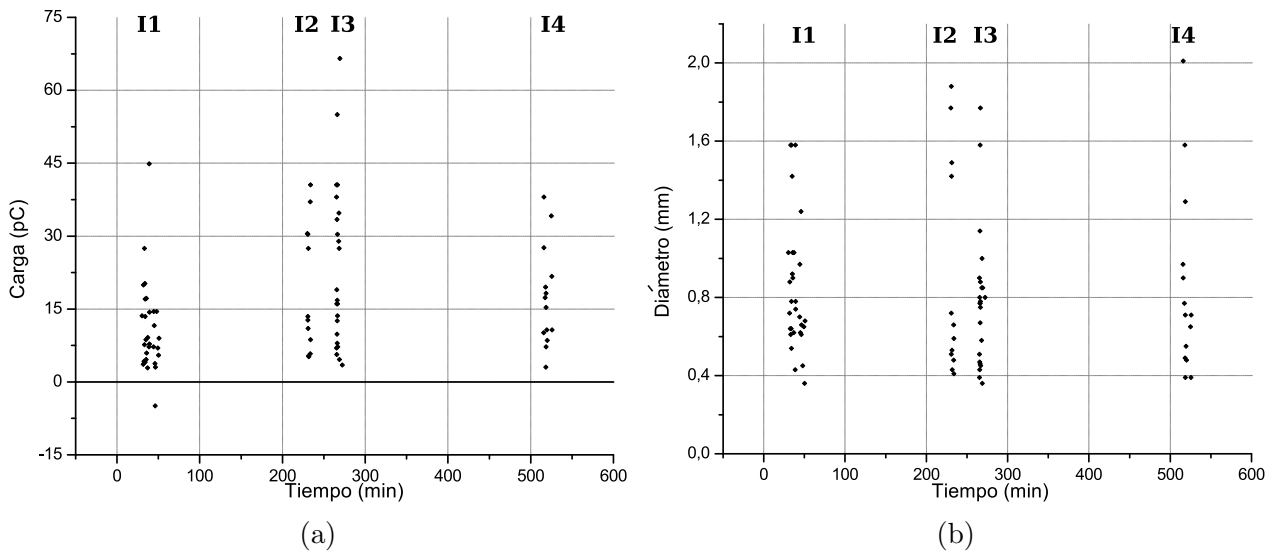


Figura 3.4: Comportamiento en el tiempo de la carga eléctrica (a) y el tamaño de las gotas (b), para la Lluvia 2.

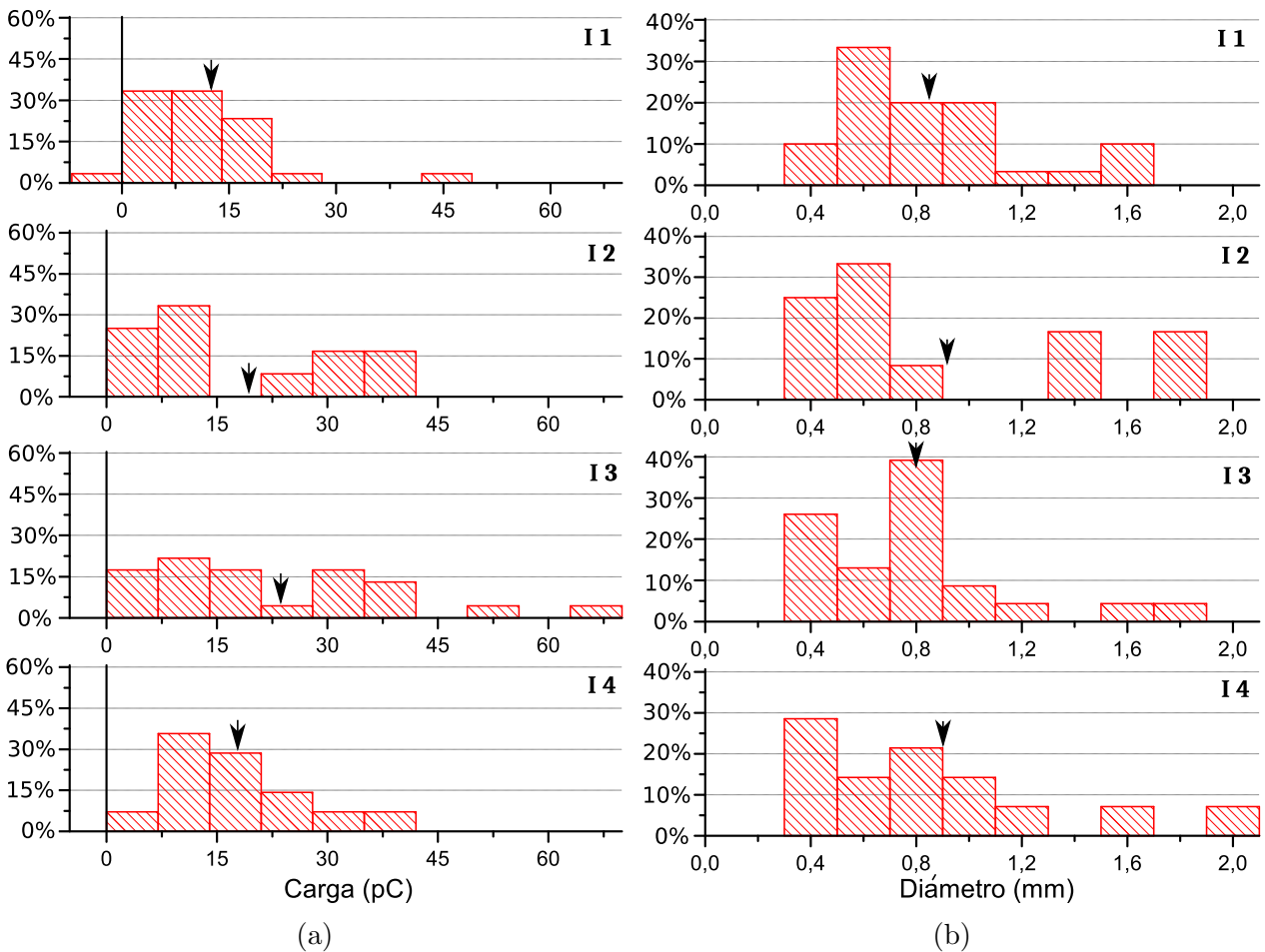


Figura 3.5: Histogramas separados por intervalos, de la carga (a) y del diámetro (b) para la Lluvia 2. Los valores promedio respectivos están indicados con una flecha.

ciarse en las figuras 3.8 y 3.9. En el primero, ni los diámetros ni las cargas son grandes (entre 5 y 30 pC y entre 0.3 a 1.3 mm , respectivamente), no parece haber ninguna correlación d vs q y todas las cargas son positivas. Por otro lado, el $I2$ presenta gotas de un tamaño notablemente

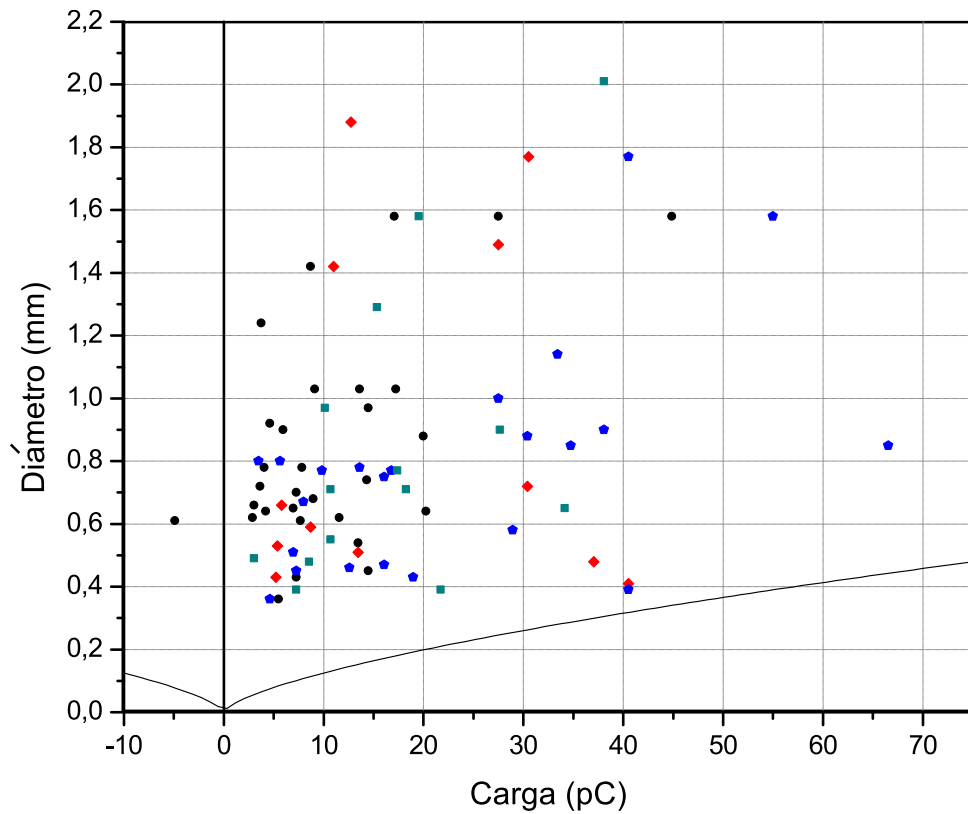


Figura 3.6: Gráfico de d vs q , donde se encuentran diferenciados los intervalos para la Lluvia 2, con color negro (círculos) el $I1$, rojo (rombos) el $I2$, azul (pentágono) el $I3$ y verde (cuadrados) el $I4$. Además se grafica con una línea continua negra la carga máxima (para un diámetro dado) de Rayleigh.

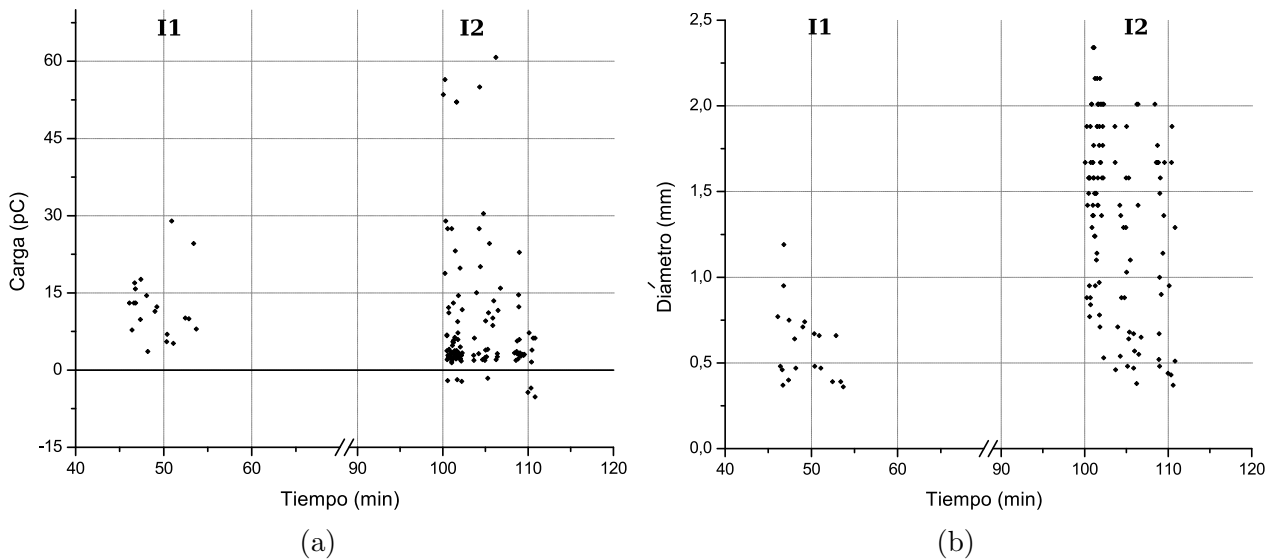


Figura 3.7: Comportamiento en el tiempo de la carga eléctrica (a) y el tamaño de las gotas (b), para la Lluvia 3. Hay un corte en la escala temporal para poder apreciar en más en detalle la distribución de datos.

mayor que el anterior (entre 0.4 y 2.5 mm), un mayor rango de cargas (entre -5 y 60 pC) y son más abundantes. Además para $I2$ la relación $d(q)$ presenta tres comportamientos distintos (figura 3.9): uno con q de modulo ~ 5 pC y d entre 1.2 y 2.4 mm, el segundo con una disposición de datos más parecido al $I1$, y el tercer comportamiento corresponde a un escaso número de eventos visiblemente separados del resto, con $q > 50$ pC y tamaños del orden de 1.5 mm que

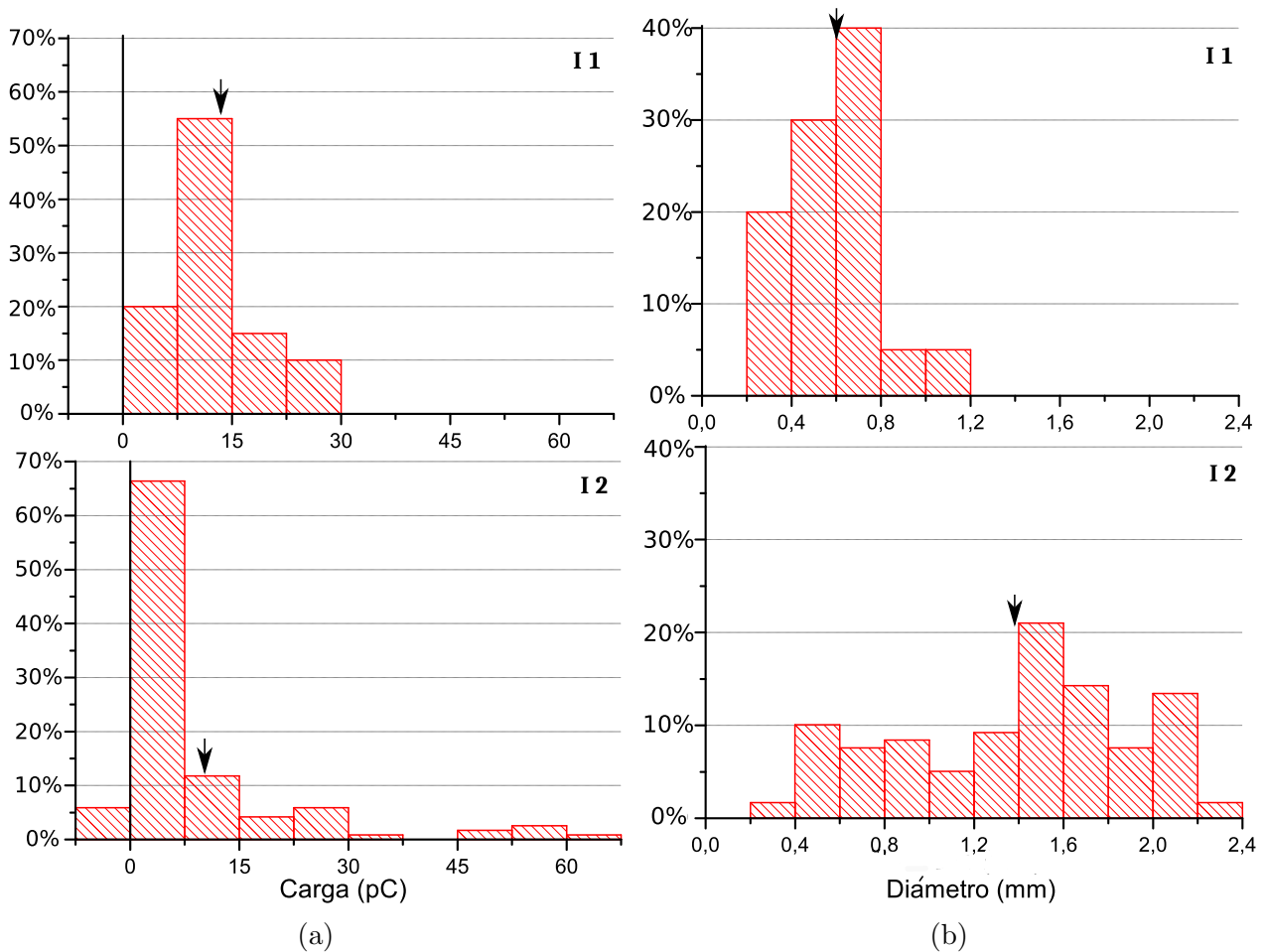


Figura 3.8: Histogramas separados por intervalos, de la carga (a) y del diámetro (b) para la Lluvia 3. Los valores promedio respectivos están indicados con una flecha.

aparecieron en la primera parte del *I2*.

El origen de la electrificación en las gotas, no parece ser siempre el mismo en esta lluvia. En el *I1*, luce como el que actuó en la Lluvia 2, debido a sus similitudes. Por otro lado en el *I2* no pareciera ser que la carga de las partículas se produjo por el mismo mecanismo que en el *I1*, pues en éste se observan comportamientos variables que hacen recordar a lo observado en la Lluvia 1, con magnitudes menores. Estas variaciones también podrían deberse a cambios en \vec{E} terrestre afectando la forma en que actúa el mecanismo de Wilson sobre las partículas de precipitación.

3.2.4. Lluvia 4

En esta ocasión, se observan comportamientos muy parecidos entre intervalos y para los dos casos se presentan tanto cargas negativas como positivas (como se observa en la figura 3.10a). Esta paridad es notoria en los histogramas de q y d , en la figura 3.11 y en el gráfico d vs q , en la figura 3.12, donde además no se percibe ninguna correlación evidente. Los promedios

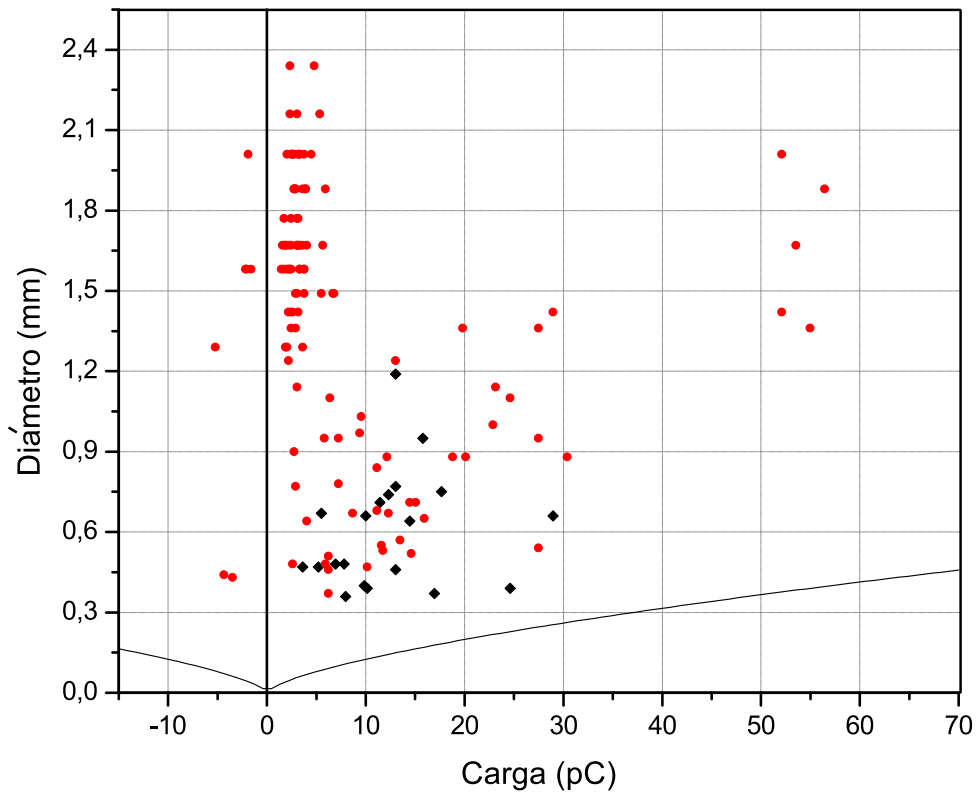


Figura 3.9: Gráfico de d vs q , donde se encuentran diferenciados los intervalos para la Lluvia 3, con color negro (círculos) el $I1$ y rojo (rombos) el $I2$. Además se grafica con una línea continua negra la carga máxima (para un dado diámetro) de Rayleigh.

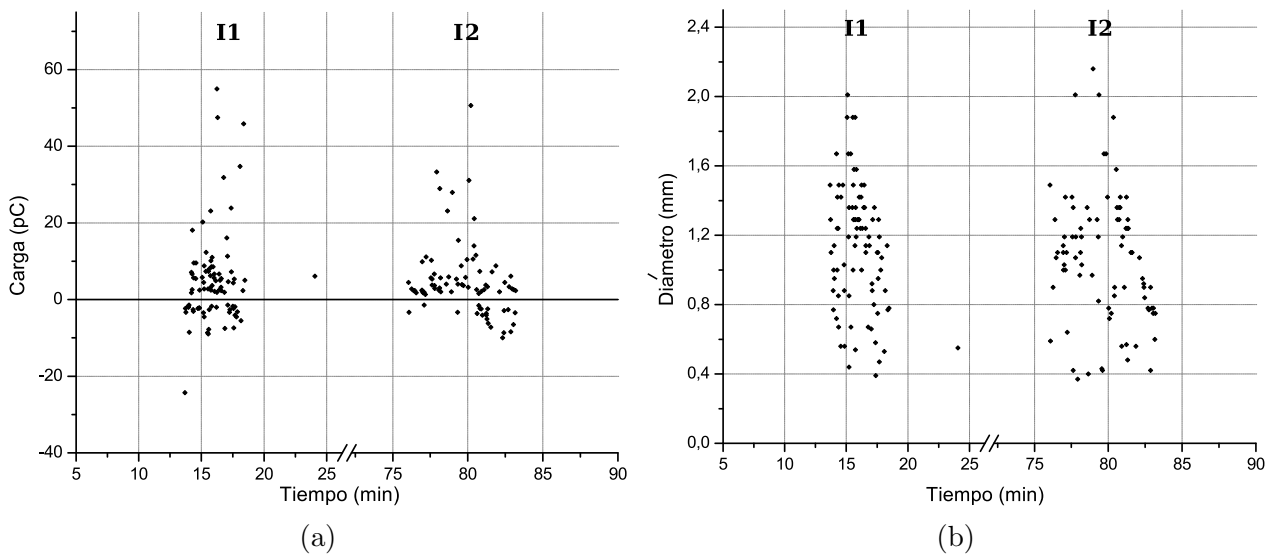


Figura 3.10: Comportamiento en el tiempo de la carga eléctrica (a) y el tamaño de las gotas (b), para la Lluvia 4. Hay un corte en la escala temporal para poder apreciar en más en detalle la distribución de datos.

de la carga y el diámetro no discrepan experimentalmente entre intervalos (ver tabla 3.2) y en ambos casos el grueso de las gotas tienen cargas chicas en magnitud y de ambos signos (entre -10 y 10 pC). Además hay algunas cargas positivas que se alejan de este rango, con magnitudes ≤ 20 pC. En esta lluvia el mecanismo que carga eléctricamente las gotas parece ser el mismo para ambos intervalos, sin embargo se aprecian algunas variaciones en el tiempo así

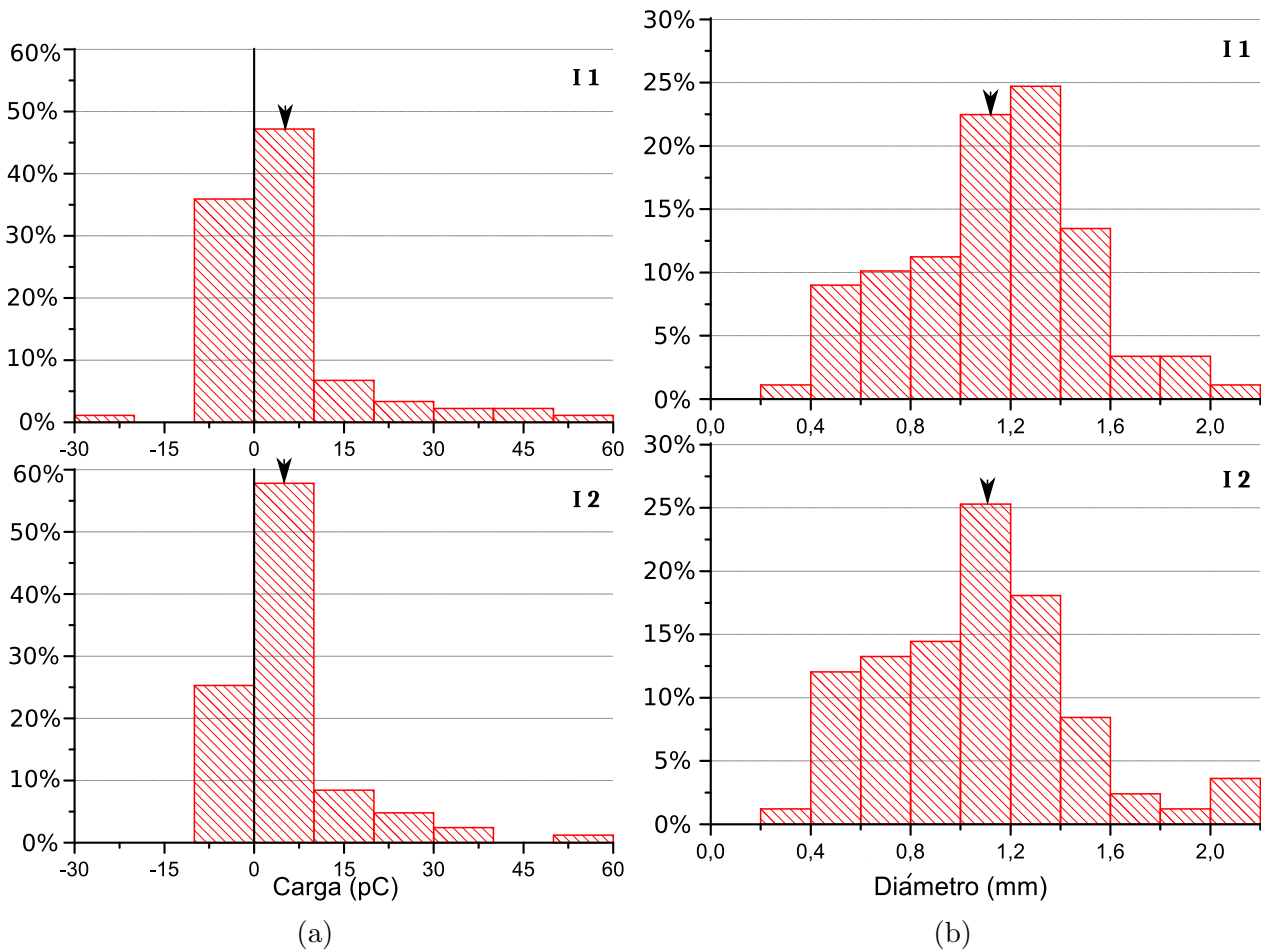


Figura 3.11: Histogramas separados por intervalos, de la carga (a) y del diámetro (b) para la Lluvia 4. Los valores promedio respectivos están indicados con una flecha.

que el proceso por el cual se electrifican las partículas de precipitación podría no ser estacionario.

3.2.5. Lluvia 5

Los resultados para la Lluvia 5 se resumen en las figuras 3.13, 3.14 y 3.15. Ambos intervalos presentan cargas negativas siendo bastante más cuantiosas en el intervalo 1. En general, las gotas tienen q menores a $50 pC$ y mayores a $-25 pC$, fuera de este rango aparecen algunas positivas del orden de los cientos de pC (la mayor fue de $(410 \pm 40) pC$), como se puede ver en la figura 3.14a. La distribución de los diámetros es parecida entre intervalos (figura 3.14b) y sus promedios no se distinguen experimentalmente (ver tabla 3.1). En la figura 3.15 se ve que el grueso de las gotas, presentan diámetros en un amplio rango (aproximadamente entre 0.5 y $3.5 mm$) y las cargas positivas de mayor magnitud tienen diámetros de $\sim 2.5 mm$. Estos eventos con cargas mayores al resto, hacen recordar a los vistos en otras lluvias, como en el I1 de la Lluvia 1 y al igual que en los otros casos, estos resultados parecen mostrar partículas con características diferenciadas del resto. En esta Lluvia no hubo presencia de granizos al nivel del suelo pero es posible que hayan estado presentes en la nube y que se hayan fundido antes de alcanzar el suelo.

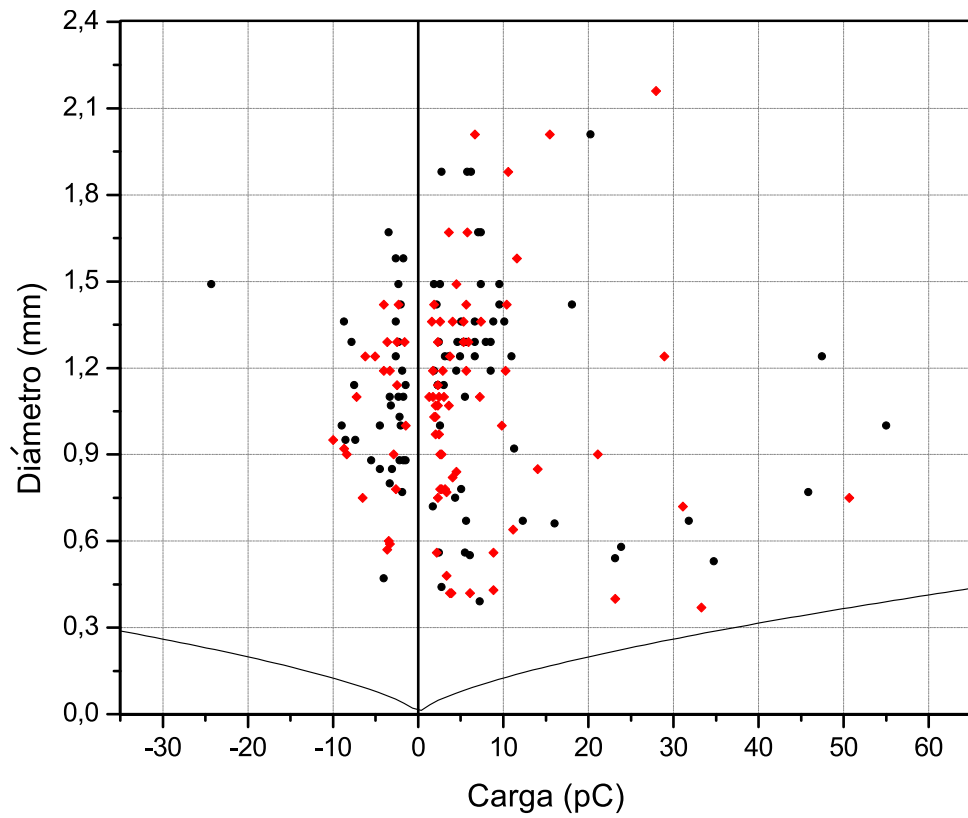


Figura 3.12: Gráfico de d vs q , donde se encuentran diferenciados los intervalos para la Lluvia 4, con color negro (círculos) el $I1$ y rojo (rombos) el $I2$. Además se grafica con una línea continua negra la carga máxima (para un dado diámetro) de Rayleigh.

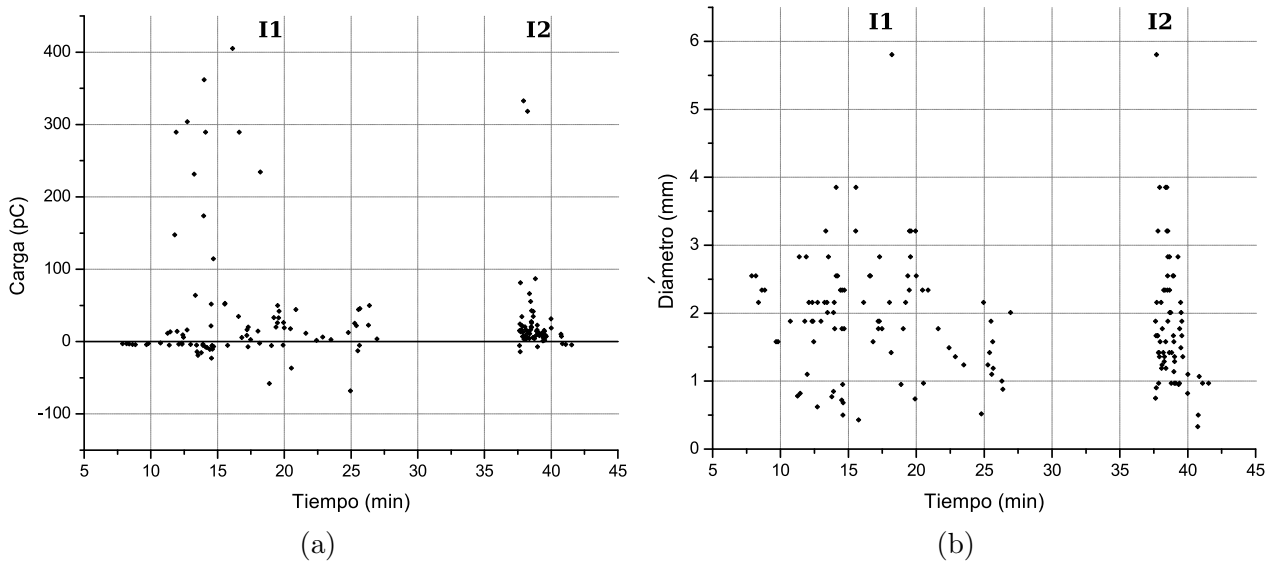


Figura 3.13: Comportamiento en el tiempo de la carga eléctrica (a) y el tamaño de las gotas (b), para la Lluvia 5.

En cuanto a la variación en el tiempo de esta lluvia, se observa en la figura 3.13a, un comportamiento que no ocurrió en ninguna otra lluvia, que es la presencia de únicamente cargas negativas al inicio del primer intervalo, esto sucedió a lo largo de ~ 5 minutos. En el segundo intervalo también ocurrió lo mismo, pero con menos casos y por algunos pocos segundos. Fi-

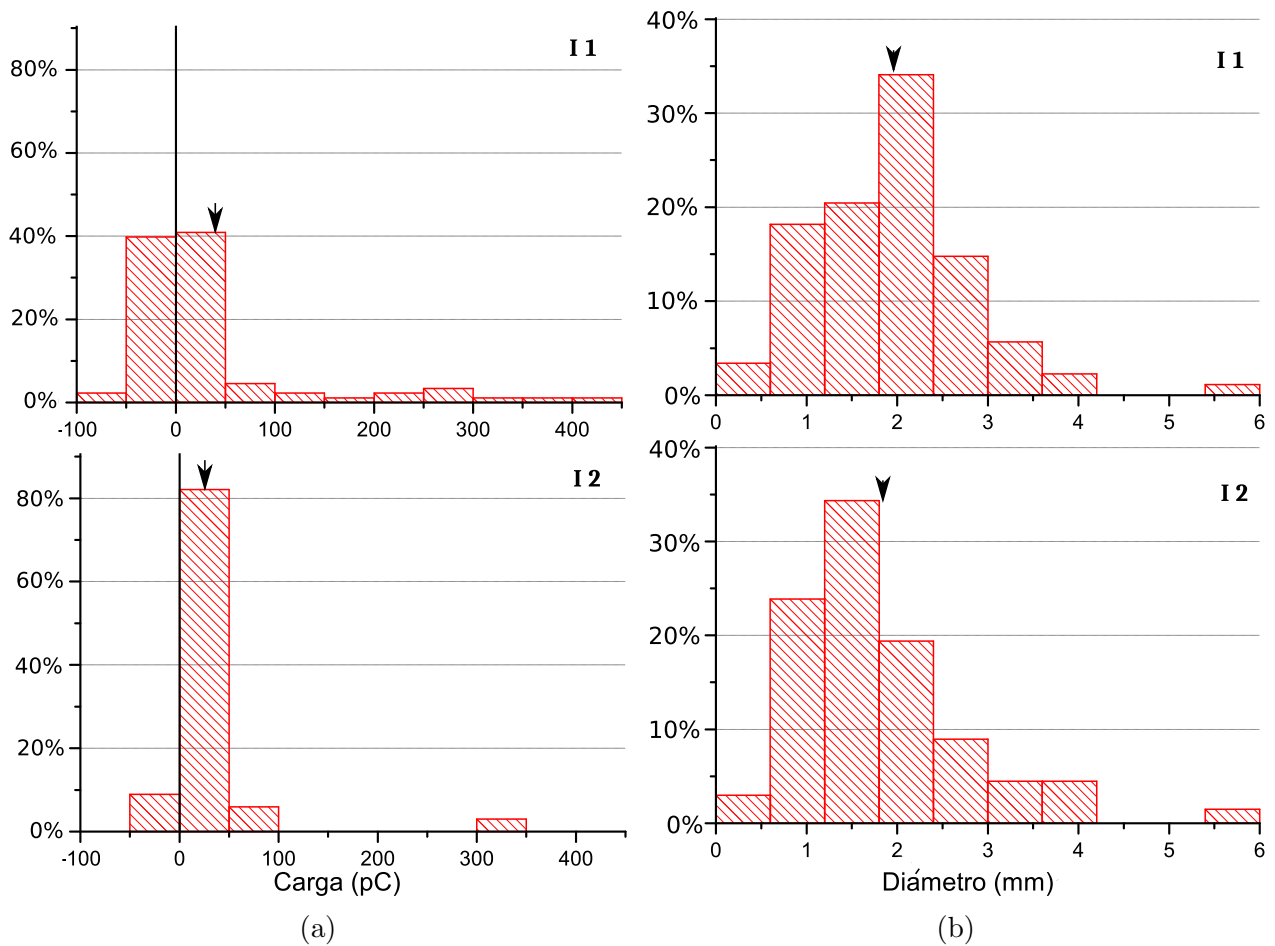


Figura 3.14: Histogramas separados por intervalos, de la carga (a) y del diámetro (b) para la Lluvia 5. Los valores promedio respectivos están indicados con una flecha.

nalmente para *I1* e *I2*, las cargas grandes aparecieron sólo en la primera mitad de cada uno de estos. Estas variaciones en el tiempo, muestran el comportamiento temporal cambiante que puede tener una lluvia en pocos minutos.

Para esta lluvia, el origen de las cargas transportadas probablemente sea resultado de procesos dinámicos dentro de la nube (si nos basamos en la teoría precipitativa no inductiva), que involucran granizos creciendo por acreción y que en la parte baja de la nube se cargan positivamente. Este mecanismo también se cree que actuó en la Lluvia 1, por lo que esperaríamos ver resultados más parecidos a los que se observaron allí. Finalmente, no es claro que este actuando el mecanismo de Wilson, debido a que se ven varias cargas negativas solas al inicio y este mecanismo las cargaría positivamente en caso de tener una inversión del campo eléctrico, como se esperaría en una lluvia de alta actividad eléctrica. Una posible explicación, usando este proceso, sería que \vec{E} varíe en el tiempo como observa Simpson [27] con el efecto imagen reflejo (subsección 1.3.5).

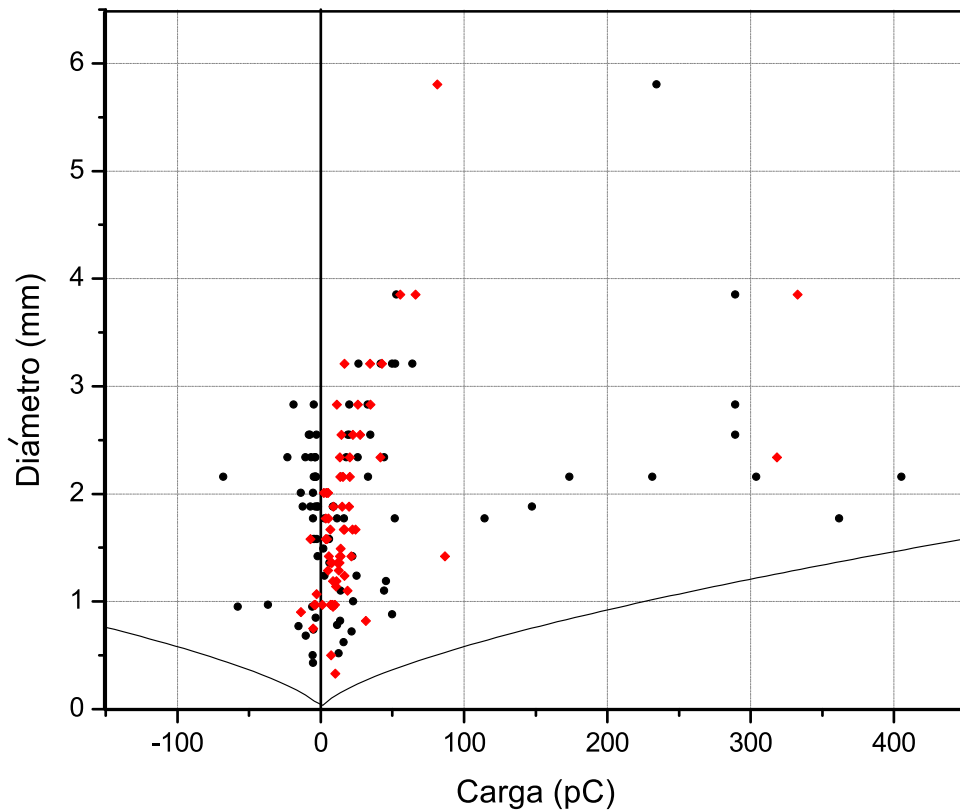


Figura 3.15: Gráfico de d vs q , donde se encuentran diferenciados los intervalos para la Lluvia 5, con color negro (círculos) el $I1$ y rojo (rombos) el $I2$. Además se grafica con una línea continua negra la carga máxima (para un dado diámetro) de Rayleigh.

3.2.6. Comparación de todas las Lluvias

En la figura 3.16, se comparan todas las lluvias estudiadas en este trabajo en una misma escala. Según los observables meteorológicos se hizo una clasificación previa (BAE y AAE) en la primer parte de la sección 3, notamos que respecto al tamaño de las gotas existe una buena concordancia con esta clasificación inicial. En donde las lluvias con alta actividad eléctrica tienen partículas más grandes que las de baja actividad. Respecto a las magnitudes de las cargas eléctricas, existe una concordancia con esta clasificación pero las diferencias no son tan claras, principalmente debido al comportamiento de la Lluvia 5. Esta, salvo por algunas pocas cargas grandes $> 75 pC$, no se diferencia mucho de las BAE y si lo hace con la 1. Se puede decir entonces, que las lluvias de baja actividad eléctrica presentan comportamientos similares tanto en q como en d , con la particularidad de la Lluvia 4 que presenta cargas negativas. En cambio las AAE, tienen más variabilidad en los resultados.

Los gráficos de d vs q para las 5 lluvias analizadas, se presentan en la figura 3.17, usando la misma escala. Lo primero que salta a la vista, es lo caótico y complejo que es el aspecto eléctrico de las lluvias. Las de un mismo tipo pueden tener diferencias notables, como ser la presencia de cargas negativas para la Lluvia 4 y no para las Lluvias 2 y 3. No obstante, los contrastes más notorios son entre la Lluvia 1, la 5 y las BAE. Esto puede ser consecuencia de

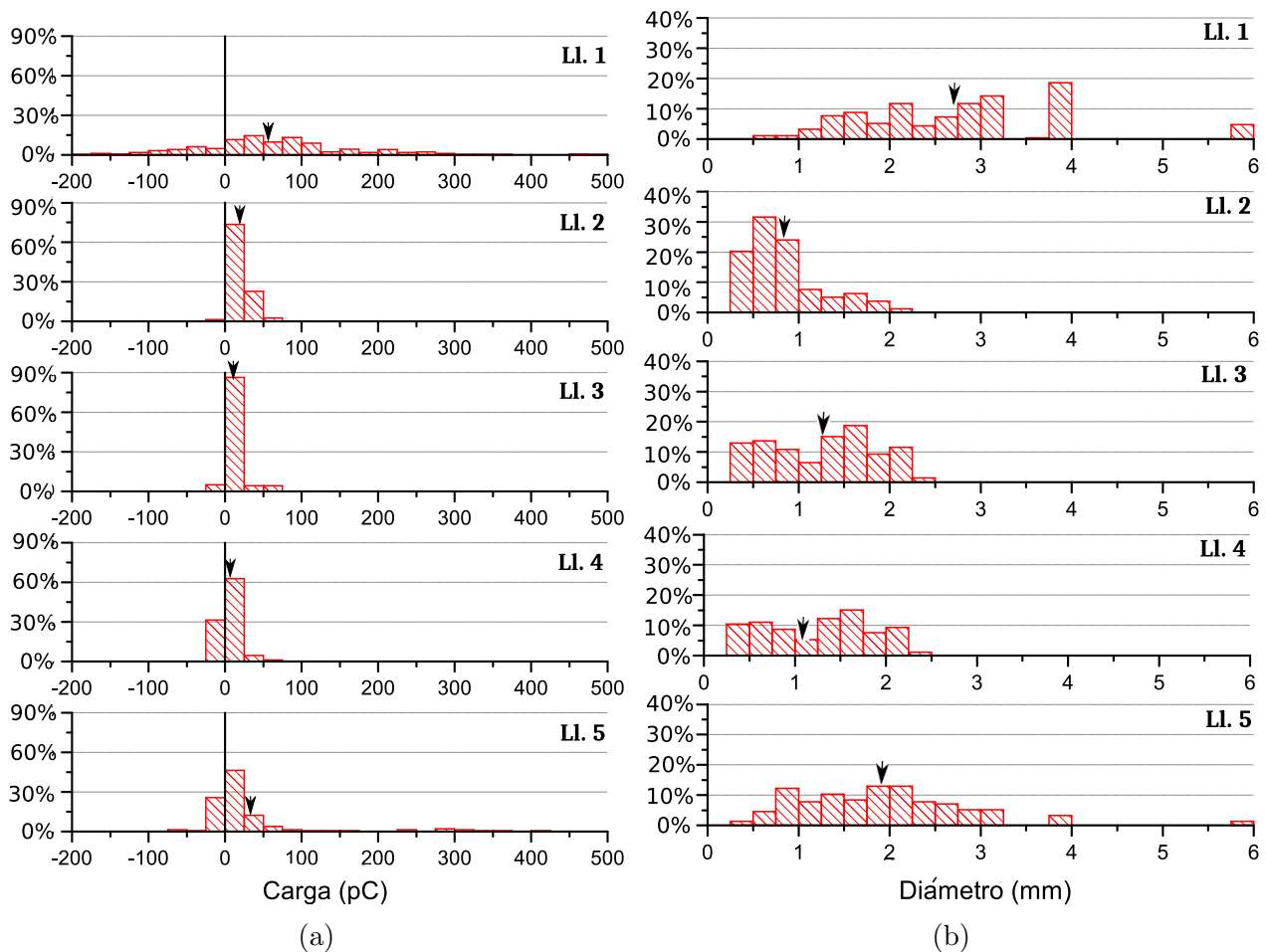


Figura 3.16: Resultados de los histogramas para todas las Lluvias, de (a) carga y (b) diámetro. Los valores promedio respectivos están indicados con una flecha.

la acción conjunta de los varios mecanismos de electrificación (tanto para nubes con desarrollo vertical como para nubes estratiformes), además de la incorporación de iones que puede ocurrir en el trayecto hasta la superficie terrestre y otros fenómenos que quizás ignoramos.

3.2.7. Comparación con otros autores

Como se explicó en la sección 1.3, algunos investigadores agruparon las lluvias según sus características meteorológicas en distintas clasificaciones, las cuales cambian de autor a autor pues existe un cierto grado de subjetividad en las definiciones; otros en cambio no clasificaron las lluvias estudiadas. Los resultados de este trabajo poco se asemejan a los de Kamra y Sathe (subsección 1.3.3), tal vez debido a las diferencias en los escenarios experimentales. Ellos midieron las partículas ubicadas en la parte baja de la nube, sin que éstas desciendan por cientos de metros hasta la superficie. Por otra parte, estudiaron sólo nubes estrato y estratocúmulo, nubes que tienen muy poco desarrollo vertical y que presentan exiguo dinamismo eléctrico. Los contrastes en lo que se refiere a la polaridad son muy evidentes, habiendo en el total de las gotas un 70 % de negativas entre tanto en este estudio, se observó una mayoría positiva

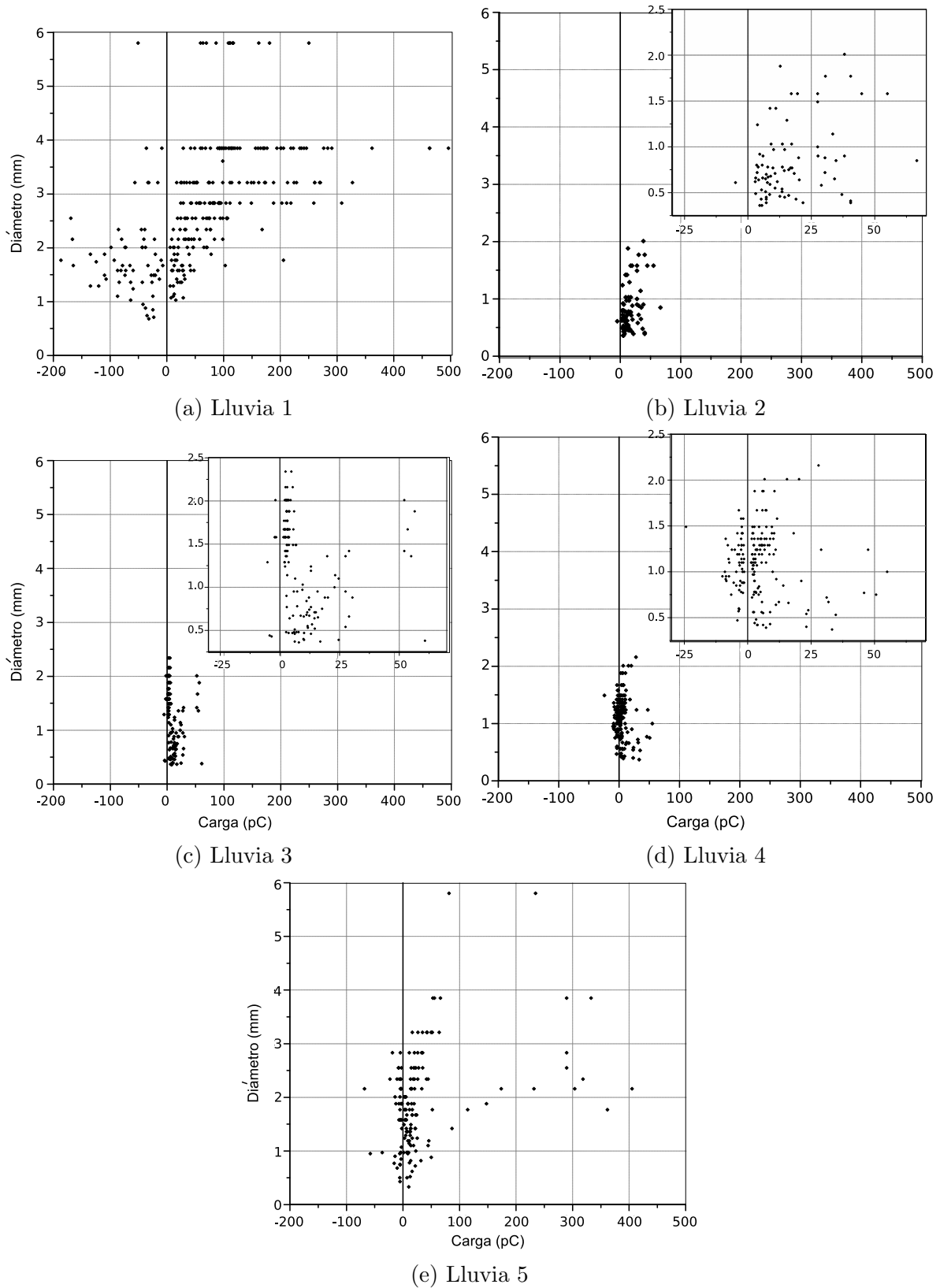


Figura 3.17: Comparación entre los gráficos de d vs q de todas las Lluvias. En los casos (b), (c) y (d) se presenta un inset dentro de la imagen para apreciar los resultados con mayor detalle.

(entre 69 y 99% eran positivas). Finalmente, sus valores de Q y de las q individuales fueron aproximadamente dos órdenes de magnitud menores a los aquí obtenidos.

Si se compara con los trabajos de Chauzy y Despiau (subsección 1.3.2) y Despiau y Houngninou (subsección 1.3.4) las condiciones de medición fueron en la superficie terrestre y para eventos variados, muchos de los cuales presentaron truenos y relámpagos, condiciones similares a las del presente trabajo. Chauzy y Despiau, observaron diferencias bien definidas en las proporciones de q de cada signo en el conjunto de lluvias estudiadas, unos casos con más cargas positivas y otros con más negativas. Las proporciones del presente trabajo se parecen sólo para las lluvias con mayor cantidad de cargas positivas que ellos encontraron, en donde su promedio de p_+ fue 78%, siendo parecido a las AAE ($\sim 75\%$) y también a la Lluvia 4 (69%). Estos autores notaron que \bar{q}_+ y \bar{q}_- fueron parecidos entre si para todos sus casos, por el contrario en el presente estudio los \bar{q}_+ fueron siempre superiores a los \bar{q}_- .

Chauzy y Despiau también analizaron la relación de d vs q y notaron que existe una correlación en una de las lluvias con más cargas negativas que positivas. La tendencia fue: más negativas para diámetros mayores, al contrario de lo encontrado en este trabajo (ver subsección 3.2.1). Su ecuación lineal fue $d(mm) = -0.096 \times Q(pC) + 1.05$, con $r = -0.23$, mientras que la encontrada para la Lluvia 1 fue $d(mm) = 0.0059 \times Q(pC) + 2.34$, con $r = 0.554$. En figura 3.18 se ilustran los conjuntos de puntos a partir de los cuales fueron realizados los ajustes anteriores.

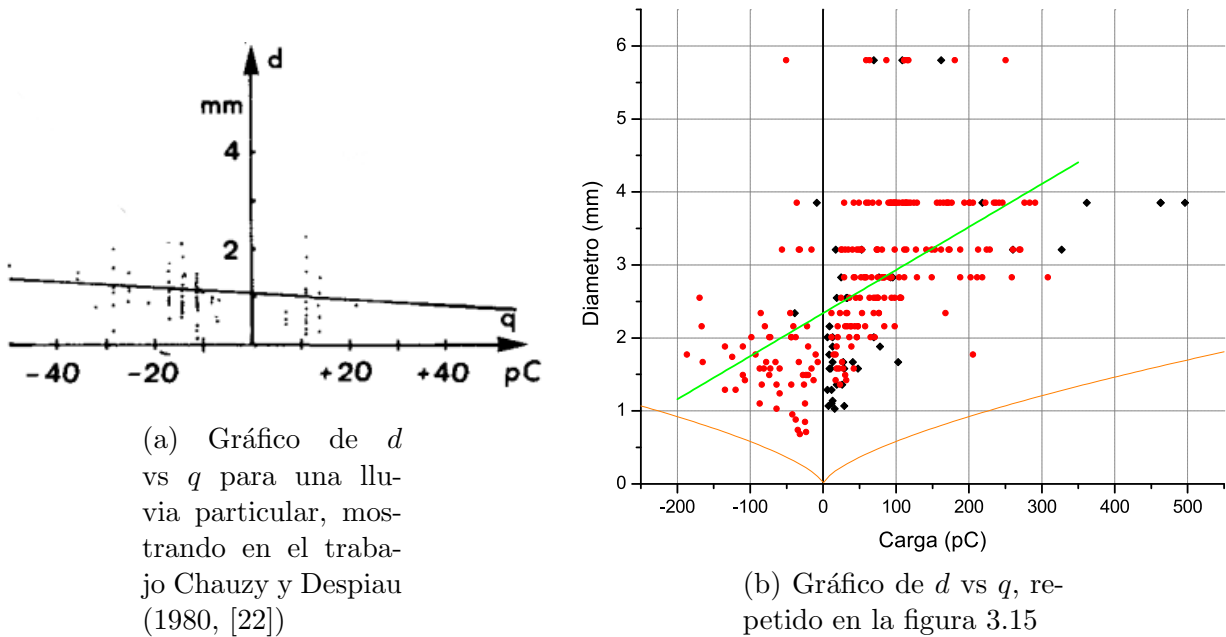


Figura 3.18: Gráficos de d vs q

Despiau y Houngninou, como fue explicado en la subsección 1.3.4, separaron las lluvias analizadas en ‘*tormentas eléctricas*’ y en simplemente ‘*lluvias*’. Para las primeras, hubo una similitud con las AAE (la categoría equivalente) pues ellos también vieron más gotas con polaridad positiva, pero la proporción de éstas fue un poco mayor (90%). Para las segundas, estos autores observaron igual cantidad de gotas con distinto signo que fue, comparando con las BAE (que son las análogas), similar sólo a lo visto en la 4. Para ‘*tormentas eléctricas*’ el

Rango	Tipo	Autores	p_-	Cargas
N. Caliente	Llovizna	<i>Takahashi (1972a)</i>	0.9	$\sim 10^{-4} pC$
N. Caliente	Llovizna	<i>Takahashi y Craig (1973)</i>	0.9	$\sim 10^{-4} pC$
N. Caliente	Lluvia	<i>Takahashi y Fullerton (1972)</i>	0.73 [0.75 - 1.4 mm]	$3 \times 10^{-3} pC$
N. Caliente	Lluvia	<i>Takahashi y Fullerton (1972)</i>	0.43 [1.7 - 2.1 mm]	$3 \times 10^{-3} pC$
Tormenta E.	Llovizna	<i>Takahashi y Craig (1973)</i>	0.38	$\leq 0.1 pC$
Tormenta E.	Lluvia	<i>Simpson (1909)</i>	0.3	-
Tormenta E.	Lluvia	<i>Gunn (1949)</i>	0.56	promedio $\sim 3 pC$
Lluvia 1 (AAE)		<i>Este trabajo</i>	0.22	101; $-63 pC$ (\bar{q}_+ ; \bar{q}_-)
Lluvia 2 (BAE)		<i>Este trabajo</i>	0.01	17; $-5 pC$ (\bar{q}_+ ; \bar{q}_-)
Lluvia 3 (BAE)		<i>Este trabajo</i>	0.05	10; $-3 pC$ (\bar{q}_+ ; \bar{q}_-)
Lluvia 4 (BAE)		<i>Este trabajo</i>	0.31	9; $-4 pC$ (\bar{q}_+ ; \bar{q}_-)
Lluvia 5 (AAE)		<i>Este trabajo</i>	0.28	50; $-10 pC$ (\bar{q}_+ ; \bar{q}_-)

Tabla 3.3: Resumen de los resultados mencionados por Takahashi [16] y los presentados en este trabajo.

promedio de las cargas positivas variaba entre $+77.6$ y $+107.5 pC$; mientras el de las cargas negativas entre -10.9 y $-37.8 pC$, siendo similares a las lluvias AAE. Las ‘*lluvias*’ tenían \bar{q}_+ y \bar{q}_- del orden de $30 pC$; en el presente trabajo también se observó que las BAE muestran promedios poco cambiantes entre lluvias, aunque las cargas negativas eran considerablemente más pequeñas que las positivas y solo estas son parecidas en el orden de magnitud a las de ellos.

Takahashi (subsección 1.3.1) en su revisión, resumió los valores de la p_+ y p_- para una gran variedad de autores, las lluvias están clasificadas en dos categorías, las ‘*nubes calientes*’ y las ‘*nubes de tormenta eléctrica*’. A su vez todos los resultados expuestos están divididos en dos rangos de tamaños, unos entre 0.1 y $0.7 mm$ (rocío); y otros entre 0.7 y $8 mm$ (lluvia). En la tabla 3.3 se comparan los resultados de este trabajo con los de la referencia. Se aprecia una gran diferencia en cuanto a las magnitudes encontradas por estos autores. Finalmente, p_- es muy variada entre los distintos trabajos, sin embargo en ningún caso se obtiene una proporción casi nula de cargas negativas, como ocurre en las Lluvias 3 y 4. No es claro el porqué de esta discrepancia.

MacGorman y Rust (subsección 1.3.5) expusieron en su libro [3] algunos resultados para nubes nimboestrato. Chalmers [32] observó que en precipitación continua de más de una hora la polaridad en el campo eléctrico y en las partículas que precipitan, es diferente para nieve que para gotas de agua. En las gotas de agua es usualmente positiva y en la nieve negativa. También Reiter [33], encontró algo similar en nubes nimboestrato que están precipitando de forma constante. En nuestro caso, las nubes con características aparentemente estratiformes, eran las BAE. Dos de éstas (Lluvias 2 y 3) tuvieron una p_+ muy grande y para el tercer caso (Lluvia 4) las proporciones eran más equilibradas. Una posible interpretación de los resultados con las lluvias BAE es que en los dos casos en que se obtuvo $p_+ \sim 1$, se trabajó con lluvia

proveniente de nubes a temperaturas mayores a la temperatura de fusión del agua. En el tercer caso, es posible que se haya medido precipitación proveniente de nubes que ocupan regiones con distintas temperaturas, unas mayores a 0°C y otras menores. Resumiendo, se especula que el comportamiento estrictamente positivo de las Lluvias 2 y 3 corresponde a nubes ‘calientes’ y el comportamiento observado en la Lluvia 4 mostraría un caso donde hay presencia de agua líquida y agua sólida, y la nube cambia su grosor en el tiempo.

Capítulo 4

Conclusiones

Este trabajo es el primero de su tipo realizado en el Grupo de Física de la Atmósfera de FaMAF y si bien las mediciones conseguidas con el mismo, son pruebas piloto que no son suficientes para obtener conclusiones contundentes acerca de los mecanismos de electrificación de nubes, estos resultados tienen el gran mérito de ser los primeros realizados con este dispositivo, además de cumplir con los objetivos planteados al inicio y dar nuevas pautas para los futuros trabajos en el tema. Se puede resumir lo realizado en los siguientes puntos:

- Se construyó exitosamente un dispositivo experimental para medir cargas eléctricas y las velocidades terminales de caída para partículas de precipitación.
- Se armó la fuente de alimentación del amplificador de corriente, la carcasa exterior que contiene la interfaz de comunicación AD y el cableado de conexión entre la tarjeta y la fuente con el amplificador dentro del dispositivo.
- Se instalaron y pusieron en funcionamiento los distintos programas de computadora para la adquisición y análisis de datos: LabVIEW, Fortran, Grace, Origin, entre otros.
- Se midió la carga eléctrica transportada y el diámetro de las partículas de precipitación para distintas lluvias, 5 de las cuales fueron analizadas en profundidad. Se encontró propicio el dispositivo para esta tarea.

Los resultados, muestran que las lluvias no son eventos fáciles de comprender sino todo lo contrario. Por ésto, es que hay mucho por mejorar y hacer a futuro, en particular, ya se está construyendo un segundo prototipo del dispositivo con algunas innovaciones que se cree mejorarán su rendimiento. A continuación se resumen las conclusiones de lo analizado en los resultados, en los siguiente puntos:

- Se encontró que la carga neta transportada a tierra es en todos los casos positiva.
- Se vió una correlación entre los observables meteorológicos y el carácter eléctrico de las lluvias analizadas, en los tamaños de las partículas se observa una mayor coincidencia que con las cargas eléctricas.

- Se encontraron comportamientos muy variados en las lluvias, con variaciones entre lluvias de características meteorológicas similares. En particular estas diferencias fueron mayores para la carga, en las lluvias que presentaban alta actividad eléctrica.
- Se comprobó que el carácter de las precipitaciones varía en los distintos períodos (intervalos), más aún éste cambia momento a momento, mostrando su carácter dinámico en el tiempo, a lo largo de su desarrollo.
- Se observó una tendencia a aumentar la carga máxima observada con el diámetro de las gotas de lluvia, esta dependencia es similar a la carga máxima propuesta por Rayleigh pero con un corrimiento a cargas más chicas.
- Se encontró que los resultados coinciden con las mediciones realizadas por otros autores, en algunos otros casos no hubo ninguna concordancia. Pero en general se pudo dar una explicación plausible de las coincidencias y discrepancias en base a los diversos escenarios experimentales.
- Es necesario recolectar una mayor cantidad de datos, con registros detallados y correlacionados con los observables meteorológicos, registrándose mayor cantidad de variables meteorológicas, con una mayor precisión y constancia. Además se necesitan realizar mediciones de una manera más sistemática y regular para, por ejemplo, visualizar mejor los cambios de las variables en el tiempo.
- Si bien se cuenta con poca información como para hacer ciertas afirmaciones teóricas, sería provechoso mencionar algunas especulaciones para pensar nuevas hipótesis, para futuras campañas de medición:
 - El mecanismo de captura selectiva de iones de Wilson no parece ser el responsable de la carga transportada en todos los casos analizados, en particular las cargas muy grandes no parecen ser originadas por este proceso.
 - Las partículas con cargas muy grandes y positivas, parecen tener una relación con los granizos que se forman en la parte baja de la nube.
 - Las variaciones en el tiempo podrían, en algunas ocasiones, responder a la captura de iones y consecuente limpieza de éstos en el medio (aire).
 - La mayor cantidad de cargas positivas, de algunas de las nubes de baja actividad eléctrica (BAE) o de sus intervalos, podría deberse a que su límite superior se encuentra por debajo de la región con temperaturas de cero grados.

Bibliografía

- [1] Ortega Ponce, H. (2017). La Tierra o Lednem de cerca [Presentación]. Recuperado de <https://docplayer.es/53909219-La-tierra-o-lednem-de-cerca.html>
- [2] Wilson, C. T. R. 1929. Some thundercloud problems. *J. Franklin Inst.* **208**: 1-12
- [3] MacGorman, D. R., Rust, W. D. 1998. The Electrical Nature of Storms. *Oxford Univ. Press, New York* cap: 2, 3, 7 y 10.
- [4] Wallace, J. M. (2006) *Atmospheric Science, 2th Ed.* San Diego, California (USA) Elsevier Inc. pp. 252
- [5] Nicoll, K. A., Harrison, R. G. 2018. Droplet charging in stratiform clouds. *XVI International Conference on Atmospheric Electricity, Nara city, Nara, Japan.*
- [6] Pereyra, R. G., Ávila, E. E., Castellano N. E., Sauders, C. P. R. 2000. A laboratory study of graupel charging. *Journal of Geophysical Research* **105**: 20,803-20,812
- [7] Ávila, E. E., Pereyra, R. G. 2000. Charge transfer during crystal-graupel collisions for two different cloud droplet size distributions. *Geophysical Research Letters* **27**(23): 3837-3840
- [8] Pereyra, R. G., Ávila, E. E. 2002. Charge separation in updraft of convective regions of thunderstorm *Journal of Geophysical Research*
- [9] Bürgesser, R. E., Pereyra, R. G., Ávila, E. E. 2006. Charge separation in updraft of convective regions of thunderstorm. *Geophysical Research Letters* **33**
- [10] MacGorman, D.R., Rust, W.D., Krehbiel, P., Rison, W., Bruning, E., Wiens, K. 2005. The electrical structure of two supercell storms during STEPS. *Mon. Weather Rev.* **133**: 2583-2607
- [11] Takahashi, T. 2006. Precipitation mechanisms in East Asian monsoon: videosonde study. *J. Geophys. Res.* **111** D09202.
- [12] Mansell, E.R., MacGorman, D.R., Ziegler, C.L., Straka, J.M., 2002. Simulated three-dimensional branched lightning in a numerical thunderstorm model. *J. Geophys. Res.* **107**, 4075.

- [13] Rayleigh, Lord 1882. On the equilibrium of liquid conducting masses charged with electricity. *Phil. Mag.* **14**: 184-186
- [14] Beard, K. V. 1976. Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft. *J. Atmos. Sci.* **23**: 851-864
- [15] Whipple, F. J. W., Chalmers, J. A. 1944. On Wilson's theory of the collection of charge by falling drops. *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **70**: 103.
- [16] Takahashi, T. 1973. Measurement of electric charge of cloud droplets, drizzle and raindrops. *Rev. Geoph. Space Phys.* **4**: 903-924
- [17] Takahashi, T. 1972a. Electric charge of cloud droplets and drizzle drops in warm clouds along the Mauna Loa-Mauna Kea Saddle Road of Hawaii island. *J. Geophys. Res.* **77**: 3869-3878
- [18] Takahashi, T., Craig, T. 1973. Charge-size measurement of drizzle in warm clouds. *J. Meteorol. Soc. Jap.*
- [19] Takahashi, T., Fullerton, C. M. 1972. Raindrop charge-size measurements in warm rain. *J. Geophys. Res.* **77**: 1630-1636
- [20] Simpson, G. C. 1909. On the electricity of rain and its origin in thunderstorms. *Phil Trans. Roy. Soc. London, Ser. A* **209**: 379-413
- [21] Gunn, R. 1949. The free electrical charge on thunderstorm rain and its relation to droplet size. *J. Geophys. Res.* **54**: 57-63
- [22] Chauzy, S., Despiau, S. 1980. Rainfall rate and electric charge and size of raindrops of six spring showers. *J. Atmos. Sci.* **37**: 1619-1627
- [23] Paluch, I. R., Sartor, J. D. 1973. Thunderstorm electrification by the inductive charging mechanism: Part I and II. *J. Atmos. Sci.* **30**: 1166-1173
- [24] Kamra, A. K., Sathe, A. B. 1983. Raindrop charges, electric field and space charge measurements at a mountain station covered with monsoon clouds. *Arch. Met. Geoph. Biocl. Ser. A* **32**: 145-153
- [25] Selvam, A. M. et al. 1978. Electrical, Microphysical and Dynamical Conditions in Clouds During Summer Monsoon at a Hill Station. *Proc. Conf. Cloud Phys. and Atmos. Elect., Issaquah, Washington* pp. 525-631
- [26] Despiau, S., Houngninou, E. 1996. Raindrop charge, precipitation, and Maxwell currents under tropical storms and showers. *J. Geophys. Res.* **101**: 14,991-14,997

- [27] Simpson, G. C. 1949. Atmospheric Electricity During Disturbed Weather. *Geoph. Mere. (London)* 841-851
- [28] Ramsay, M. W., Chalmers, J. A. 1960. Measurement on the electricity of precipitation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **86**: 530-539
- [29] Rust, W. D., Morre, C. B. 1974. Electrical conditions near the bases of thunderclouds over New Mexico. *Quart. J. R. Met. Soc.* **100**: 450-468
- [30] Stow, C.D. 1980. Large hydrometeor charges below thunderstorms. *J. Meteor. Soc. Jpn.* **58**: 217-224
- [31] Magono, C. 1980. Thunderstorms. *Elsevier Sci., Amsterdam* 261 pp
- [32] Chalmers, J.A. 1956. The vertical electrical currents during continuous rain and snow. *J. Atmos. Terres. Phys.* **9**: 311-321
- [33] Reiter, R. 1965. Precipitation and Cloud Electricity. *Quart. J. R. Met. Soc.* **91**: 60-72
- [34] Gunn, R., Kinzer, G.D. 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *J. Meteorol.* **10**: 243-248