

CB 1013122

R.º ~~2-068/F~~

Sig May (041) = 60

AREA DE PREDICCIÓN

SERVICIO DE TÉCNICAS DE ANÁLISIS Y PREDICCIÓN

EDICIÓN

7- Abril-92

NOTA TÉCNICA Nº 3

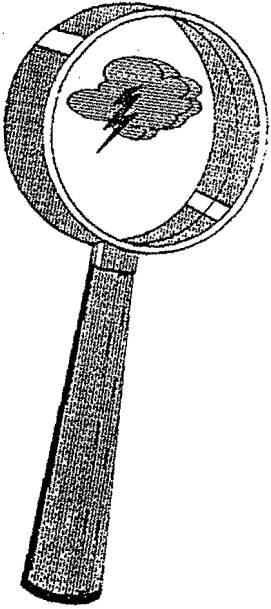
REVISIÓN

-0-

# PRINCIPIOS GENERALES DE ELECTRICIDAD ATMOSFÉRICA: DESCARGAS ELÉCTRICAS

F. Martín León  
O. Carretero Porris

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA  
Subdirección General de Predicción y Vigilancia



PRINCIPIOS GENERALES DE ELECTRICIDAD ATMOSFERICA:

DESCARGAS ELECTRICAS

I N D I C E

INTRODUCCION

- 1.- PRINCIPIOS GENERALES DE ELECTRICIDAD ATMOSFERICA.
  
- 2.- PROCESOS DE FORMACION Y SEPARACION DE CARGAS EN LAS NUBES: MODELO TRIPOLAR
  - 2.1.- INTRODUCCION
  - 2.2.- PROCESOS DE GENERACION Y SEPARACION DE CARGAS
    - 2.2.1.- TEORIA DE LA PRECIPITACION
    - 2.2.2.- TEORIA DE LA CONVECCION
  - 2.3.- MODELO TRIPOLAR
  
- 3.- DESCARGAS ELECTRICAS EN LAS NUBES CONVECTIVAS. TIPOS DE RAYOS.
  
- 4.- ACTIVIDAD ELECTRICA ASOCIADA A LAS TORMENTAS: MODELO CONCEPTUAL.
  
- 5.- BIBLIOGRAFIA.

- Preparada por:

I.N.M.  
Subdirección Gral. Predicción y Vigilancia.  
Servicio Técnicas de Análisis y Predicción.



## INTRODUCCION

La actividad eléctrica asociada a las tormentas, y más concretamente a los rayos, constituyen un elemento más dentro de las características de los fenómenos convectivos tan comunes en nuestro país. Durante un tiempo la detección de "parásitos atmosféricos", también llamados simplemente "atmosféricos", sirvió como herramienta para la localización de las tormentas, pero esta actividad hace ya mucho tiempo que desapareció de la rutina meteorológica diaria y desde entonces ha estado ausente.

La detección de estos fenómenos tiene un interés indudable. Su aplicación básica consiste, evidentemente, en la localización de la actividad tormentosa (labor básica de vigilancia) pero además, el conocimiento de la propia actividad eléctrica puede tener un valor importante por el impacto que puede tener sobre cierto tipo de actividades o por el riesgo que por sí misma puede entrañar. Por ejemplo, según el Calendario Meteorofenológico, el número de muertos por rayo en España durante el período 1941 a 1980 ascendió a nada menos que a 1981 personas; los rayos son también responsables de un buen número de incendios forestales en nuestro país, por último, existen muchas actividades que se ven también afectadas directamente por la presencia de rayos: líneas de conducción eléctrica, lanzamiento de misiles y cohetes etc.

La próxima puesta en operación en el I.N.M. de una red de detección de descargas va a proporcionar al predictor acceso a una nueva fuente de datos y prácticamente inédita para él. Esto significa que va a ser necesario durante un tiempo "aprender" a interpretar y a utilizar estos datos en las actividades diarias de vigilancia y predicción a muy corto plazo. Además, estos datos contribuirán, poco a poco, a la caracterización de los sistemas tormentosos en nuestro entorno así como de su distribución espacial y temporal, es decir, ayudarán a la elaboración de **modelos conceptuales** en los que se pueda apoyar en el futuro el predictor.

La presente Nota Técnica, elaborada por el S.T.A.P. a requerimiento de los predictores, no pretende más que presentar una serie de conceptos generales de electricidad atmosférica que puedan servir de base al predictor para comprender mejor el significado de los nuevos datos a los que va a tener acceso. Es decir, se trata de una primera información básica de tipo general (en la que no se entrará en la descripción de la red de detección desplegada por el I.N.M.), a esta Nota seguirá en breve una segunda en la que se recogerán los principales **modelos conceptuales** establecidos que relacionan la actividad de descargas con diferentes tipos de estructuras convectivas y sus ciclos de vida, modelos extraídos evidentemente de la literatura extranjera y que poco a poco habrá que ir validando y adaptando a nuestro entorno.



## 1.-PRINCIPIOS GENERALES DE ELECTRICIDAD ATMOSFERICA.

En la mayoría de los fenómenos atmosféricos se puede considerar el aire como un aislante casi perfecto pero siempre es posible detectar y medir una corriente eléctrica débil en la atmósfera (con o sin nubes).

En ausencia de nubes, es decir, en condiciones de buen tiempo, se puede detectar la existencia de un campo eléctrico muy tenue normal a la superficie terrestre, orientado de arriba abajo. En función de la diferencia de potencial se puede expresar como:

$$E = - \nabla V$$

En este caso las componentes horizontales de  $E$  son nulas (no así en las zonas tormentosas) y la expresión anterior puede quedar reducida a su componente vertical:

$$E = -dV/dz$$

Como referencia se considera a la tierra con potencial cero y a la atmósfera con potencial positivo. La variación de  $E$  es tal que decrece con la altura (ver Fig. 3, que se comentará más adelante). Como ejemplo podemos citar sus valores en superficie y a 10 Km de altura:

SUPERFICIE

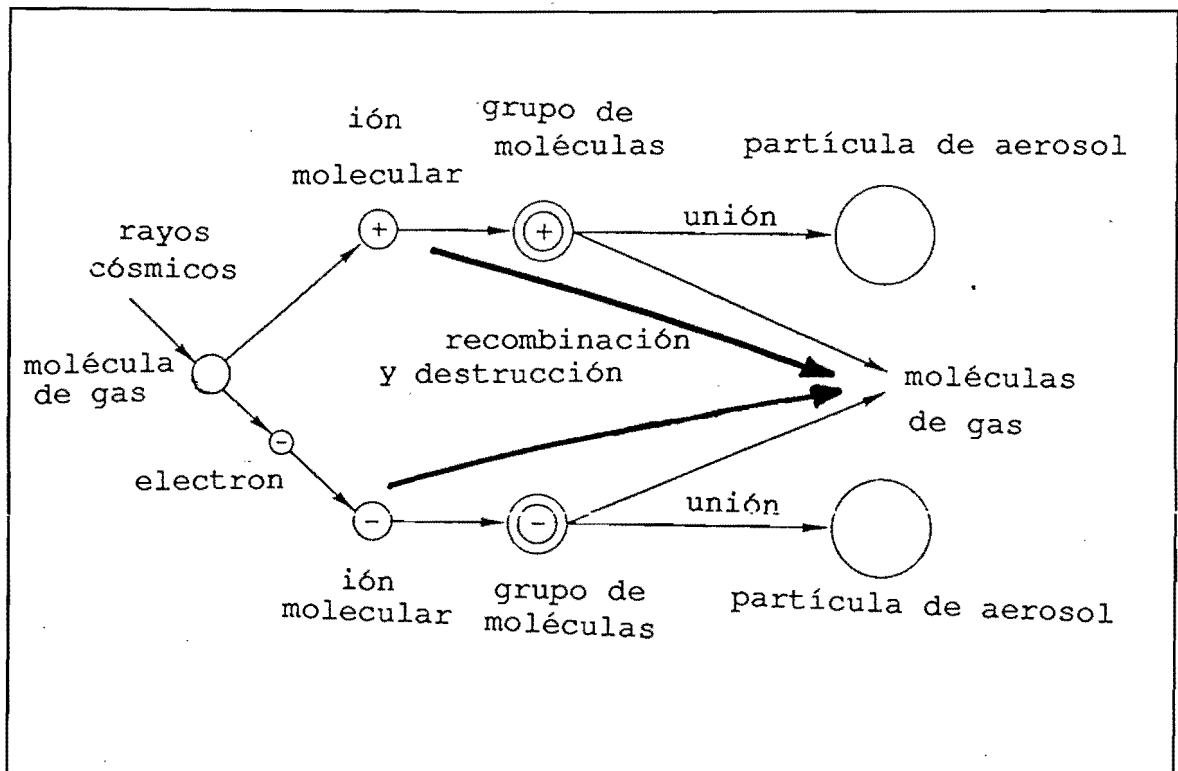
130 v/m

ALTURA (10 Km)

4 v/m

Al considerar a la atmósfera como un aislante casi perfecto lo que hacemos en realidad es despreciar la pequeña conductividad que poseen los iones que se encuentran en ella. Esta aproximación se aleja de la realidad, de hecho, la existencia de iones es el resultado final de ciertos procesos que ocurren en la atmósfera. La ionización es un fenómeno de tipo atómico (pérdida o ganancia de electrones) pero que puede afectar a entes de mayor tamaño (ver figura 1) como:

- A una molécula de la que forma parte el átomo ionizado.
- A un agregado de ellas, que pueden captar a una partícula cargada: aerosoles, gotitas de agua precipitable, nieve, granizo, etc.



**Figura 1.-Producción y aniquilación de iones en la atmósfera**  
 Los rayos cósmicos actúan sobre el gas molecular que queda separado en un ión positivo más un electrón. El ión positivo puede unirse a otros dando lugar a grupos de moléculas que a su vez se pueden unir a aerosoles cargándolos de forma positiva.

El electrón puede actuar sobre moléculas cargándolas negativamente siguiendo el mismo proceso anterior.

Al mismo tiempo las moléculas o grupos de moléculas de signo opuesto pueden recombinarse y neutralizarse dando lugar de nuevo a gases moleculares neutros.

(Ref. Bibl. 5. Adaptación)

Los procesos que dan lugar a la ionización de la atmósfera se dividen de acuerdo a las escalas espaciales donde actúan en:

- Procesos de gran escala (rayos cósmicos, radiación ultravioleta).
- Procesos de menor escala o de tipo local (radioactividad, nubes).

En condiciones de buen tiempo los principales agentes ionizantes atmosféricos son:

- Los rayos cósmicos (en general protones muy energéticos) penetran en la atmósfera chocando con las moléculas neutras del aire. Del choque algún electrón de una molécula puede quedar libre.
- La radiación ultravioleta solar produce el mismo efecto anterior. En este caso es un fotón. Ambos fenómenos ocurren, preferentemente en la alta atmósfera (más allá de los 70 km.)
- La radiactividad terrestre natural, que se centra sobre los continentes y es muy pequeña en los mares. Su efecto es muy pequeño comparado con los anteriores (no hay que olvidar que parte de la radiación solar y cósmica llega a la superficie de la tierra pero muy atenuada).

Como consecuencia de todo esto aparece una capa atmosférica caracterizada por los fenómenos asociados a la ionización, su principal efecto para definirla. Es la ionosfera ( Fig. 2) que se caracteriza por un brusco aumento de la conductividad eléctrica. Este hecho es particularmente intenso a partir de los 80 km. En ella los gases están ionizados al haber perdido los electrones más periféricos que quedan libres circulando entre iones positivos, electrones y moléculas neutras. Sus características comienzan a ser parecidas a la de un conductor metálico. Podemos considerar la ionosfera como un conductor, casi perfecto, donde en su interior, debido a su gran conductividad, el campo eléctrico es nulo y sus superficies externas son equipotenciales.



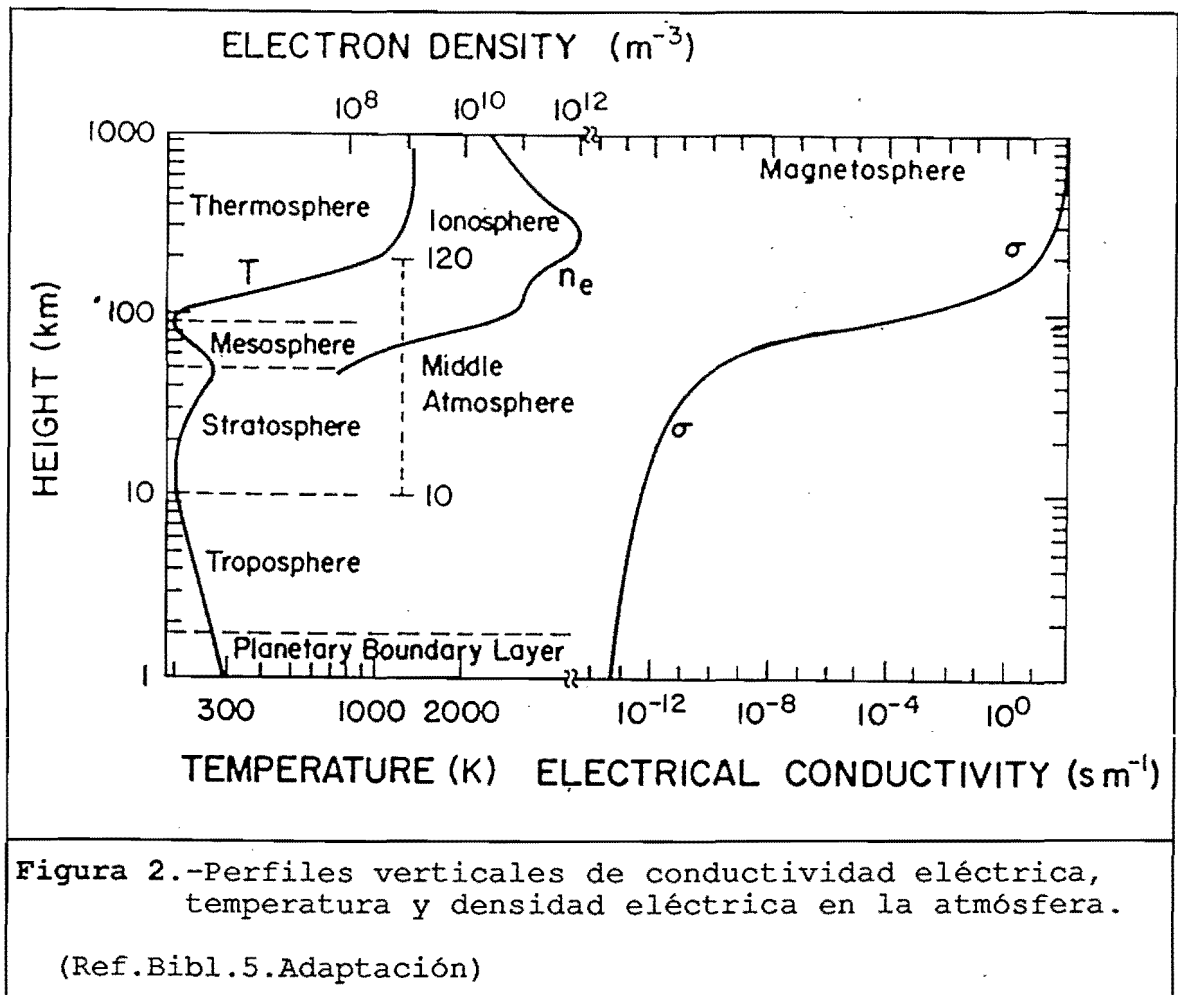


Figura 2.-Perfiles verticales de conductividad eléctrica, temperatura y densidad eléctrica en la atmósfera.

(Ref. Bibl. 5. Adaptación)

Lógicamente la conducción atmosférica se deberá a los componentes que posean una carga neta positiva o negativa. Las cargas positivas se moverán hacia potenciales decrecientes, hacia abajo y las negativas hacia potenciales crecientes, hacia arriba. En los 12 primeros Km de la atmósfera la distribución vertical, en condiciones de buen tiempo, del campo eléctrico, la conductividad y la corriente de buen tiempo se representan en la figura 3. Se puede observar en la figura como las corrientes de buen tiempo permanecen constantes con la altura, esto es debido a que son proporcionales al producto de la conductividad por el campo eléctrico y, como se refleja en la figura, los dos parámetros varían de forma inversa con la altura.

Cuando existe contaminación en las capas bajas de la atmósfera la captura de los iones por los aerosoles cercanos a la superficie de la tierra hacen aumentar fuertemente el campo eléctrico, llegándose a medir en condiciones de fuerte contaminación valores de campo eléctrico del orden de 500 v/m entre la carga espacial positiva y la tierra (en verano, y con una capa de aire bien mezclada, el campo eléctrico alcanza valores del orden de 130 v/m).

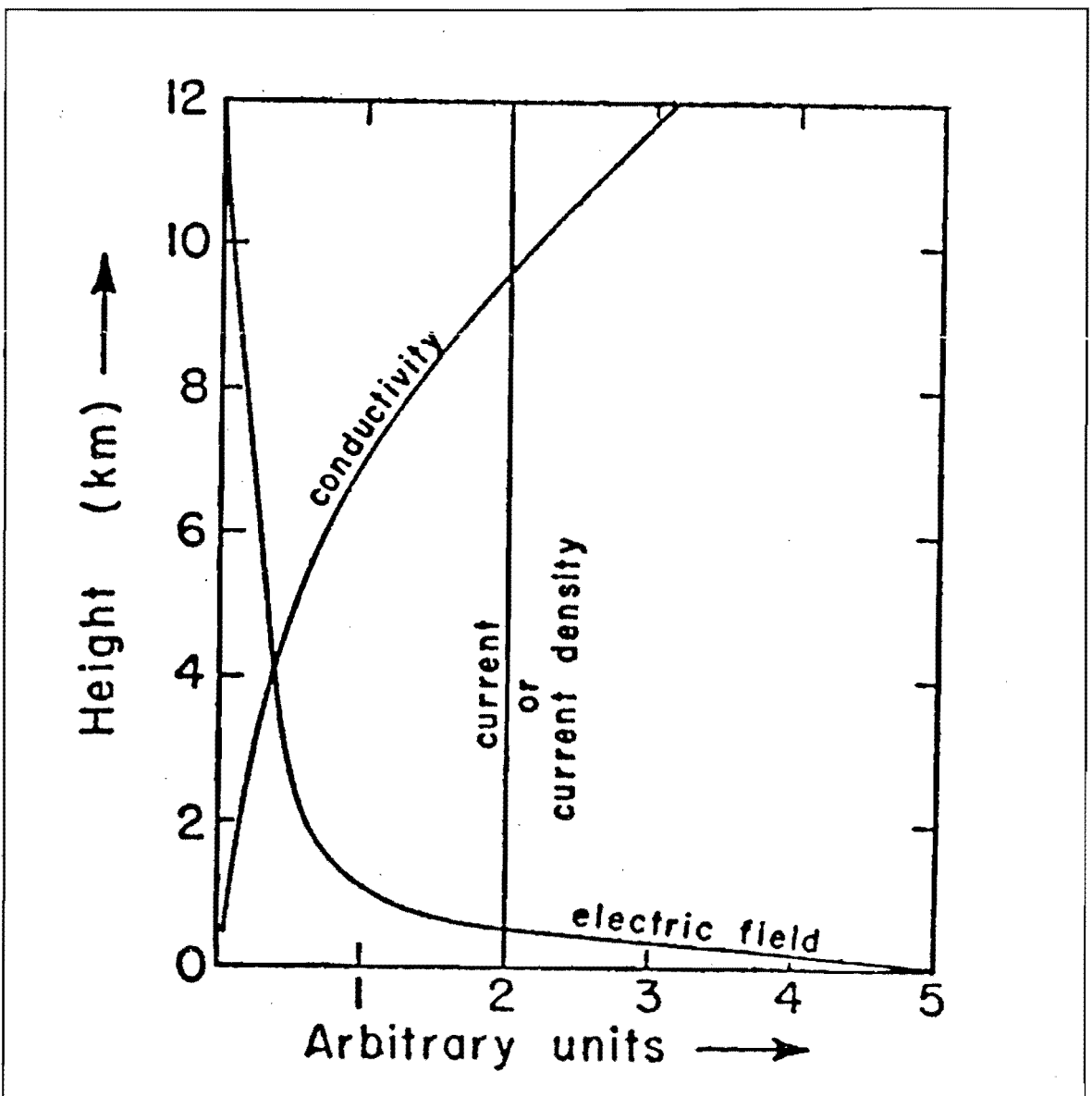


Figura 3.-Propiedades eléctricas de la atmósfera de buen tiempo.

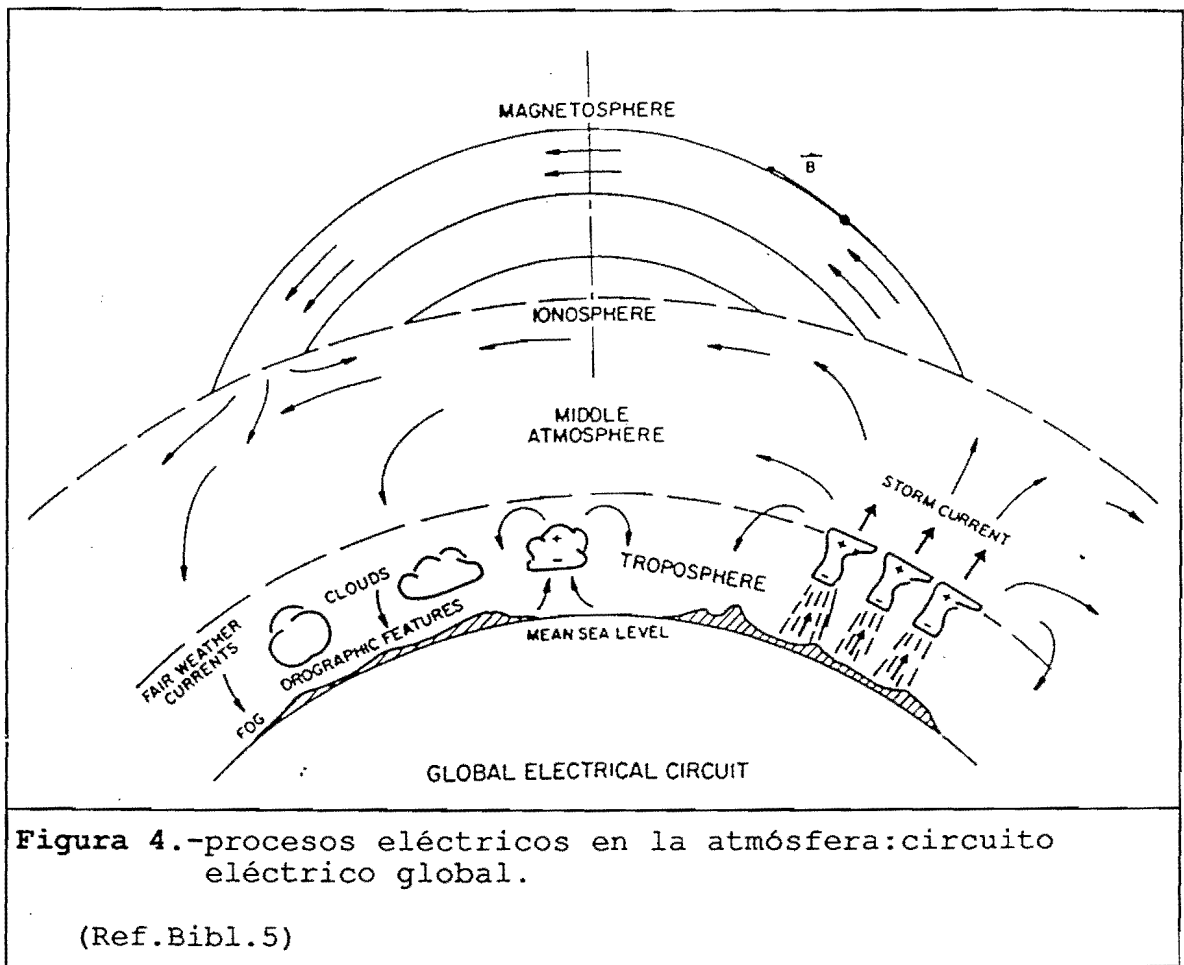
(Ref. Bibl. 9)

Un modelo eléctrico asociado a la atmósfera podría ser el de un condensador esférico donde su cara interna sería la superficie terrestre, cargada negativamente, y la externa, la ionosfera, cargada con signo opuesto. La diferencia de potencial entre las dos "placas" es de unos 360.000 v. Como se comentó anteriormente la caída de potencial varía con la altura siendo de 75.000 v. en el primer km., con la consiguiente variación del campo **E**. En la estratosfera el campo es casi constante, 5 v/m, mientras que en la ionosfera es nulo. Esta variación con la altura se debe al hecho de que el aire no es un dieléctrico perfecto (el campo en su interior sería constante). La existencia de cargas, por ionización, introduce esta variabilidad del campo **E**.

La corriente eléctrica generada entre las dos placas del "condensador atmosférico" se denomina corriente de buen tiempo o corriente de retorno o conducción aire-tierra, con una intensidad de 1800 A para toda la tierra o de  $3 \times 10^{-12}$  A/m<sup>2</sup>. Este valor es independiente de la altitud y produciría la descarga del condensador eléctrico por esta corriente de fuga, hecho que no se produce en realidad. Lógicamente debe de haber mecanismos que mantengan la diferencia de potencial y el campo eléctrico atmosférico de buen tiempo, en caso contrario el condensador se descargaría en una hora. El equivalente eléctrico sería una pila que mantenga tal diferencia de potencial.

En la figura 4 se representa el circuito eléctrico global. En él se representan las corrientes de buen tiempo junto con las principales corrientes de compensación. En la figura 5 se observan estas corrientes de compensación junto con las descargas. Veamos cada una por separado:

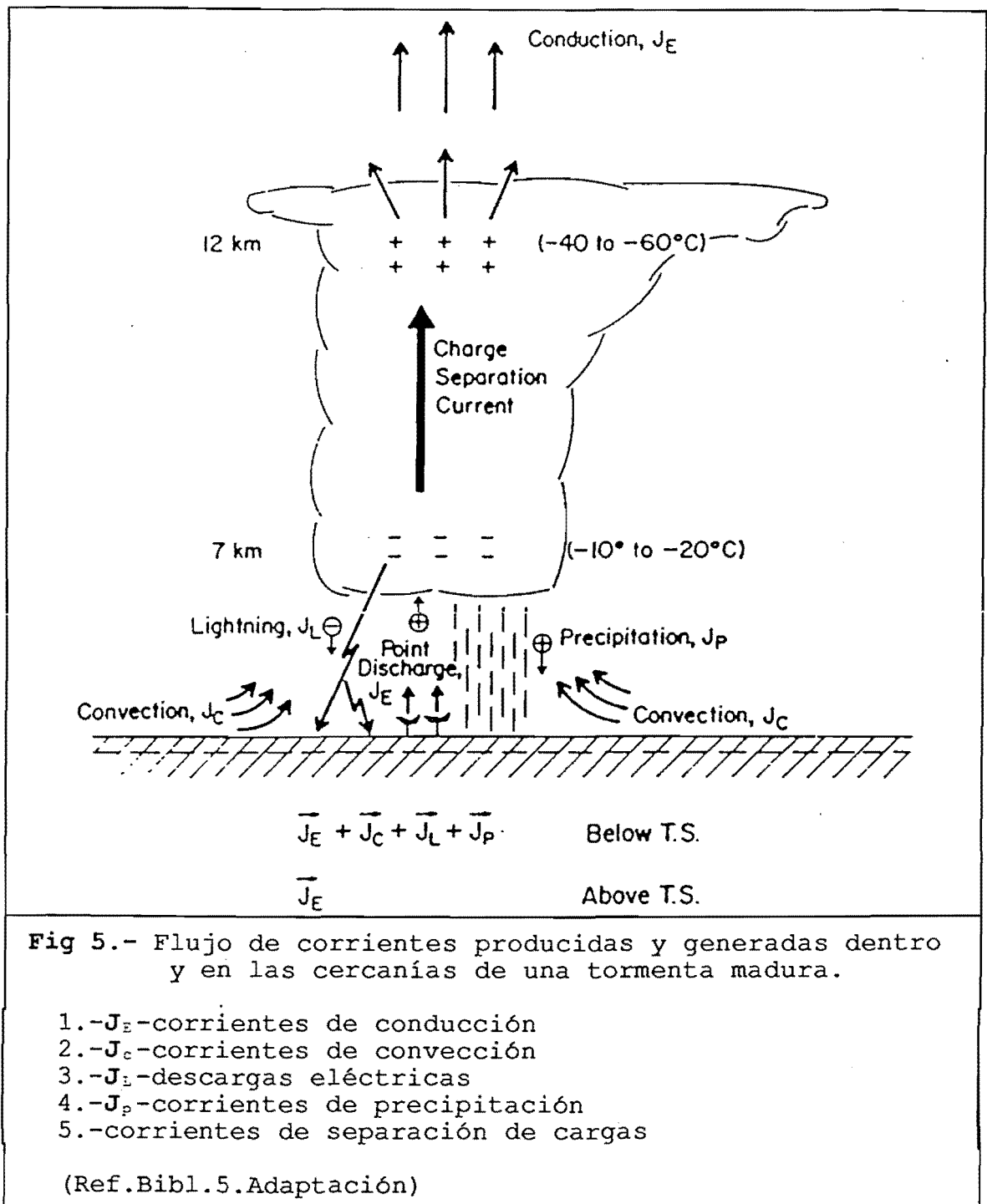
- Las corrientes de separación de cargas que se producen en el interior de la nube. Las tormentas son fenómenos extremadamente complejos, por lo que es necesario hacer algunas simplificaciones para incluirlas dentro de este circuito. Una de estas simplificaciones sería considerarlas como un dipolo con la carga negativa en la base y la positiva en la cima de la nube. Las corrientes de separación de cargas harían posible esta estructura dipolar.



**Figura 4.-**procesos eléctricos en la atmósfera:circuito eléctrico global.

(Ref.Bibl.5)

- Las corrientes de conducción. Las tormentas originan unas corrientes ascendentes hacia la ionosfera. El rápido incremento de la conductividad con la altura confina la corriente dentro de la columna vertical que fluye desde la tormenta hasta la ionosfera y magnetosfera, que se encargan de distribuir la carga por todo el globo. Posteriormente las corrientes de conducción de buen tiempo harían descender la carga positiva de nuevo hacia la tierra. Hay que tener en cuenta que la corriente de conducción varía de acuerdo a la diferencia de potencial ionosférico y a la resistencia de la columna entre la ionosfera y la tierra. La orografía de la tierra es un factor importante a tener en cuenta debido a la disminución de la resistencia con la altura que hace que el flujo de la corriente sea mayor sobre las montañas que sobre el nivel del mar. Se deben tener también en cuenta tanto las nubes como los aerosoles, nieblas y otros fenómenos meteorológicos ya que pueden influir en la conductividad eléctrica, resistencia global o de una columna de aire y también porque pueden ser generadores locales.



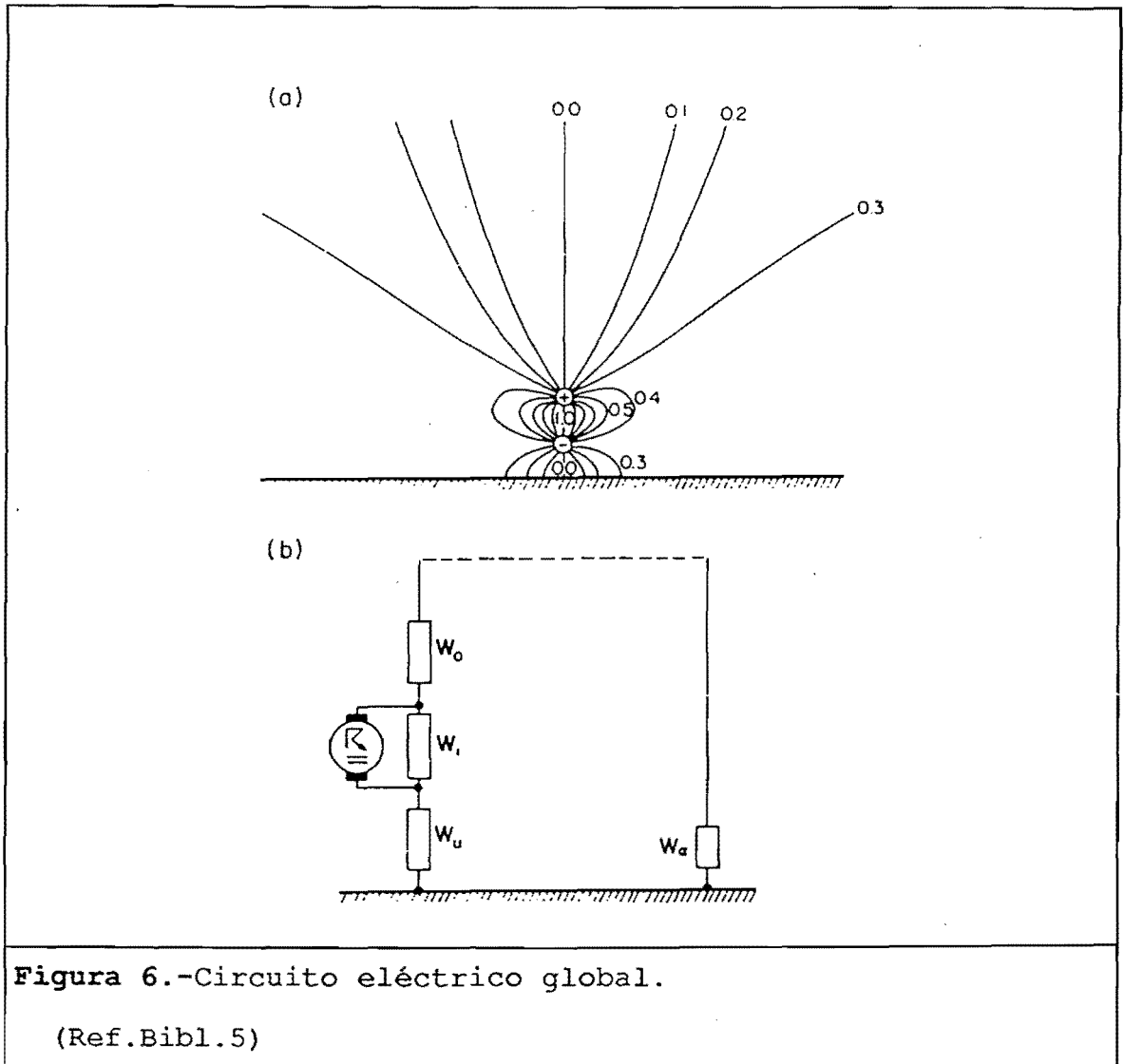
- Las corrientes de convección formadas por el transporte de partículas cargadas desde el suelo a la base de la nube.Serán más intensas cuanto más fuerte sea la convección en la nube.

- Las corrientes de precipitación producida por el transporte de cargas en la precipitación que varía desde  $10^{-12}$  a  $10^{-10}$  A/m<sup>2</sup>, hasta los  $10^{-8}$  A/m<sup>2</sup> en las nubes tormentosas.
- Las descargas eléctricas se producen por el aumento de la diferencia de potencial entre:
  - nube-nube
  - nube-tierra

Se tratará ampliamente este tema en apartados posteriores de esta nota técnica.

Un esquema de este circuito se puede observar en la figura 6.b. La resistencia total de buen tiempo viene dada por  $W_e$ . Las tormentas las representamos como un generador con una resistencia interna  $W_i$ . La resistencia total entre las tormentas y la ionosfera se representa con  $W_o$  y la resistencia total entre las tormentas y la tierra por  $W_u$ . La figura 6.a nos da el esquema de las líneas de corriente de un dipolo dentro de una atmósfera con una conductividad que aumenta de forma exponencial sobre una tierra perfectamente conductora.

De todo lo expuesto se puede deducir que el papel que desempeñan las tormentas es el equivalente a la de un generador capaz de mantener la diferencia de potencial entre las placas del condensador.



## 2.-PROCESOS DE FORMACIÓN Y SEPARACIÓN DE CARGAS EN LAS NUBES CONVECTIVAS: MODELO TRIPOLAR.

### 2.1.-INTRODUCCIÓN

Es un hecho comprobado que los movimientos verticales asociados a la escala sinóptica (débiles), normalmente, no van acompañados de descargas o fenómenos eléctricos de importancia. Esto es, la precipitación de tipo estratiforme, no asociada a estructuras convectivas, es poco proclive a producir estos fenómenos. Son las fuertes corrientes ascendentes y descendentes, que tienen lugar en los núcleos convectivos las que, de alguna manera, producen la formación y separación de cargas lo suficientemente intensas como para producir campos y diferencias de potencial capaces de generar fenómenos eléctricos significativos. Por otra parte como la existencia de los primeros rayos está ligada a la llegada de la precipitación, líquida y/o sólida, al suelo ( a veces antes) sugiere que, además, las partículas precipitables juegan un papel destacable en la generación, permanencia y disipación de los fenómenos eléctricos.

Se ha observado que la actividad eléctrica más intensa se encuentra en las nubes convectivas que poseen grandes desarrollos por encima del nivel de congelación (tormentas eléctricas en latitudes medias). La existencia de ciertos tipos de elementos sólidos contribuye de forma significativa a la electrificación de la nube. Las tormentas de nieve en latitudes altas ( $> 60^\circ$ ) no suelen llevar asociados fenómenos eléctricos.

Volviendo al modelo eléctrico asociado a las tormentas, inicialmente se pensó en la estructura dipolar para la distribución de cargas en las nubes convectivas. Ya en 1752 Franklin sugirió una ambigüedad sobre el signo de la carga en la parte alta de las nubes. En el decenio que comenzó en 1920 C.T.R. Wilson, tras realizar observaciones de numerosas tormentas a cierta distancia, llegó a la conclusión de que la estructura básica de una nube tormentosa era la de un dipolo positivo, es decir, la carga positiva en los niveles más altos. Pero en otras mediciones, llevadas a cabo en la misma época por George C. Simpson, realizadas sobre la carga de las partículas de lluvia que llegaban al suelo, indicaban que el dipolo era de tipo negativo. En ambos casos la estructura dipolar era la que trataba de explicar un sistema eléctrico tan complejo como es el de una tormenta.



En los últimos 20 años se ha podido determinar la verdadera distribución de cargas midiéndose directamente y no por sus efectos. Los resultados indican que la estructura más aproximada es tripolar, con una concentración de cargas negativas aproximadamente a 6 ó 7 Km de altura, donde coexisten las tres fases del agua. Sobre ella tenemos la región principal de cargas positivas de espesor muy variable, llegando hasta los niveles superiores de la nube. Por último existe otra región secundaria de cargas positivas, debajo de la negativa y próxima al suelo. No se suele considerar otra región de cargas negativas que son atraídas por el núcleo superior positivo haciendo las veces de pantalla, ya que sus efectos son despreciables.

Los que consideraban a la nube con un dipolo positivo estaban observando, desde lejos, el campo eléctrico que básicamente era el producido por las cargas principales. Los seguidores de las ideas de Simpson hacían sus medidas debajo de ella, por lo que apreciaban el efecto de las cargas secundarias positivas.

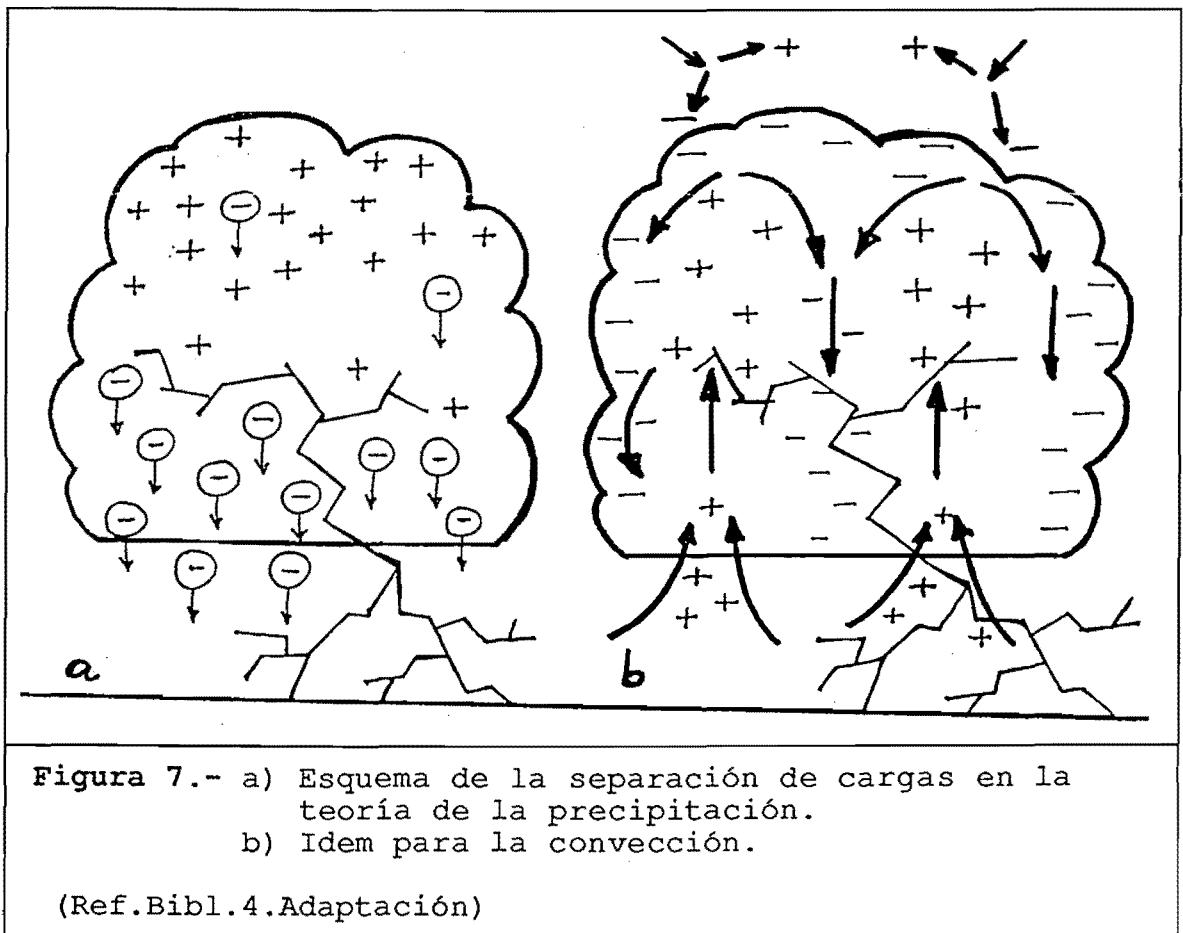
Lógicamente la estructura tripolar no se mantiene a lo largo de todo el ciclo de vida de la nube tormentosa, sólo cuando está plenamente desarrollada (desde el punto de vista eléctrico). Se verá a lo largo de esta Nota Técnica que la estructura eléctrica de la nube puede variar dependiendo de en qué fase de su ciclo de vida se encuentre (cúmulo, madurez o disipación).

## **2.2.-PROCESOS DE GENERACIÓN Y SEPARACIÓN DE CARGAS.**

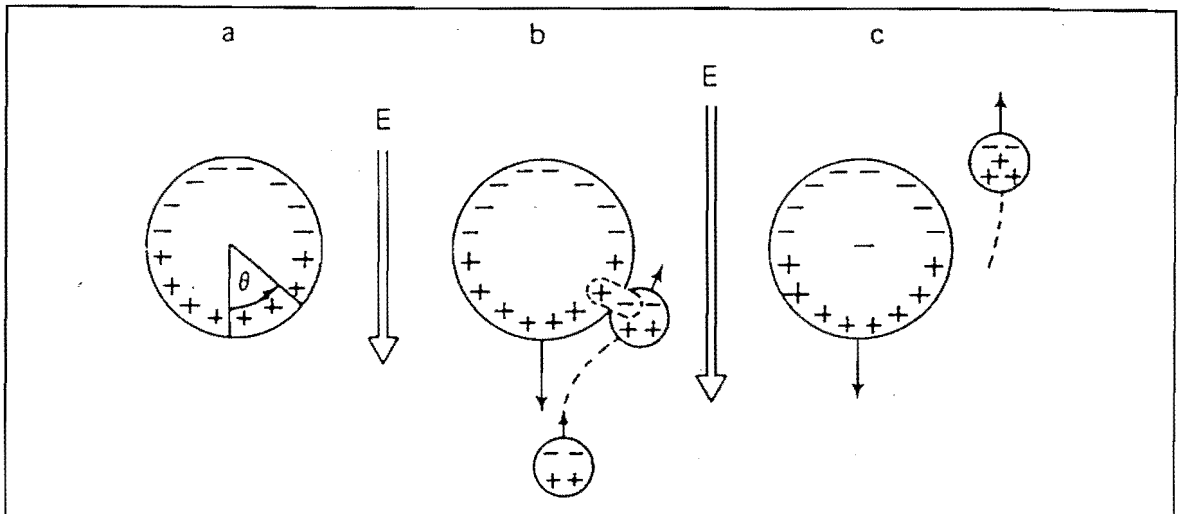
Respecto a los procesos de generación y separación de cargas se ha dado un nuevo enfoque a las teorías que tratan de explicar la electrificación de las nubes. Ya no se hace una clasificación basándose en la influencia (teorías inductivas) o no (teorías no inductivas) del campo eléctrico de buen tiempo. Estas teorías se basaban en el posible efecto (o no) del campo eléctrico terrestre, como elemento fundamental en la generación de cargas. Aunque en la actualidad no se han abandonado tales teorías, los modelos o hipótesis que se manejan son las asociadas al papel de la precipitación y de la convección.

### 2.2.1 Teoría de la precipitación

En la teoría de la precipitación se parte de un estado en el que la nube es capaz de producir gotitas de agua lo suficientemente grandes para que no puedan ser mantenidas por las corrientes ascendentes. Por efecto de la gravedad las gotitas de agua caen interaccionando con las partículas (sólidas y/o líquidas) de menor tamaño que aún siguen ascendiendo. Las colisiones producen una separación de cargas (parecida a la que ocurre por frotamiento): las mayores quedan cargadas negativamente y las pequeñas positivamente. Las corrientes aéreas y la gravedad tienden a separarlas del lugar donde se generaron ( Fig. 7a).



Algunos autores apuntan que el choque o colisión pueda ser o no de tipo selectivo, al estar polarizadas las partículas mayores. Las Fig 8 y 9 recogen algunos de los modelos de carga para partículas polarizadas por el campo eléctrico  $E$  según la ideas de Elster - Geitel y de Wilson (Fig. 8 y 9 respectivamente).



**Figura 8.-Modelo inductivo de Elster-Geitel:**

Transferencia de carga por inducción por gotas que colisionan en presencia de un campo **E**.

a.-distribución de carga sobre una gota polarizada

b.-contacto entre dos gotas polarizadas de distintos tamaños

c.-generación de carga después de la separación

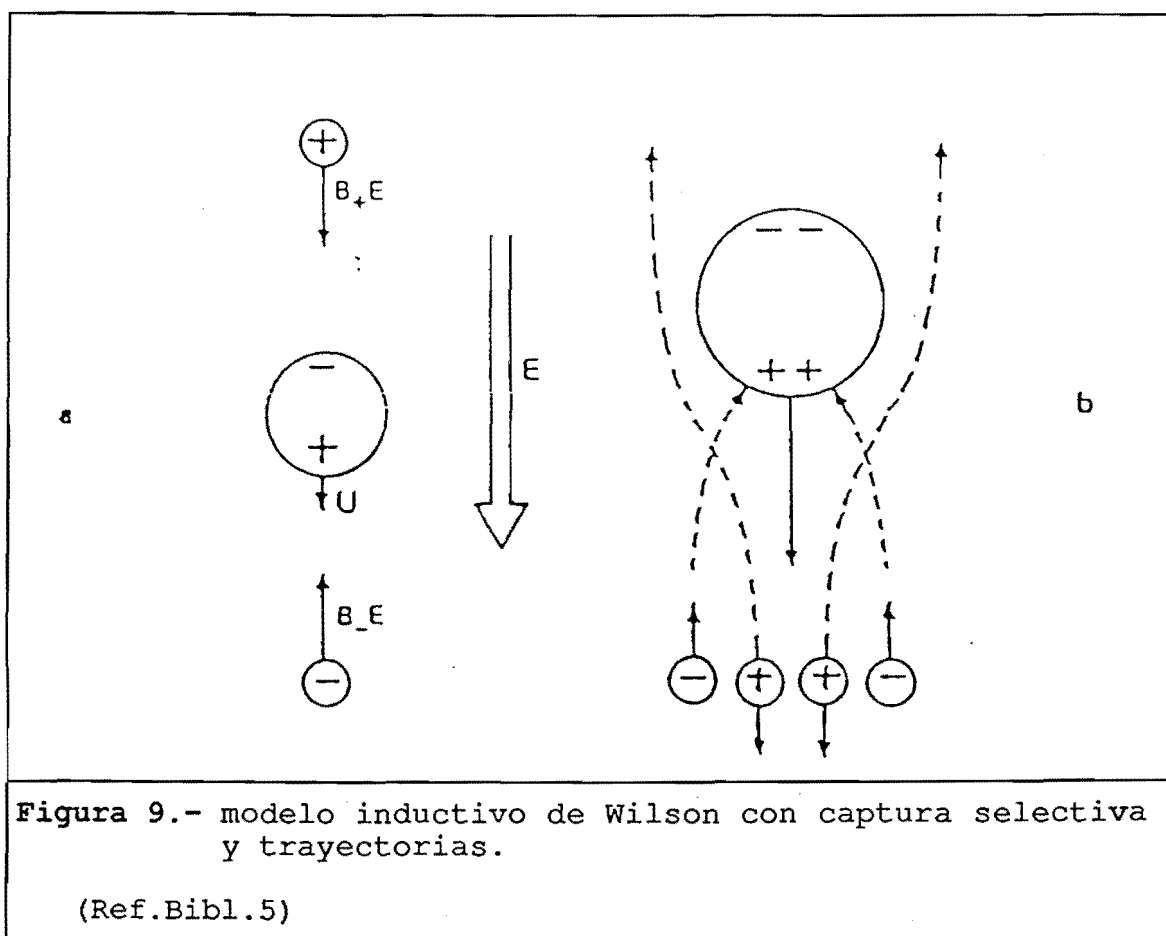
(Ref.Bibl.5)

En este modelo inductivo ( Fig 8) las partículas grandes, polarizadas, que descienden, chocan con otras menores. Tras el impacto, la partícula pequeña queda cargada positivamente y las grandes negativamente. La cantidad de carga que se puede transferir en una colisión entre dos gotas que estén polarizadas dependerá:

- Del ángulo de contacto con respecto a la dirección del campo **E**.
- Del tiempo de contacto
- Del tiempo de relajación de la carga (tiempo necesario para la redistribución de la carga)
- De la carga neta de las gotas
- De la magnitud de la polarización de cada una de las gotas.

Según se puede apreciar en la figura 8 después de la colisión descendería la gota grande con un exceso de carga negativa y ascendería (o descendería más lentamente) la gota más pequeña con un exceso de carga positiva. Por lo tanto el campo **E** se vería reforzado con este mecanismo.

En el modelo inductivo de Wilson (1929), la captura es selectiva. Las gotitas nubosas más grandes descienden por efecto de la gravedad dentro de la nube. En el caso de que las gotitas cargadas más pequeñas se muevan lentamente, solamente las cargadas de forma negativa serán interceptadas por las que descienden (Fig. 9b), mientras que si se desplazan rápidamente, serán capturadas por igual tanto las + como las - por las gotas más grandes. (Fig. 9a)



Muchos investigadores apuntan a que la electrificación por el choque o frotamiento es más intenso entre el hielo y granizo que los producidos entre las gotitas de agua, a la hora de electrificar a una nube. En esta teoría se prima la existencia de partículas precipitables y su estado físico frente a la existencia de corrientes ascendentes y descendentes intensas y el campo eléctrico previo. El resultado final sería el de una nube con estructura dipolar positiva: las partículas más pesadas caerían a niveles inferiores (-) y las más pequeñas irían a los superiores (+).

### 2.2.2 Teoría de la convección.

En los procesos de electrificación por convección (Fig 7b) no es necesario la presencia de la precipitación, basta que existan fuertes corrientes ascendentes que puedan "arrancar" las cargas positivas que se han acumulado en ciertas zonas cercanas a la superficie terrestre (debajo de la nube). Estas corrientes las transportan a niveles más altos por la rama ascendente, que se encuentra en el interior de la nube, mientras que en niveles superiores los rayos cósmicos ionizan a las moléculas del aire. Las cargas negativas así generadas son atraídas por las positivas de la nube formando una especie de "capa pantalla" a la vez que son transportadas por las corrientes descendentes de la periferia hacia abajo. Se ha formado una especie de dipolo positivo.

### 2.3.-MODELO TRIPOLAR.

Como ya mencionábamos en la introducción desde la controversia Wilson-Simpson en los años veinte sobre la estructura dipolar de las nubes tormentosas han transcurrido muchos años de observaciones a través de las cuales se ha podido establecer que la estructura básica de las nubes tormentosas no es dipolar, sino tripolar.

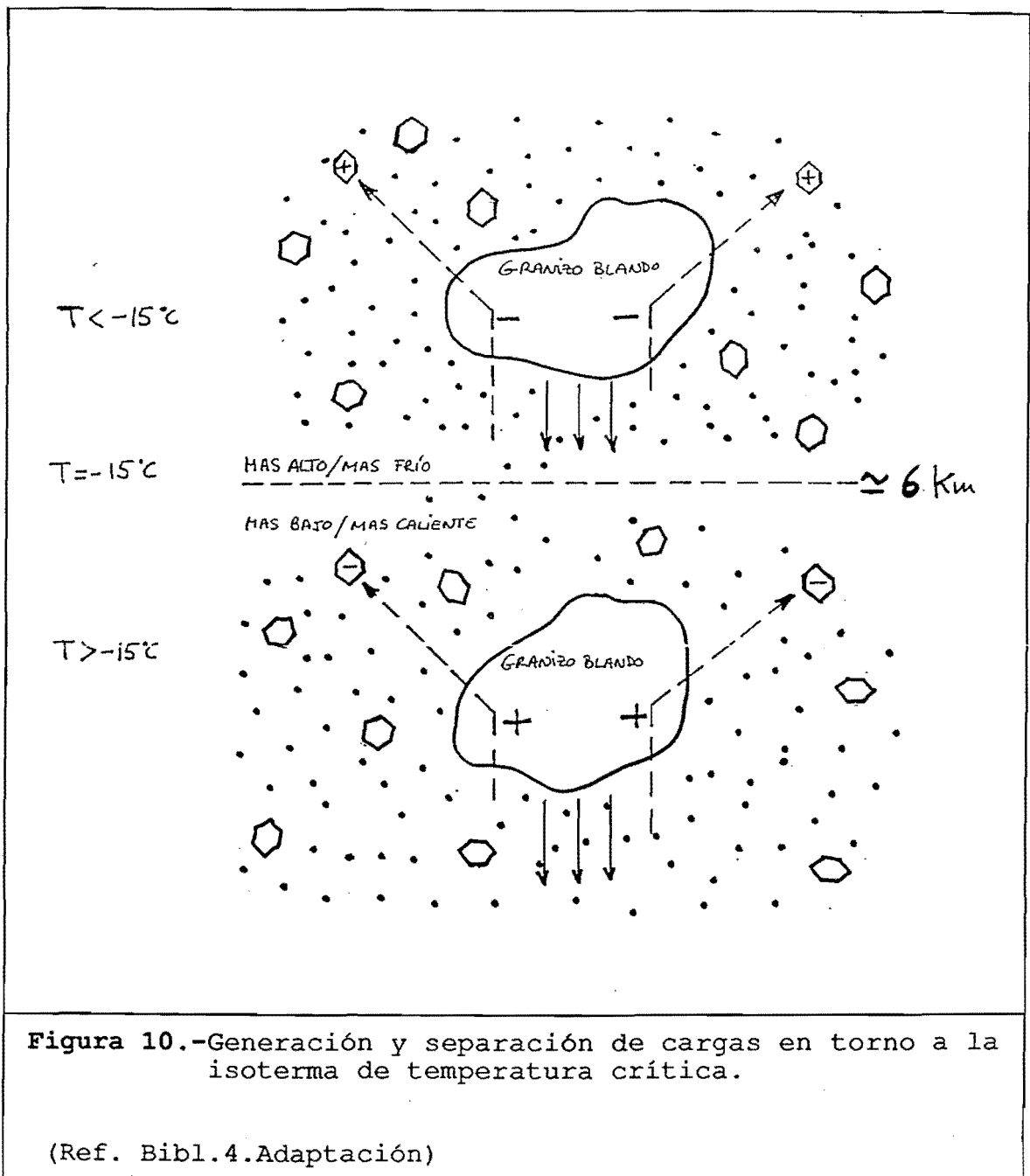
Podría parecer que el modelo de convección conducía, de forma más natural, a la estructura tripolar, debido al flujo de cargas positivas hacia la base de la nube que podría explicar el núcleo secundario de cargas positivas. Por contra mediciones recientes del tamaño de esta corriente indican que son demasiado débiles para explicar la velocidad de carga de la nube, por ello se intentó una posible explicación del modelo tripolar a través de la teoría de la precipitación.

Simpson acometió un primer intento a través de estudios realizados en cascadas donde observó que las gotas se cargaban selectivamente de forma positiva al romperse. Propuso que las gotitas de agua que caían de una nube tormentosa se fragmentaban de igual forma cerca de la base de la nube, explicando de esta forma la región inferior positiva. Sin embargo las mediciones realizadas bajo la región principal de carga negativa de las nubes tormentosas muestran que las partículas de precipitación transportan cargas que son notablemente mayores que las producidas por en el proceso de fragmentación de una cascada. Por otro lado, se conoce que la mayoría de las partículas cargadas positivamente que caen

debajo de la región principal de carga negativa no son gotitas, sino hielo.

Estudios de laboratorio llevados a cabo en los años cuarenta mostraron que las partículas de hielo adquirirían una fuerte carga positiva al fundirse. Este hecho podría explicar la existencia de cargas positivas por debajo de una cierta altitud (unos 4000 Km en tormentas de latitudes medias), pero no explicaría la existencia de cargas de este mismo signo a alturas mayores. No parece pues que la fusión del hielo cause la estructura tripolar. Sin embargo continuaron las investigaciones con las partículas de hielo, llegándose a establecer en los últimos veinte años que cuando las partículas de granizo blando chocan con los cristales de hielo, la polaridad de la carga que pasa a las partículas depende notablemente de la temperatura. Estos resultados fueron obtenidos a través de experimentos de laboratorio por gran cantidad de investigadores, especialmente por Stephen E. Reynolds, Marx Brook (Instituto de Minería y Tecnología de Nuevo Mexico), Tsutomu Takahashi (Universidad de Hawai en Manoa) y Clive P.R. Saunders, Jonh Latham y J. Illingworth (de la Universidad Victoria).

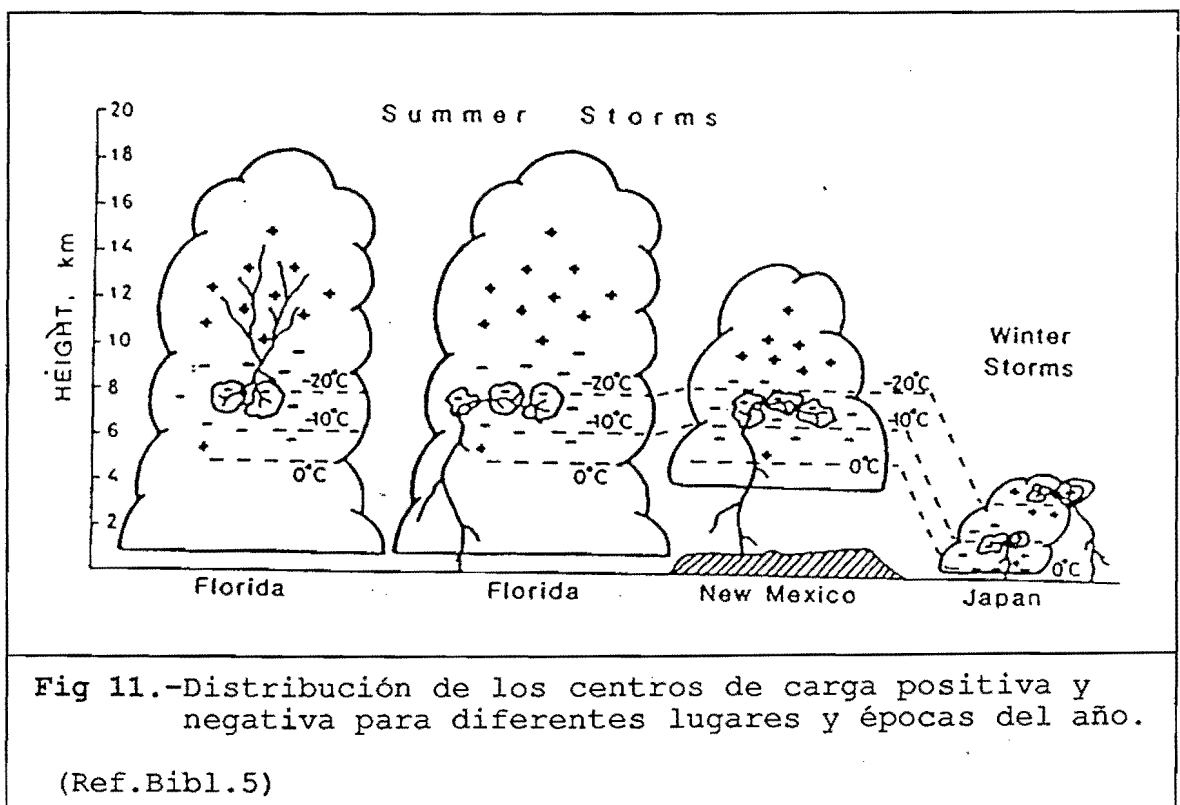
Por debajo de una temperatura crítica,  $T_c$ , las partículas de granizo se cargan negativamente, pero a  $T > T_c$  (correspondiente a menores alturas en la nube tormentosa) el granizo se carga positivamente. El valor de  $T_c$  o temperatura de inversión de carga se encuentra entre los  $-10$ . C y los  $-20$ . C. De acuerdo con la Fig 10 en la región de los 6 - 7 km se alcanzan la  $T_c$  de los  $-15$ . C. Por debajo de ella las colisiones entre el granizo blando y los cristalitos de hielo son capaces de producir el núcleo positivo esperado. El descubrimiento de la  $T_c$  crítica o de inversión de carga es considerada como uno de los principales descubrimientos en el campo de la electrificación atmosférica. Este hecho nos puede explicar el modelo tripolar observado en ciertos momentos del ciclo de vida de las tormentas.



Aunque el modelo de la convección parece más débil que el de precipitación, no hay que olvidar que sus efectos están presentes en las nubes tormentosas y que la generación de granizo blando, agua subfundida y gotitas de agua están asociadas a fuertes movimientos ascendentes y descendentes. Otros fenómenos violentos asociados a fuertes descensos (microburst) están relacionados con la máxima actividad eléctrica y máxima precipitación. La capa de apantallamiento negativa también es predicha por esta teoría. Sus detractores se aferran al hecho de que la carga y campos generados son muy pequeños como para provocar descargas.

Ni la convección ni la precipitación requieren una de la otra pero en las nubes que producen rayos y relámpagos se observan, conviven y se complementan ambos fenómenos. Parecería ingenuo dejar una teoría por la otra, al ser ambas complementarias y reflejar lo que verdaderamente ocurre en las nubes de desarrollo vertical. Una teoría general deberá combinar las mejores aportaciones de una y otra además de añadir los nuevos resultados de otros procesos microfísicos que están en estudio.

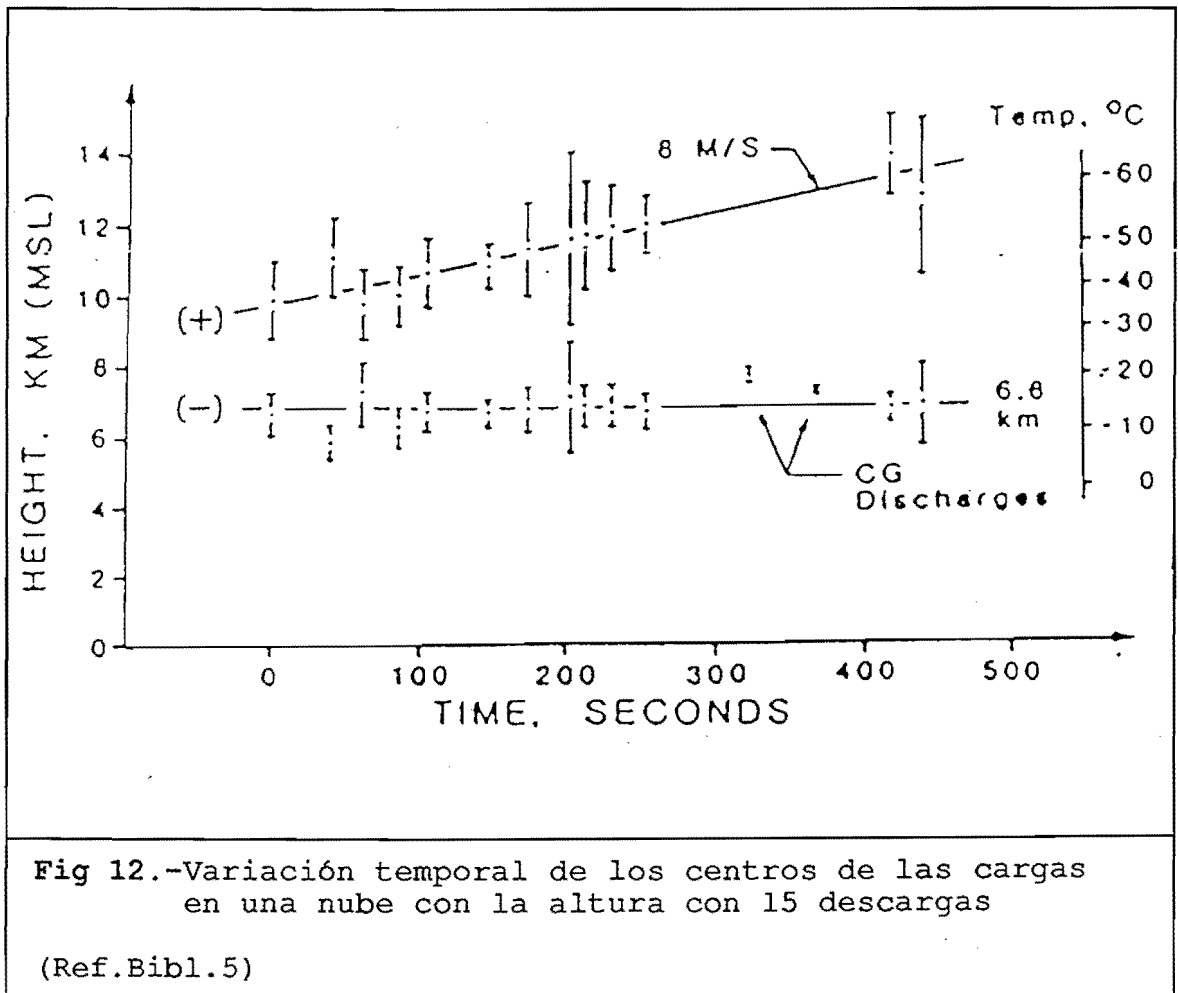
Los estudios y observaciones han demostrado que las cargas negativas se encuentran confinadas en una región relativamente estrecha en los rangos de T, básicamente entre 0 y -25 grados y particularmente intensa entre los -10 y -20 grados, con máximos entre los 6 y 7 km. en verano y los 1 a 3 km. en invierno. Además permanecen entre estos rangos durante toda la evolución de la nube tormentosa aumentando su distribución horizontal.



Por el contrario, el centro de cargas positivas de niveles altos no está confinado en unos intervalos más o menos fijos sino que evoluciona con el sistema. El rango de T suele estar entre los -25 y -60°C, con alturas que van desde los 8 a los 16 km. en relación directa con su evolución. Esta es una



diferencia fundamental con respecto a la distribución eléctrica de las cargas negativas. Las figuras 11 y 12 reflejan las propiedades de los centros de cargas principales. En esta última podemos ver la primeras 15 descargas, dos de ellas de nube a tierra (NT). Es importante observar la evolución de las alturas de los centros de carga con el tiempo, mientras que el centro de cargas negativas permanece casi invariable, el centro de cargas positivas alcanza mayores alturas al pasar el tiempo. En la última fase (no mostrada aquí) el núcleo negativo desaparece y tan sólo queda nubosidad media y alta estratiforme cargada positivamente que puede perdurar durante varias horas una vez desaparecida la nube convectiva.



Ciertos estudios locales han detectado que la electrificación llega a ser suficientemente intensa cuando las señales de eco del radar sobrepasan ciertas alturas ( que en los meses de verano suelen ser de 8 km) y crecen con el tiempo durante un intervalo significativo. Trataremos mas ampliamente este tema en el último apartado de esta Nota Técnica. En la Fig. 13 tenemos un ejemplo:

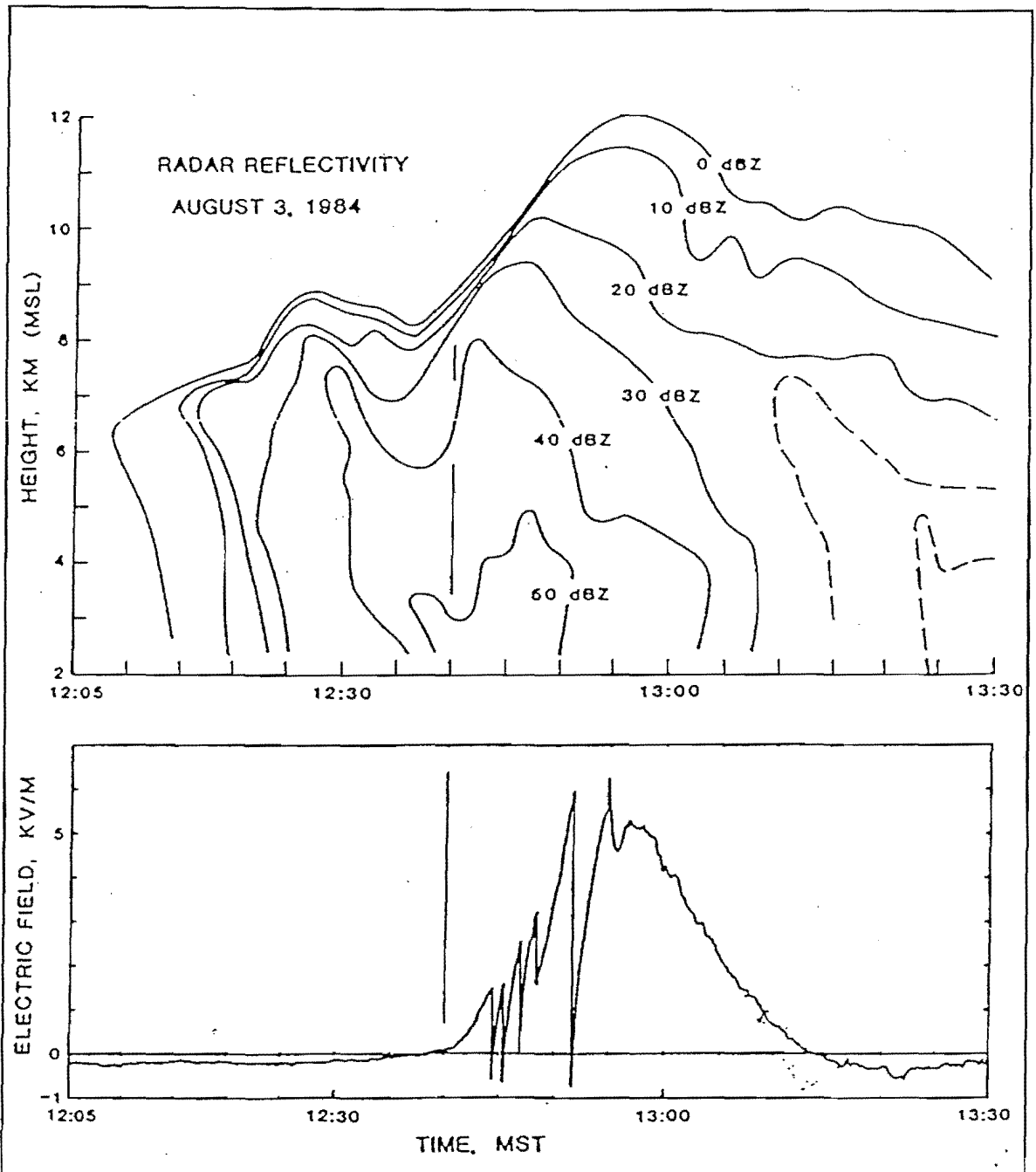


Fig 13.-Variación del campo eléctrico a 5 Km de una tormenta y su perfil vertical de reflectividad.

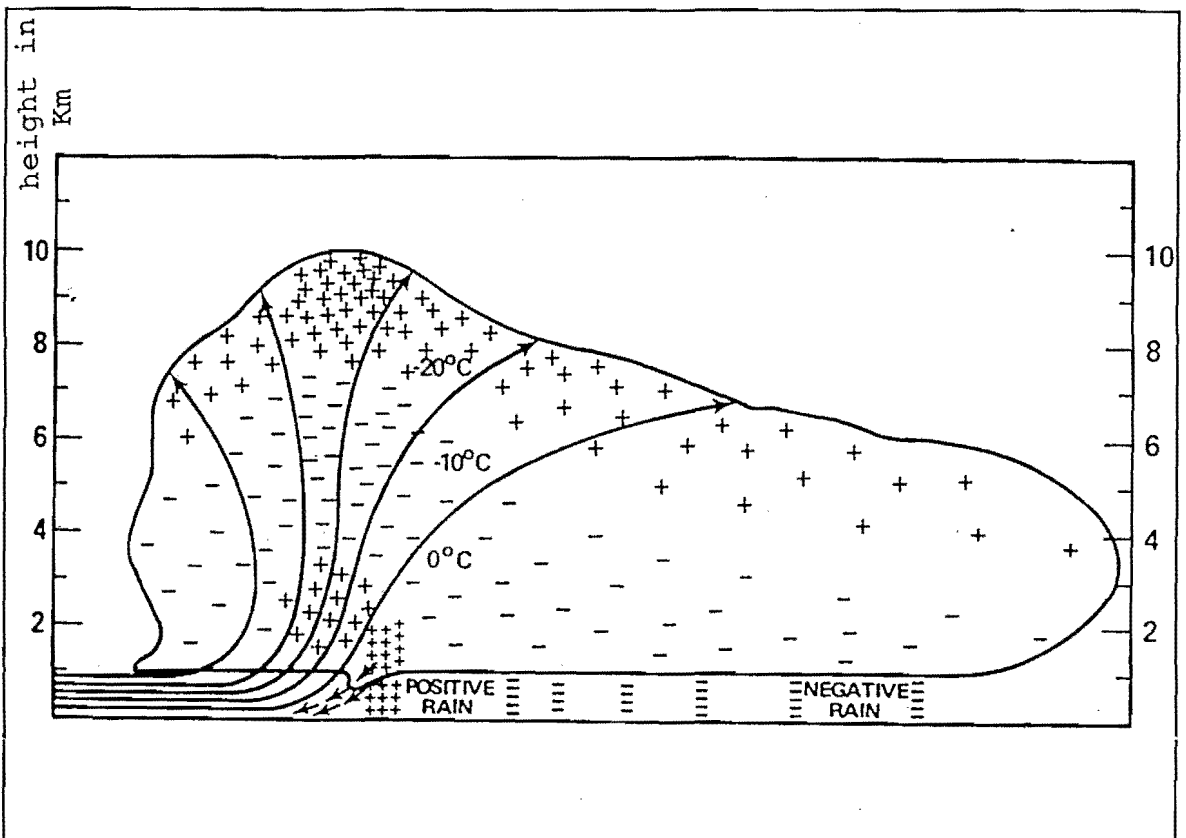
(Ref.Bibl.5)

La electrificación, a 5 km de distancia, comenzó a detectarse cuando en niveles altos existía una señal de 30 dBZ a 8 km. Las descargas producidas en la nube están marcadas por las oscilaciones abruptas del campo eléctrico. Mientras que la  $dE/dt$  fue positiva existieron descargas. Cuando la cantidad de agua disminuyó, la actividad fue menor y el campo tendió a su estado de buen tiempo.

El campo eléctrico comenzó a variar a las 12 h. 40' cuando el radar produjo una señal sostenida de crecimiento sobre los 8 km de altitud. El primer rayo apareció a las 12:44 h cuando el echotop había alcanzado 10 km. de altitud. La anterior gráfica nos pone de manifiesto la relación que existe entre el crecimiento de la nube y su electrificación y que, normalmente, existe una moderada cantidad de agua precipitable anterior a los procesos que producen alteraciones en el campo eléctrico y las primeras descargas.

Podemos resumir las ideas anteriores de la forma siguiente: (ver figura 14)

- Las tormentas se comportan, globalmente, como un tripolo pero a grandes distancias su estructura aparece como dipolar: cargas positivas en niveles altos y cargas negativas en niveles bajos. El modelo anterior no deja de ser un esquema simplificado de lo que verdaderamente ocurre en la nube.
- La presencia de ciertas sustancias sólidas (hielo, granizo blando) juegan un papel importantísimo en el proceso de generación de cargas. Se ha observado sin embargo que la existencia de nieve no juega un papel tan importante.
- Las corrientes ascendentes y descendentes intensas (junto con la gravedad) son elementos fundamentales para la generación (colisión) y separación de cargas en las nubes de desarrollo.



**Figura 14.**-Distribución de cargas en una nube madura. Se puede apreciar en la zona de máximo desarrollo de la nube la distribución tripolar de las cargas, con la concentración secundaria de cargas positivas en la base originando lluvia cargada positivamente. En la parte menos desarrollada de la nube la estructura es dipolar ya que los movimientos ascendentes por debajo de la nube no tienen la suficiente intensidad para transportar cargas positivas desde la superficie de la tierra y tampoco hay una aportación de granizo cargado positivamente suficiente.

(Ref. Bibl. 3)

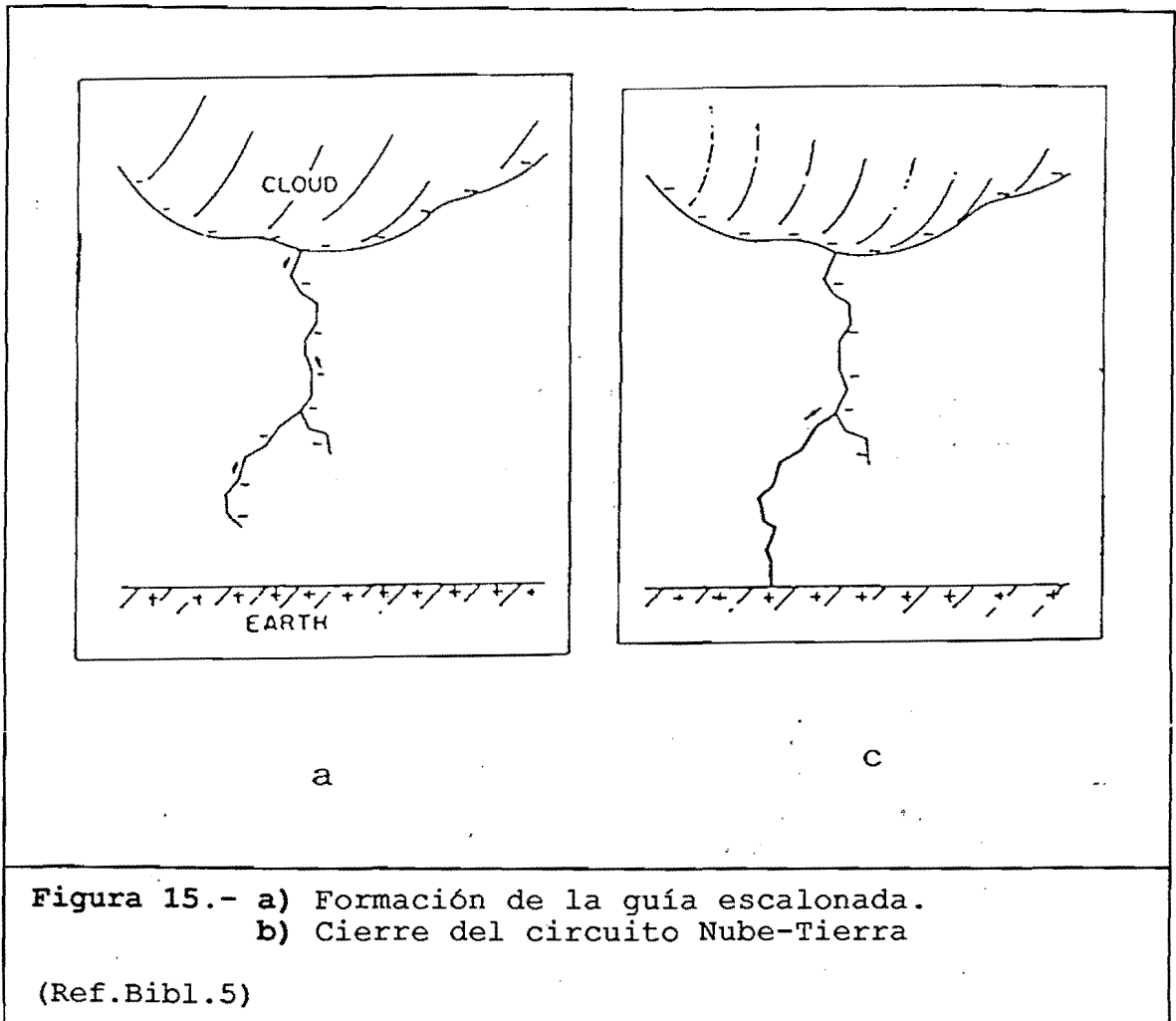
### 3.- DESCARGAS ELÉCTRICAS EN LAS NUBES CONVECTIVAS. TIPOS DE RAYOS.

En una nube convectiva los mecanismos de generación y separación de cargas tienden a aumentar la energía eléctrica del sistema. Cuando el campo eléctrico o el potencial superan un valor crítico, se produce el rayo o descarga eléctrica que tiende a reducir tal energía, con una nueva redistribución de las cargas eléctricas: en la nube, en el suelo y en la atmósfera. Durante un corto período de tiempo la energía electrostática acumulada es liberada en forma de energía electromagnética (relámpago visible más ondas de radio), energía acústica (trueno) y energía calorífica. El efecto global de las corrientes puestas en juego es el del transporte de cargas negativas hacia el suelo y positiva a niveles altos de la atmósfera.

La acumulación local de cargas produce dos tipos de descargas: las NN (dentro de la nube o entre Nube y Nube) y las NT (entre la Nube y Tierra). Normalmente existe una proporción de 5 (o más) a 1 a favor de las NN frente a las NT, ya que los procesos de carga son producidos dentro de la nube y la disminución de la presión con la altura favorece la aparición de los NN. Podemos subdividir los del tipo NT en positivos (descargas NT(+)) o negativos (descargas NT(-)), según sea el origen de la descarga y los centros que lo generen. Lo que sí podemos afirmar es que la mayoría se suelen generar en la región principal de cargas negativas y son del tipo NT(-).

Particularizando a las descargas que se generan desde la nube a tierra, tipo NT, tenemos en las siguientes figuras 15, 16, 17 y 18 un resumen del proceso.

La generación de la descarga comienza (Fig. 15a), en la gran mayoría de los casos, entre la región principal de carga negativa y la superficie terrestre (cargada positivamente por inducción). La chispa tiende a seguir un camino, que se va creando por sucesivos impulsos, desde la nube a tierra. Es la llamada guía escalonada (Step Leader) que con arranques y paradas sucesivas va acercándose a tierra. El proceso es invisible a nuestros ojos (no transporta gran cantidad de carga y no es brillante). Suele ramificarse mucho, pero la mayoría de ellas no llegan al suelo. El resultado final es la existencia de un camino ionizado de mínima resistencia.



Cerca de la superficie terrestre se va generando, poco a poco y sobre ciertos puntos llamados de descarga, una acumulación de cargas positivas que son las primeras en conectar con la guía escalonada descendente, llegando a cerrar el circuito nube-tierra ( Fig 15b).

Entonces aparece el rayo o mejor dicho la primera descarga de retorno (Return Stroke) que se desplaza desde la tierra a la nube transportando gran cantidad de carga en el canal y en un tiempo muy pequeño, aumentando enormemente la temperatura, liberando gran cantidad de energía calorífica y electromagnética, con los efectos luminosos y sonoros por todos conocidos. Todo este proceso aparece reflejado de forma más detallada en la figura 16.

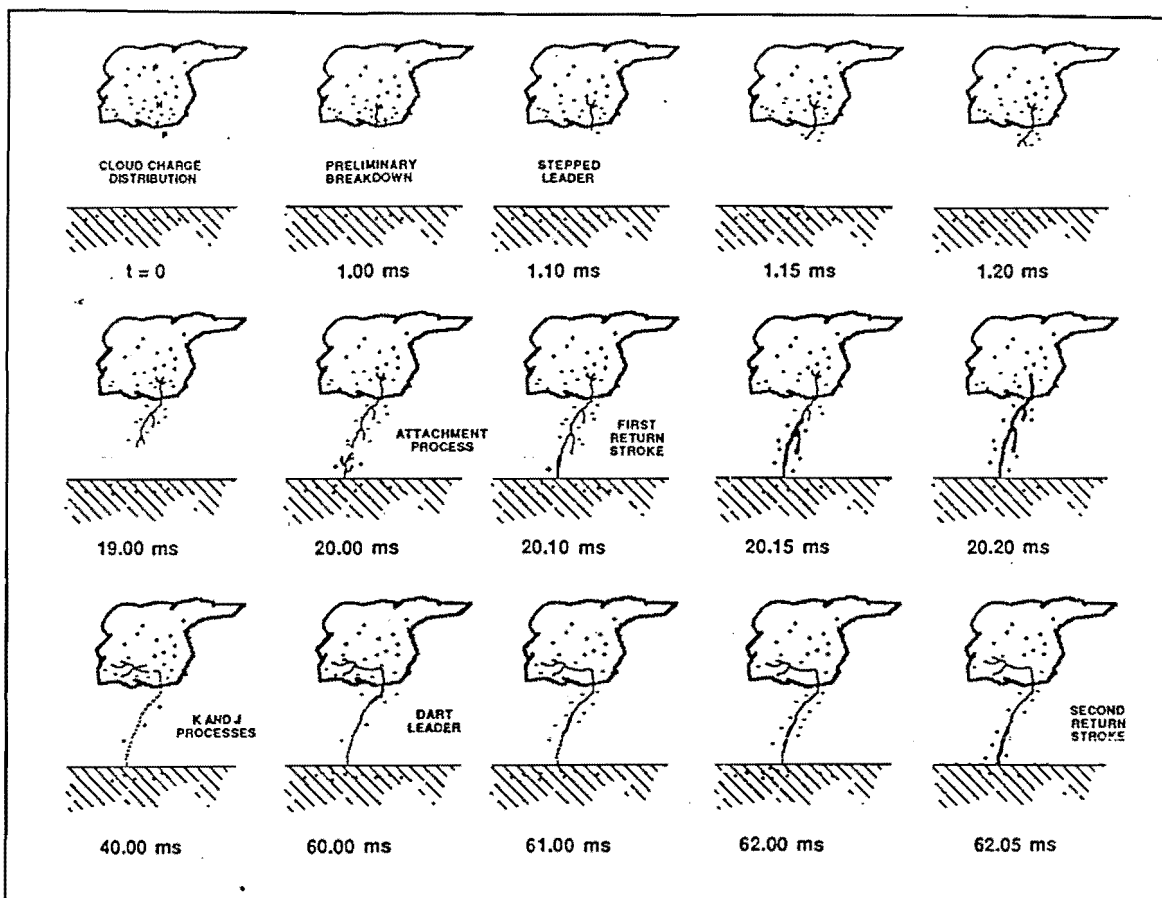
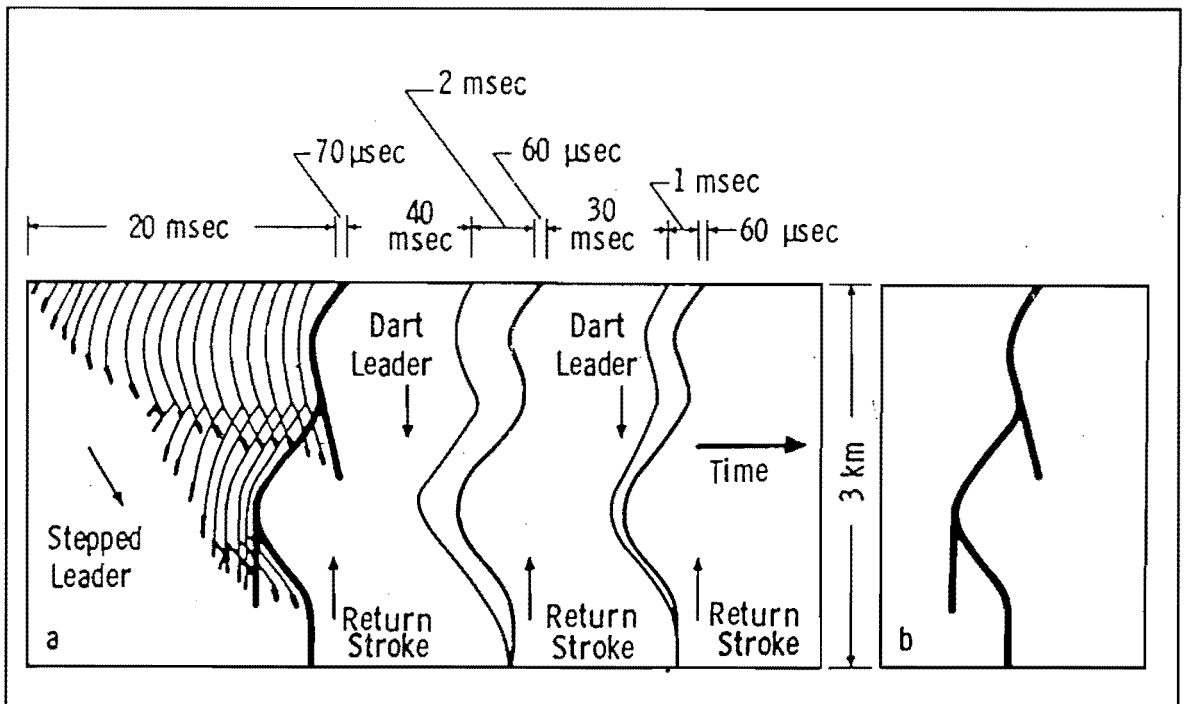


Figura 16.-Representación de los diferentes procesos que se producen en una descarga NT(-).

(Ref.Bibl.3)

En la mayoría de los casos, cuando la primera descarga de retorno ha desaparecido, baja otra guía, pero esta vez sin pausa. Es la llamada guía rápida (Dart Leader) que baja de una sola vez de forma no pulsante. Posteriormente a su llegada al suelo aparece una segunda descarga de retorno (menos energética que la primera) y así sucesivamente hasta unas 5 o 10 veces por término medio (se ha llegado a detectar hasta 42 descargas de retorno por un mismo camino). Para el ojo humano todo sucede tan rápido que lo que se observa es un solo destello. En la figura 17 se muestra esquemáticamente un rayo tal y como sería fotografiado por una cámara.

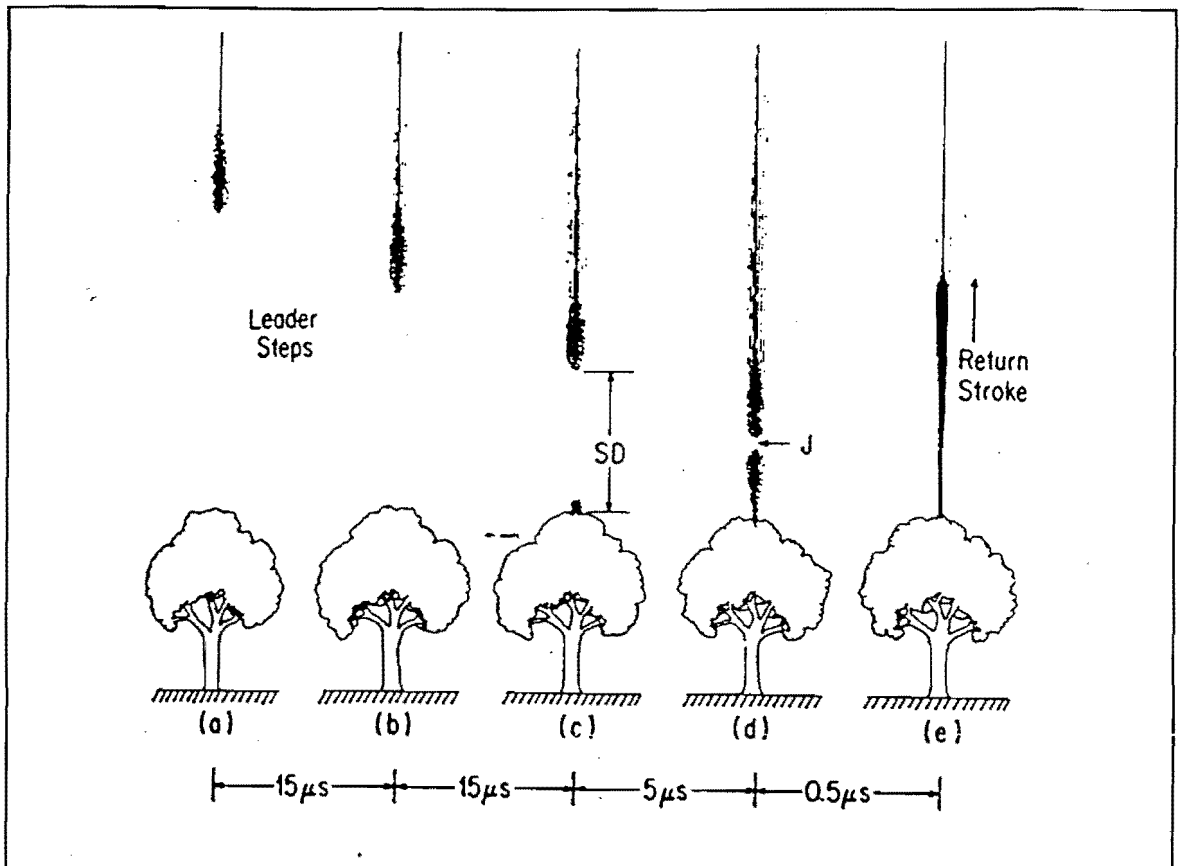


**Figura 17.-** a.-Representación de un rayo NT por debajo de una nube tal y como sería fotografiado por una cámara. El tiempo aumenta hacia la derecha. La escala temporal se ha distorsionado para dar mayor claridad.  
 b.-Representación del mismo rayo tal y como aparecería en una fotografía sin desplazar las diferentes descargas hacia la derecha.

(Ref. Bibl. 3)

En la figura 18 se representan los últimos pasos de la guía escalonada y el comienzo de la descarga de retorno. En esta figura se denomina SD (striking distance) a la distancia entre el objeto del que va a partir la descarga de conexión y la punta de la guía escalonada, justo en el momento en el que la descarga de conexión se está iniciando (Fig. 18c). La distancia a la que realmente se unen en J (junction) la guía escalonada y la descarga de conexión se considera que es la mitad aproximadamente de la SD (Fig. 18d). Es este momento de unión o conexión de las dos ramas cuando se libera gran cantidad de energía (aproximadamente entre 50 y 100 Km sobre el suelo).





**Figura 18.**-Esquema de los efectos luminosos que ocurren durante la unión de la guía escalonada y un objeto en tierra.

(Ref. Bibl. 5)

En la Fig. 19 se aprecian tres ejemplos de perfiles eléctricos asociados a tres descargas típicas de tipo NT(-) registrados a 50 Km del sensor:

- a.-Muestra la señal detectada en el golpe preliminar.
- b.-Forma de onda asociada a la primera descarga de retorno. Los pequeños pulsos que la preceden fueron producidos por diversos pasos de la guía escalonada justo antes de la conexión entre ésta y la descarga de conexión. La primera descarga de retorno es precisamente la que emplean la mayoría de los sistemas comerciales de detección de rayos, utilizando su señal característica para discriminarla de otras posibles descargas no deseadas. La Fig 20 nos muestra, de forma ampliada, la señal de la primera descarga de retorno, con una subida muy pronunciada y un descenso posterior, en forma de sierra, y menos marcado.

c.-Señal de una descarga de retorno posterior.

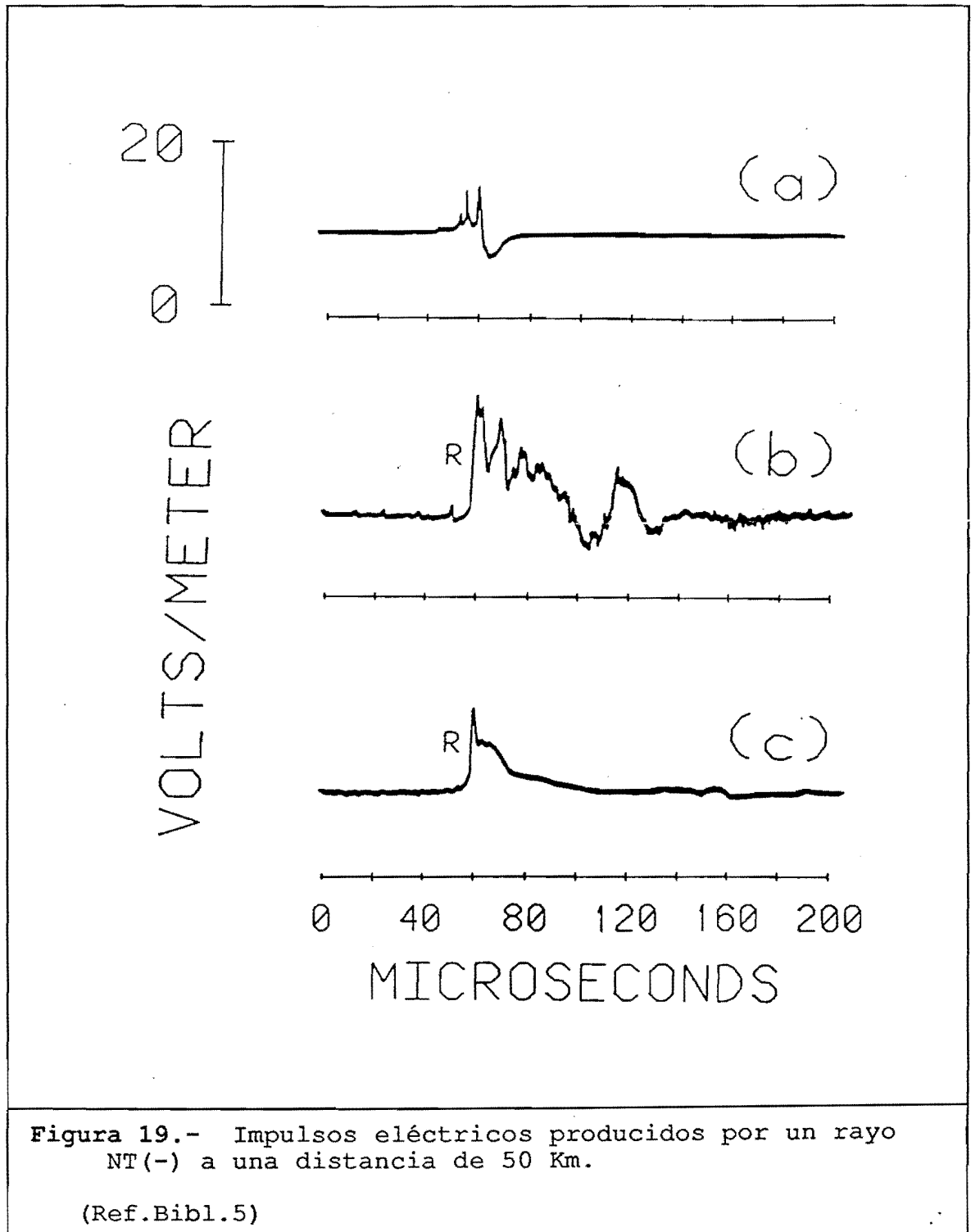
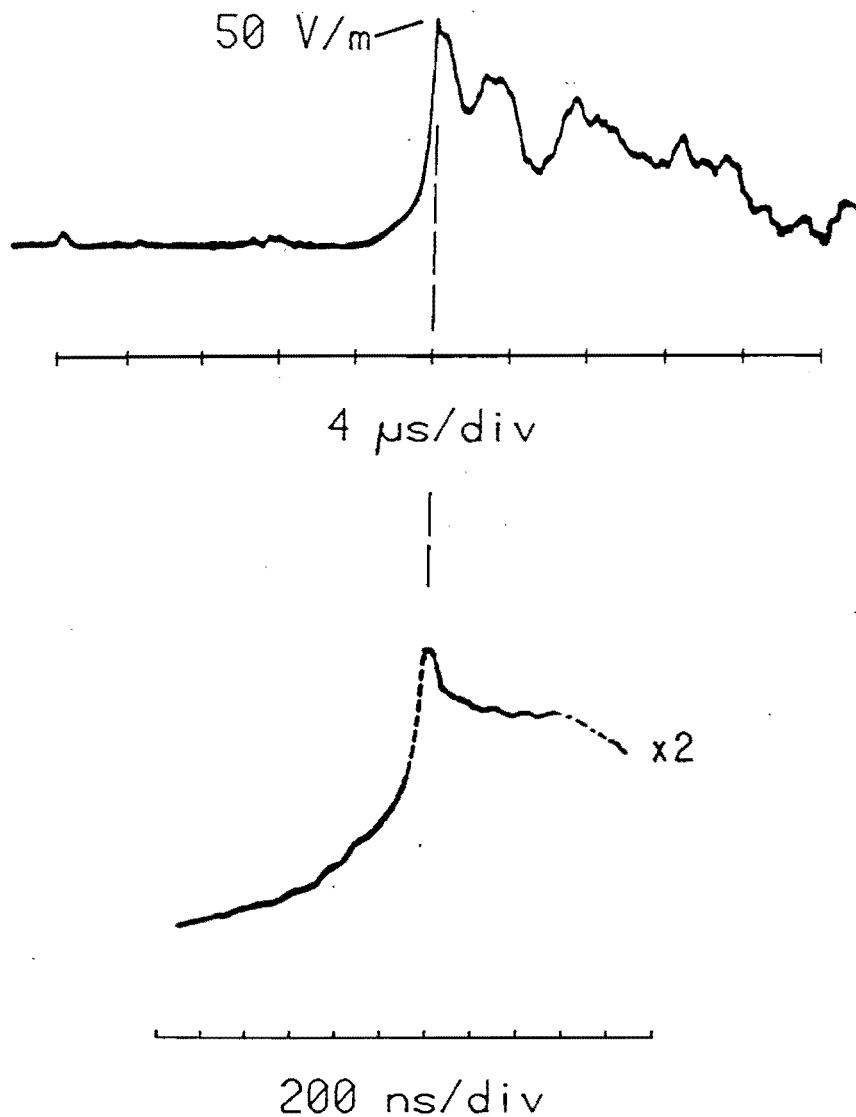


Figura 19.- Impulsos eléctricos producidos por un rayo NT(-) a una distancia de 50 Km.

(Ref.Bibl.5)

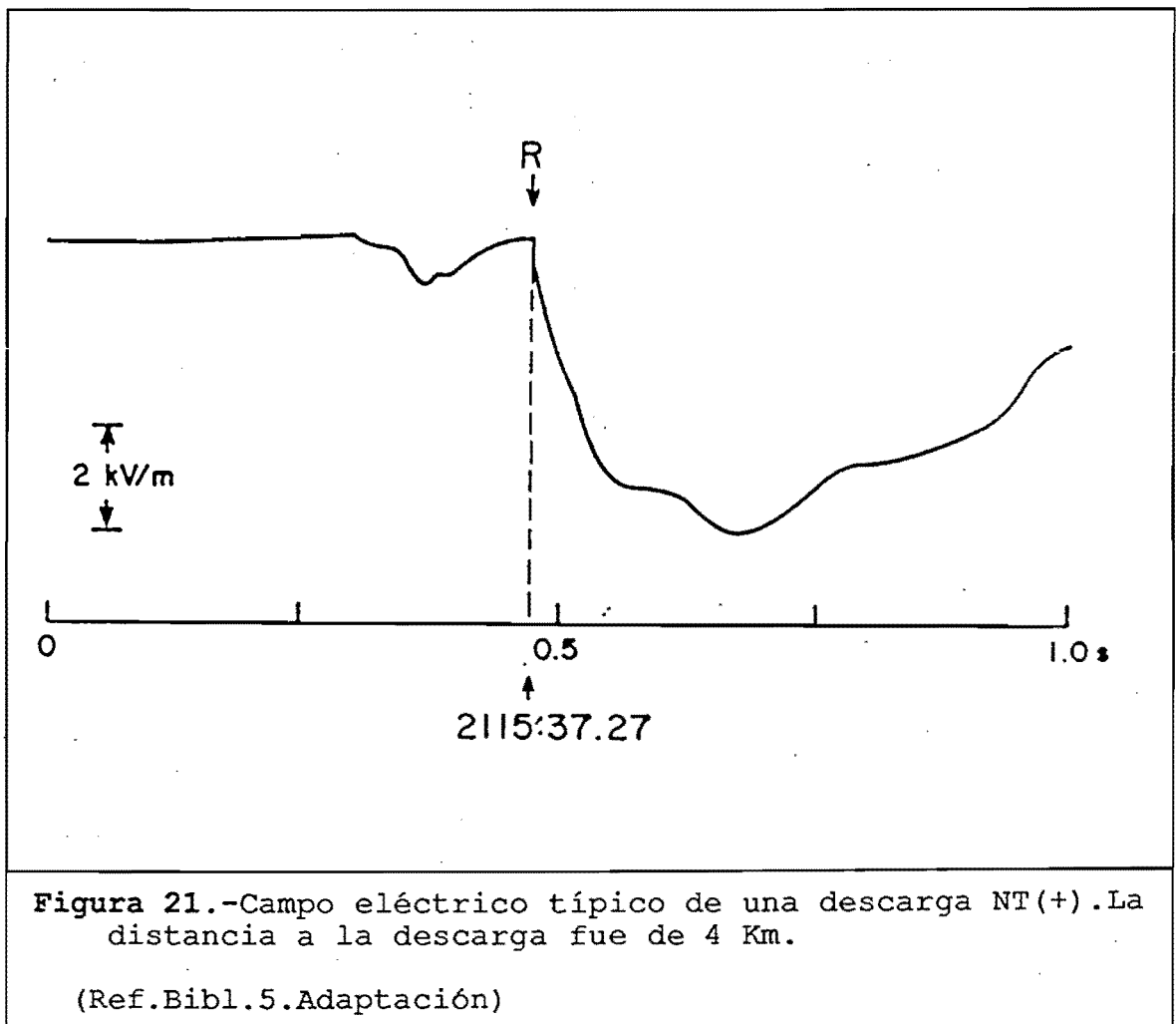
FIRST RETURN STROKE  
RANGE 19km



**Figura 20.**—Señal ampliada de la primera descarga de retorno  
Las dos figuras son representaciones de la misma señal  
coincidiendo los dos máximos en el tiempo.

(Ref.Bibl.5)

Recientemente están adquiriendo más importancia un tipo de descargas producidas en la zona de cargas positivas secundarias que se encuentran en ciertas zonas de la nube, capaz de engendrar descargas de polaridad diferente a los NT(-) clásicos. Son las descargas positivas de nube a tierra (Positive Cloud to Ground Lightning) NT(+). Su perfil esta representado en la figura 21 y como se puede apreciar, la señal esta invertida respecto a la NT (-). Las diferencias fundamentales son:



- Transportan cargas positivas a tierra (10 veces más que los NT (-)).
- Generan corrientes eléctricas y campos más intensos que los normales de las descargas NT(-), siendo de signos opuestos.

- La dirección de propagación de la guía y de la descarga de retorno es inversa a la NT(-). La mayoría de las veces sólo se genera una descarga de retorno. Se han detectado casos en los que no aparece la guía inicial escalonada.
- Están asociados a fenómenos convectivos severos (supercélulas, líneas de turbonada, etc.) y a ciertas fases de desarrollo de tormentas o sistemas convectivos mesoscalares (preferentemente en su fase de disipación) ya que una zona generadora de NT (+) es la asociada a las áreas de lluvia estratiforme de las nubes tormentosas pues las cargas positivas son transportadas desde las zonas de desarrollo más activas .

Como resumen final podemos decir que son más dañinas por la gran cantidad de energía liberada: fuegos en bosques, daños en aeroplanos, etc. y además suelen aparecer con mayor frecuencia relativa en ciertos momentos del ciclo de vida de los sistemas. También se ha observado que el número de descargas positivas es mayor en las tormentas de meses fríos que en los meses cálidos o estivales. Se puede observar su explicación en la figura 22:

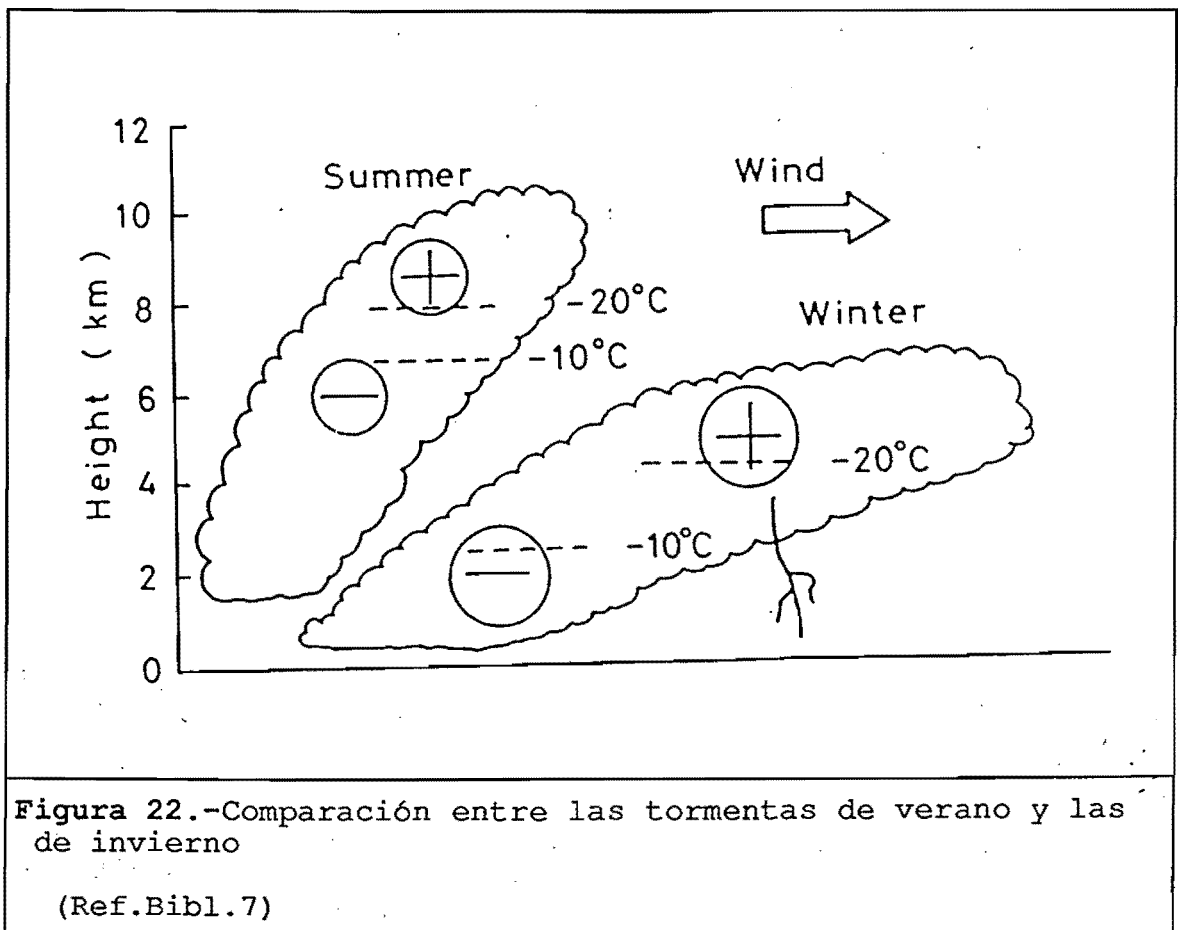


Figura 22.-Comparación entre las tormentas de verano y las de invierno

(Ref.Bibl.7)

1.-la separación horizontal de cargas es mayor en las tormentas de meses fríos.

2.-la distancia entre las cargas positivas y la tierra es también menor en las tormentas de meses fríos.

El resultado de todos estos procesos es el mantenimiento de la diferencia de potencial en el condensador terrestre, generando unas corrientes que tienden a compensar a las de buen tiempo, debido a la redistribución de cargas tierra-nube-atmósfera. Es decir:

- Disminución de cargas positivas en el suelo, ya que son transportadas hacia niveles más altos por convección o aniquiladas por las negativas en la descarga nube-tierra.
- Aumento de las negativas en la superficie terrestre por aniquilación de las positivas.
- Aumento de las positivas en niveles altos al ser transportadas por las corrientes ascendentes, en la propia nube, o por conducción desde la nube a niveles más altos.

#### 4.- ACTIVIDAD ELECTRICA ASOCIADA A LAS TORMENTAS: MODELO CONCEPTUAL.

Es un hecho que los núcleos convectivos en su estado de desarrollo son sistemas que no suelen producir descargas NT. En general, el primer rayo surge cuando se detectan los primeros ecos en altura. Las primeras descargas que se producen son del tipo NN.

Después de alcanzar su estado maduro los NT (-) comienzan a incrementarse rápidamente, tendiendo a agruparse en las cercanías de las áreas de fuerte desarrollo y posteriormente, dentro de la zona de intensidad de precipitación más marcada (el radar puede no dar precipitación en el suelo y ya se han producido los primeros NT). Cuando se observa una tormenta desde lejos se pueden llegar a detectar descargas desde la parte más elevada de los Cbs, bien desde la zona asociada al yunque o en la parte alta y delantera más activa de los torreones o "chimeneas", alcanzando el suelo con facilidad. La fase de madurez se caracteriza por un incremento, con el tiempo, del número de descarga hasta un máximo de actividad eléctrica. A la vez, va creciendo la zona estratiforme y comienza a aparecer descargas fuera de la zona convectiva propiamente dicha.

En la fase de disipación, la actividad de las descargas NT (-) comienza a disminuir notablemente, mientras que las NN permanecen casi constante. Además, las descargas NT tienden a tener una componente más horizontal que vertical (visualmente). Con anterioridad suelen presentarse los NT (+) en las zonas de desarrollo, pero es en la fase de disipación donde suelen aumentar coincidiendo con el transportes de cargas positivas generadas en la zona convectiva y transportada al área estratiforme por el flujo aéreo.

En la figura 23 se observa esquemáticamente la evolución de las descargas en las nubes convectivas, desde las NN en una misma nube a las NN de diferentes elementos convectivos pasando por los NT.

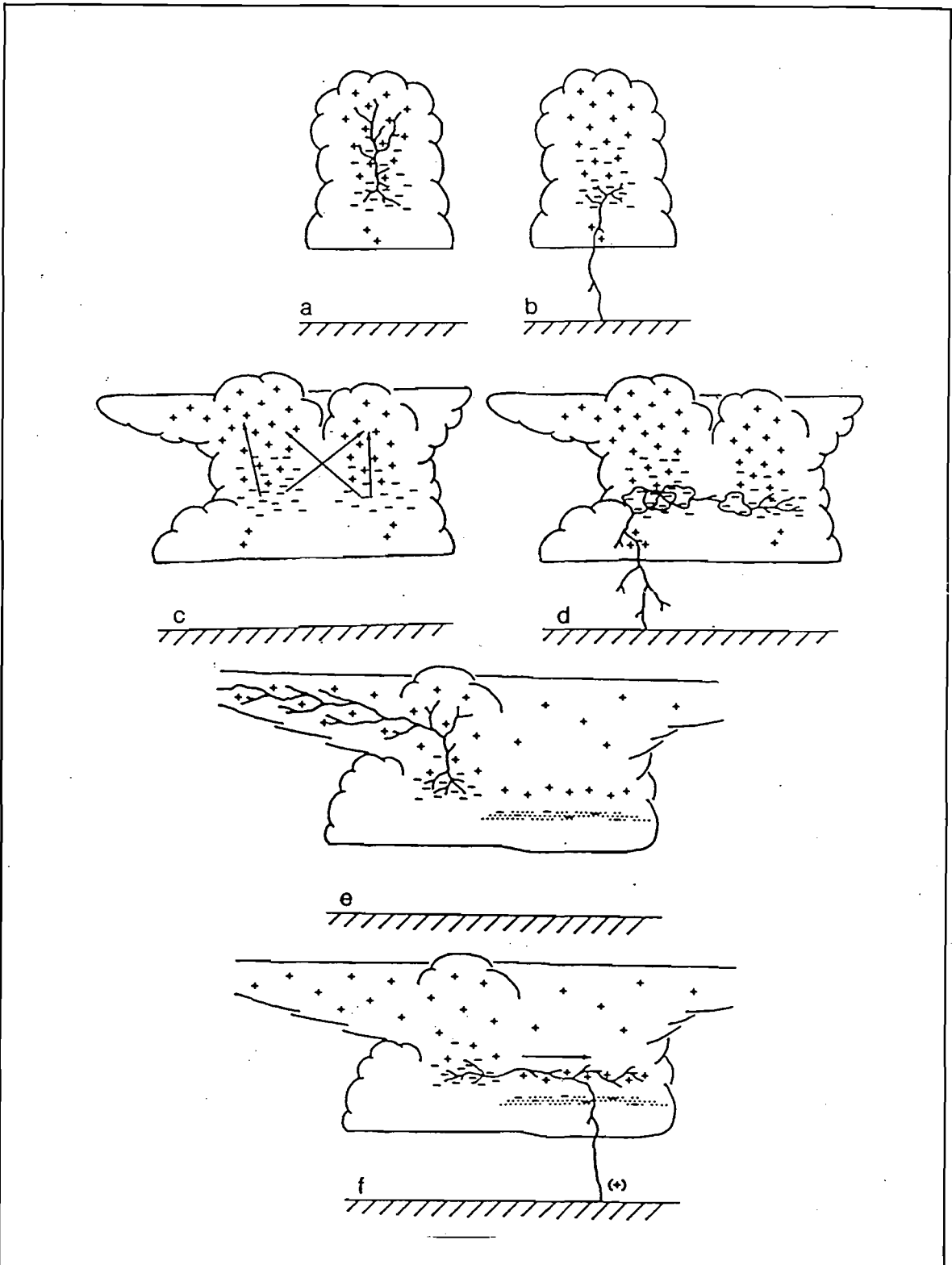


Figura 23.- Evolución de las descargas eléctricas con el tiempo. Ver el texto para su explicación.

(Ref. Bibl. 5)

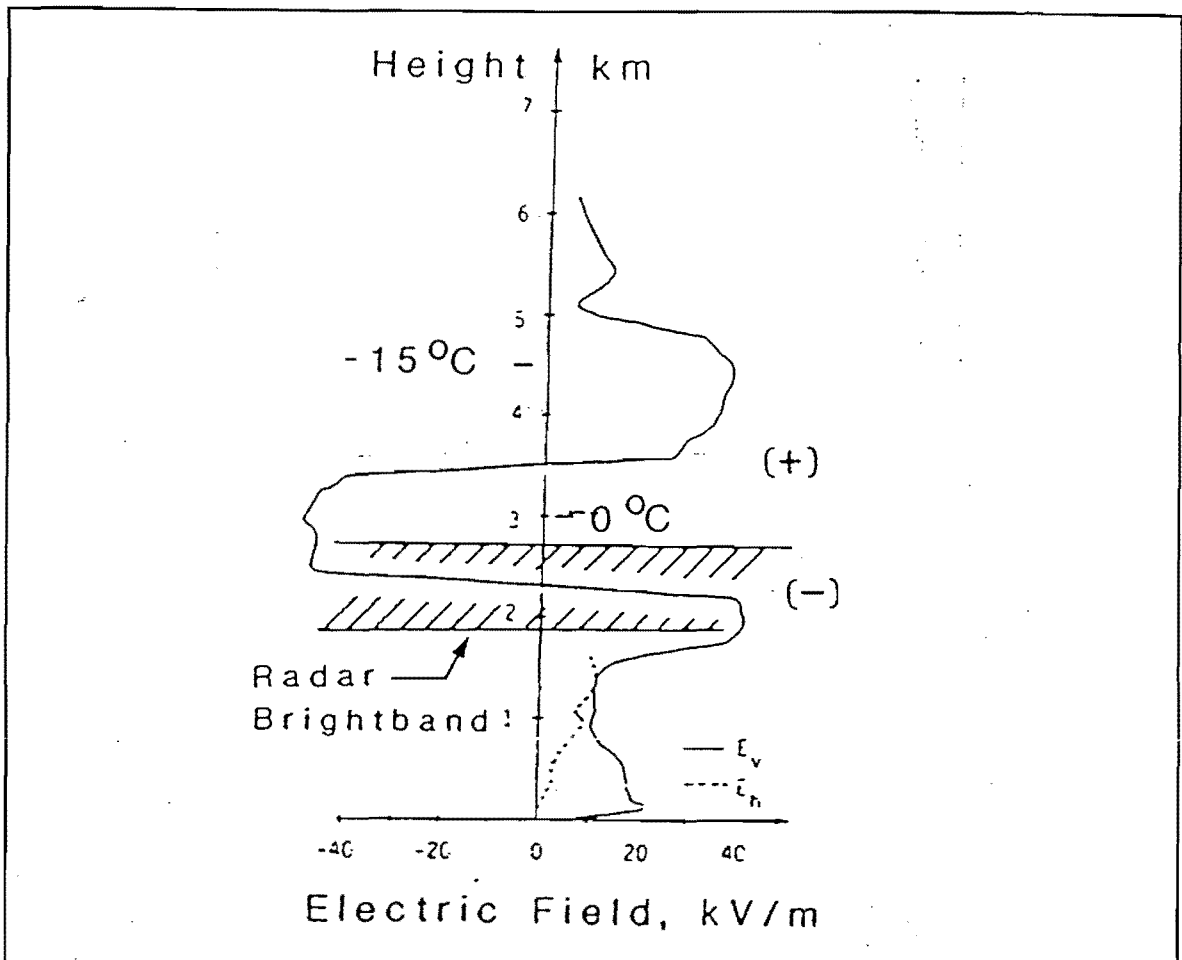


En una primera fase el transporte y transferencia de cargas se realiza en la propia célula y en la vertical con NNS (Fig. 23a). Posteriormente comienzan a aparecer los primeros NT (-), cuando se detectan los primeros ecos en altura, incrementándose rápidamente y agrupándose en la zona más activa de la nube. Cuando la estructura nubosa adquiere mayor grado de organización comienza a ganar horizontalidad generándose los primeros NN entre diferentes elementos celulares (figura 23c,d), mientras los NT siguen agrupados en la zona más activa del sistema. En menor número y frecuencia aparecen en la zona de lluvia estratiforme donde algunos elementos convectivos pueden estar embebidos. (figura 23d).

Cuando el sistema llega a poseer, por la cizalladura, una amplia región estratiforme, rica en cristallitos de hielo cargados positivamente, se pueden observar los primeros NT (+) (y NN) fuera de las zonas convectivas (figura 23e,f). En la fase de disipación del sistema se observa que disminuyen drásticamente los NT(-) produciéndose en intervalos cada vez mayores y sin ofrecer una estructura celular nítida. Por contra las descargas horizontales siguen manteniendo más actividad que las anteriores alcanzando gran extensión en la horizontal.

En la fase final se ha observado que las descargas horizontales entre núcleos positivos y negativos se producen en una zona que se encuentra sobre una capa que se denomina, por su señal en radar, banda brillante (Se define "banda brillante" como un realce en el eco radar motivado por la diferencia en la reflectividad entre el hielo y las partículas de agua. Este eco se interpreta como la frontera en una imagen radar entre la precipitación líquida y de hielo). Las descargas horizontales se generan entre el núcleo de cargas negativas de las células más activas y una aparente zona de cargas positivas que en el mismo nivel se ha formado en las partes de disipación de la tormenta. En la Fig. 24 se muestra un perfil del campo eléctrico en una nube en su estado de disipación.

Se aprecia la existencia de un núcleo de cargas negativas en la misma banda brillante y otra positiva sobre ella. Esta especie de "torta positiva" se ha tratado de explicar por el hecho de que en la fase de disipación los movimientos descendentes transportan hacia abajo los cristallitos de hielo cargados positivamente.



**Figura 24.-** Perfil vertical del campo eléctrico en una nube convectiva en fase de disipación.

En la figura 25 se muestra el registro del campo eléctrico en función del tiempo medido desde el suelo y la intensidad de precipitación de una tormenta que tuvo lugar en Nuevo Mexico (adaptado de un trabajo realizado Moore y Vonnegut en 1977). La tormenta fue seguida durante todo su período de vida, registrándose diferentes fases en su electrificación.

A medida que la tormenta comienza a electrificarse, la acumulación de cargas negativas en su base origina que el campo eléctrico por debajo de la nube invierta su signo con respecto a de buen tiempo y aumente rápidamente en magnitud. A este fenómeno se le denomina electrificación inicial de la tormenta. Se ha llegado a medir la duración de este período estimándose entre 5 y 10 minutos o quizás menos. Esta electrificación inicial de la tormenta llega a su fin con la aparición de la primera descarga, que marca el comienzo del período activo.

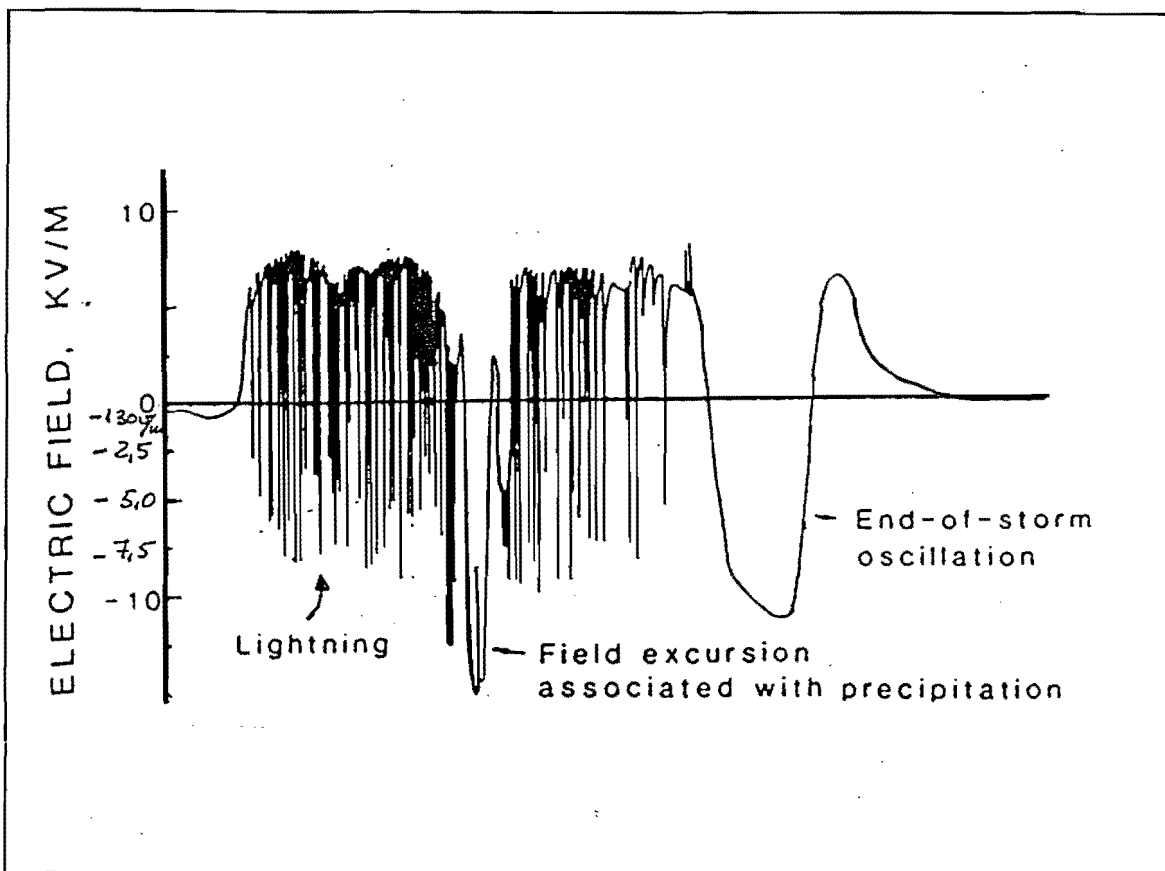


Figura 25.- Campo eléctrico e intensidad de precipitación sobre la tierra por debajo de una tormenta aislada y estacionaria en Nuevo Mexico.

(Ref.Bibl.5)

La fase activa de las tormentas puede extenderse desde unos pocos minutos hasta una hora, dependiendo del tamaño y vigor convectivo de las tormentas. Durante este período las descargas originan variaciones bruscas del campo eléctrico, mientras que el proceso de carga aumenta constantemente el campo. Para un observador desde tierra el campo salta desde valores positivos a negativos para volver a crecer de nuevo hacia valores positivos.

Llama la atención en los registros la incursión pronunciada del campo eléctrico hacia valores negativos durante un tiempo relativamente amplio coincidiendo, pero adelantado en el tiempo, con la máxima intensidad de precipitación. Este fenómeno es una característica común en las observaciones de las tormentas y está asociado a la precipitación en sí que transporta cargas desde niveles más altos. Este derrumbe va acompañado con una cascada súbita de aire produciendo los temidos microrreventones (a) (microbursts/macroburst) en aviación.

Durante la fase de disipación la actividad eléctrica va decayendo. Disminuyen las descargas y el campo eléctrico exhibe las oscilaciones amplias típicas de este período. Son las llamadas EOSO (End Of Storm Oscillation).

Hay que hacer notar que aunque los elementos convectivos suelen aparecer tanto aislados como agrupados en estructuras mayores, su naturaleza tripolar se mantiene diferenciada, en general, dentro del sistema, de tal forma que la electrificación es un proceso de tipo celular.

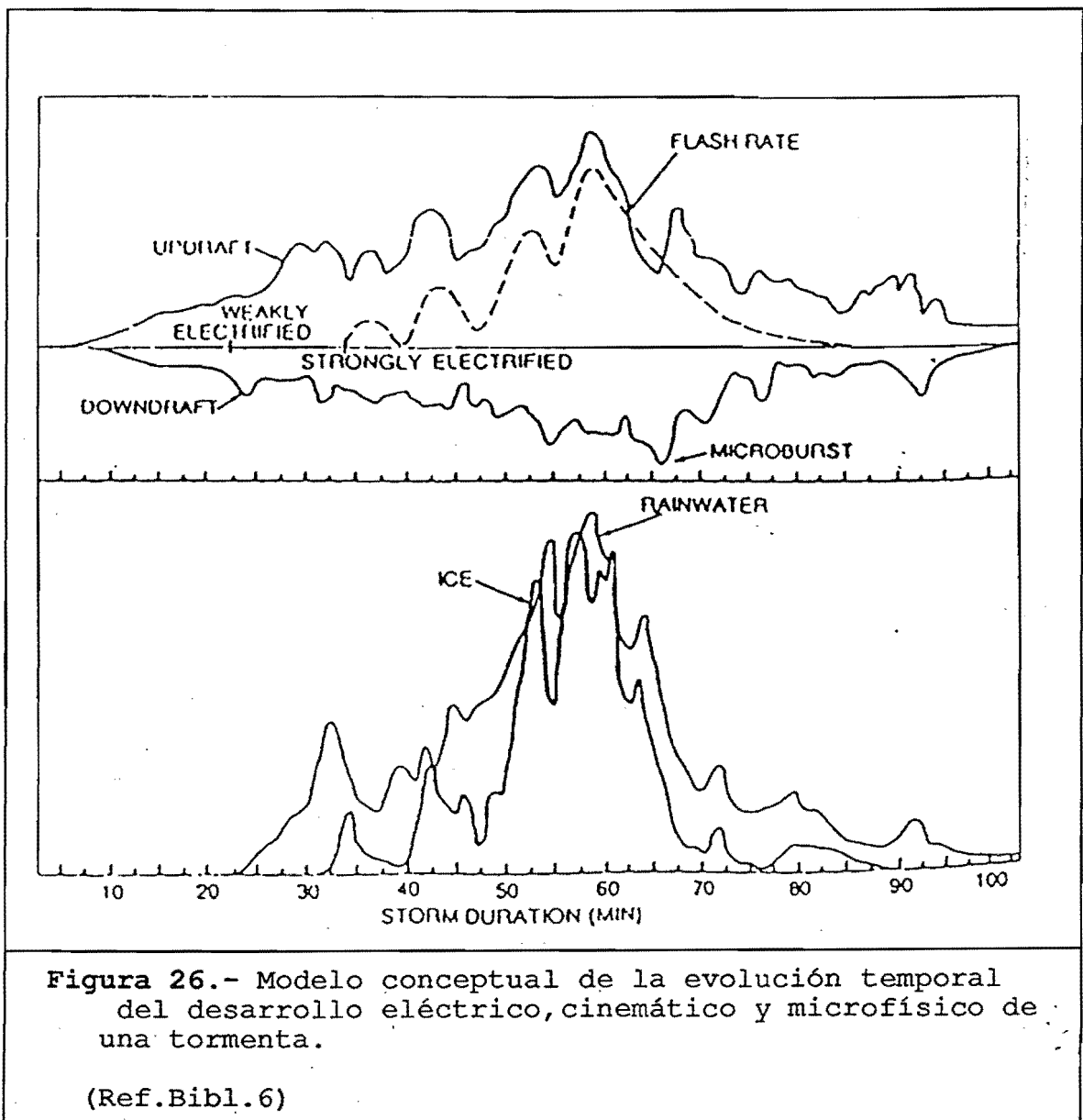


Figura 26.- Modelo conceptual de la evolución temporal del desarrollo eléctrico, cinemático y microfísico de una tormenta.

(Ref. Bibl. 6)

La Fig. 26 se muestra un modelo conceptual simplificado del desarrollo y decaimiento de una tormenta típica con actividad eléctrica y su relación con algunas propiedades del sistema.

En la primera fase predominan los movimientos ascendentes. Los descendentes aparecen más tarde pero en este período son más intensos los primeros. No existen señales de agua líquida y/o sólida de tamaño precipitable en la nube, en estos momentos la actividad eléctrica y las señales en radar son nulas.

En la fase de desarrollo comienzan a aparecer en altura las primeras señales de radar que dan cuenta de la aparición de partículas potencialmente precipitables. La cantidad de agua líquida y de hielo aumentan y es después cuando comienzan a aparecer las primeras descargas. Se observa que la actividad tormentosa está en fase con los movimientos ascendentes (teoría de la convección) y con la presencia de partículas precipitables (teoría de la precipitación): cuanto más intensos sean los movimientos verticales mayor será la actividad de la tormenta en todos los sentidos.

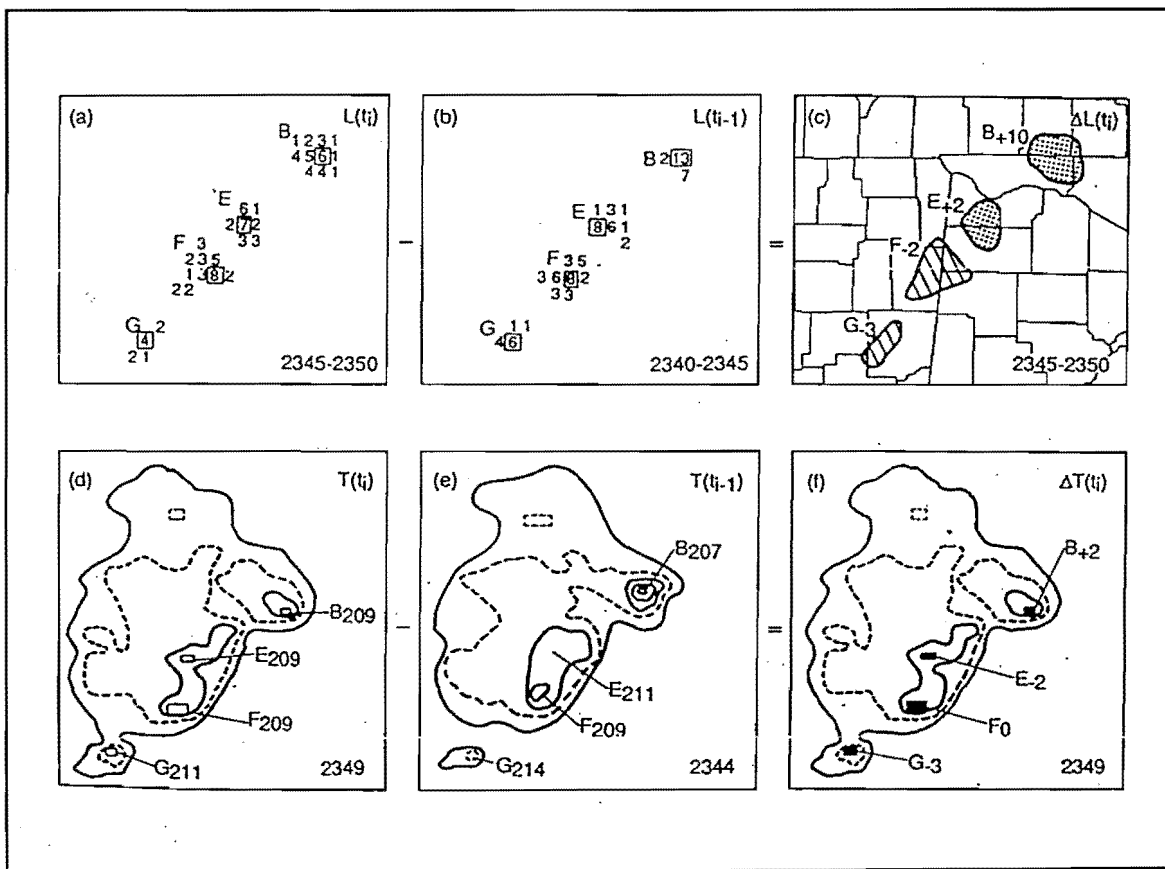
Las primeras descargas en la nube (NN) aparecen después de detectarse los primeros ecos en niveles altos. A título orientativo de 5 a 10 minutos después de que existan ecos de 30 a 40 dBZ a los 7 u 8 km de altura. Vemos que la fase entre la actividad tormentosa y el volumen relativo de hielo en la nube es acusada tanto en sus máximos y mínimos relativos. Las primeras descargas nube-tierra aparecen, en general, entre los 15 y 20 minutos después de los primeros ecos. La fase madura de la nube en este modelo existe siempre y cuando el número de descargas vaya aumentando con el tiempo hasta alcanzar un valor máximo. A partir de ahí la tormenta entra en su fase de disipación. El volumen de agua e hielo caen estrepitosamente, predominando los movimientos descendentes frente a los ascendentes, y es en esta fase cuando pueden aparecer en superficie ciertos fenómenos significativos, máxima intensidad de precipitación, frentes de rachas muy activos, fuertes vientos en superficie. Así la existencia de los "microburst" se suele producir de 10 a 15' después de la máxima intensidad en el número de rayos. Otra consecuencia que se ha observado es que cuanto más largo sea el período en alcanzar este máximo más tardará en decaer la actividad eléctrica. El crecimiento y decrecimiento suele tener forma exponencial. Nubes que crecen muy rápidamente decaen también muy rápidamente.

De lo comentado anteriormente, resulta muy interesante identificar células individuales y observar con el paso de tiempo si el número de descargas aumenta o disminuye. El modelo anterior puede ser de gran utilidad.

En la Fig 27 se muestra un ejemplo de cómo se pueden combinar los datos de satélite y los de descargas NT. Los datos de descargas para dos intervalos de tiempo consecutivos se representan en forma de grids y se agrupan en células. Las descargas durante los 5 minutos previos  $L(t_{i-1})$  se restan de los datos más recientes de  $t_i$  para producir un producto derivado  $\Delta L(t_i)$  que se representa en la figura 27c. Este producto representa la forma de la célula mientras que la proporción de descargas es reemplazado por la derivada o pendiente. Por ejemplo, la proporción de rayos de la célula B aumenta en 10 en 5 minutos mientras que en la célula G disminuye en 3. Las células en las que aumentan las rayos (B y E) se pueden distinguir claramente de las otras dos (F y G) en las que disminuyen, dándonos una idea de la posible tendencia convectiva.

El mismo procedimiento se sigue para el estudio del campo de temperaturas en infrarrojo. El campo de temperaturas derivado  $\Delta T(t_i)$  se obtiene restando los dos campos de intervalos de tiempo consecutivos (figura 27d,e). En él se puede observar (figura 27f) cómo la célula B llega a ser 2 K más cálida, las células E y G se enfrían y la temperatura de la F permanece invariable.

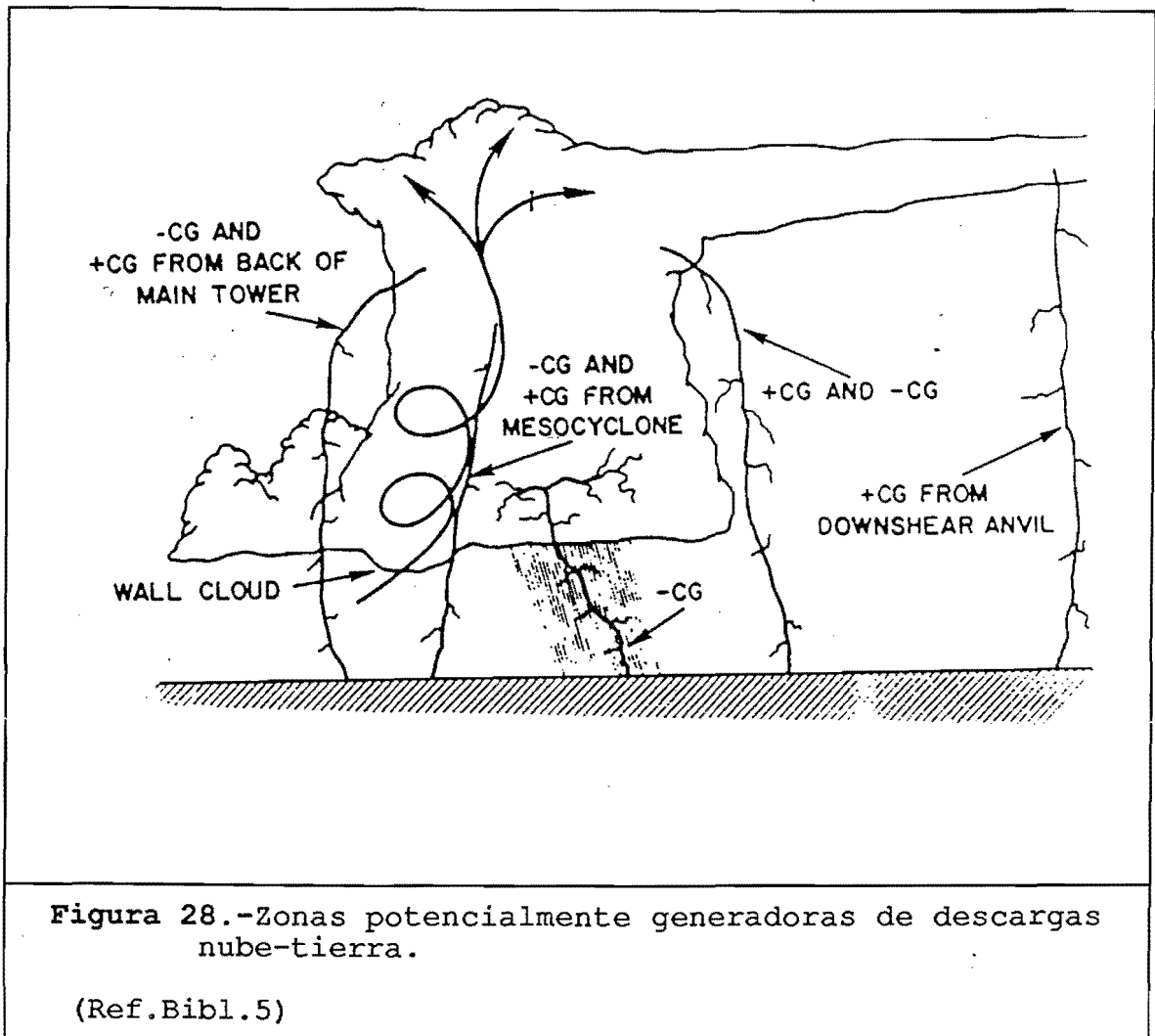
Los dos campos estudiados parecen estar de acuerdo para la célula E, pero no lo están para las otras tres células. Por ejemplo para la célula B el campo de temperaturas nos indica que la tormenta disminuye en dimensión vertical por lo que podría interpretarse que comienza su fase de disipación, perdiendo su actividad convectiva, sin embargo el campo de descargas nos indica todo lo contrario, señalándonos que la tormenta se encuentra en su fase eléctrica activa. Con este ejemplo hemos querido poner de manifiesto que la información sobre la actividad eléctrica de una nube convectiva a veces no es una información adicional más, sino que resulta de vital importancia para conocer el estado de desarrollo de una tormenta.



**Figura 27.**-Utilización de los datos de descargas para la estimación de células convectivas y sus posibles tendencias convectivas.

(Ref.Bibl.6)

En la figura 28 se representa un modelo de supercélula tormentosa aislada que contiene fuertes corrientes ascendentes, cizalladura, turbulencia, una amplio penacho en la cima y un mesociclón (rotación que puede producir un tornado). Se ha observado que en la región de precipitación fuerte se producen descargas negativas a tierra, mientras que las zonas inmediatamente por debajo del penacho, cerca de la torre principal de la nube, pueden producir descargas positivas y negativas por igual. Se han llegado a observar pocas descargas originadas por debajo del mesociclón por otro lado, el penacho superior de la nube, desplazado horizontalmente con respecto a la célula principal origina descargas positivas hacia la tierra.



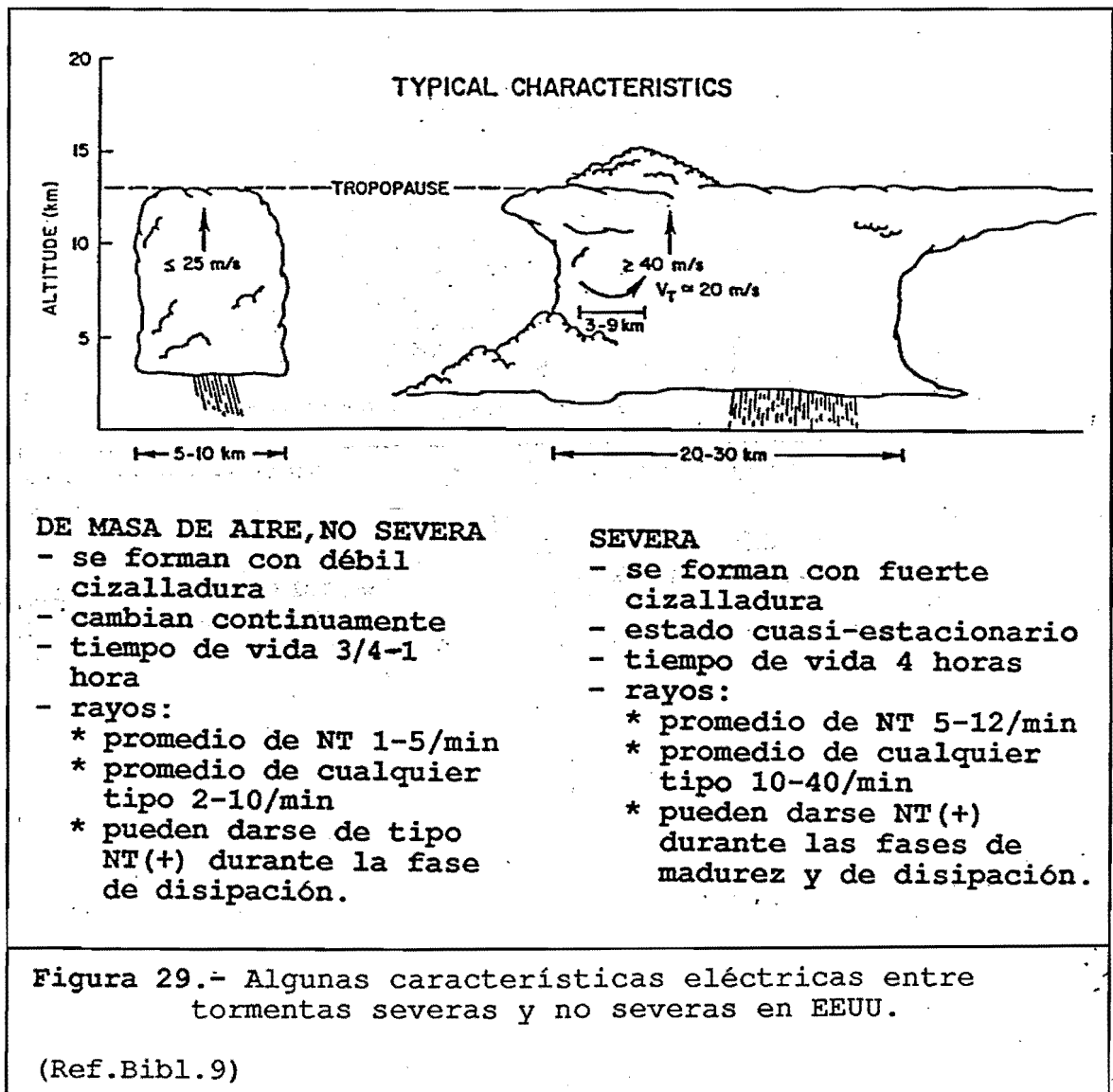
En la Fig. 29 se comparan dos elementos convectivos con diferentes características observados en EEUU y referidos a las tormentas de masas de aire y a las de tipo severo.

La primera, desde el punto de vista eléctrico, se caracteriza por una intensidad de descargas más bajo que las segundas (además su ciclo de vida es notablemente inferior). Las descargas de tipo NT (+) se presentan, en general, en fase de disipación, mientras en las de tipo severo pueden existir en la fase severa y de disipación.



Es importante reflejar un hecho que se ha detectado en EE.UU. y es que las tormentas de primavera pueden ser severas pero las descargas eléctricas que suelen acompañarlas son poco frecuentes. En cambio, las tormentas de final de primavera, principios de verano y otoño, tanto severas como no, pueden tener más actividad eléctrica que las primeras. Las variaciones estacionales son muy importantes y habrá que tenerlas en cuenta en nuestra Península. De hecho algunas tormentas eléctricas de sistemas no severos pueden tener considerable actividad sobre todo en zonas de montaña.

La severidad y el estado eléctrico del sistema pueden estar relacionados pero existen evidencias de excepciones a esta regla.



## 5.- BIBLIOGRAFIA.

- 1.- FEYNMAN. THE FEYNMAN LECTURES ON PHYSICS, VOL. II. ELECTRICITY IN THE ATMOSPHERE. FONDO EDUCATIVO INTERAMERICANO, S A.
- 2.- CHARLES A.D.(1985) THE OPERATIONAL METEOROLOGY OF CONVECTIVE WEATHER. VOL.II. STORM SCALE ANALYSIS. NOAA TECHNICAL MEMORANDUM ERL ESG-15.
- 3.- UMAN M.A.1987: THE LIGHTNING DISCHARGE.INTERNATIONAL GEOPHYSICS SERIES.VOL. 39. ACADEMIC PRESS INC.
- 4.- WILLIAMS E.R. 1989: ELECTRIFICACION EN LAS TORMENTAS. INVESTIGACION Y CIENCIA, ENERO 1989.
- 5.- VARIOS AUTORES.1986: THE EARTH'S ELECTRICAL ENVIRONMENT. STUDIES IN GEOPHYSICS. NATIONAL ACADEMY PRESS.
- 6.- GOODMAN S.J.,BUECHLER D. E. AND MEYER P.J.1988:CONVECTIVE TENDENCY IMAGES DERIVED FROM A COMBINATION OF LIGHTNING AND SATELLITE DATA. WEATHER AND FORECASTING.VOL.3,NO.3.SEPTEMBER 1988.
- 7.- MAGONO C., THUNDERSTORMS. DEVELOPMENTS IN ATMOSPHERIC SCIENCE 12. ELSEVIER SCIENTIFIC PUBLISHING COMPANY 1980.
- 8.- EDWIN KESSLER. INSTRUMENTS AND TECHNIQUES FOR THUNDERSTORMS OBSERVATION AND ANALYSIS. VOL.3, 2 EDICION. UNIVERSITY OF OKLAHOMA PRESS, 1988.
- 9.- CHARLES A.DOSWELL III. THE OPERATIONAL METEOROLOGY OF CONVECTIVE WEATHER. VOLUME II: STORM SCALE ANALYSIS. NOAA TECHNICAL MEMORANDUM ERL ESG-15. ABRIL 1985.