

UN SIMPLE MODELO NUMERICO PARA EL ESTUDIO DE LA ELECTRIFICACION DE NUBES

CARLOS M. SCAVUZZO y GIORGIO M. CARANTI
*Facultad de Matemática, Astronomía y Física,
Universidad Nacional de Córdoba.
Laprida 854, 5000 Córdoba, Argentina.*

RESUMEN

En este trabajo se presenta un modelo numérico 3-D que simula la electrificación de nubes. En este modelo, el único mecanismo microfísico de electrificación incluido es la transferencia de carga eléctrica en colisiones hielo-hielo con fracturas. El espectro de partículas de nube incluido es discreto con ocho categorías. Ellas se mueven con el viento y bajo la acción de la gravedad. Las ecuaciones de transporte para el número de partículas y su respectiva carga son resueltas por diferencias finitas en una grilla de 500m para un dominio cúbico de 16Km de lado.

Se muestra en el trabajo que campos suficientemente altos como para iniciar una descarga (400 KV/m) se producen en el tiempo esperado (4min). Se encuentra además un gran solapamiento de las regiones con carga positiva y negativa, pero su superposición arroja una muy estable estratificación de la carga, formando una estructura de dipolo como es observada en mediciones de campo. Se discute además la estabilidad de la estratificación encontrada.

ABSTRACT

A 3D cloud electrification model is presented. In it actual laboratory data on individual ice-ice collisions involving fracture is incorporated. An eight categories discrete particle spectrum is used. The particle are moved by the wind and de grabity force. The ecuations for the charge and particle concentrations are resolved by finite difference on a grid of 500m in a cubic domain of 16km.

It is shown that high fields (400 kv/m) are produced by this kind of interaction in the expected times (4 min). and the fragments increase the number of only one of them. It is also found that positive and negative charges overlap considerably but their superposition results in a highly stable stratification forming a vertical dipole (or tripole) structure. The stability of this results is also discuss.

1. Introducción

El curioso fenómeno de la electrificación espontanea de tormentas severas no esta aún completamente entendido. Además de su interés básico, los daños causados por las descargas a tierra como incendios, destrucción en ciudades, accidentes en aviones y hasta muertes, ha hecho de este un fenómeno sujeto a innumerables investigaciones.

La estructura eléctrica de una nube de tormenta puede verse esquemáticamente en la Figura 1. Es posible observar como existe una región de carga negativa en el centro entre dos regiones de carga positiva. La región cargada negativamente se encuentra localizada aproximadamente entre las hisotermas de -15°C y -25°C , y tiene una altura de alrededor de un kilómetro. La región positiva que se encuentra arriba esta menos localizada y su altura es de varios kilómetros. Las densidades de carga volumétrica de éstas dos regiones

son similares y en el momento de una descarga llegan a tener de 1 a 10 Coulomb por kilómetro cúbico (C/Km). La región inferior de carga positiva es mas pequeña y su carga uno a dos ordenes menor que las otras zonas. Los campos medidos en regiones próximas a donde se han iniciado descargas son del orden de los cientos de kilovoltios por metro.

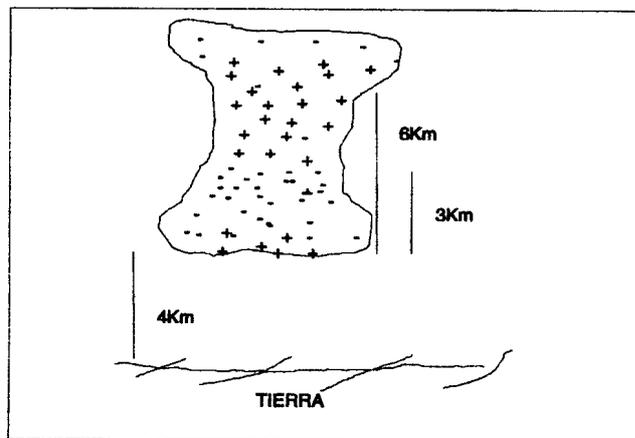


FIGURA 1 : Esquema de la distribución de carga en una nube.

Existen tres caminos por los cuales aproximarse a la investigación del posible mecanismo responsable de la electrificación de las tormentas: 1) Experimentos de laboratorio y cálculos teóricos realizados para cuantificar el intercambio de carga entre partículas interactuantes de diversos tamaños, faxes y diferentes condiciones ambientales. 2) Mediciones de campo; donde sensores remotos y mediciones in situ miden las características dinámicas, termodinámicas, microfísicas y eléctricas de la nube, que luego son elaboradas e interpretadas. 3) Estudios de modelado numérico; que simulan el crecimiento de la nube y tomando en cuenta los procesos físicos que ocurren dentro de ella, dan información de como los complejos procesos podrían interactuar para producir una electrificación neta de la nube.

El modelado numérico de la electrificación de tormentas ha sido un nuevo camino para investigar este problema. Luego de que en los 50 y 60 los modelos numéricos de nubes comenzaron a desarrollarse, a estos siguieron los primeros intentos en modelar los mecanismos de electrificación propuestos y evaluar los resultados. El primero de tales trabajos fue Pringle(73) [1], quien modificó un modelo bidimensional dependiente del tiempo para incluir una muy primitiva parametrización de la separación de carga sin especificar ningún mecanismo particular. Takahashi (74) [2] empleo un modelo de nube unidimensional dependiente del tiempo donde incluyo la interacción de la carga espacial con los hidrometeoros, pero no permitía ningún intercambio de carga en la interacción de hidrometeoros entre ellos. Illingworth y Lathan (77) [3] en un modelo 1-D pero de estado estacionario, incluyeron varios mecanismo de cargado por interacción de partículas. Recien en los 80 se realizó el primer modelo 3-D Rawlins(81) [4]. Todos estos modelos arrojaron alguna información interesante pero aún ninguno es concluyente en cual o cuales son los mecanismo principales del cargado.

El proceso de electrificación propuesto por Avila y Caranti [5],[6] se encuentra dentro del

grupo de las teorías no inductivas y se basa en el hecho de que mediciones de laboratorio muestran que al chocar dos cristales de hielo con velocidades relativas adecuadas y condiciones ambiente controladas, aparece un fragmento con carga neta y las otras dos partículas también terminan, luego de la colisión, con carga neta. Los signos de cada uno dependen fuertemente de la temperatura ambiente y del contenido de agua líquida. La capacidad de producir un fragmento además depende de la energía cinética disponible en el choque.

Un simple modelo conceptual de lo que ocurriría en una nube según esta teoría sería el siguiente: Cuando las partículas de precipitación caen en la nube chocan entre ellas y con cristales con una transferencia de carga en cada evento. Si esto ocurre en la parte de arriba de la nube, las partículas pesadas se abran cargado negativamente. Los cristales positivos son llevados hacia arriba por el viento, creando un núcleo positivo. Las partículas grandes caen y en la parte baja ellas pierden parte o toda su carga negativa a costa de partículas que se mueven hacia arriba cargadas negativamente. Así el centro de la nube debe necesariamente quedar cargada negativamente y la parte inferior podría quedar cargada positiva formando así la llamada estructura de tripolo.

El desarrollo de un modelo numérico de nube 3D dependiente del tiempo (Scavuzzo and Caranti 1992) [7] fue el primer paso hacia el testeo de nuestras ideas acerca de la electrificación de nubes. Aquel modelo simula la evolución del campo de viento, de agua líquida, temperatura y presión de una nube, partiendo de un dado conjunto de condiciones atmosféricas para comensar la convección. Diferencias finitas son usadas para resolver todas sus ecuaciones salvo la ecuación diagnóstica para la presión que es resuelta por un método pseudoespectral. La nube es simulada primero, sin incluir la electricidad, para obtener el campo de viento 3D. En esta etapa del trabajo un estado estacionario de la nube es usado en otro programa que simula el proceso de electrificación. Este modelo de electrificación así como sus resultados y la discusión de estos son presentados en presente trabajo.

2. El Modelo de Electrificación

El modelo toma como datos los campos de viento y temperatura a un tiempo fijo, obtenidos con nuestro modelo de nube 3-D. Tal como en otros modelos de electrificación existentes (Helsdon and Farley, 1987) [8] aquí se utiliza un espectro discreto de partículas. Ya que el propósito fundamental de este modelo es incorporar la interacción entre partículas de hielo, el espectro consiste solo de ocho categorías de partículas de hielo representando a hielo de precipitación y cristales 1) 10μ (fragmentos), 2) 30μ , 3) 50μ , 4) 100μ , 5) 250μ , 6) 500μ , 7) 1000μ , 8) $> 5000\mu$

Así el modelo incluye 16 variables independientes en cada punto de una grilla discreta que coincide con la grilla del modelo de nube original. Estas son el número de partículas por litro, de cada categoría, y la carga media de cada tipo en cada lugar y momento. Estas partículas de hielo se mueven y chocan, provocando la separación de carga neta en la nube. Las ecuaciones de transporte para las partículas y sus respectivas densidades de carga son las siguientes.

$$\frac{\partial N_i}{\partial t} = -\nabla \cdot ((V - V_T)N_i) \quad i = 1, 8$$

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = -\frac{1}{N_i} \nabla \cdot ((V - V_T)C_i N_i) \quad i = 1, 8$$

aquí V_{T_i} es la velocidad terminal de la partícula "i" y V la del viento.

Para evaluar el número de colisiones de las partículas "i" con las "j" se utiliza una formulación muy simplificada pero que lo estima, de una manera razonable. así el número de colisiones por litro de aire y por segundo será:

$$NC = \pi R_g^2 |V_{Ti} - V_{Tj}| N_i N_j E$$

donde R_g es el radio de la partícula de mayor tamaño y E una eficiencia de la colisión. Para saber cuales de todas las colisiones posibles "i j" pueden provocar fragmentos y con ello producir separación individual de carga, se estimó la energía necesaria para tal fractura. De aquí se indujo que solo las siguientes colisiones ponen en juego la suficiente energía cinética como para provocar fragmentos (partículas 1).

2 - 8

3 - 6 3 - 7 3 - 8

4 - 6 4 - 7 4 - 8

5 - 6 5 - 7 5 - 8

6 - 7 6 - 8

7 - 8

Cada colisión se supone que solo produce un fragmento y las cargas se reparten de la siguiente manera:

para $T > -18^\circ C$

10 fc la grande -8 el fragmento y -2 el cristal pequeño

para $T < -18^\circ C$

-10 fc la grande 8 el fragmento y 2 el cristal pequeño

3. Esquema numérico, condiciones iniciales y de contorno

Las ecuaciones del párrafo anterior son resueltas por un simple esquema de diferencias finitas de primer orden centrada en el espacio, y adelantada en el tiempo. La grilla elegida tiene 500 m de parámetro de red (igual a nuestro anterior modelo). Por el problema que ocasiona la gran variación de concentración (3 ordenes en 20 puntos de grilla) se debe elegir un paso de tiempo pequeño, igual a 1seg. Apesar de esto se debieron realizar algunas cálculos extras para no permitir mayor advección que la debida, provocando artificiales concentraciones negativas.

Se utilizó, para poner a punto el modelo, un dominio de $16 \times 16 \times 16$ puntos pero fue necesario luego correr el modelo en un dominio de $32 \times 32 \times 32$ puntos para el mismo δx .

Este demora del orden de 18 hs en simular 5 min del proceso de electrificación corriendo sobre una computadora NEXT, con los códigos hechos en FORTRAN.

Se toman condiciones de contorno periódicas en los laterales. Estas si bien no son físicamente justificables no provocan efectos espurios, por estar lejos de la zona donde hay cristales. En el piso y tope se toman todas la variables iguales a cero. Además todos los cristales que existan por debajo de la isoterma de cero grado son eliminados.

Se tomaron inicialmente espectro de partículas típicos para nubes que mostraron electrificación. La concentración de cristales aumenta rápidamente con la altura hasta un máximo de 700 l^{-1} a los 7.5 km después del cual sigue constante hasta el tope de la nube. Realmente todas los espectros de partículas siguen una distribución tipo: Ae^{Bz} donde A y B son diferentes para cada clase y z la altura. Las clases 1, 2 y 3 (cristalitos), tienen $B > 0$ así su concentración se incrementa con la altura hasta un valor máximo luego del cual siguen constantes. Para las categorías de la 4 a la 8, consideradas como precipitación, $B < 0$ y ellas decrecen en número con la altura.

Por otro lado, ya que las partículas de la clase 8 se caen fuera de la nube muy rápidamente, y el modelo no tiene incorporada la parte de crecimiento, ellas son reinyectadas artificialmente a razón del 40% de su perfil original en cada minuto.

Se toma una eficiencia de colisión del 10%. Este pequeño valor toma en cuenta dos factores a saber: a) La real eficiencia de colisión que muy raramente sería menor que 0.5. b) El efecto de que las cargas transferidas en cada colisión individual tienen un amplio rango estadístico y solo en promedio producen los signos y cantidades puestos en el modelo; este efecto estadístico podría reducir la eficiencia del mecanismo. Por eso se pone E tan pequeño, Produciendo que se cuenten uno de cada 10 eventos de colisión.

La nube utilizada en el caso que describiremos en detalle en este trabajo se encuentra a los 14 min de iniciada, su región central era de alrededor de 6Km de diámetro horizontal llegando a 20-30m/s las máximas velocidades ascendente. El nivel de congelación estaba a los 3Km del piso, la base de la nube a los 2.5Km y el tope serca de los 11Km.

Si bien la grilla simulada tubo $32 \times 32 \times 32$ puntos las partículas de hielo se sembraron en un cubo central de 16 puntos de lado y con carga inicial cero.

4. Resultados

En la Figura 2 se muestra la concentración (en número por litro) de las partículas de la clase 1 (cristales de hielo) como función de la altura, para intervalos de tiempo de un minuto. Ya que esta es una de las dos clases que crecen (fragmentos) ellas tienen un marcado crecimiento en su número; en 5 minutos casi se duplican. Figura 4 muestra la densidad de carga volumétrica asociada con esta clase. Esta es presentada en forma de promedios a lo largo de planos horizontales, en forma similar a la Figura 2. La densidad de carga de estas partículas es positiva y grande por encima de los 5.5Km, con un crecimiento casi lineal en el tiempo con el máximo llegando alrededor de los 7.5Km.

Del otro lado del espectro, la clase 8, es mostrada en la Figura 3. Estas partículas son más numerosas a bajos niveles y su número decrece muy rápido con la altitud. Como ellas son reinyectadas hay una compensación por las partículas perdidas por presipitación y su concentración permanece más o menos inalterada. El comportamiento de su carga se presenta en la Figura 5. Esta es esencialmente negativa excepto por una pequeña zona cerca del nivel de congelación. La máxima carga negativa asociada con esta clase 8 baja su altitud para estabilizarse alrededor de los 6Km con un valor absoluto de la mitad del máximo de la clase 1. así puede verse que las densidades de carga de las clases 1 y 8

distribuidas verticalmente podrían, ya formar una estructura de dipolo reportada por los trabajos de observaciones de tormentas in situ.

Curvas de las densidades de carga de los otros tipos de partículas se examinaron, viendose que su magnitud era muy inferior (en total por celda no por partícula) a las de las clases 1 y 8. Esto estaría indicando que las partículas más grandes y más pequeñas solas son capaces de producir la estratificación de la carga y este fenómeno sería poco dependiente de las distribuciones espaciales y cantidades de los otros tipos de partículas.

La distribución vertical de la carga total es dada en la Figura 6. La carga total a una dada altura , es calculada sumando la carga de todas las celdas a esas altura. Es notable la estructura dipolar que esta muestra ya desde el comienzo. En ella se ve claramente la zona negativa con un espesor muy definido y a la altura la isoterma de -20 . Por el contrario la zona de carga positiva se ve claramente más dispersa , como es de esperarse, y con valores máximos de carga de aproximadamente 5 C/Km^3 .Estos resultados concuerdan en buena medida con los datos medidos en nubes reales.

Figura 7 muestra el modulo del campo eléctrico total y su componente vertical sobre una linea vertical atraves del centro de la nube a los 4min. El máximo campo eléctrico es de 410 KV/m alrededor de los 6 Km , este valor es lo suficientemente grande como para iniciar una descarga . Debería notarse que este alto valor se alcanza ya a los 4 min luego de iniciada la electrificación. El signo de la componente vertical concuerda con las ideas de estructura tripolar esperada para el fenómeno en cuestión.

En otras corridas en las cuales la interacción 2-8 se puso con una eficiencia muy pequeña del 1 %, la carga total disminuyó en un tercio pero su distribución en altura permaneció casi inalterada. En esta corrida un pequeño centro positivo apareció en la base de la nube. Además simulaciones variando el espectro inicial de partículas hasta en un 50 % fueron llevadas a cabo, notandose que la forma de la estratificación de la carga así como los valores de carga máxima fueron prácticamente inalterados, mostrando la gran estabilidad de los resultados de estratificación encontrados. Este resultado además refuerza los resultados ante cualquier opinión acerca de que si los espectros utilizados son exactamente los que corresponde.

Resultados arrojados cuando al modelo se le prohibió producir fragmentos (o sea que los 10^6 C se los llevó el cristal pequeño), mostraron una estratificación similar. Este resultado es esperable ya que en el modelo los fragmentos solo tienen el efecto de trasportar carga y no son capaces de producir nuevos fragmentos. Así ya que las diferencias de velocidades terminales de los otros tamaños pequeños y los fragmentos es muy pequeña (menos de 1 m/s), el modelo no es capaz de representar las posibles diferencias existentes en la realidad si no hubiera fragmentos.

Resultados de los perfiles de la carga total a los 5 min de iniciada la electrificación para otros casos simulados se presentan en las Figura 8 a-b. En el experimento a) se utilizó el mismo perfil de temperatura que en el caso descrito arriba pero la temperatura de inversión de signo se cambia de $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ a $-8 \text{ }^\circ\text{C}$, mientras que para el caso b) esta fue elegida como $-28 \text{ }^\circ\text{C}$. En estos se ve un marcado desbalance de carga. En el a) se ve un exeso de carga positiva y en el b) un exeso de carga negativa. Observando las Figuras 9 a) y b) donde se muestran las densidades de carga de cada tipo de partícula a los 6 min, puede entenderse que el origen de tal desbalance es debido a que en un caso las partículas 8 caen fuera de la nube cargadas positivamente mientras en el otro caso caen cargadas negativamente. Apesar de estos hechos, el tipo de estratificación a grandes rasgos se sigue conservando.

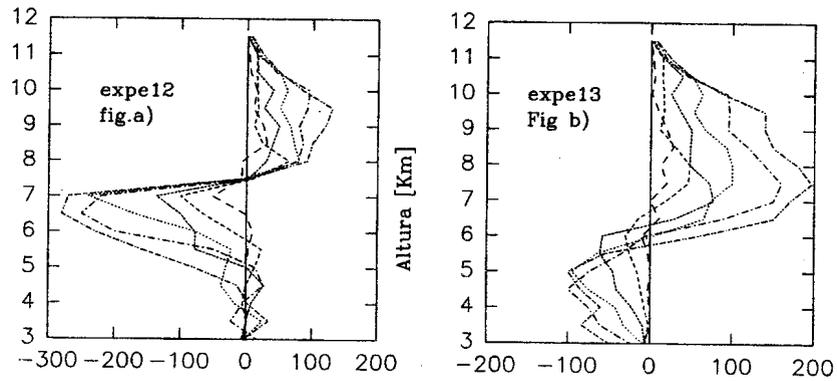


Figura 8 . a) y b) Carga total en funcion de la altura [C]

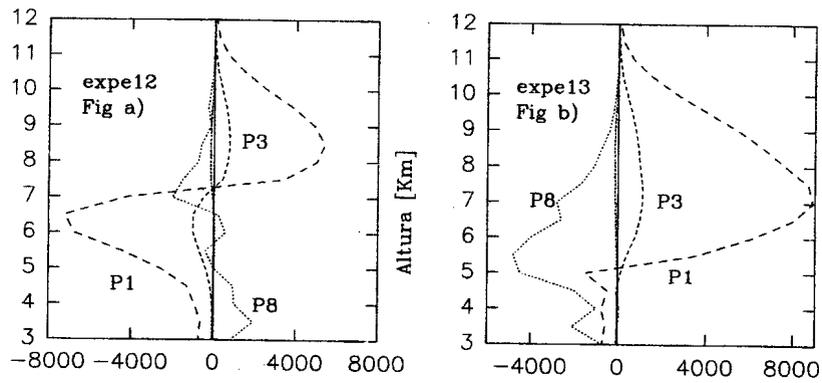


Figura 9 . a) y b) Densidad de carga de cada tipo de part. [fC/l]

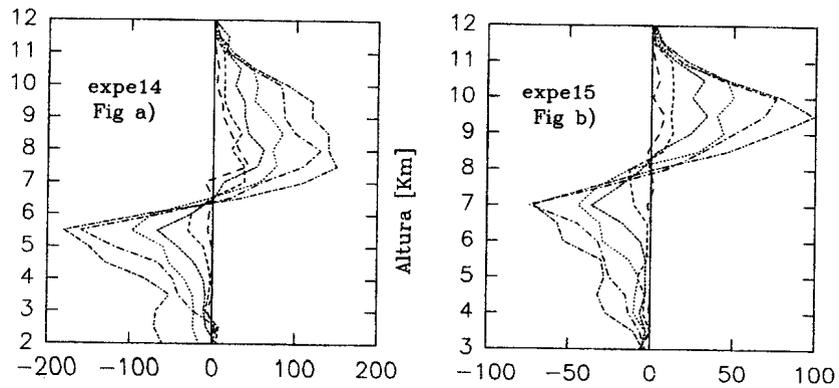
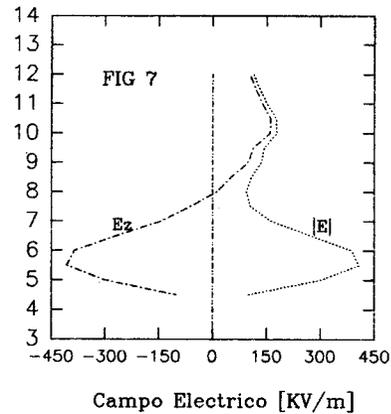
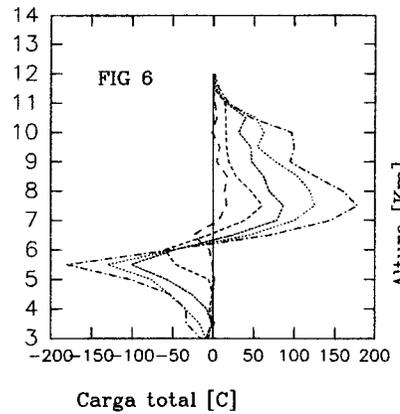
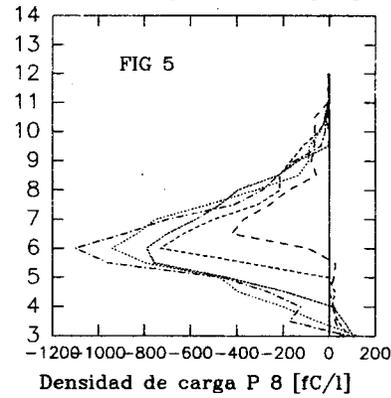
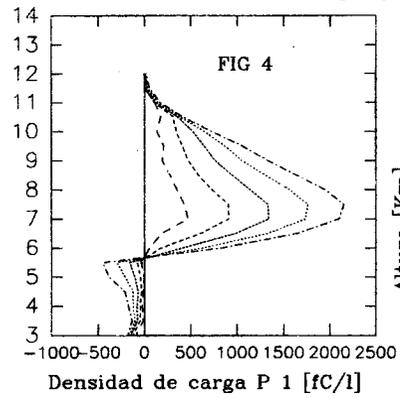
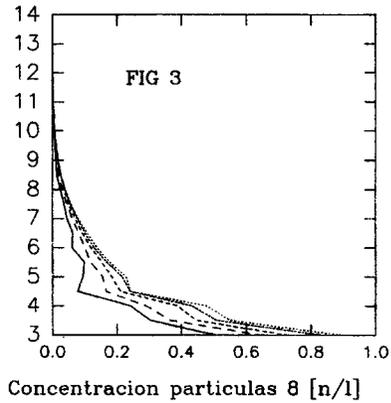
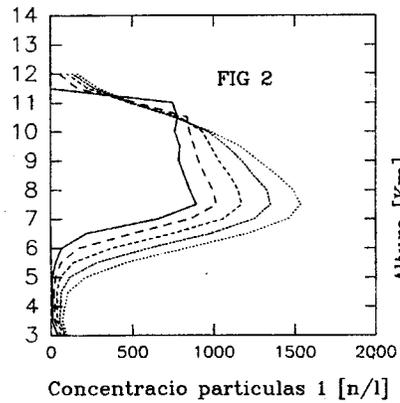


Figura 10 . a) y b) . Carga total en funcion de la altura [C]



La figura 10 a) y b) es igual a la 9 pero el analisis es sobre otros dos casos. En estos experimentos (expe14 y expe15) se deja la temperatura de inversión igual a -18°C pero cambian la razón de cambio de la temperatura con la altura. En el experimento descrito arriba fue de $8^{\circ}\text{C}/\text{km}$, mientras en c) y d) es de $6^{\circ}\text{C}/\text{km}$. En ambos c) se deja la altura de los -18 constante (4.9km) mientras en el d) se dejo la temperatura del suelo fija, provocando la subida de la isoterma de -18°C casi 1Km hacia arriba. Exepto estos cambios todo lo demás fue igual al modelo original para poder comparar con la fig 7. Estos gráficos muestran una estratificación de la carga muy similar al encontrado en la figura 6. Esto demuestra que si bien el fenómeno es altamente dependiente de la temperatura, su forma global es muy estable ante variaciones de los perfiles de temperatura. Esto es muy razonable ya que la electrificación de tormentas es encontrada practicamente en todas las nubes de gran desarrollo vertical independiente de su perfil vertical de temperaturas y si nuestro mecanismo fuera estremadamente dependiente de este parámetro no podría explicar tal general comportamiento.

5. Discusión y Conclusiones

Nuestro principal interés en este primer paso del trabajo fue testear si el cargado por fractura, era suficiente para reproducir la estructura de carga medidas en tormentas electrificadas y en que proporción. Para ello la utilización de modelos de simulación fue la herramienta más adecuada. En este primer paso, la información disponible, del contenido de agua líquida no fue utilizado para calcular si las partículas crecían por acreción, efecto que podría mejorar aún más los resultados.

Se encontraron Picos de densidades de cargas (ver Figure 6) del orden de $5\text{ C}/\text{km}^3$ los cuales estan dentro de los valores observados. Las cargas total por plano del orden de 180 C. Aunque las cargas muestran un gran solapamiento, el resultado de la simulación muestra que la carga total posee una clara estratificación. La carga negativa esta localizada en una banda muy definida a una altura casi constante, y la positiva esta mucho más distribuida y su parte central se mueve muy lentamente hacia arriba. Este es el resultado general encontrado, para otras corridas con diferentes eficiencias y condiciones de inyección. Krehbiel (1984) [9] en mediciones in situ, notó la constancia en altitud del centro de carga negativa y el movimiento ascendente del centro positivo momentos antes de observar la aparición de una descarga. Por supuesto el centro donde la descarga se origina no necesariamente coincide con el real centro de carga, ya que esta descarga depende del campo eléctrico (y la presión del aire) más que de la carga en si, pero esto no estaría muy lejos.

Mediciones con aviones en tormentas (Weinheimer et al 1988) [10] han reportado que cargas reales en partículas, estan en el rango de -500 a +200 pC con mayoría en el rango de -50 a -30 pC. De acuerdo con estas observaciones, las partículas más cargadas en esta corrida de cinco minutos fueron negativas y de la clase 8 las cuales tenían alrededor de 12 pC. Aviones instrumentados adecuadamente midieron a altas altitudes (10Km) la cargas de partículas y ellos notaron que eran principalmente negativas en vez de ver una neta carga positiva, como es de esperarse a esa altura ya que es el centro positivo. Los resultados de las figuras 5 y 6 muestran la mezcla de signos a esas alturas y que los resultados de estos autores no son contradictorios, ya que los aviones no eran capaces de detectar muy pequeñas partículas y con poca carga (decenas de fentocoulombs), ellos solo median las pocas partículas grandes muy cargadas negativamente.

El hecho de que en 4 min el campo eléctrico es lo suficientemente grande como para iniciar

una descarga asegura que el modelo trabaja satisfactoriamente y que el mecanismo de transferencia de carga por colisiones y fracturas es uno viable. De hecho este es el rango de tiempos observados en mediciones de campo. Los valores pico del campo eléctrico estan entre los centros de carga como es de esperar.

Experimentos moviendo varios parámetros del modelo muestran que el fenómeno de estratificación de la carga producida por el proceso microfísico incluido en el modelo, es altamente estable como sería de esperar por mediciones realizadas.

Referencias

- [1]-Pringle J.E., Orvill H.D. and Stechmann T.D.,(1973) Numerical simulations of atmospheric electricity effects in a cloud model, *J. Geoph. Res.*, **78**, 4508-4514.
- [2]-Takahashi T. (1974) Numerical simulation of warm cloud electricity, *J. Atmos. Sci.*, **31**, 2160-2181.
- [3]-Illingworth A.J. and Lathan J. (1977) Calculations of electric field growth, field structure and charge distributions in thunderstorms, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **103**, 281-295.
- [4]-Rawlins F., (1981) A numerical study of thunderstorm electrification using a three-dimensional model incorporating the ice phase. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **108**, 779-800.
- [5]-Avila E.E. and Caranti G.M. (1992) Laboratory study of static charging by fracture in ice growing by rime. *Proceedings IX International Conference on Atmospheric Electricity*, Leningrado, Russia.
- [6]-Caranti J.M., E.E. Avila and M.A. Ré (1991) Charge transfer during individual collisions in ice growing from vapor deposition. *J. Geoph. Res.* , **96**, D8, 15365-15375.
- [7]-Scavuzzo C.M., Comes R. , Caranti G.M. , (1992) , A simple 3-D numerical cloud model. *J. Comp. Phys. in press*
- [8]-Helsdon, J. H. and Farley, R. D. (1987) A numerical modeling study of a Montana Thunderstorm: 2. Model results versus observations involving electrical aspects. *J. Geoph. Res.*, **92**, 5661-5675.
- [9]-Krehbiel P.R., R. Tennis, M. Brook, E.W. Holmes and R. Comes (1984) An comparative study of the initial sequence of lightning of a small Florida thunderstorm. in *Proceedings VII International Conference on Atmospheric Electricity*, American Meteorological Society, Boston, Mass. 388-393.
- [10]-Weinheimer A. J., Dye, J. E., Breed, D. W. and Marshall T. C. (1988) Simultaneous measurements of the charge, size and shape of hydrometeors *Proceedings VIII International Conference on Atmospheric Electricity*, Uppsala, Sweden, 727-731.

Este trabajo ha sido financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Argentina.