

ESTUDIO DE SENSIBILIDAD EN ZONAS CRITICAS DE UN DIAGRAMA DE CARGADO

M.Pulido*, S.Masuelli, M.Scavuzzo, G.Caranti

Facultad de Matematica Astronomía y Física (FaMAF) Universidad Nacional de Córdoba
Ciudad Universitaria (5000) - Córdoba - Argentina
e-mail: pulido@roble.fis.uncor.edu

Se simula numéricamente la vida de embriones de granizo en una tormenta severa. Trayectoria, crecimiento y cargado son calculados a través de la interacción que tiene el granizo con los campos de la nube (viento, LWC, campo eléctrico, etc). El cargado del granizo se simula a través de colisiones, teniendo en cuenta cargado no-inductivo dado por el diagrama experimental de Saunders. Se analizan las posibles consecuencias que trae aparejado la existencia de los "bolsones" (zonas de cambios abruptos de signo, para bajos contenidos de agua líquida) en el diagrama. Para esto se comparó el cargado y crecimiento de embriones en los casos con y sin bolsones. Se concluye que embriones que en alguna parte de su trayectoria tienen los valores de las variables correspondientes a dichos bolsones sufren cambios notables, no solo desde el punto de vista individual sino en estudios globales de cargado. Se observa una gran influencia del bolsón negativo, que actúa en la etapa inicial del embrión (cristal), elevando la cantidad de graupels con carga positiva; en la zona baja central de la nube. Esto muestra que los bolsones contribuyen a la formación del centro inferior de carga positiva, medido en nubes de tormenta.

The evolution of hailstone embryos in a thunderstorm is simulated numerically. The trajectory, growth and charging are calculated by the coupling these variables have with the cloud fields (wind, LWC, E-field, etc.). The charging of the graupel arises from the collisions with other cloud ice particles following the non inductive diagram by Saunders. The consequences of the charge pockets in the diagram is analyzed by comparing charging and growth of embryos for the cases with and without them. Embrios which have the diagram variables correspondig to the pockets change notably their growth and trajectory. These changes are translated to the global scale of the thunderstorm. The most important influence comes from the negative pocket of the diagram which acts primarily at early stages, increasing the number of graupels with positive charge in the lower center of the cloud contributing to the lower positive charge in thunderclouds.

I. INTRODUCCIÓN

Distintos mecanismos de cargado han sido propuestos para tratar de explicar el cargado que tiene lugar en las nubes de tormentas. El que actualmente cuenta con mayor aceptación es el llamado mecanismo no inductivo (Williams 1995⁽¹⁾), en el cual la separación de cargas se produce al colisionar partículas de hielo que tienen diferencias en su superficie (temperatura, hábitos de crecimiento, etc.). Un gran esfuerzo se ha hecho y se continúa haciendo para determinar las variables que determinan que haya separación de carga y su cuantificación a través de distintas parametrizaciones (Takahashi 1978⁽²⁾, Saunders et al. 1991⁽³⁾). Diversos experimentos indican que el signo de la transferencia de carga para colisiones hielo-hielo dependen esencialmente de dos variables: La temperatura ambiente y el contenido de agua líquida (LWC). En estos momentos, el diagrama de cargado más reciente es el desarrollado por el grupo de investigación de Manchester. Es así como en Saunders et al. 1991⁽³⁾ se reúnen todos los resultados previos y se propone parametrizaciones suceptibles de ser simuladas mediante un modelo numérico.

A los modelos numéricos usados para estudiar las nubes podríamos distinguirlos entre aquellos que

intentan representar las principales características de una nube, como son la dinámica o su estructura eléctrica (Scavuzzo y Caranti 1996⁽⁴⁾, Wang y Chang 1993⁽⁵⁾), y los que estudian lo que les ocurre a las partículas dentro de una nube (Castellano et al. 1992⁽⁶⁾, Pulido et al. 1996⁽⁷⁾). Los segundos permiten una descripción muy detallada de las distintas interacciones y fenómenos en los que intervienen tales partículas. Este tipo de modelos presenta el atractivo extra de que es posible establecer una relación más directa entre las mediciones experimentales, sus parametrizaciones y los resultados numéricos, permitiendo un óptimo chequeo mutuo de estos tres aspectos de la investigación (experimentos, teoría y simulación).

Tal como ya mencionáramos, existen muchas mediciones de laboratorio del mecanismo de cargado no inductivo, habiendo discrepancias entre los diversos grupos de investigación. Uno de las mediciones más controvertidas son las que se realizan a bajo contenido de agua líquida. Hasta el día de hoy, sólo el grupo de Manchester ha medido una estructura muy fina para bajo LWC (ver figura 2), con cambios de signo y magnitud abruptos.

El objetivo de este trabajo es estudiar mediante un modelo de trayectorias individuales las consecuencias

* Autor a quién debe dirigirse la correspondencia.

que trae aparejada la consideración o no de las mediciones a bajo LWC para el diagrama de Saunders et al 1991⁽³⁾, estableciendo si éstas tiene o no influencia en los resultados globales de carga y tamaño de los graupels y en qué zonas.

II. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo numérico utilizado para este estudio es tridimensional, para la misma nube que se usó en Masuelli et al. (1997)⁽⁸⁾. El campo de viento y el campo eléctrico son extraídos de modelos numéricos Scavuzzo and Caranti (1996)⁽⁴⁾. Los campos de viento y eléctricos están dados en un dominio cúbico de 16km de lado, con una resolución regular de 500 m. El eje de la nube en (8.25,8.25)km. Estos datos son utilizados como datos de entrada, los cuales afectarán la trayectoria de las partículas. En fig. 1 se muestra un corte del campo eléctrico y LWC utilizados.

La ecuación de movimiento de la partícula es:

$$m \frac{d^2 \vec{x}_p}{dt^2} = \vec{F}_e + \vec{F}_d + m \vec{g}$$

donde m es la masa de la partícula, F_d es la fuerza de arrastre, g es la aceleración de la gravedad y F_e es la fuerza eléctrica en ese punto.

En el cálculo de la fuerza eléctrica se utilizó la ecuación: $\vec{F} = q\vec{E}(x, y, z)$. Dado que las trayectorias no necesariamente pasan por los puntos de grilla, se usan interpolaciones para todas las variables..

Para el cálculo del cargado se ha tenido en cuenta el mecanismo de colisiones cristal-graupel (partículas mayores a 0.5 mm son consideradas graupel), no inductivo, sin considerar otro tipo de interacciones. Las interacciones son simuladas mediante un espectro discreto que tiene en cuenta 8 categorías de hielo (diámetros de 0.01 mm, 0.03 mm, 0.05 mm, 0.10 mm, 0.25 mm, 0.5 mm, 1.00 mm y mayores a 5.00 mm.)

Para la carga transferida en cada colisión se ha tenido en cuenta el diagrama de cargado de Saunders, cuyo signo depende de ew (contenido de agua líquida efectivo) y T , como se muestra en la fig. 2, para un graupel, signo inverso para cristal, la magnitud también depende de la velocidad relativa de las

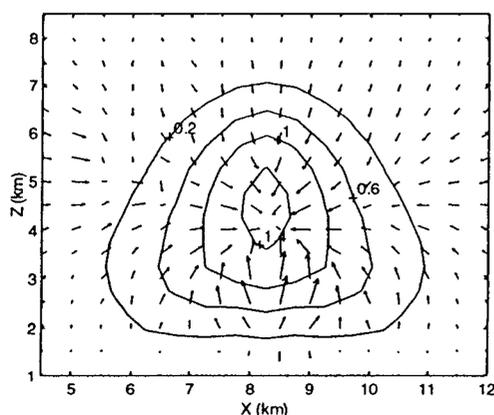


Fig 1. Campos eléctrico y contornos de LWC de la nube utilizada, los contornos están en g/m^3 y el campo máximo es 200 kV/m

partículas y del tamaño del cristal, como en Masuelli et al.(1997)⁽⁸⁾.

Cuando se estudió el caso sin bolsones, las bolsones correspondientes a ew bajos son eliminadas del diagrama (ver figura 2).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizó una corrida general que consistió en largar embriones de 0.25 mm desde 343 posiciones iniciales (una red desde $X, Y \geq 8$ km hasta $X, Y \leq 1$ km, cada 0.5 km para los planos de altura 2.5 a 5 km y 6 km), los cuales evolucionan en la nube hasta que llegan a la isoterma de $0^\circ C$, la información obtenida para cada uno de ellos es, posición, radio, carga, ew y T para cada instante de tiempo (cada 10 s). Los casos estudiados son 2 como ya se mencionó:

Caso A) Diagrama de cargado con bolsones.

Caso B) Diagrama sin los bolsones.

Comparando los casos se observa que, en general las diferencias se pueden clasificar en dos grupos, uno son embriones en los cuales no se observan diferencias mayores al 5%, el otro comportamiento es donde hay diferencias de aproximadamente un factor de 2-4. Las grandes diferencias se manifiestan para los embriones que se largaron en los planos Z de altura media para anillos alrededor del centro de la nube de "ancho" variable entre 0.5 a 2km.

El bolsón que causa estas grandes diferencias es el negativo, debido al tipo de nube estudiado unicelular sin yunque, la mayor parte de la nube ($LWC \gg 0$) se encuentra debajo de la isoterma de $-20^\circ C$ por lo tanto los volúmenes de nube donde están las condiciones de ew y T para que se manifieste cargado en el bolsón negativo son mucho menores con respecto a los volúmenes que corresponden al bolsón positivo, el otro efecto será explicado en la próxima subsección.

Para el estudio detallado, presentaremos los resultados en las siguientes subsecciones casos particulares, diferencias en el crecimiento, comparación casos A y B según posición final y electrificación (cualitativa) de la nube .

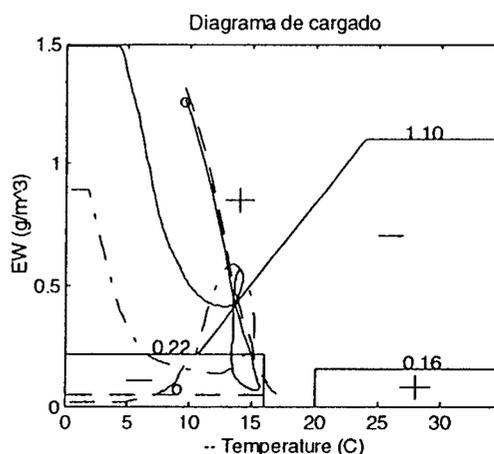


Fig 2 Diagrama de cargado de Saunders, en el cual se observan, el $ew-T$, para cada partícula (sección III).

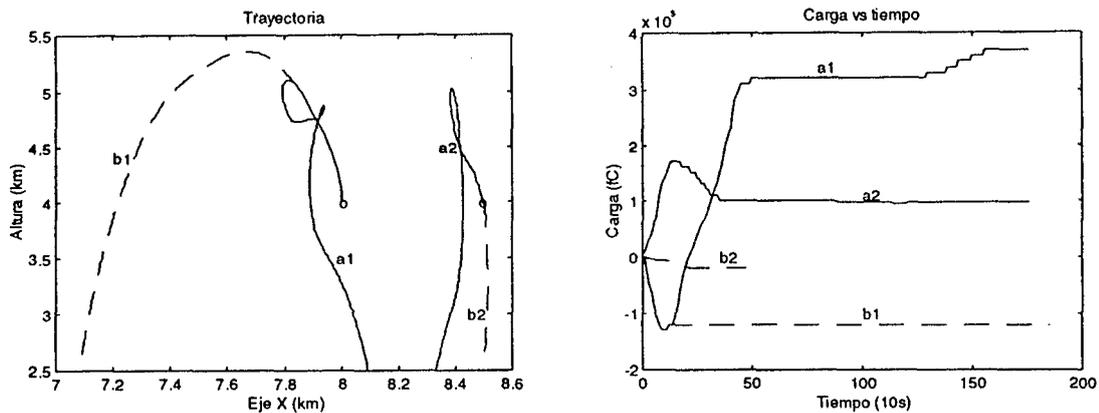


Fig 3 a) Trayectorias de los embriones, largados desde a1, b1 (8.0, 11.0) km y a2, b2, (8.5, 9.5) km. b) Cargado de los graupel en función del tiempo.

a. Casos particulares

Debido a que los embriones que tienen grandes diferencias para los dos casos, manifiestan el mismo tipo de comportamiento, en esta sección se muestran dos corridas típicas, a1, b1, embrión largado desde (8,9.5) km con y sin bolsón respectivamente y el embrión con posición inicial (8.5, 11) km, a2, b2.

En la figura 3a están las trayectorias, de las dos corridas, con grandes diferencias entre ambos casos, para ambas corridas el caso con bolsón, tiene los embriones con mayor crecimiento debido a que sus trayectorias están en el "corazón" de la nube.

1. Análisis del (8.0,11.0) km. Cuando es largado el embrión esta en una zona muy crítica, hay poco viento cerca del centro del vórtice, el campo eléctrico apunta hacia arriba, el caso A hace que el "cristal" (actúa como cristal en la colisión) se cargue positivo, nos encontramos en el bolsón negativo (0.17 g/m^3 y -3 C) la fuerza eléctrica apunta hacia arriba y hacia adentro, metiéndolo en el updraft (corriente ascendente), como no alcanza a llegar al centro las corrientes divergentes lo expulsan nuevamente, en la última parte es llevado hacia el centro de la nube en un efecto conjunto de viento y campo eléctrico. (Ver figuras 1, 2 y 3)

2. Embrión (8.5, 9.5) km. Las corrientes divergentes lo llevan hacia afuera, por lo cual el ew viene disminuyendo hasta entrar al bolsón negativo, como es un cristal se empieza a cargar positivo, cambiando el signo de la carga y por lo tanto el sentido de la fuerza eléctrica, que comienza a ser hacia adentro y hacia abajo (caso A), logrando cambiar el signo de la velocidad horizontal y vertical por lo cual entra al

updraft nuevamente y permanece en él hasta caer, hay un tiempo con velocidad vertical muy pequeña al haber cambiado de signo el campo eléctrico vertical (4.5 km de altura). Mientras el caso B al no cambiar de signo la carga, campo de viento y eléctrico lo sacan del corazón de la nube. (Ver figuras 1, 2 y 3).

b. Estudio global de las diferencias en el crecimiento

Con el fin de cuantificar globalmente las diferencias en el crecimiento que producen los dos casos, se presentan en las tablas 1 y 2 un análisis para todos los embriones que parten de un plano Z, el radio medio final, tiempo de "vida" (en llegar a la isoterma $0 \text{ }^\circ\text{C}$), el radio máximo obtenido de los embriones del plano y el tiempo de vida de este embrión. Además figura el parámetro HPR, definido por Xu(1983)⁽⁹⁾, como el porcentaje de los embriones largados desde una altura que alcanzan a superar un dado tamaño, clasificados en radios >0.5 , >1.0 y >2.0 mm. La comparación con respecto a posiciones iniciales está justificada por lo que se mencionó en la subsección anterior, que son las posiciones en los primeros instantes del embrión las que marcan la diferencia entre ambos casos.

Las diferencias más notables están en los planos centrales (3.5,4.0,4.5 y 5.0 km). En el plano 4.0 km, se obtiene el máximo, con diferencia relativa en el radio medio de 242% (un factor de 3.4) y por ejemplo el 65% de las partículas en el caso A crecen más de 1 mm, mientras en el caso B, no hay ninguna que alcance el mm.

CASO CON BOLSONES

Z ₀ (km)	HPR(.5)	HPR(1)	HPR(2)	R _{f max}	t _{f max}	R _{med}	t _{med}
2.5	0.71	0.71	0.71	5.42	920	2.858	747
3.0	0.63	0.59	0.39	4.65	1760	1.603	800
3.5	0.82	0.22	0.08	3.36	2800	0.910	1037
4.0	0.84	0.67	0.16	2.49	1750	1.300	1791
4.5	0.65	0.49	0.22	2.39	1970	1.155	1667
5.0	0.65	0.47	0.32	3.18	2790	1.241	1682
6.0	0.08	0.02	0.02	3.49	3800	0.391	1430

Tabla 1 Resultados de un plano X Y para varios valores de Z₀ los radios están en mm y el tiempo en segundos.

CASO SIN BOLSONES

Z ₀ (km)	HPR(.5)	HPR(1)	HPR(2)	R _{r max}	t _{r max}	R _{med}	t _{med}
2.5	0.71	0.71	0.71	5.42	920	2.797	747
3.0	0.57	0.53	0.35	4.65	1760	1.409	661
3.5	0.49	0.00	0.00	0.87	1730	0.471	595
4.0	0.16	0.00	0.00	0.78	1930	0.380	932
4.5	0.26	0.10	0.10	3.60	2570	0.625	1323
5.0	0.26	0.10	0.10	3.70	2800	0.652	1438
6.0	0.02	0.02	0.02	3.45	3800	0.391	1439

Tabla 2 Resultados de un plano X Y para varios valores de Z₀ los radios estan en mm y el tiempo en segundos.

c. Comparación casos A y B según posición final

Para 3 distancias al centro (<0.75, 0.75-1.50, >1.50 km), en el gráfico 5 está el radio medio, de todos los embriones que caen en la región. En el segundo gráfico estan los mismos casos, considerando la cantidad de partículas con cargas de un dado signo.

A pesar que las partículas en el caso A crecen más, en los dos primeros anillos, como hay una gran convergencia de partículas, las cuales en el caso B van a parar al anillo externo, esto hace que el radio medio sea menor, B tiene pocas partículas grandes (radio medio alto). La media de A disminuye, pero aumenta la cantidad de agua que “cae” en esta zona, esto se puede corroborar con las tablas de la sección anterior o teniendo en cuenta la cantidad de partículas figura 5 b).

Con respecto a la carga en la figura 5b) en la región central practicamente no hay cargas en el caso B. Los bolsones hacen que aumente en gran medida la cantidad de carga positiva, de esta manera hay un indicio de que el bolsón negativo, esta contribuyendo a formar el polo positivo bajo, además como se puede deducir de lo ya mencionado para los radios, los casos positivos sin bolsón son extremadamente críticos, graupel muy grandes, muy cargados y viven en una región concentrada alrededor del eje de la nube (adentro del updraft) mientras los casos con bolsón son casos que son externos o cercanos al updraft cuando

son embriones y por la influencia eléctrica y dinámica van a parar a zonas centrales bajas. Esto aumenta la probabilidad de los embriones con diferencias que van a parar a zonas centrales.

d. Diferencias en la electrificación de la nube

La electricación de este modelo para el diagrama de cargado ya ha sido estudiado en un trabajo anterior (Masuelli et al. 1997⁽⁸⁾), por lo tanto ahora solo describiremos las diferencias, para esto se dividió a la nube en 6 regiones (distancias menores a 1.25 km y mayores a esta y para alturas menores a 4 km, entre 4 y 5.5 km, y mayores a 5.5 km) para cada región se cuenta la cantidad de partículas que hay según la siguiente clasificación radios chicos <1mm, medios entre 1-3mm y grandes mayores a 3 mm. Las diferencias mas notables (fig. 6) están en las regiones 4, 5 y 6. Las diferencias son sistemáticas, donde la cantidad de cargas positivas son mayores y menores las negativas en el caso con bolsón. Siendo de influencia positiva para la formación del polo positivo inferior lo observado en las regiones 5 y 6 (recordar también fig. 5). La cantidad de cargas positivas en la región 4 (donde debería estar el polo negativo), no es una buena tendencia, pero teniendo en cuenta que esta región es donde “nacen” los embriones con diferencias, la cantidad de carga que poseen debería ser pequeña e influir poco en el cargado de esta zona.

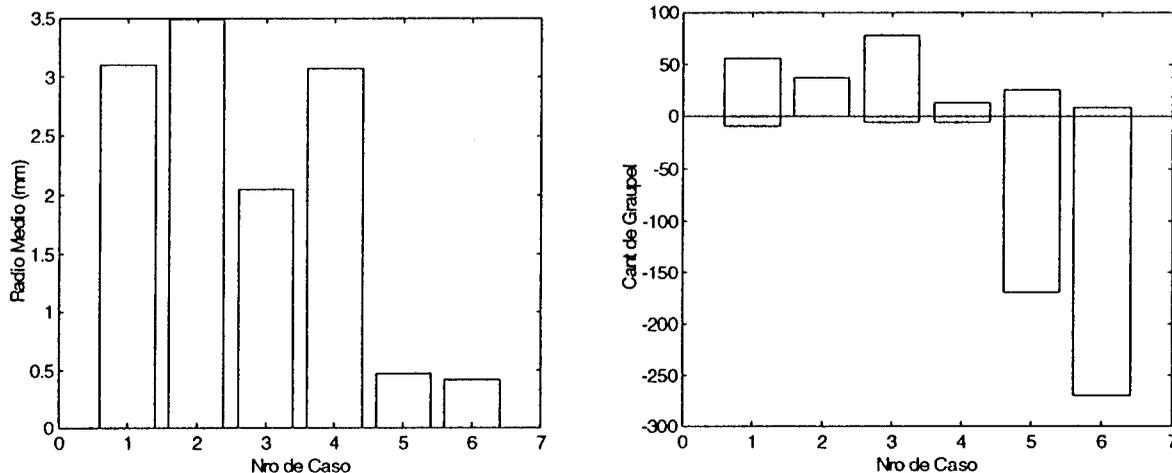


Fig 5. a) Comparación de los radios medios que alcanzan la región anular menor a 0.75 km en la columna 1, entre 0.75 y 1.50 km columna 3 y distancias al centro mayores a 1.5 km en la columna 5 para el caso con bolsón, para el caso sin bolsón en el mismo orden columnas 2, 4 y 6. b) Comparación de la cantidad de graupel que alcanzan las regiones mencionadas en a), con cargas de un dado signo(columnas superiores cargas positivas, columnas inferiores cargas negativas).

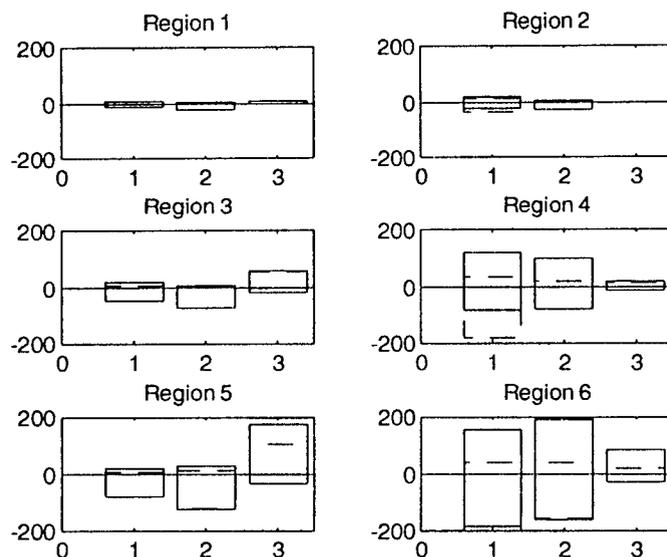


Figura 6. Número de partículas total que pasaron por la región en cuestión, ordenadas de altura máxima a a mínimas, izquierda región central, derecha región periférica, en cada columna se dividen por sus radios, columnas 1, 2 y 3 en radio creciente y por su signo positivas arriba y negativas abajo del eje. Líneas continuas corresponde al caso a y a trazos caso b.

IV. CONCLUSIONES

Se ha demostrado que la existencia de los bolsones tiene grandes consecuencias para el cargado de los embriones y a través de este con la trayectoria y el crecimiento del granizo. Estas consecuencias se observan no solo en casos particulares sino en grandes regiones de la nube, las cuales influyen en estudios globales de crecimiento y cargado.

Este rol predominante del bolsón negativo en particular se observa en la etapa inicial del embrión cuando puede ser considerado un cristal en los choques con otras partículas, haciendo que una partícula pueda cargarse positiva en el bolsón, crece y cuando es graupel continua con el cargado positivo, debido a que se encuentra en el diagrama en zonas arriba de la temperatura crítica, mientras en el caso sin bolsones el cargado es negativo y debido a la interacción con la dinámica a través de la fuerza eléctrica (la cual apunta hacia abajo) la partícula cae rápidamente.

Cuando la partícula se encuentra con ew y T correspondientes a los bolsones en la etapa madura, no se producen cambios de signo en la carga (las diferencias en el cargado son muy pequeñas), por lo cual no hay variaciones apreciables debido a la existencia de los bolsones.

El bolsón positivo en este modelo de nube tiene muy pocas consecuencias debido a que en primera medida son muy pocos los casos en los cuales la partícula tiene ew y T correspondientes a este bolsón, modelos con mayor cantidad de ew , o con yunque harían que el rol del bolsón positivo sea más importante. De todas maneras al no haber una zona de temperatura crítica "cercana" a este bolsón, es probable que no haya grandes diferencias cualitativas, como las corridas que

hay en este estudio, no mostradas pero se puede observar en la tabla 1 y 2, por ejemplo, algunos granizos que parten del plano $Z=6\text{km}$, pasan por el bolsón positivo, sin manifestar consecuencias en el crecimiento, ni en el cargado (ver región 1 y 2 de la fig 6).

Por último, es de importancia lo observado en la fig. 5b, donde podemos notar el rol que tiene el bolsón negativo en hacer converger partículas hacia zonas bajas y centrales, con carga positiva, lo cual contribuiría a la formación del polo positivo bajo.

Estos resultados resaltan la necesidad de realizar un nuevo conjunto de mediciones con las condiciones necesarias para transferencias de carga en los bolsones, para corroborar a estos, y también le dan importancia, a la hora de tratar de simular con este tipo de diagramas las distribuciones de carga en la nube.

Referencias

- 1 - Williams, E. R., J. Geophys. Res., **100**, 1503-1505(1995).
- 2 - Takahashi T., J. Atmos. Sci., **35**, 1536-1548(1978).
- 3 - Saunders C.P.R., Keith W.D. and Mitzewa R.P., J. Geophys. Res., **96**, 11007-11017(1991).
- 4 - Scavuzzo C.M. and Caranti J.M., J. Atmos. Sci., **53/2**, 349-358(1996).
- 5 - Wang C., and Chang J.S., J. Geophys. Res., **98**, 14827-14844(1993).
- 6 - Castellano N.E., Scavuzzo C.M., Nasello O., Caranti J.M., Levi L, Atmos. Res., **33**, 309-331(1994).
- 7 - Pulido M., Masuelli S., Scavuzzo M., Caranti G., Anales AFA, en prensa(1996).
- 8 - Masuelli S., Pulido M., Scavuzzo M., Caranti G., Q. J. R. Meteorol. Soc., en prensa(1997).
- 9 - Xu J., J. Atmos. Sci., **40**, 185-203(1983).