

Algunos resultados del análisis de la efectividad de la siembra operativa del NOE-87 en Camagüey*

**Félix GAMBOA ROMERO
y **Roberto AROCHE RAMIREZ

RESUMEN. Usando la lámina de precipitación estimada por el radar MRL-5, se comparan la zona sembrada y la zona de control en cinco esquemas, diferentes. Se discute gráfica y analíticamente sobre la existencia de diferencias entre ambas zonas, incluso cuando la comparación se acomete estratificando la muestra según las condiciones meteorológicas predominantes.

INTRODUCCION

En el contexto del experimento científico operativo (NOE-87), que tuvo lugar en el Polígono Meteorológico de Camagüey (PMC) en 1987, año de intensa sequía en este territorio, se realizaron siembras operativas con el objetivo de incrementar las precipitaciones. Para intentar conocer si se logró tal propósito, tendremos necesariamente que abordar aspectos vinculados a la evaluación de siembras operativas, tarea difícil por el carácter no aleatorio de las mismas y la gran variabilidad natural espacio-temporal de las precipitaciones, así como también por el costo de la toma de información y la metodología que se adopte, dificultades éstas que han conducido a que actualmente exista poca bibliografía sobre esta temática. En la actualidad prácticamente no se aborda la evaluación de este

tipo de trabajo, adquiriendo una gran importancia las consideraciones cualitativas de los usuarios.

No obstante las dificultades expuestas anteriormente, muchos científicos, atendiendo a la necesidad de cuantificar económicamente gastos y ganancias involucradas en esta actividad, han tratado de una forma u otra de evaluar los posibles efectos de la siembra, particularmente en los experimentos, utilizando métodos estadísticos, físicos y físico-estadístico, (Xaikin *et al.*, 1987).

En Cuba existen algunos antecedentes en el campo de la evaluación de los efectos de

*Manuscrito aprobado en marzo de 1992.

**Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba.

siembra, particularmente en las campañas de lluvias provocadas. Se disponen de informes científico-técnicos sobre evaluaciones de las campañas de los años 1986 y 1987 en el territorio oriental de nuestro país y de la campaña de 1987 en Camagüey (Aroche *et al.*, 1988; Ruíz *et al.*, 1989).

En el año 1988 se manifiesta determinada evolución en esta temática; se incluye la información de radiolocalización (Batista, 1988) donde se usó la razón matemática entre la lámina acumulada en la zona sembrada (ZS) y la zona de control (ZC) como método comparativo fundamental, estratifi-

cando la información en cinco esquemas diferentes.

Mazin (1983) plantea que los procesos que tienen lugar en los *cúmulos congestos* y *cúmulos nimbos* se consideran estacionarios en un intervalo de 10 a 15 min. Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto y las recomendaciones de Batista (1988) de usar la lámina de precipitación (LP) decidimos acometer el mejoramiento de la metodología usada por éste, cuyos aspectos fundamentales se discuten en el presente trabajo.

MATERIALES Y METODOS

La información primaria discutida en este trabajo es una complementación de la que se discutió en el informe científico de Batista (1988). Se usaron los datos comprendidos del 14 de junio al 28 de octubre de 1987. En el estudio que nos ocupa se emplean procedimientos que difieren en cierta manera de los empleados por Batista (1988) pero que tienen mucho en común. Veamos los aspectos principales:

Se comparan las láminas medias de precipitaciones de la ZS (LPs) con las láminas medias de la ZC (LPc). Todas las zonas ocupan un área de 36 y 48 km², según la cantidad de siembras efectuadas, ejemplo: cuando se siembra una burbuja en un sistema nuboso o en una nube multicelular se adopta la primera, para la siembra de más de una burbuja en la que su cercanía no permita separarlas en áreas de 36 km² se escoge como tamaño de las mismas 48 km². No se consideraron en la muestra todas las nubes multicelulares cuyo tiempo de vida después de la siembra fue inferior a 30 min.

Teniendo en cuenta el movimiento y/o propagación de la nubosidad y adoptando

como punto de referencia el centro de la ZS, la ZC se determinó en dependencia de cinco esquemas diferentes (Figs. 1-5).

Esquema 1. Este considera a la ZS al centro y todas las zonas contiguas se utilizan como ZC por lo que en éste la lámina que caracteriza la ZC se analiza como:

$$LC_1 = \left(\sum_{C=1}^N LPc \right) / N$$

donde N=1; 2...8.

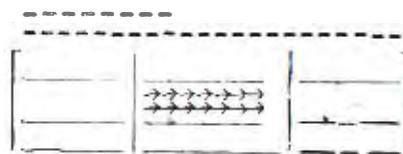


Fig. 1. Esquema 1. ← indica el movimiento de la nubosidad estudiada.

Este presupone la misma probabilidad de movimiento y/o propagación de la nubosidad en todas las direcciones, de manera tal que con él se atenúan las diferencias de las LP entre las áreas, dadas por otros factores.

Esquema 2. Se considera como ZC las dos zonas contiguas a la ZS con relación

a la dirección del movimiento y/o propagación de la nube (Fig. 2):

$$LC_2 = (\sum_{C=1}^2 LPc)/2$$



Fig. 2. Esquema 2. ← idem Fig. 1.

Esquema 3. Posee las mismas características del anterior, pero las zonas escogidas para el control están perpendicularmente dispuestas al sentido del movimiento y/o propagación de la nube (Fig. 3).

$$LC_3 = (\sum_{C=1} LPc)/2$$



Fig. 3. Esquema 3. ← idem Fig. 1.

Esquema 4. Posee el mismo sistema de orientación del esquema 2, pero en este caso se contempla la zona contigua a la ZS que está delante de la misma con relación al movimiento y/o propagación de la nube (Fig. 4):

$$LC_4 = LPc$$

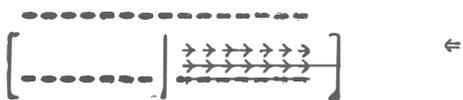


Fig. 4. Esquema 4. ← idem Fig. 1.

Esquema 5. Posee el mismo sistema de orientación del esquema 4, pero la ZC está detrás de la ZS (Fig. 5):

$$LC_5 = LPc$$



Fig. 5. Esquema 5. ← idem Fig. 1.

Los cálculos de la lámina de precipitación (LP) se efectúan cada 5 min y se analizan desde cuatro puntos de vista diferentes:

Primero: se observa el comportamiento de ésta cada 15 min desde 15 min antes de la siembra (la magnitud de dicha lámina se hace corresponder en los gráficos al tiempo 0 min) hasta la desaparición del radioeco del campo de precipitación en la ZS o en último caso 75 min después de efectuar la siembra. En la muestra sólo se incluyó aquel caso para el cual la lámina de precipitación correspondiente a $t=0$ min en la ZS era diferente de cero.

Segundo: Se realizó un análisis de correlación lineal entre las LP^s y LP^c para los diferentes esquemas, con el objetivo de precisar la correspondencia entre dichas láminas a través del período que se analiza.

Tercero: teniendo en cuenta las peculiaridades estadísticas entre las LP y la existencia de correlación entre las ZS y ZC (Tabla 2) decidimos aplicar la prueba estadística de rangos señalados y pares igualados de Wilcoxon.

Cuarto: Se estratifico por separado la información correspondiente al esquema 1. Teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas predominantes (CM). Estas se estratificaron según la clasificación propuesta por Burlutski (1973) con algunas consideraciones tanto de los sistemas sinópticos, como sus características con relación al PMC. En la señalada clasificación se indican cuatro tipos de situaciones:

1. Zonas de altas presiones asociadas a la cuña o parte central del anticiclón de Las Azores (CM1).
2. Débiles altas presiones en la periferia SW del anticiclón de Las Azores (CM2).
3. Zonas de bajas presiones (CM3).
4. Vaguadas u ondas en el SW del anticiclón de Las Bermudas (CM4).

ANALISIS Y DISCUSION DE LOS RESULTADOS

Comportamiento de las láminas medias de precipitación (LP) para las ZS y ZC
 Para facilitar la interpretación de la in-

formación decidimos abordarla por separado.
 En las Figs. 6 y 7 se ilustran las LPs y LPc respectivamente.

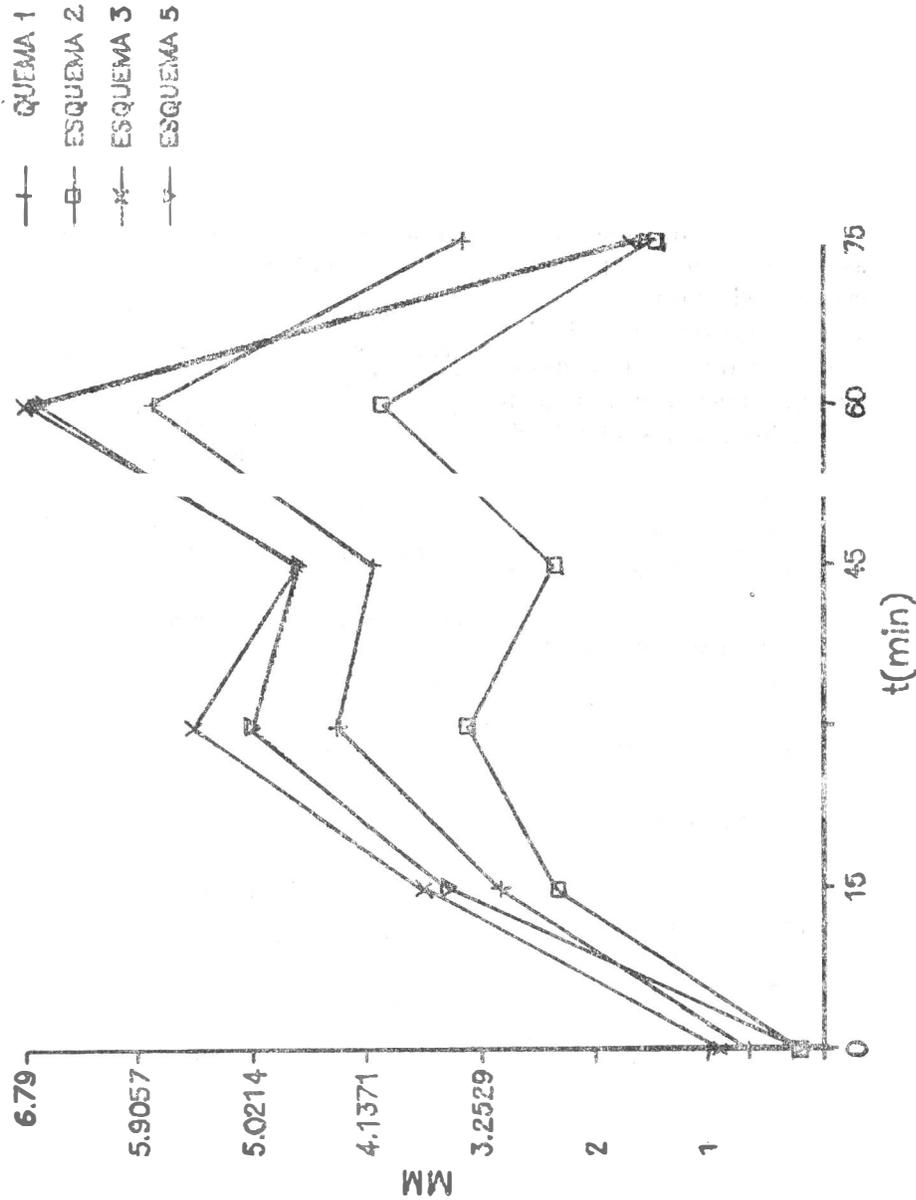


Fig. 6. Curso tem o al L en los último 15 min. El tiem o de r erencia ==0 es la hor de la siembra.

En la Fig. 6, a pesar de ser desiguales (Tabla 1), se observan características generales: las cantidades de casos para cada esquema

TABLA 1. Cantidad de casos considerados en cada esquema referidos al tiempo final (en min) de cada intervalo.

Tiempo	Esquema 1	Esquema 2	Esquema 3	Esquema 5
00	41	27	31	33
15	42	30	30	35
30	40	30	29	34
45	35	27	27	30
60	29	21	22	24
75	20	6	15	17

- Las curvas muestran una inclinación positiva de más de 60° en los primeros 15 min después de la siembra.
- Todas presentan su máximo principal 1 hora después de efectuada la siembra.
- Todos los esquemas muestran una pendiente negativa en los últimos 15 min de estudio.
- Todas las curvas poseen un máximo secundario 30 min después de sembrar. Realizando el mismo análisis con la Fig. 7 obtendremos:

- En los primeros 15 min después de sembrar, exceptuando las curvas de los esquemas 1 y 5 ninguna tiene inclinación similar a las que se presentan en la Fig. 6.
- Los máximos principales de todos los esquemas coinciden en tiempo con los de las zonas sembradas.
- Resulta significativo que ninguna curva tiene máximo secundario evidente exceptuando el esquema 5.

Teniendo en consideración que las curvas de la Fig. 7 representan el comportamiento natural de la lámina de precipitación para cada esquema y que la Fig. 6 es representativa de la ZS, pudiéramos asumir que esta diferencia en el carácter de distribución de ambas curvas puede estar asociada al posible efecto de siembra, así como las diferencias en magnitudes.

Peculiaridades de la LP para cada esquema de comparación

En las Figs. 8; 9; 10; y 11 donde se representan separadas por esquemas las LPs y LPc, obsérvese que en la primera hora después de la influencia, la diferencia entre las magnitudes de la LPs y LPc es positiva.

Si quisiéramos asumir como un índice del estadio del desarrollo de la nubosidad, el carácter de la distribución de la LP asociada a ésta, podríamos considerar que la diferencia de estadio de desarrollo entre la ZS y la ZC no es tan marcada como para no poder acometer un análisis comparativo de las mismas.

No se abordaron los resultados del esquema 4 porque al menos linealmente la correlación entre las LP^s y LP^c del referido esquema fue muy baja (Tabla 2).

Los resultados de la prueba de Wilcoxon (Tabla 3a y 3b) para diferentes intervalos de tiempo indican que antes de la siembra todos los esquemas analizados presentan una probabilidad (dada en %) de que las variables LP^s y LP^c sean iguales, desde 1,14 en el esquema 3 hasta el 3,3.10 en el esquema 2. Obsérvese que en el esquema 1 los primeros 45 min después de sembrar la probabilidad de que se cumpla $H_0 \leq 6,27 \cdot 10^{-3}$, mientras que en ese mismo intervalo de los demás esquemas H_0 es menor o igual

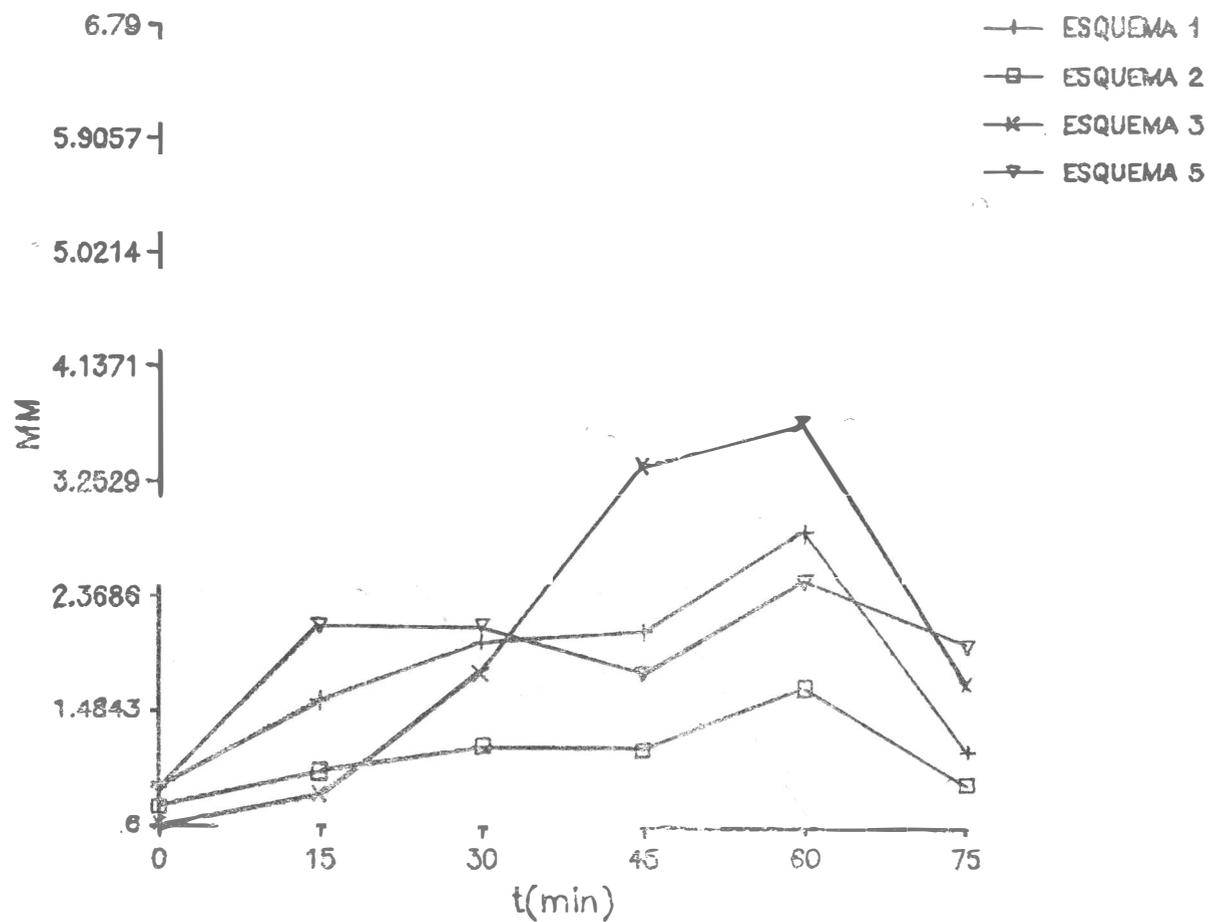


Fig. 7. Curso temporal LPC en los últimos 15 min. $t=0$ idem a la Fig. 6.

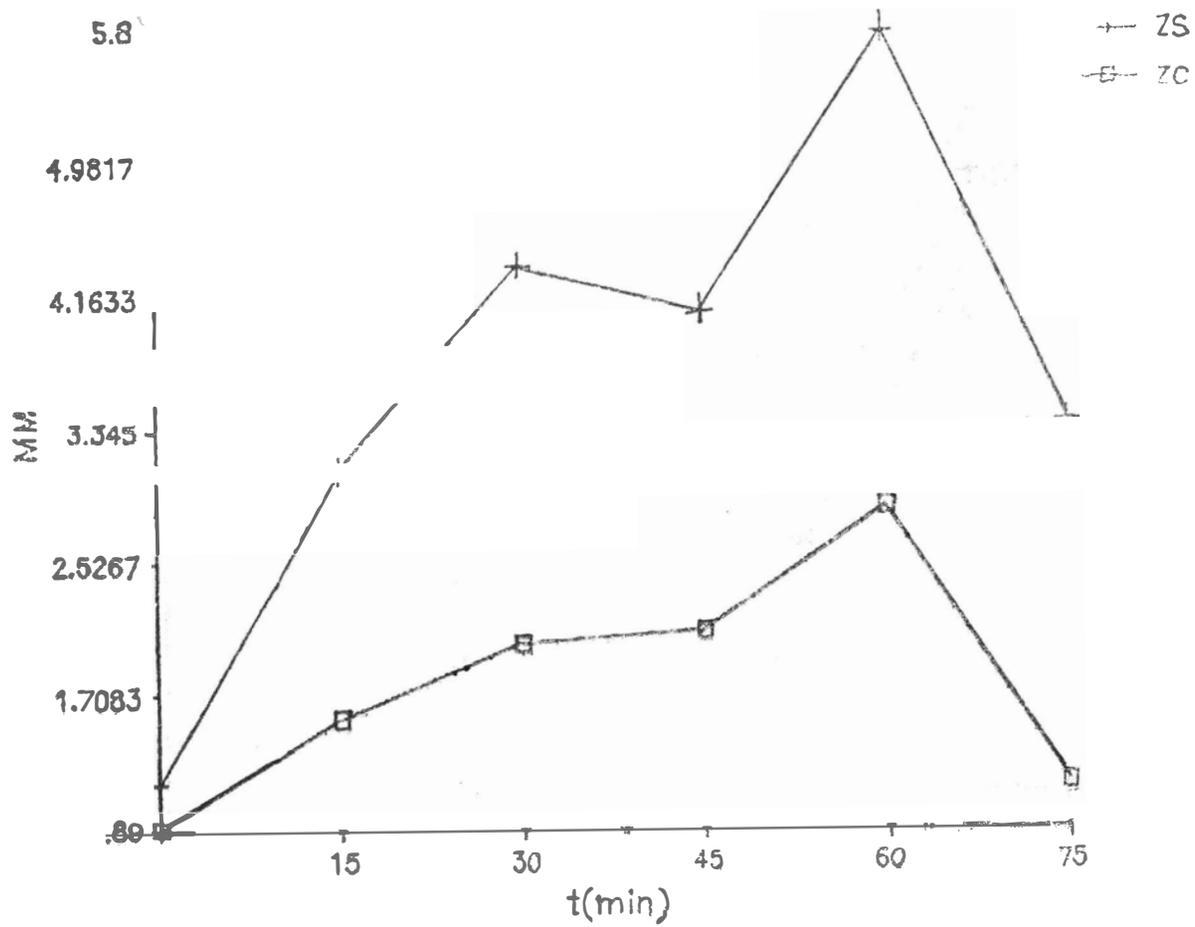


Fig. 8. Esquema 1. Curso temporal LP en las ZS y ZC en los últimos 15 min; $t=0$ ídem a la Fig. 6.

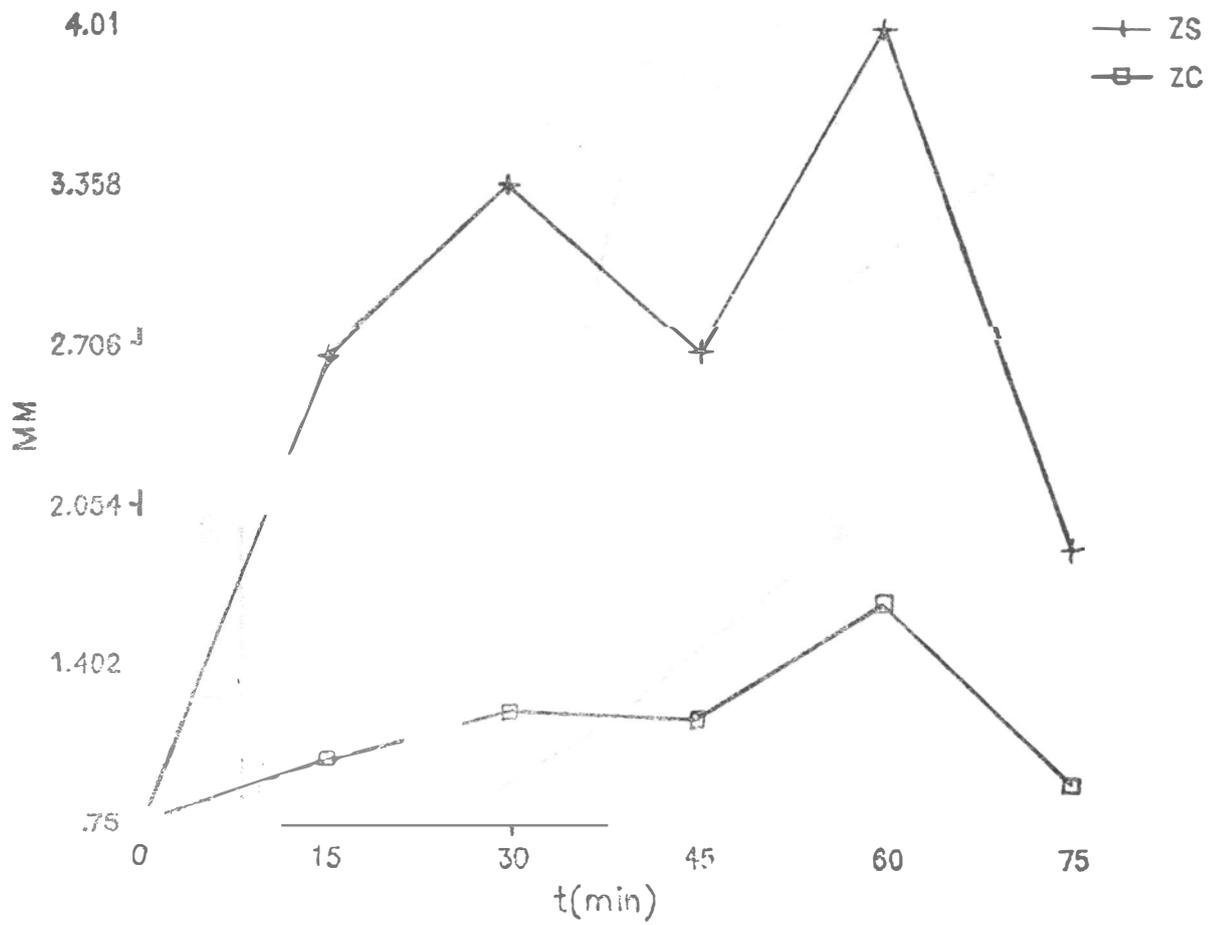


Fig. 9. Esquema 2. Curso temporal LP de las ZS y ZC en los últimos 15 min; t=0 ídem a la Fig. 6.

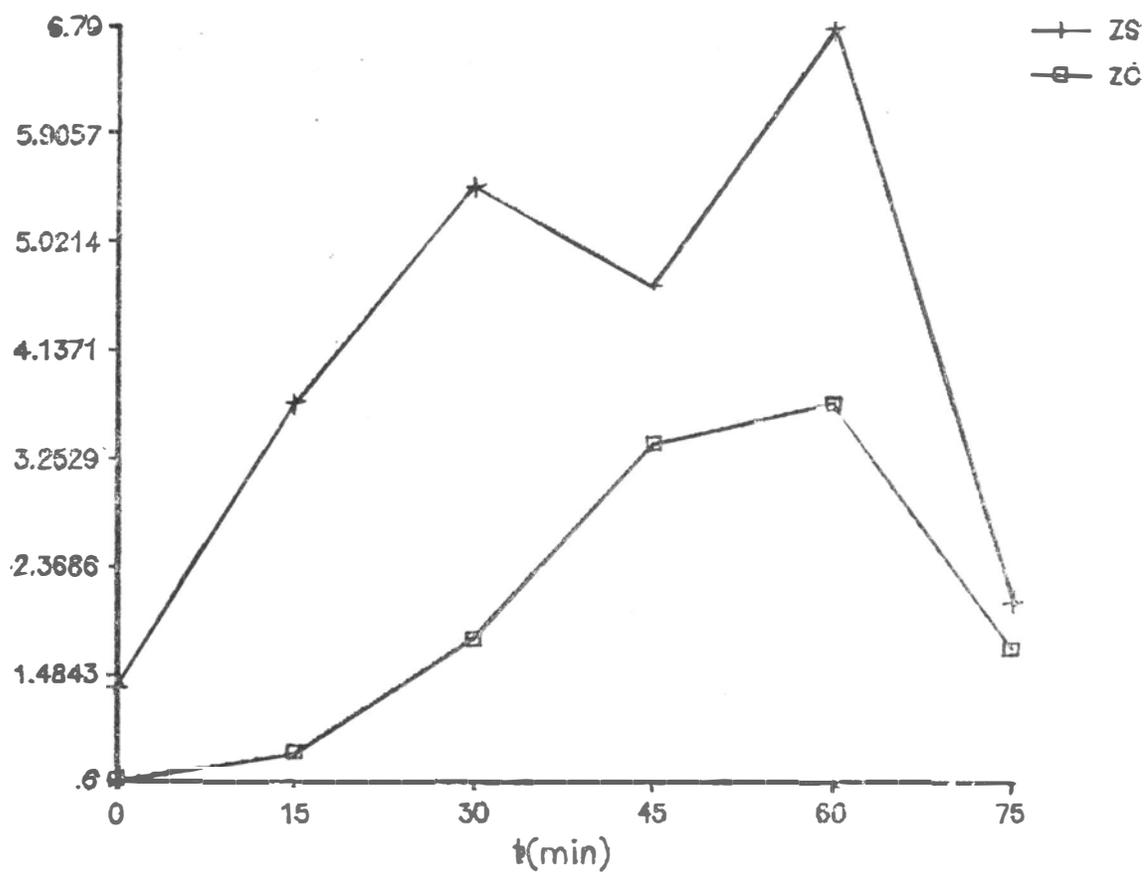


Fig. 10. Esquema 3. Curso temporal LP de las ZS y ZC en los últimos 15 min; $t=0$ idem a la Fig. 6.

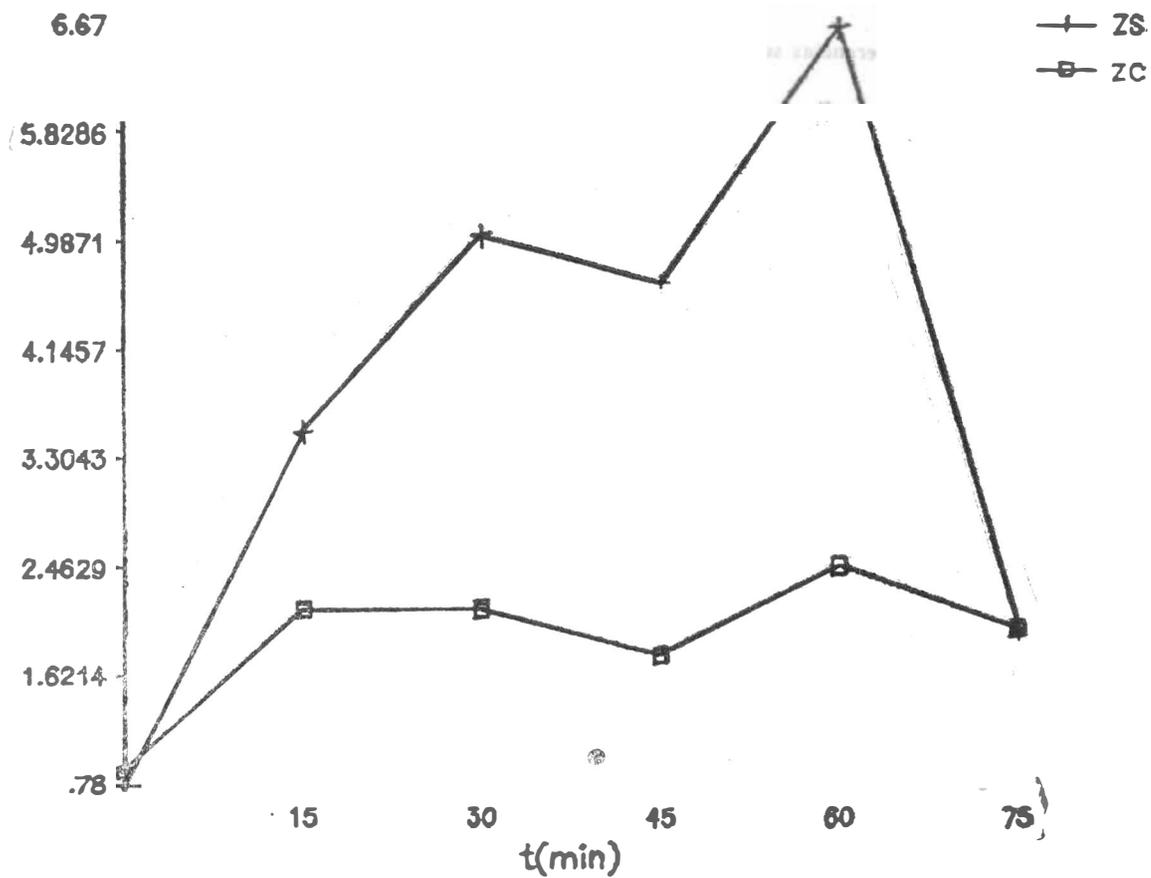


Fig. 11. Esquema 5. Curso temporal LP de las ZS y ZC en los últimos 15 min; $t=0$ ídem a la Fig. 6.

TABLA 2. Resultados del análisis de correlación lineal entre las zonas ZS y las ZC por esquemas

Esquemas	Coef. de correlaciones
1	0.8559
2	0.7558
3	0.6752
4	0.3166
5	0.7245

a $4.26 \cdot 10^{-1}$. Las diferencias son de un orden o más.

TABLA 3a. Resultados de la prueba estadística de rangos señalados y pares igualados de Wilcoxon.

Esquema	Tiempo	Probabilidades (%)
1	0	2,9
	15	1,07 E-04
	30	6,27 E-03
	45	6,80 E-03
	60	5,46 E-03
	75	2,09
2	0	33,0
	15	2,27 E-01
	30	1,03 E-01
	45	7,9 E-02
	60	3,1
	75	17,0

TABLA 3b. Continuación de los resultados de la prueba de Wilcoxon.

Esquema	Tiempo	Probabilidades (%)
3	00	1,14
	15	7,12 E-02
	30	4,26 E-01
	45	26,0
	60	2,5
	75	19,0
5	00	9,23
	15	1,43 E-01
	30	2,11 E-03
	45	3,85 E-02
	60	1,3 E-01
	75	4,4

Estratificación de la información en dependencia de las condiciones meteorológicas

La campaña operativa de 1987 transcurrió prácticamente con simultaneidad al NOE-87, durante el cual los días de vuelos experimentales estuvieron en más de 85% de los casos (Aroche *et al.*, 1990) bajo la influencia de ondas del Este en interacción, preferentemente, con sistemas anticiclónicos. Lo anteriormente expuesto fue corroborado al caracterizar las condiciones meteorológicas en el presente trabajo donde se obtuvo que las más frecuentes fueron las CM2 y CM4 (Figs. 12 y 13 respectivamente).

Teniendo en consideración los resultados ofrecidos por la información abordada de cada uno de los esquemas analizados, estratificamos los datos que se utilizaron en el esquema 1 porque a nuestro juicio es el más confiable debido a que tiene el mayor número de casos, la mejor correlación (Tabla 2) entre las ZS y ZC, la mayor compensación de la diferencia en el estadio de desarrollo de las ZS y ZC y de la diferencia de la posición de las zonas abordadas con relación a la propagación de la nubosidad.

Sólo pudimos clasificar 40 zonas (Tablas 4 y 5). Dicha información está representada en la Fig. 14 donde se ven las curvas de las ZS y ZC para ambas situaciones meteorológicas, ello da la posibilidad de comparar la LP^S y LP^C correspondientes de las CM2 y CM4 (LP^SE1CM2 y LP^CE1CM2 LP^SE1CM4 y LP^CE1CM4 respectivamente); en ésta se puede observar:

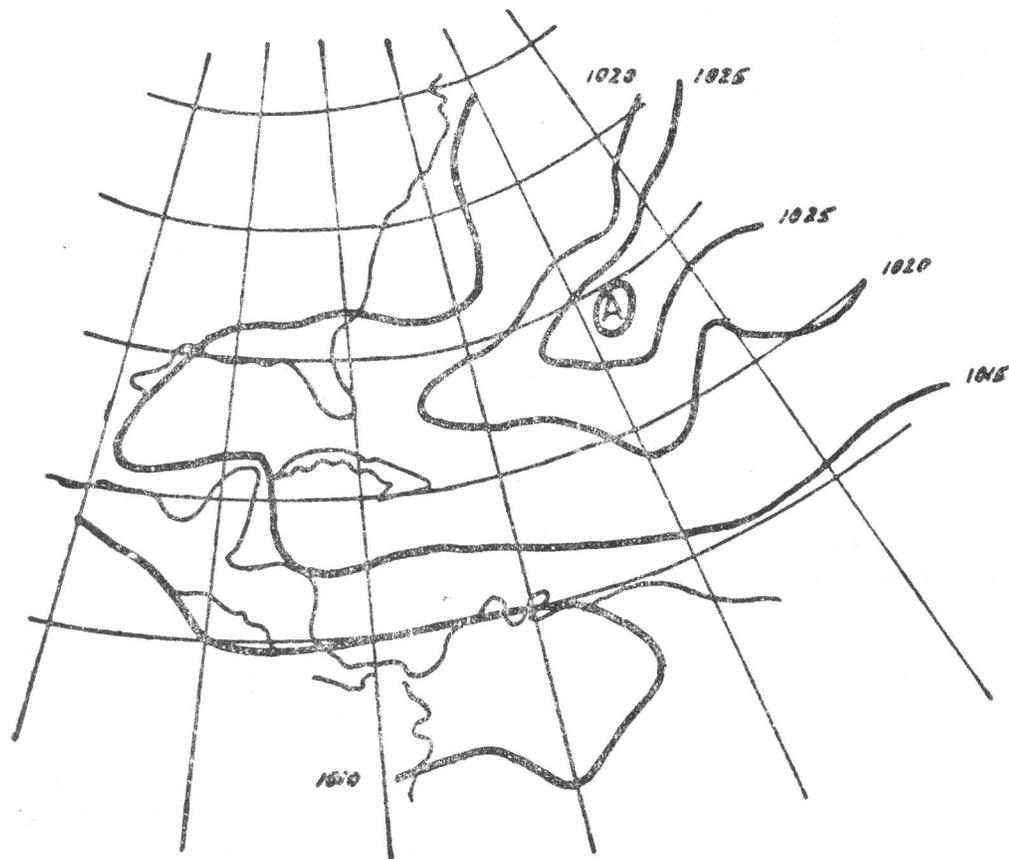


Fig. 12. Débiles altas presiones (CM2).

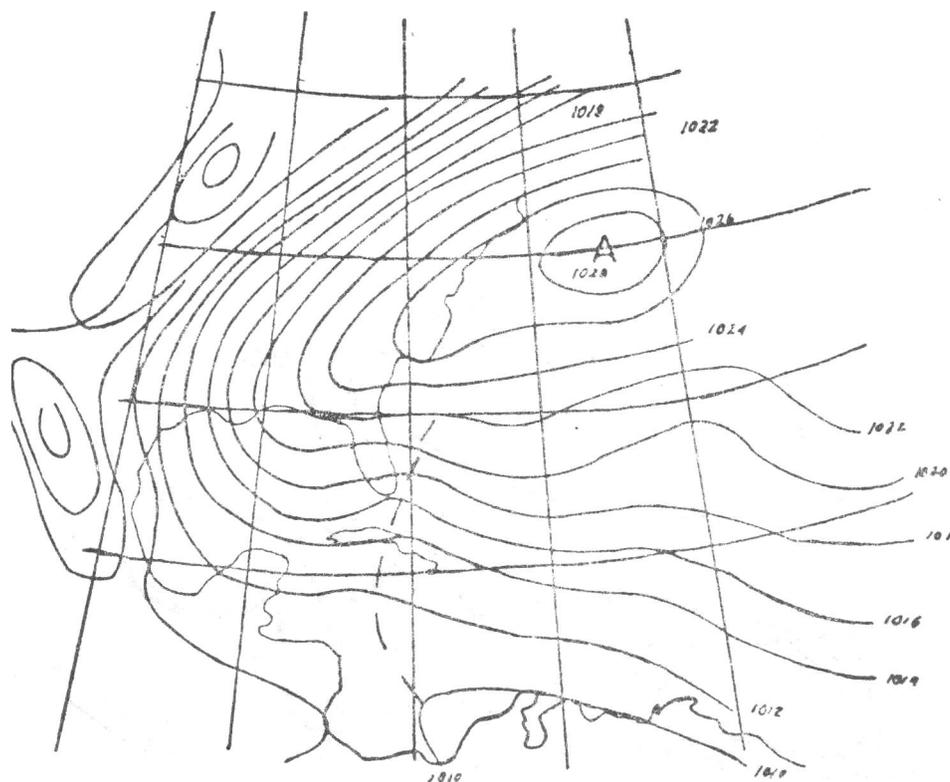


Fig. 13. Vaguada en el SW del anticiclón de las Bermudas (CM4) últimos 15 min; $t=0$ ídem a la Fig. 6.

TABLA 4. Cantidad de casos analizados según la condición meteorológica imperante (CM)

Condición Meteorológica	Esquema I
	7
2	17
3	2
4	14

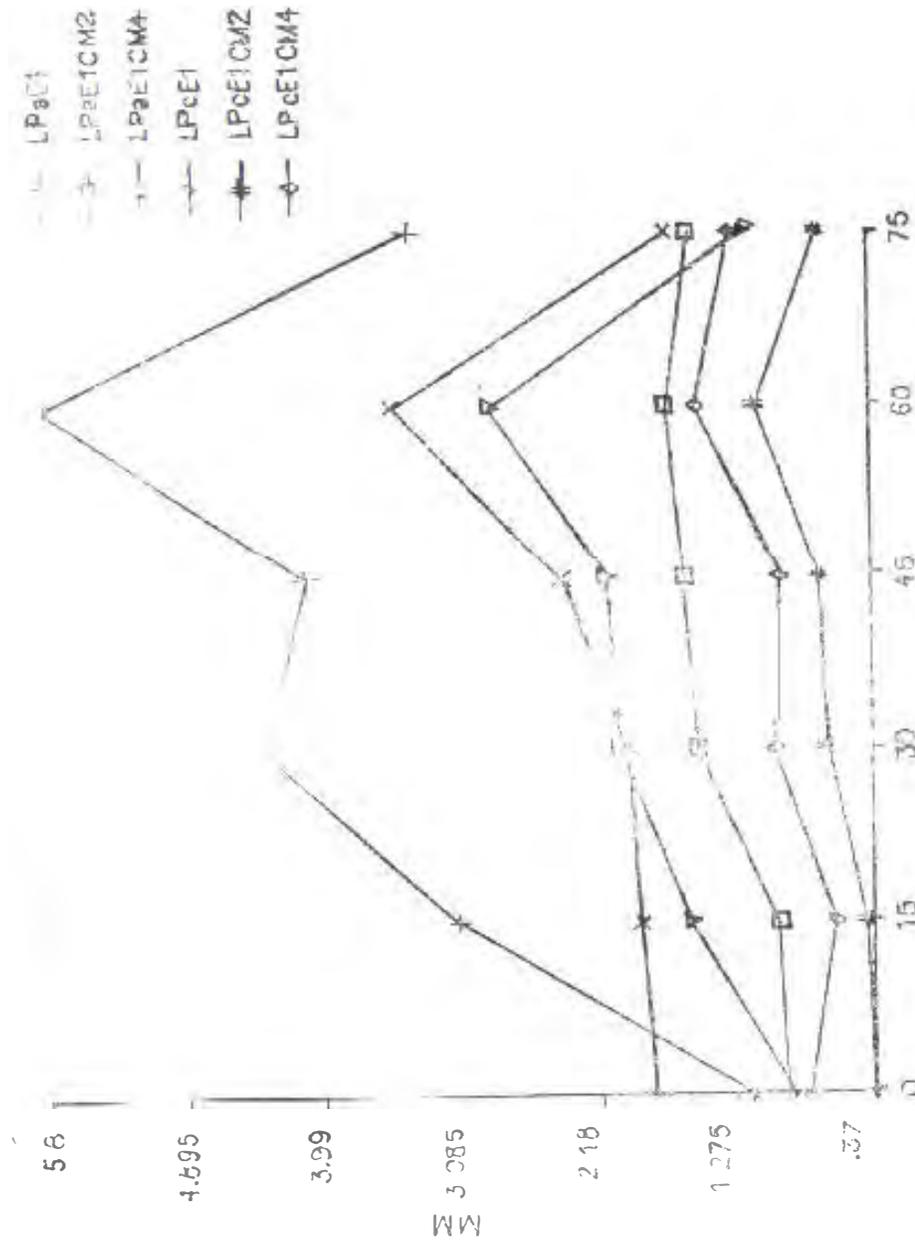
TABLA 5. Cantidad de casos contemplados en la estratificación por intervalos.

Tiempo	Esquema	
	CM 2	CM 4
00	17	13
15	17	14
30	17	12
45	15	11
60	12	9
75	10	6

- a) En todas las curvas los máximos principales coinciden en tiempo (aproximadamente una hora después de sembrar), pero no en magnitudes, siendo las mismas mayores en la ZS que en la ZC, independientemente de la CM; en la CM4 son mayores con independencia de si se siembra o no.
- b) En todas las curvas se observa una tendencia hacia un máximo secundario, casi simultáneo 30 min después de la siembra, pero difieren en magnitudes siendo en los casos de siembra mayores que en los casos de control, independientemente de la CM. Una excepción en cuanto a la no evidencia de este máximo lo es la curva de LP^SE1CH4.

En todo el período de análisis se observa que las diferencias entre las LP^s y LP^c correspondiente a la CM4 son mayores que las de la CM2. De manera que en

las CM4 la detección del posible efecto de siembra a partir de dichas diferencias es más fácil que en la CM2.



Curso temporal LC estratificada según la CM; t=0, ídem a la Fig. 6.

CONCLUSIONES

Las ZS que logramos estudiar hasta 75 min después de la siembra, tienen el máximo valor de la LP una hora después de ésta, independientemente del esquema de comparación que se use; esta característica es probable que sea natural, ya que las ZC tienen igual comportamiento.

Si consideramos como representativa de la curva natural la información de las ZC, pudiéramos asumir como efectos de siembras los máximos secundarios que se ven en las LP^s de todos los esquemas, en dependencia de las condiciones de humedecimiento en la capa subnubosa, generado por las precipitaciones de la ZS, o por las condiciones meteorológicas influyentes.

La probabilidad de encontrar las mayores diferencias entre las LP^s y LP^c es mayor en los primeros 45 min después de efectuar la siembra.

De acuerdo con las características de la muestra estudiada puede suponerse que es

más probable la detección del efecto de siembra en condiciones favorables, como son las CM4, atendiendo a la magnitud de las diferencias y en condiciones adversas como son las CM2 atendiendo al carácter de la distribución de las curvas.

Consideramos como el mejor esquema de comparación el esquema 1 si deseamos arribar a conclusiones más categóricas. Resulta mucho más económico el 3 y el 5 aunque no son más convincentes que el primero.

Antes de concluir el presente artículo, en el sentido de que los lectores pudieran tener una idea más exacta sobre las particularidades de la utilización en investigaciones ulteriores de las conclusiones presentadas, le enfatizamos que no se efectuó una estratificación en dependencia de la cantidad de pirocartuchos empleados en las siembras y que la situación meteorológica macroescalar era adversa a los fenómenos conducentes a precipitaciones.

RECONOCIMIENTOS

Expresamos profundo agradecimiento a todos los compañeros que de una forma u otra hicieron posible este trabajo. Especialmente a Jorge Félix Ballester Almarales,

Oscar Cebrián y Zoila Jaspe Fondín. Gran aprecio sentimos también por la ayuda que nos brindaron los compañeros del Centro de Cálculo de la Universidad de Camagüey.

REFERENCIAS

Aroche, R. y otros "Informe técnico sobre la campaña operativa de 1987 en Camagüey" [inédito], Departamento Provincial de Influencia Activa Camagüey.

— (1987): "Informe aero-sinóptico del NOE-87" [inédito], Departamento Provincial de Influencia Activa Camagüey.

Batista, L. M., A. Perera, B. Koloskov y F. Gamboa

[en prensa]: "Evaluación de los recursos nubosos para incrementar las precipitaciones en el PMC, según los datos del radar MRL-5", Editora Universidad de Camagüey.

Batista, L. M. (1988): "Evaluación de la campaña operativa de lluvia provocada en Camagüey, 1987" [inédito], informe científico al tema 421.04 del INSMET.

- Burlutski, R. (1973): Los procesos sinópticos que influyen sobre las precipitaciones en Cuba. Hidrometeoizdat, Leningrado GGO, *Trudi* No. 101.
- Mazin, I. P. y S. M. Shmeter (1983): *Las nubes: Estructura y Física de su formación* [en ruso]. Leningrado, Hidrometeoizdat, URSS, 280 pp.
- Ruiz, A., G. Puente, M. Valdés, D. Martínez, B. Koloskov, y otros [en prensa]: "Evaluación de las campañas de lluvia provocada en la región oriental", Editora Universidad de Camagüey.
- Xaikin, M. H., A. A. Chernikov e I. O. Shipilov (1987): Utilización de los datos de radiolocalización para la planificación y evaluación de los trabajos de incremento artificial de las precipitaciones [en ruso]. Maskovskiie Otdielenie Hidrometeoizdat, Moscú, 1:35-45.

Ciencias de la Tierra y del Espacio, 23-24, 1994

SOME RESULTS OF THE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF THE OPERATIVE CLOUDS SEED NOE-87 IN CAMAGÜEY

Félix GAMBOA ROMERO
and Roberto AROCHE RAMIREZ

ABSTRACT. *Taking in consideration the gage rainfall estimated by the MRL-5 radar, we compare the seed zone and the control zone in five different schemes. It is graphically and analitically discussed about the existence of differences between both zones, even when the comparison is done stratificating the data according to the predominant weather conditions.*