

Diseño del experimento de incremento artificial de la lluvia en áreas extensas de Camagüey por siembra de nubes aleatorizada (ESPAREX)

Carlos A. Pérez
(carlos.perez@cmw.insmet.cu)
Daniel Martínez
Félix Gamboa
Instituto de Meteorología, Cuba,
Ap. 17032

Victor Petrov
Boris Koloskov (attech@mail.ru)
Agency for Atmospheric Technologies,
Novovagankovsky p, ed. 8, 123242, Mos-
cú, Rusia

Bagrat Danelyan
Observatorio Aerológico Central,
Pervomayskaya 3, Dolgoprudnyi,
Reg. Moscú, Rusia,

Resumen

Se presenta el diseño científico del experimento de incremento artificial de la lluvia en áreas extensas que se viene ejecutando en la provincia de Camagüey y regiones vecinas desde agosto de 2005, como continuación de los experimentos realizados en esa región, en el período 1985-1990, que demostraron la posibilidad de obtener incrementos significativos de lluvia, a partir de la siembra con yoduro de plata de nubes individuales y agrupaciones nubosas con determinadas características. La metodología de siembra aplicada en EXPAREX consiste en la introducción de pirotecnos de yoduro de plata en la parte superior de las nubes convectivas en desarrollo, cuyos toques alcanzan alturas entre 6 y 8 km, en el momento de la siembra, con ayuda de sistemas de lanzamiento instalados a bordo de un avión An-26. La altura de siembra es cercana a los 6 km, a una temperatura de casi -7°C . Este avión porta, además, equipos de medición de parámetros básicos de la física de las nubes que permiten discernir en qué grado la nube experimental se corresponde con los criterios de siembra. En el diseño se expone y se fundamenta la hipótesis de siembra dinámica, en que se basa el experimento y se definen la unidad experimental, las metodologías de vuelo, la siembra y la evaluación del experimento, y los criterios de selección de días y de nubes experimentales. Se estima, también, la cantidad de unidades experimentales necesarias para lograr una demostración significativa del efecto de siembra sobre la base de los resultados de experimentos precedentes.

Palabras claves: siembra de nubes, modificación del tiempo, física de las nubes y lluvia.

Introducción

El género humano ha soñado siempre con actuar sobre el clima y el tiempo para cambiarlos a su favor, particularmente en lo relacionado con las precipitaciones. Sin embargo, no es hasta mediados del siglo xx, con el descubrimiento de las propiedades del hielo seco (Schaefer, 1946) y el yoduro de plata (Vonnegut, 1947), para producir núcleos de congelación, que este sueño se acerca a la realidad. Probados primero en cámaras de laboratorio y luego en nubes con agua superenfriada (con temperaturas menores a 0°C), el hielo seco y el yoduro de plata mostraron su capacidad de convertir todas o parte de las gotas superenfriadas de agua en cristales de hielo. Cuando la prueba se realizó en capas de nubes superenfriadas, los cristales de hielo inducidos artificialmente

crecieron y cayeron de la nube en forma de precipitación.

Antes del tratamiento, las nubes contenían alta concentración de gotas de agua superenfriadas, las que eran muy pequeñas para caer desde la nube. Esas gotas permanecían en fase líquida aun a temperaturas menores a 0°C , debido al déficit de núcleos de congelación característicos de la atmósfera en condiciones naturales. Solamente después de la siembra ocurrió la precipitación. El aumento de las precipitaciones parecía ser algo muy simple de lograr; solo era necesario suministrar a las nubes superenfriadas núcleos artificiales de hielo para suplir la deficiencia natural de estas. La realidad se ha encargado de probar que este es un proceso mucho más complejo.

Braham (1985) puso de manifiesto que la ciencia de la siembra de nubes para el incremento artificial de las pre-

cipitaciones en nubes con composición de fases mixta (o sea, conformada por partículas de hielo y agua) se basa en cuatro hechos establecidos experimentalmente y dos postulados. El primero de estos hechos está dado porque las gotas de agua permanecen sin congelarse en algunas nubes, a temperaturas por debajo de 0 °C. El segundo es que la presión de vapor de saturación sobre el hielo es menor que sobre el agua superenfriada a la misma temperatura, lo que permite que las partículas de hielo en una nube superenfriada crezcan por deposición de vapor, mientras que las gotas más pequeñas se evaporan. El tercero se basa en que la precipitación en muchas regiones del mundo proviene de nubes con composición de fases mixta. El cuarto hecho probado es que existen sustancias, llamadas glaciogénicas, que pueden provocar la congelación del agua superenfriada, ya sea por su temperatura muy baja, como es el caso del hielo seco (CO₂ sólido), o por aportar núcleos de hielo activos a temperaturas relativamente altas, como el yoduro de plata (Agl).

El primer postulado enuncia que la deficiencia natural de núcleos de hielo limita la eficiencia de la precipitación de algunas nubes superenfriadas hasta valores tan bajos como 20 %, para algunos casos. Tales nubes son candidatos potenciales para la siembra con agentes glaciogénicos.

Los intentos de aumentar las precipitaciones, mejorando la eficiencia de su formación son conocidos como siembra estática por medio de efectos microfísicos. Cualquier cambio en la dinámica de la nube es considerado pequeño y no motivado por este método. Una concentración en el rango entre 1 y 10 núcleos por litro es considerada óptima para este proceso.

El segundo postulado se centra en la observación de que en las corrientes ascendentes de las nubes convectivas, frecuentemente se encuentran cantidades sustanciales de agua superenfriada. Si esta agua se congelara con más rapidez y a temperaturas más elevadas de lo que pudiera ocurrir de modo natural, el calor latente de congelación y de deposición sería liberado con rapidez y conduciría a un incremento en la flotabilidad de la nube

y a su mayor crecimiento. Esta nube mayor en espesor vertical, podría entonces, procesar más vapor de agua y propiciar así un aumento de la precipitación. Este postulado se conoce como hipótesis de siembra dinámica, o siembra para efectos dinámicos.

Para este tratamiento se considera óptimo alcanzar una concentración de núcleos de hielo de 100 por cada litro de aire nuboso a la temperatura de -5 °C (Orville, 1986). El tratamiento es llamado dinámico debido a que el resultado primario de la siembra es el fortalecimiento de la circulación interna que sostiene a la nube y la ingestión, y procesamiento de una mayor cantidad de agua. En teoría al menos, este procedimiento puede conducir a la precipitación de más agua que la que estaba presente en la nube, en el instante de la siembra.

Realmente, ningún procedimiento de siembra para el incremento de las precipitaciones produce solamente efectos estáticos o dinámicos. Todos los procesos dentro de la nube son interactivos. Como se aprecia, los cambios microfísicos (ejemplo, la glaciación rápida de la nube) son un prerrequisito para la producción de efectos dinámicos. Por otro lado, cambios dinámicos (ejemplo, intensificación de la corriente ascendente) son imprescindibles para alcanzar mayor condensación del vapor de agua dentro de la nube.

Los procesos que conducen a la formación de las precipitaciones dentro de las nubes, son mucho más complejos que lo que se pensó inicialmente con el descubrimiento de los elementos capaces de proporcionar núcleos de congelación en las cantidades supuestamente requeridas. Como un esquema de clasificación, los términos de estático y dinámico continúan usándose para indicar si el propósito primario de la siembra es inducir cambios microfísicos en la nube, para aumentar la eficiencia de la precipitación, o inducir cambios dinámicos que aumenten las dimensiones de la nube o su duración.

De acuerdo con las investigaciones de Física de las nubes y los experimentos del Proyecto Cubano para la Modificación Artificial del Tiempo (PCMAT), realizados entre los años 1979 y 1991 (Koloskov y col., 1996), el

método que se debe emplear para la continuidad de los experimentos de incremento artificial de la lluvia en Cuba es el de siembra dinámica.

El presente trabajo tiene como finalidad exponer el diseño del experimento de incremento artificial de la lluvia en áreas extensas de Camagüey por siembra de nubes aleatorizada (EXPAREX), el cual da continuidad a los experimentos de incremento artificial de las precipitaciones que se realizaron en esa provincia durante el período 1978-1991.

Se pretende discernir si, en las condiciones de Cuba, la siembra con reactivos glaciogénicos de nubes convectivas en estado de desarrollo sobre un área extensa que cubre aproximadamente 2 000 km² y que se desplaza junto con estas, puede producir incrementos de las precipitaciones, estadísticamente significativos sobre esa área.

Antecedentes en Cuba

El PCMAT se inició en el año 1979, producto de la colaboración entre el Instituto de Meteorología de la Academia de Ciencias de Cuba y el Observatorio Aerológico Central de Rusia.

En la primera etapa, los esfuerzos se dirigieron a la selección del sitio experimental (1979-1981), y del período del año más adecuado para realizar los experimentos.

Como resultado de esta primera etapa del proyecto, se escogió como región experimental a la provincia de Camagüey, situada en la porción centro-oriental de Cuba, y como período para la ejecución de los trabajos de campo, fue seleccionado el período lluvioso, de mayo a octubre. Durante 1982 a 1984 se realizó la evaluación de los recursos nubosos disponibles para la siembra y se determinaron las características microfísicas y dinámicas de las nubes convectivas en diferentes estadios de desarrollo, con las cuales se evaluaron los diferentes modelos conceptuales para formular la hipótesis de siembra.

Se concluyó que en el área de trabajo existen sufi-

cientes recursos nubosos para la aplicación del método propuesto, en la forma de nubes convectivas aisladas o de agrupaciones de nubes convectivas. Por otro lado, sobre la base de la caracterización microfísica y dinámica de las nubes convectivas del área, se decidió que el modelo conceptual de siembra que se deben usar era el de siembra dinámica aplicado a las nubes del tipo cúmulos *congestus* en desarrollo y que el método sería la siembra con yoduro de plata como agente glaciogénico, introducido dentro de las corrientes ascendentes en la región superenfriada de las nubes.

El experimento de 1985 se planificó como exploratorio y en su desarrollo se evaluó la hipótesis de que la precipitación proveniente de nubes convectivas con composición de fases mixta, puede ser incrementada con la aplicación de siembra dinámica. Además, se elaboró un método para la siembra del tipo de nubes antes señalado, según su patrón de surgimiento y evolución en el polígono meteorológico de Camagüey.

Un total de 46 nubes experimentales formaron la muestra compuesta por 29 sembradas y 17 no sembradas, obtenidas entre el 12 de junio y el 6 de agosto de 1985. La muestra se estratificó de acuerdo con la altura del tope entre clases: $H_0 < 6$ km; $H_0 = 6-8$ km y $H_0 > 8$ km.

El análisis de la muestra estratificada mostró que las nubes sembradas con alturas del tope entre 6 y 8 km presentan un mayor desarrollo vertical, un incremento del tiempo de vida y mayor reflectividad de radar. De esta manera, el experimento exploratorio de 1985 brindó el criterio de que las nubes adecuadas para la siembra eran aquellas con apariencia ópticamente densa en estado de desarrollo, con topes en crecimiento por medio de la altura comprendida entre 6 y 8 km, y cuyas dimensiones horizontales están entre 2 y 5 km.

Como continuidad al experimento exploratorio se diseñó una fase confirmatoria para el período 1986-1990. Teniendo en cuenta los estudios que muestran que las nubes aisladas aportan solo alrededor de 3 % de la precipitación total en el área y que las agrupaciones nubosas de mesoescala producen alrededor de 25 % de esas

precipitaciones, se incluyó en el diseño el tratamiento de agrupaciones nubosas extendidas sobre áreas de 400-600 km², además de las nubes individuales.

Para el caso de las nubes individuales, el experimento confirmatorio demostró un incremento de volumen de lluvia de 120 % en las nubes sembradas, comparado con las nubes no sembradas, con un nivel de significación estadístico mejor que el 90 %. Para las agrupaciones nubosas, el incremento del volumen de lluvia en las unidades sembradas, respecto a las no sembradas fue de 65 %, con un nivel de significación mejor que 95 %. En ambos casos, se utilizó la prueba de Mann-Whitney (Koloskov y col., 1996).

Los resultados de los experimentos de siembra dinámica en nubes con composición de fases mixta en Cuba, fueron muy alentadores y totalmente exitosos para el caso de las agrupaciones nubosas, además fueron consistentes con aquellos obtenidos en La Florida (Woodley y col., 1982), el sudoeste de Texas (Rosenfeld y Woodley, 1989) y en Tailandia (Silverman y col., 1994). En 1991, los experimentos del PCMAT iniciaron la etapa de áreas extensas, aplicando el procedimiento aleatorio de siembra para áreas nubosas con extensiones de alrededor de 2 000 km², basados en la concepción de blanco flotante. Sin embargo, en 1992, las dificultades financieras obligaron a suspender los experimentos. A finales del año 2004 se tomó la decisión de continuar desarrollándolos, lo que motiva la elaboración de un diseño actualizado para el experimento de incremento artificial de la lluvia, en áreas extensas de alrededor de 2 000 km².

Materiales y métodos

Diseño del experimento

En los experimentos anteriores quedó suficientemente probado que las nubes superenfriadas que se desarrollan sobre Cuba, son adecuadas para incrementar las precipitaciones mediante la siembra con reactivos glaciogénicos, siempre y cuando cumplan con los criterios de se-

lección establecidos. Como consecuencia, el diseño para los experimentos de áreas extensas estará basado en los resultados obtenidos, principalmente desde el punto de vista metodológico, teniendo en cuenta, desde luego, las características de las nuevas unidades experimentales.

Por otra parte, es imprescindible tener en consideración los avances en el conocimiento de la física de las nubes que se han puesto de manifiesto en los últimos años y los nuevos criterios sustentados por las evidencias experimentales enfocadas a la luz de los conceptos actuales. Para tener en cuenta los conceptos más actuales acerca del modo dinámico de siembra, estructuralmente, el diseño presenta gran similitud con el realizado para el experimento de Tailandia (Silverman y col., 1994), el que a su vez fue muy similar al empleado en Texas (Rosenfeld and Woodley, 1989,1993).

Hipótesis física de siembra

El concepto de siembra dinámica se aplica a nubes convectivas con composición de fases mixta, el cual se sustenta en la certidumbre termodinámica de que la conversión de agua líquida superenfriada a hielo dentro de la nube, libera calor latente de congelación, e incrementa así la temperatura interior de esta de acuerdo con la relación (Rogers y Yau, 1989):

$$dT = \frac{\alpha dp - Ldw_L}{cp} \quad (1)$$

donde:

L : calor latente de congelación
(≈ 80 cal/g).

dw_L : variación en el contenido de agua líquida expresada en gramos por kilogramos.

α : volumen específico.

cp : calor específico a presión constante.

Para una congelación isobárica, el aumento de temperatura puede ser de $\approx 0,3$ °C por g/kg de agua superenfriada congelada a la temperatura de -10 °C. Un incremento adicional de temperatura aproximadamente de la misma

magnitud tiene lugar por la deposición de vapor sobre los cristales de hielo, formados en el proceso anterior.

Por lo general, no se obtiene una glaciación total, pero algunos procesos que tienen lugar en la microfísica de las nubes con composición de fases mixta como el *riming* (crecimiento de una partícula de hielo por la adhesión de gotas pequeñas de agua superenfriada), pueden contribuir con una liberación adicional de calor y compensar el déficit que se produce al no alcanzar la congelación total.

El calentamiento adicional afecta, directamente, la flotabilidad de la nube, la que está relacionada con la velocidad vertical de la corriente ascendente a través de la expresión:

$$\left[\frac{dw}{dt} = \frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial z} = \left(\frac{T_v - T_{ve}}{T_{ve}} - Q_t \right) g - \mu w^2 \right] \quad (2)$$

donde:

w : velocidad vertical.

T_v : temperatura virtual.

T_e : temperatura ambiente en la vecindad de la nube.

Q_t : contenido total de agua.

g : aceleración de la gravedad.

μ : parámetro que tiene en consideración la mezcla de la nube con el medio.

$(T_v - T_{ve})/T_{ve}$: representa la flotabilidad.

$(g - Q_t)$: el peso del agua y se opone a la flotabilidad.

Es precisamente el término de la flotabilidad el que, según la hipótesis adoptada, se debe alterar positivamente. Estudios realizados por Pérez y colaboradores (1992) demuestran que en las nubes experimentales del PCMAT es posible incrementar, de forma positiva, la flotabilidad e incluso revertir de negativo a positivo sus valores mediante un proceso de congelación isobárica.

Se postuló, originalmente, que el aumento de flotabilidad proporcionaba un incremento directo de la dimensión vertical de la nube y mediante este un aumento del volumen total de lluvia producido por la nube. Lo anterior se basa en la evidencia experimental de que

a nubes con mayor altura del tope, correspondía un mayor volumen total de precipitaciones. Sin embargo, los resultados de los experimentos de Texas, Tailandia y también los de Cuba pusieron de manifiesto que los efectos de siembra podían evidenciarse en aspectos como un mayor tiempo de vida y un incremento en el área de precipitación, sin grandes incrementos de las dimensiones verticales.

Los nuevos conceptos propuestos por Rosenfeld y Woodley (1993) proponen, entre otras cosas, que el incremento en la flotabilidad es utilizado para compensar la fuerza negativa, producida por la generación rápida de un gran volumen de precipitación en el seno de la corriente ascendente, permitiendo así que no se desplome esta última. El mecanismo propuesto permite mayor duración de la corriente ascendente y, por tanto, más tiempo para procesar vapor de agua y producir más lluvia.

De forma simplificada, la cadena de sucesos que se prevé en la hipótesis para la evolución de las nubes sembradas es la siguiente:

1. La siembra masiva de la región superenfriada de sectores en desarrollo de las nubes convectivas, congela la mayor parte del agua presente en esta zona.
2. El calor latente que se libera debido a la congelación aumenta la flotabilidad del volumen sembrado. Este proceso es muy rápido por la presencia de gotas de agua de lluvia formadas por coalescencia de forma natural. Estas gotas congeladas continúan creciendo en forma de "graupel" (embriones de precipitación sólida) a partir de la adhesión de gotas pequeñas de nubes. Estas partículas crecen más rápido que las gotas de agua superenfriada de masa similar y permanecen suspendidas por mayor tiempo que estas en la corriente ascendente.
3. El incremento de la flotabilidad propiciará la compensación del aumento del peso de las partículas de precipitación, el cual, de no haberse producido la congelación, podría haber causado la destruc-

ción de la corriente ascendente.

4. Como consecuencia de esto, la precipitación se retiene por más tiempo en la región superior de la nube, lo que retrasa la formación de la corriente descendente, y propicia que la ascendente se alimente de humedad adicional y que la nube aumente su tiempo de vida.
5. Por último, la precipitación acumulada en la región superior de la nube desciende. En presencia de valores débiles o moderados de la cizalladura vertical del viento, se forma una corriente descendente adyacente a la ascendente, a través de la cual se descarga la corriente ascendente, que conserva su flotabilidad.
6. El incremento de la corriente descendente produce convergencia local en los niveles bajos, que induce la formación de nuevas celdas, algunas de las cuales pueden producir precipitación adicional.
7. Si estas nuevas celdas son susceptibles de ser a su vez sembradas, se puede obtener un efecto multiplicador que lleve, en condiciones favorables, a la formación de un sistema convectivo de larga duración.

La ocurrencia de cada uno de los pasos que se postulan en el anterior modelo conceptual depende de la existencia de condiciones ambientales favorables para la siembra de nubes. En general, se pueden presentar tres situaciones: la primera es que las condiciones ambientales propicien el surgimiento de sistemas convectivos profundos generalizados aun sin siembra de nubes; la segunda es cuando las condiciones ambientales son sumamente desfavorables para la convección, de modo que no surgirán nubes apropiadas para la siembra; la tercera situación, que es la única donde se cumplirá el modelo conceptual de manera satisfactoria, es cuando existen condiciones para la convección profunda, pero no de forma extrema, de modo que la siembra proporciona a las nubes la energía adicional necesaria para su desarrollo.

Teniendo en cuenta que los resultados del PCMAT son

consistentes con la hipótesis revisada de siembra dinámica propuesta por Rosenfeld y Woodley (1993), para las nubes con bases cálidas, se asume esta como la hipótesis en que se basará el EXPAREX. La validez de la hipótesis está sustentada, además, por estudios adicionales de física de las nubes que muestran la existencia de suficiente contenido de agua superenfriada y una concentración baja de cristales de hielo en esas nubes experimentales, así como la posibilidad de incremento de la flotabilidad en esas nubes (Pérez y col., 1994).

Área de realización del experimento

Las unidades experimentales serán seleccionadas en un área comprendida dentro de un círculo de radio igual a 150 km, centrado en el radar de Camagüey, cuyas coordenadas son 77°,48',03" W y 21°,26',15" N, exceptuando dentro de esta las regiones sobre el mar y el área de un círculo de 20 km de radio centrado en el radar; esta última región es una "zona muerta", en la que es difícil, para el radar, ver los topes de los ecos con alturas apreciables (mayores a 12 km).

Unidad experimental

Debido a las dificultades que ha introducido la variabilidad climática en los últimos decenios, para efectuar un análisis del comportamiento histórico de las precipitaciones, así como el hecho de que en Cuba estas presentan una variación en extremo significativa que dificulta el establecimiento de correlaciones entre las precipitaciones de diferentes regiones, se considera arriesgado emprender un experimento con diseños de polígonos fijos con tratamiento *crossover* aleatorizado. Por su parte, el experimento de área total fija, supone, al igual que en el caso anterior, una cantidad elevada de años (puede llegar hasta 10 o 15 años) para alcanzar una significación estadística aceptable.

Por lo antes señalado, es aconsejable continuar los experimentos, según los criterios establecidos en los

momentos en que estos se suspendieron por dificultades financieras, o sea, la siembra de agrupaciones nubosas sobre áreas de aproximadamente 2 000 km² y definir sobre estas un esquema de análisis de blanco flotante (Fig. 1).

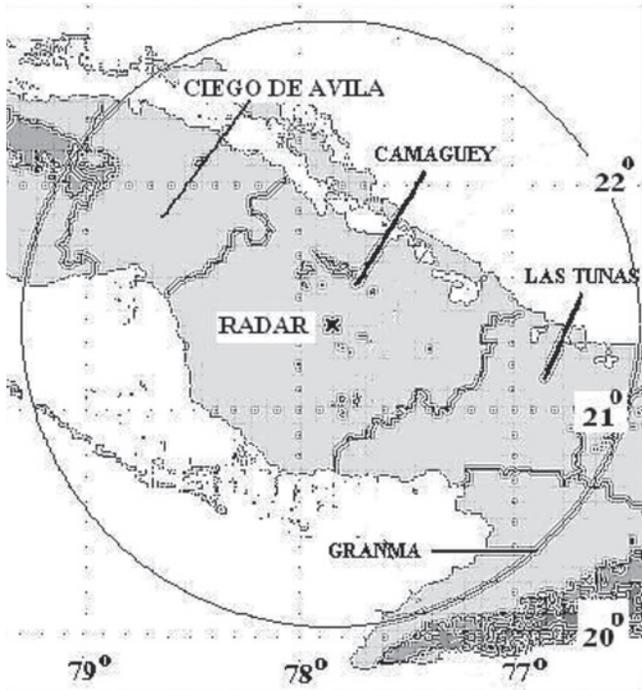


Fig. 1. Área de realización del experimento.

Criterios de selección de la unidad experimental

Una unidad experimental consiste en un conjunto de nubes convectivas, cuyas torres reciben un tratamiento de siembra real (liberación de AgI) o simulado (sin liberación del reactivo), dentro de un círculo con radio de 25 km, centrado en la celda convectiva sobre la que se efectuó el primer tratamiento. La unidad así definida tendrá un área aproximada de 2 000 km², la cual es la mayor extensión que puede ser atendida por un avión de manera efectiva.

La selección y determinación final como unidad experimental estará basada en los mismos conceptos básicos que se aplicaron en el experimento confirmatorio, para nubes individuales y agrupaciones nubosas de 400-600 km² de área.

1. Las torres de las agrupaciones nubosas seleccionadas para el tratamiento deben tener, a la altura de vuelo, un contenido de agua líquida mayor que 0,5 g/m³, sostenido por más de un segundo, velocidad de la corriente ascendente de más de 5 m/s, sostenida durante el mismo período; el diámetro debe ser de más de 2 km, no deben presentar signos de disipación o glaciación en el tope y deben poseer el aspecto propio del estado de desarrollo (forma de coliflor con aspecto sólido y densidad óptica apreciable). Las estadísticas de las agrupaciones nubosas, medidas en los experimentos anteriores, muestran que estos valores suelen encontrarse con mucha frecuencia en las nubes cubanas, por lo que pueden ser corroborados después o durante la penetración sin efectuar un pase preliminar en la nube seleccionada, y evitar la pérdida de oportunidades de encontrar unidades experimentales que, dadas las condiciones propias de nuestra región experimental con agrupaciones en forma de línea y desarrollo vertical muy explosivo, son bastante restringidas.
2. Ninguna nube o celda dentro de la unidad experimental, en el instante inicial del tratamiento, debe tener altura del tope > 10 km.
3. La altura del tope debe encontrarse en el intervalo de 6-8 km, correspondiente a un intervalo de temperaturas de -7 a -20 °C, aproximadamente (Martínez y col., 2002).
4. En el momento de la selección, el centro de la unidad experimental debe estar al menos a 40 km desde cualquier cumulonimbo que tenga una reflectividad de radar de 50 dBZ o mayor.
5. El tratamiento a las nubes dentro de una unidad experimental culminará cuando se cumpla al menos una de las circunstancias siguientes: ha transcurrido más de una hora desde la última siembra y si los ecos contenidos dentro de sus fronteras no perduran, la unidad experimental se mueve más allá de los 150 km medidos a partir del radar; el ra-

dar presenta una falla en sus funciones; y el avión presenta una falla técnica o se acerca al límite de su autonomía de vuelo.

Discusión de los resultados

Obtención de la información de las unidades experimentales

La evaluación de los parámetros externos generales y la precipitación de las unidades experimentales se obtendrán por medio del muestreo continuo del radar MRL-5 modificado. Esta información será grabada desde el surgimiento del primer radioeco en el polígono hasta que no exista nubosidad en este. Con esa información y la aplicación de diferentes paquetes de software se obtendrán las características detalladas de las unidades experimentales. Mediante un sistema computacional se identificará y seguirá de modo objetivo la trayectoria de las unidades tratadas, durante todo su tiempo de vida. De igual modo se ejecutará, diariamente, la calibración del radar con respecto a la red pluviométrica del territorio, además se contará para este fin con cuatro microrredes de alta densidad (cinco pluviómetros en cada una distancia entre ellos menor de 2 km) conformadas por pluviómetros digitales.

Por otro lado, la información correspondiente a los cambios y condiciones microestructurales y dinámicas que tienen lugar dentro de las torres o celdas de las unidades experimentales, será muestreada por los aviones de siembra, adecuadamente equipados para determinar la composición de fase, el contenido de agua líquida, la presencia de gotas de precipitación, la evolución de las fases y los cambios en la estructura de las corrientes verticales, la temperatura dentro y fuera de la nube, y la posible detección de efectos físicos de la siembra. Los aviones estarán equipados con un sistema de adquisición de datos para procesamiento en tiempo real y diferido, y cuya salida se transmite automáticamente al puesto de dirección de tierra de modo continuo. La trayectoria del avión, incluidos los segmentos dentro de la nube, debidamente identificados, son transmitidos también en tiempo real.

Para cada día del período experimental se elaborará una carpeta contentiva de las características meteorológicas correspondientes, sondeos de aire superior del polígono y de la región, información satelital para diferentes horarios, pronósticos especializados y su corrección si es necesaria, información de los modelos numéricos empleados en el día y un resumen de la situación particular.

Aleatorización

Las instrucciones para la siembra aleatorizada se basan en un esquema de aleatorización de unidad por unidad. La decisión de aplicar el reactivo o no será conocida con posterioridad a la selección de las unidades experimentales, así permitirá la obtención de una muestra con unidades experimentales comparables sembradas real o simuladamente.

Procedimiento experimental

Las informaciones meteorológicas provenientes de diferentes fuentes proporcionarán los criterios requeridos para la elaboración del pronóstico especializado del desarrollo convectivo. Los días en que la eficacia natural de las precipitaciones esté totalmente generalizada en el territorio, implicando la posible dilución de los efectos de siembra dentro del marco natural, no se considerarán como experimentales. Tampoco se realizarán acciones experimentales en aquellos días en los que las condiciones meteorológicas impidan el desarrollo de la nubosidad convectiva.

Una vez determinado que el día presenta condiciones propicias para el trabajo experimental, la información del radar, acerca del surgimiento y desarrollo de los radioecos se utilizará para determinar el momento de despegue del (los) avión (es) de siembra. En el caso de que, a pesar del pronóstico favorable, no aparezcan radioecos que cumplan los requisitos establecidos por la metodología durante el período de espera establecido, el día se declarará como no experimental.

Si se toma la decisión de despegar, el avión (o los aviones) ascenderá(n), dirigiéndose a la (s) región (es) indicada (s), por el radar hasta aproximadamente la altura de la isoterma de $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, que será el nivel de vuelo para el trabajo experimental. Se procederá a la selección de las unidades experimentales en coordinación entre el personal de tierra y la tripulación científica de cada avión; a esta le corresponde la decisión final. Inmediatamente se aplicará la decisión aleatorizada de siembra o no siembra, contenida en un sobre que será abierto por el especialista que efectúa el disparo de los pirotecnicos o lo simula, para cada unidad experimental seleccionada, según las condiciones descritas anteriormente para estas. El radar marcará y efectuará el seguimiento de esta área con mediciones continuas cada 5 min para toda el área del polígono, hasta que esté libre de nubosidad. Ver el procedimiento experimental en la figura 2.



Fig. 2. Esquema del procedimiento experimental diario.

La siembra se efectuará a cada torre de las nubes que presenten las condiciones apropiadas dentro del área experimental. En el caso de que el procedimiento de aleatorización haya indicado no sembrar, la torre se penetrará y se procederá de modo idéntico con cada torre perteneciente a las nubes del área pero sin efectuar la liberación del reactivo.

Modo de liberación del reactivo

El reactivo se introducirá en la nube, en la región de las corrientes ascendentes, liberando un pirotecnico cada 1 o 2 seg, con el objetivo de provocar una mezcla lo más homogénea posible en la región de la corriente ascendente, entre las isotermas de -4 y $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, con una concentración de casi unos 100 n/L, pretendiendo la cristalización de alrededor de 50-60 % del agua contenida en esa región. Utilizando los valores del coeficiente de turbulencia obtenidos por Martínez (1996), se puede concluir que la dispersión del reactivo se comportaría de forma similar a lo calculado para el FACE (Woodley y Sax, 1976), de manera que esta cantidad de reactivo es suficiente para alcanzar la cantidad de cristales necesarios para inducir una siembra dinámica (Cotton, 1972a,b).

Tipo de reactivo

El agente glaciogénico que se debe usar en el experimento será la mezcla pirotécnica con AgI, proporcionada por los pirotecnicos PV-26 con formulación y manufactura de procedencia rusa. Estos pirotecnicos aportan $1,7 \times 10^{14}$ núcleos glaciogénicos por gramo de mezcla a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $7,0 \times 10^{13}$ a $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Cada pirotecnico quema durante unos 40 seg y desciende alrededor de 1,5-2 km, lo que no llega a tanto en presencia de corrientes ascendentes fuertes.

Duración proyectada para el experimento

Los criterios de éxito serán dados por el incremento de las precipitaciones de las celdas convectivas que recibieron el tratamiento con yoduro de plata y para las unidades experimentales que contienen esas celdas, en ambos casos bajo consideraciones físicas adecuadas y significación estadística de los resultados. Según los resultados de los experimentos anteriores, se puede esperar el éxito primero para las sembradas dentro de

las unidades experimentales y luego para las unidades como un todo, debido a que las celdas recibieron, directamente, el tratamiento y además porque la muestra de celdas sembradas será siempre mayor, ya que en una unidad experimental pueden existir varias de estas.

Las formulaciones dadas por Gabriel (1999), para el uso de las razones (simples y dobles) en el tratamiento estadístico y evaluación de los experimentos para el incremento artificial de las precipitaciones, constituyen la base para el cálculo de la cantidad de unidades experimentales, necesarias para alcanzar el grado de confianza deseado. El tamaño requerido de la muestra se obtiene a partir de la relación siguiente:

$$N=(Z_{\alpha}+Z_{\beta})^2x(\sigma^2/\delta^2)$$

donde:

Z_{α} : fracción acumulativa.

$(1-\alpha)$: distribución normal estándar.

Z_{β} : percentil.

$(1-\beta)$: distribución normal estándar.

α : nivel de significación para la prueba de una sola cola ($\alpha=0,05$).

β : probabilidad de concluir que no existe efecto de siembra cuando realmente existe.

$(1-\beta)$: potencia del experimento, lo que se define como la probabilidad de detectar un efecto de siembra cuando este realmente existe.

σ^2 : varianza de la razón simple, o sea, el cociente de los valores correspondientes a las variables de las unidades sembradas, entre las no sembradas (SR).

δ : efecto de siembra (SR-1).

Como se puede apreciar, una gran varianza y un efecto de siembra pequeño implican la necesidad de una gran cantidad de casos.

De acuerdo con estos cálculos se necesitan unas 120 unidades experimentales para alcanzar una significación estadística de 5 % o menos. Estos valores se

obtuvieron considerando un posible incremento de 40 % de las unidades tratadas con respecto a las no tratadas, lo que puede resultar bastante conservador, si se tienen en consideración los incrementos alcanzados en los experimentos de Tailandia y los nuestros, que alcanzaron incrementos por encima de 66 %, si bien se debe considerar que en el caso de nuestros experimentos el área de las unidades experimentales fue mucho menor (400-600 km²).

Considerando el comportamiento en la obtención de las unidades experimentales, en el período 1986-1990, para el caso de las agrupaciones nubosa (82 unidades) del PCMAT, el comportamiento de los experimentos de Tailandia y Texas, y la complejidad adicional de selección en nuestras condiciones de unidades con áreas de 2 000 km², se proyecta una duración del experimento de 3 a 4 años, suponiendo que se trabajen de 3 a 4 meses por año y que se logre tratar al menos 10 unidades experimentales por mes. Esta duración puede variar en dependencia de la disponibilidad de aeronaves y otras circunstancias, que determinan las posibilidades de ejecución del experimento.

Un aspecto de mucho interés es que el uso de covariantes puede reducir ampliamente el número de casos necesitados. Como se conoce, una covariante que está correlacionada con el volumen de lluvia de las unidades experimentales con un coeficiente R reducirá el número de casos N hasta N (R) de acuerdo con la expresión siguiente:

$$N(R)=(1-R^2)N(SR)$$

La prueba de la fórmula anterior para un coeficiente de correlación de 0,65 o 0,70 entre una variable dada y el volumen de lluvia en las unidades experimentales, reduce el número de casos requeridos en alrededor de la mitad. Queda claro, entonces, que la identificación de covariantes en los experimentos para el incremento artificial de la lluvia representa un gran beneficio. Este aspecto debe resultar de vital importancia durante la ejecución de los experimentos.

Evaluación

El procedimiento de evaluación será enfocado, tanto a las celdas individuales como a las unidades experimentales que las contienen. Los parámetros que se deben evaluar contemplan las relaciones de los valores medios para los casos de unidades sembradas (S) y las no sembradas (NS) de los topes, reflectividad, área, duración y volumen de precipitación. Los efectos de la siembra deben ponerse de manifiesto en la mayoría de los análisis, y estos deben ser consistentes con el modelo conceptual. Algunos de los resultados deben ser estadísticamente significativos, y en particular el referente al incremento del total de lluvia. Los resultados deben ser adecuados, razonables y físicamente consistentes.

Teniendo en consideración los aportes de Gabriel (1999) acerca de que para el caso de muestras mayores a 100 unidades, las razones estadísticas brindan resultados similares a aquellos reportados por la realeatorización de las muestras y que, por su parte, Woodley y Silverman (2003) reportan resultados comparables aún para muestras menores, se propone utilizar las razones estadísticas para evaluar la relación entre S y las NS. Este método es mucho más fácil de aplicar que la realeatorización y favorece la aplicación de análisis estadísticos concomitantes (Gabriel, 2000).

Como complemento a la evaluación estadística, se deberá encontrar evidencia de que las nubes cumplen los criterios de selección y de que la evolución de los parámetros físicos de las nubes es consecuente con el modelo conceptual que sirve de hipótesis de siembra. Esta evidencia se buscará a partir de estudios de casos particulares con propósitos específicos.

Conclusiones

Se propone un diseño que, a partir de los resultados alcanzados en Cuba a finales del pasado siglo y considerando los avances que han tenido lugar en diferentes experimentos e investigaciones en el campo del incre-

mento de las precipitaciones, permita la realización del experimento aleatorizado en áreas extensas, aplicando los criterios más actuales y acertados para su ejecución.

Si se consultan las más recientes declaraciones de la Organización Meteorológica Mundial, se puede apreciar que en sus indicaciones más generales relacionadas con los requisitos para la aceptación de un experimento por la comunidad científica de la especialidad, está la elaboración de un diseño que *a priori* exprese las hipótesis en que se basan los procedimientos que se deben emplear para la detección de los efectos de siembra y la evaluación de los posibles incrementos de las precipitaciones. Consecuentemente, el diseño elaborado cumple con los requisitos de la OMM, en cuanto a su función de guía general del desarrollo de los trabajos experimentales y como norma para juzgar la rigurosidad científica solicitada.

Bibliografía

- Braham, R. R. Jr. (1985): "Cloud Physics of Weather Modification", *Extended Summary, Asosociation Lecture, 4th Conference on Weather Modification*, Honolulu, HI.
- Cotton, W. R. (1972a): "Numerical simulation of the precipitation development in supercooled cumuli", part. I. *Mon. Wea. Rev.*, 100, 757-763.
- _____ (1972b): "Numerical simulation of the precipitation development in supercooled cumuli", part. II. *Mon. Wea. Rev.*, 100, 763-784.
- Gabriel, K. R. (1999): "Ratio statistics for randomized experiment in precipitation stimulation", *J. Appl. Meteor.* 38. 290-301.
- _____ (2000): "Planning and evaluation of weather modification projects", *WMO Tech. Document WMO/TD-936*, pp. 39-59.
- Koloskov, B. *et al.* (1996): "Results on Convective Precipitation Enhancement in the Camagüey Experimental Area, Cuba", *J. Appl. Meteor.*, 32, 1524-1534.
- Martínez, D. (1996): "Turbulence parameters and vertical drafts in tropical convective clouds over Camagüey,

- Cuba", 12th International Conference of Clouds and Precipitation, Aug. 19-23, 1996, Proceedings, vol. 1, Zurich, Switzerland, pp. 566-569.
- Martínez, D., I. Rivero y R. Báez (2002): "Caracterización estadística de los perfiles meteorológicos de Camagüey en horas de la tarde y su relación con la lluvia", *Rev. Cub. Meteor.*, 9 (1).
- Orville H. D. (1986): "Dynamic-mode seeding in summer cumuli, *Precipitation Enhancement, a scientific challenge*. RR Braham (ed). Meteor. Monog. N. 43. Amer. Meteor. Soc.
- Pérez C.; D. Martínez and V. Petrov (1992): "Microstructure, mixing and turbulence in cumulus clouds over Cuba and the Caribbean Sea", *Proceedings of the WMO Workshop on Cloud Microphysics and Applications to Global Change*, WMO/TD-537, Toronto, Canada, pp. 254-256.
- Pérez, C., M. Oms, D. Martínez and V. Petrov (1994): "Phase Composition and Seedability of Cumulus Clouds in the Camagüey Meteorological Site", *Sith WMO Scientific Conference on Weather Modification, Pasteum. WMP Report No. 22 WMO/Td No. 596, 2, 379-382*.
- Rogers R. R. and M. K. Yau (1989): *A short course in cloud physics*, 3rd edition, Pergamon Press, 292 pp.
- Rosenfeld, D. and W. L. Woodley (1989): "Effects of cloud seeding in west Texas", *J. Appl. Meteor.*, 28, 1050-1080.
- _____ (1993): "Effects of cloud seeding in west Texas: Additional results and new insights", *J. Appl. Meteor.*, 32, 1848-1866.
- Schaefer, V. J. (1946): "The production of ice crystal in a cloud of supercooled water droplets", *Science*, 104, 457-459.
- Silverman, B. A., C. L. Hartzell, W. L. Woodley and D. Rosenfeld (1994): "Demonstration Project design. U.S", Department of Interior, Bureau of Reclamation, Thailand Applied Atmospheric Resources Research Program Final Rep. R-94-1, 183 pp. (available from Woodley Weather Consultants).
- Vonnegut, B. (1947): "The nucleation of ice formation by silver iodide", *J. Appl. Phys.*, 18, 593-595.
- Woodley, W. L. and R. I. Sax (1976): "The Florida Area Cumulus Experiment: Rationale", Desing, Procedure, Results, and Future Course. NOAA Technical Report ERL 354-WMPO 6. Boulder, Colo, 204 pp.
- Woodley, W. L. *et al.* (1982): "Rainfall results of the Florida Area Cumulus Experiment, 1970-1976", *J. Appl. Meteor.*, 21, 139-164.
- Woodley, W. L. and B. A. Silverman (2003): "Results of on-top glaciogénico cloud seeding in Thailand". Part. II: Exploratory Analyses, *J. Appl. Meteor.*, 42, 939-951.

Abstract

The scientific experimental design of the Randomized Convective Cloud Seeding Experiment in Extended Areas (EXPAREX) is presented. This experiment is being implemented in Camagüey and adjacent regions from August 2005, as a follow up of the experiments which were carried out in the same region in the period 1985-1990, which showed the possibility of obtaining significant rainfall increase by seeding individual convective clouds and cloud systems which comply certain conditions, with silver iodide flares. The methodology applied in EXPAREX consists in seeding silver iodide flares in the upper part of developing convective clouds whose tops reach from 6 to 7 km at seeding time, using launching systems ion board an An-26 aircraft. The seeding altitude is nearly 6 km, which corresponds to a temperature of nearly -7 °C. The An-26 is instrumented with basis cloud physics equipment which allows to assess if the experimental clouds fulfill the seeding criteria. The dynamic seeding hypothesis, in which the experiment is based, is explained and argued. The experimental unit is defined as well as the flight, seeding and evaluation methodologies. Criteria for experimental day and experimental cloud selection are also discussed. The total amount of experimental units which is needed to obtain a statistically significant result is estimated using the results of previous experiments.

Keywords: *cloud seeding, weather modification, cloud physics and rain.*