

RAO, P. G., H. R. HATWAR y M. AL-SULAITI, 2001(a): Thunderstorms over Qatar. *Theoretical and Applied Climatology* (enviado).

RAO, P. G., M. AL-SULAITI y ALI H. AL-MULLA, 2001(b): Winter shamals in Qatar, Arabian Gulf. *Weather* (aceptado para publicación).

SNEYERS, R., 1990: *On the statistical analysis of series of observations*. OMN-N.º 415, Ginebra.

TAKAHASHI, K. y H. ARAKAWA, 1981: Climates of Southern and Western Asia. *World Survey of Climatology*, 9, 215-228.

Observaciones sobre el Proyecto Italiano de Intensificación de la Lluvia

Por Abele NANIA *

62

Una red pluviométrica extensa y densa es un requisito fundamental para cualquier proyecto de intensificación de la lluvia. La selección de zonas experimentales (objetivo y de control) depende por completo de los análisis estadísticos de la climatología disponible de la región, con especial atención al banco de datos pluviométricos. Para obtener resultados con una significación estadística aceptable se necesitan una red pluviométrica de alta densidad, un experimento de larga duración y el uso de metodologías aleatorias de siembra.

Algunas conclusiones discutibles obtenidas de numerosos experimentos de intensificación de la lluvia en el pasado han estimulado el desarrollo de modos alternativos para valorar los resultados de la siembra basados en datos experimentales y en evidencia física. En el diseño del proyecto italiano de Puglia (cruce aleatorio) [1], TECNAGRO* ha intentado el análisis con el uso combinado de:

- Datos de la red pluviométrica de alta densidad, que consta de 80 pluviómetros.
- Un modelo numérico (situado en la parte occidental de la zona experimental [2]) para estudiar la influencia de la orografía en las corrientes de aire horizontales y verticales.

Un análisis adicional del conjunto de datos de observación recogidos durante el Proyecto Italiano de Intensificación de la Lluvia (1986-1995), ofrece la oportunidad de hacer algunas observaciones sobre los resultados de la siembra de nubes que surgen de patrones de precipitación representados a través de imágenes de radar. Se sugiere una nueva clasificación de los resultados y se presentan algunas ideas para la futura optimización de la tecnología de intensificación de la lluvia.

- Observaciones de radar (reflectividad, evolución de la altura máxima de nubes y totales de precipitación [3]).
- Unidades experimentales flexibles (siembra tres horas más para permitir a las gotitas de nube inducidas crecer hasta un tamaño precipitable [4]).

Durante los estudios preliminares, se consideraron los ecos significativos en las imágenes de radar como evidencia visual válida a favor de la relación causa efecto entre la siembra de nubes y la lluvia inducida. Por lo tanto, se incluyeron los ecos de radar en los criterios para valorar los resultados de la siembra.

Se consideró importante comparar los datos de la red pluviométrica en la zona objetivo con los de

la zona de control. La suposición implícita era que los resultados de la siembra (si se llegaban a dar) podrían encontrarse siempre dentro de la zona objetivo, siguiendo el calendario de siembra aleatoria. Esta suposición desató una crítica justificable durante el proyecto, porque el flujo de aire deformado orográficamente sobre el recorrido de control y su proximidad a la zona objetivo y de siembra fueron responsables, de forma clara, de importantes diferencias en la valoración de los efectos de la siembra de nubes sobre el suelo.

La velocidad horizontal del viento y las corrientes ascendentes de origen orográfico contribuyeron a la caída de precipitación inducida adicional a sotavento de la línea de siembra. En el proceso termodinámico

* Antigo Jefe del Servicio Meteorológico Italiano y Director de la Escuela Internacional de Meteorología del Mediterráneo de Erice. En la actualidad, Coordinador Científico de TECNAGRO (una asociación sin ánimo de lucro para la difusión de información tecnológica), Roma.

de congelación de los hidrometeoros en las nubes, hay una liberación de calor latente que no es instantánea sino que se prolonga durante un largo intervalo de tiempo, altura y distancia [5, 6]. De todas formas, el objetivo principal era intensificar la precipitación dentro de la zona objetivo. Un defecto del diseño de proyecto era que no estaba permitido cambiar las trayectorias de siembra durante el experimento. Permanecieron fijas en el espacio, mientras que los factores macrometeorológicos, orográficos y termodinámicos mencionados arriba variaban de un día a otro. Desgraciadamente, el diseño original del proyecto no preveía soluciones o alternativas adecuadas.

Para explorar la relación entre la siembra de nubes y la intensificación de la precipitación, la hipótesis más sencilla adoptada en TECNAGRO fue buscar la precipitación inducida en cualquier lugar a sotavento de la trayectoria de siembra. En el caso de viento ligero o de calma, se encontró evidencia de lluvia inducida dentro de la zona objetivo o cerca de la trayectoria de siembra; en esos casos, la red de alta densidad demostró su utilidad para ofrecer datos pluviométricos con buena resolución temporal y espacial.

Cuando se hacía la siembra en situaciones con viento (en 850-700 hPa) de entre 20 y 25 m s⁻¹ y con presencia de corrientes orográficas ascendentes [3], se encontraron con frecuencia patrones de precipitación importantes a sotavento, fuera de la zona objetivo. Se detectaban por medio de radar [4, 5]. El análisis de los datos muestra que las cantidades de lluvia medidas sobre el suelo a sotavento de la trayectoria de control estaban de acuerdo con las velocidades de viento medidas por pilotos en vuelo [11, 12]. Las conclusiones que se derivaron fueron:

- Debido a la posición geográfica de la zona experimental y de los vientos de suroeste dominantes que acompañaban a los sistemas de nubes productores de precipitación, se producían efectos positivos fuera de la zona objetivo, que se extendían a sotavento sobre el mar abierto.
- En dichos casos, ningún análisis pluviométrico (basado en unidades experimentales tradicionales o flexibles) podía obtener un significado estadístico razonable basado en el conjunto de datos recogido dentro de las dos zonas [7, 8].

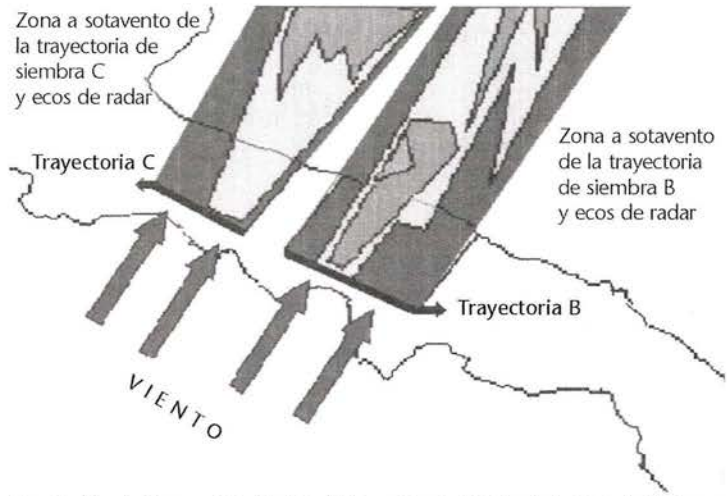


Figura 1 — Presentación esquemática del patrón de lluvia a sotavento de las trayectorias de siembra B y C que se detecta contando píxeles de la imagen de radar. Gris normal = precipitación más intensa, gris claro = precipitación moderada y gris oscuro = precipitación menos intensa.

En TECNAGRO, se llevó a cabo un estudio de pluviometría de radar mediante los siguientes pasos:

- La imagen radar de precipitación total (hasta 3 horas después de la siembra) se convierte a un formato PBM ASCII con una rejilla 528 × 480 y píxeles de 0,5 × 0,5 km² (la longitud del pulso de radar es de 500 m).
- Dependiendo de la dirección de viento medida en el vuelo, se elige una trayectoria a sotavento de la línea de siembra elegida en la zona objetivo (a veces, los ecos sugieren divergencia del flujo de aire) (Figura 1).
- Dentro de dicha trayectoria, el ordenador elige y cuenta los píxeles que tienen la misma cantidad de lluvia (1, 3 ó 6 mm como valores medios, de acuerdo con la escala numérica de color de precipitación del radar). Origina entonces:
 - Zonas de superficie (km²) y cantidades relativas de precipitación determinadas por los píxeles del mismo color.
 - Totales de precipitación (mm) recogida en la zona a sotavento.
 - Superficie total (km²) cubierta por la lluvia inducida.
- Manteniendo constante la dirección del viento, se repite un procedimiento idéntico para la zona de control.
- Se realiza un análisis y una comparación de las cantidades de precipitación en las zonas objetivo y de control de sotavento.

Como el objetivo principal del análisis era comparar las zonas objetivo y de control, se obtienen resultados interesantes de los casos en los que las imágenes de radar mostraron precipitación:

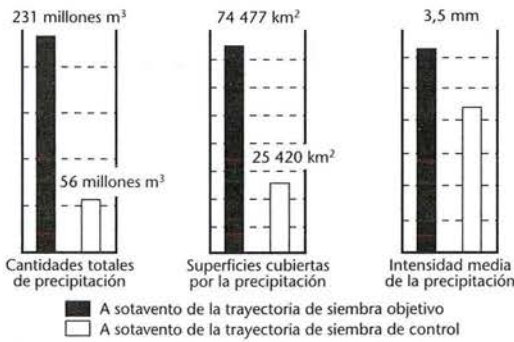


Figura 2 — Resumen de los resultados de 102 horas de siembra (el 54 por ciento de las horas totales de siembra). Las cantidades de precipitación se calculan a partir de imágenes de radar de hasta tres horas después de la siembra: (a) la precipitación total (en millones de metros cúbicos) demuestra que la precipitación a sotavento de la zona objetivo es cuatro veces más que a sotavento de la zona de control; (b) el total de superficies con lluvia a sotavento de la zona objetivo es tres veces mayor que la superficie a sotavento de la zona de control; (c) intensidad media de lluvia normalizada a sotavento de la zona objetivo y de la zona de control.

- A sotavento de las dos zonas, objetivo y de control.
- Solo a sotavento de la zona de control (siembra fallida).

Los datos de este estudio se recogieron durante el proyecto en 139 misiones de siembra desde avión, 298 horas de vuelo y 188 horas de siembra.

Las campañas de siembra se realizaron en distintas estaciones, comenzando en 1992 (con un software nuevo instalado en el radar y un sistema GPS en el avión de siembra) hasta 1994, momento en que, por desgracia, se finalizó el proyecto por falta de fondos.

Se analizaron los datos de las 139 misiones pero inconvenientes operativos (p. ej., ruido de radio, imágenes de radar poco claras, distribución caótica de ecos, fallos de radar, falta de disponibilidad de informes de viento) redujeron el número total de casos fiables. La Figura 2 muestra el resumen de los datos recogidos en 102 horas de siembra, es decir, el 54 por ciento del tiempo total de siembra. Se analizaron razones entre objetivo y control de cuatro clases de intensidades de precipitación. Demuestran que las lluvias intensas se producen principalmente a sotavento de la zona objetivo (se puede obtener una tabla detallada de resultados solicitándola al autor). Las cantidades promedio de lluvia son: 3,1 mm (a sotavento de la zona objetivo); y 2,2 mm (a sotavento de la zona de control).

Esto significa que la región a sotavento de la zona objetivo recibió un 40 por ciento más de precipitación que la región a sotavento de la zona de control. Este aumento está muy por encima del 15 por ciento de aumento de la precipitación esperado, de acuerdo con el diseño original del proyecto.

Este proyecto habría sido un éxito para la metodología de la siembra de nubes si se hubieran modificado de forma adecuada las líneas de siembra a barlo-

vento, permitiendo de esa manera que la precipitación inducida cayera dentro de los límites de los objetivos supuestos.

Dado que la calibración del radar demostró una coherencia suficiente entre los totales estimados de lluvia y los datos pluviométricos del suelo, cuando se disponía de ellos, nuestro comentario sobre las suposiciones básicas son los siguientes:

- En la escala de la zona experimental (subsintóptica) las zonas objetivo y de control estaban también cerca la una de la otra; la suposición de dirección de viento constante dentro de la trayectoria a sotavento de ambas zonas, objetivo y de control, es, por lo tanto, aceptable.
- Se demostró que la subjetividad a la hora de definir exactamente los límites geográficos de las zonas de lluvia era un problema menor, ya que el software de ordenador utilizado para el cálculo de las zonas geográficas y las intensidades de lluvia resultó ser bastante adecuado.

El hecho de que grandes cantidades de lluvia cayeran en el mar parecía evidente a partir del análisis de radar. Por desgracia, Control de Tráfico Aéreo no permitió, cuando fueron solicitados, desplazamientos de las líneas de siembra debido a problemas de seguridad de la aviación.

El presente estudio, por lo tanto, trata de añadir más evidencia a lo que ya se sabía de las actividades operativas. A la vez, representa un intento de cuantificar la cantidad de lluvia caída fuera de la zona objetivo y a poca distancia de la costa, donde no existe otra posibilidad de medir la precipitación caída.

Solo se encontró un caso que mostrara lluvia ligera exclusivamente a sotavento de la zona de control, debido probablemente a que el ordenador tenía dificultades para distinguir los ecos de lluvia del ruido de suelo durante una situación anticiclónica. Recordando que las operaciones de siembra se realizaron de acuerdo con un calendario aleatorio, la conclusión en TECNAGRO fue que la siembra de nubes en las condiciones climáticas de Puglia es una metodología de trabajo capaz de intensificar la precipitación en una escala regional.

Como ya se ha observado, la intensificación de lluvia estimada por radar (40 por ciento) está muy por encima de la esperada por el experimento preliminar. Desgraciadamente, la mayor parte de la precipitación se produjo sobre el mar, mientras que cantidades incluso menores sobre tierra habrían sido beneficiosas para la agricultura local.

TECNAGRO está planificando un experimento de comprobación. Sus objetivos son adoptar trayectorias flexibles de siembra (dependiendo de las intensidades de viento reales obtenidas por medidas en vuelo) y un análisis más detallado del mecanismo de difusión del

reactivo en las nubes. Se introducirán desplazamientos adecuados a barlovento de las líneas de siembra previas en caso de vientos fuertes.

Podrían considerarse como un ejercicio de investigación los ejemplos presentados para un pluviómetro situado a escasa distancia de la costa. En el futuro, la adopción de líneas flexibles de siembra dependientes del viento ofrecerá datos útiles para cuantificar los resultados de la siembra a través, sobre todo, de una red pluviométrica terrestre de alta densidad.

Debido a las frecuentes sequías, sigue siendo difícil esperar la posibilidad de llevar a cabo un experimento de larga duración que pudiera asegurar el gran número de unidades experimentales flexibles necesario en la estadística tradicional. Por lo tanto, los futuros experimentos de intensificación de la lluvia deben buscar metodologías alternativas para probar y, finalmente, demostrar el éxito o el fracaso de las operaciones de siembra.

Se necesitan modelos numéricos aplicables para regiones particulares y para redes pluviométricas de alta densidad. En caso de que las operaciones se lleven a cabo cerca de la costa, como en Puglia, es de vital importancia el uso generalizado de radares meteorológicos digitales con capacidad Doppler.

Es cierto que algunos científicos han expresado sus dudas sobre la posibilidad de que la siembra de nubes aumente la precipitación. Sus puntos de vista son generalmente la herencia de experimentos previos fracasados. Hay argumentos de que hay muchos factores meteorológicos implicados en los procesos que provocan la precipitación para determinar claramente los efectos de la siembra. Los estadísticos, por otra parte, parecen poco dispuestos a abrir la valoración de los resultados de la experimentación a una mayor evidencia física. En [10] aparece el examen de un meteorólogo sobre estos rígidos puntos de vista.

Es alentador mencionar que el Decimotercer Congreso de la OMM (en mayo de 1999) "tomó nota de los nuevos aspectos emergentes de las actividades de modificación artificial del tiempo, así como de su posible aplicación a la gestión de recursos hídricos". En el Congreso se dijo que la comunidad meteorológica debe estar preparada para ofrecer asesoramiento sobre la eficacia de la siembra de nubes.

Entre las necesidades más urgentes para tener éxito en la aplicación de los métodos de modificación artificial del tiempo cuando se den las condiciones apropiadas, se encuentra la colaboración con los físicos de nubes y con los expertos de radar para preparar modelos y software más sofisticados.

Referencias

- [1] NANIA, A. *et al.*, 1999: Scientific and Technical Achievements from the Italian Rain Enhancement Project. Seventh WMO Scientific Conference, Chang Mai, Tailandia, WMO/TD-N.º 936.
- [2] PACCAGNELLA, T., 1993: Interazione Tra Strutture Orografiche e Flussi Troposferici nel Comparto Centro-Occidentale della Basilicata, Serv. Met. Emilia Romagna.
- [3] TECNAGRO, 1996: Il Progetto Pioggia (CD-ROM), Roma.
- [4] NANIA, A., 1994: Cloud Seeding and Rain: Time Interval in Experimental Units. Sixth WMO Scientific Conference on Weather Modification, Paestum. Report N.º 22, WMO/TD N.º 596.
- [5] SPIRIDONOV, V., 1999: Dynamic Seeding Effects on Convective Clouds. Seventh WMO Scientific Conference, Chang Mai, Tailandia, WMO/TD-N.º 936.
- [6] SMITH, P., 1999: The Freezing Rates of Raindrops: Implications regarding Cloud Seeding for Dynamic Effects. Seventh WMO Scientific Conference, Chang Mai, Tailandia, WMO/TD-N.º 936.
- [7] LIST, R. *et al.*: The Rain Enhancement Experiment in Puglia, Italy: Statistical Evaluation. *JAM* Vol. 38, N.º 3.
- [8] NANIA, A., 1999: Just a look ... Farther! WMO MEDSEEMEPEP Workshop, Monselice (Italy). WMP Report N.º 33.
- [9] CHANGNON, S. A.: The Statistical and Physical Design and Evaluation of Precipitation Enhancement Projects. En: WMO Training Workshop on Weather Modification for Meteorologists. PEP Report N.º 13.
- [10] NANIA, A., 1998: The Italian Rain Enhancement Project. A Meteorologist's view. *WMO Bulletin* 47 (3).
- [11] TECNAGRO, 1996: Report on Seeding Operations, October 1992 - May 1993, Vols. I & II, Roma.
- [12] TECNAGRO, 1996: Report on Seeding Operations, January-May 1994, Vols. I & II, Roma.

Bibliografía

- ELLIOT, R. D., 1986: Winter Orographic Cloud Seeding, Precipitation Enhancement: A Scientific Challenge. AMS.
- OMM, 1977: Areal extent of Seeding Effects in Relation to Precipitation Enhancement Project, WMO Weather Modification Programme. PEP Report N.º 6.

