

<http://www.gcrio.org/USGCRP/LaJolla/appA.html>

SIMMONS, A.J. and R. STRÜFING, 1981: *An Energy and Angular-momentum Conserving Scheme, Hybrid Coordinates and Medium-range Weather Prediction*. ECMWF Technical Report, **28**, 68 pp.

TIEDTKE, M., 1989: A comprehensive mass flux scheme for cumulus parametrization in large-scale mo-

dels. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1779-1800.

TIEDTKE, M., 1993: Representation of clouds in large-scale models. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3040-3061.

VITERBO, P. and A.C.M. BELJAARS, 1995: An improved land surface parametrization scheme in the ECMWF model and its validation. *J. Climate*, **8**, 2716-2748. □

EL PROYECTO ITALIANO DE INCREMENTO ARTIFICIAL DE LA PRECIPITACIÓN: EL PUNTO DE VISTA DE UN METEORÓLOGO

Por Abele NANIA*

Introducción

Durante varios de los meses de invierno de los años 1986 a 1995 se emprendió, en la región de Puglia, en el sur de Italia un proyecto de incremento artificial de la precipitación [1], [2]. La financiación corrió a cargo del Ministerio de Recursos Agrícolas y de la Administración Regional. El diseño científico original del proyecto (cruce aleatorio) fue formulado por el difunto Prof. A. Gagin.

En 1987, a petición de TECNAGRO (institución italiana sin ánimo de lucro) que actuaba como gestora general, el autor participó en el proyecto como coordinador científico. El proyecto se interrumpió prematuramente en 1995 por falta de fondos. Sólo se ejecutaron 260 de las 303 unidades de experimentación que los expertos consideraban necesarias para obtener una significación estadística del 95 por ciento.

Durante el proyecto se totalizaron 421 horas de siembra de nubes, 2 507 horas de observación por radar y 700 000 datos de medidas pluviométricas. Se suministró regularmente asesoramiento meteorológico a los decisores operativos. Pilotos y tripulaciones experimentados cooperaron en un intercambio abierto de información y opiniones con los decisores. Los meteorólogos analizaron situaciones sinópticas y mesosinópticas, imágenes de satélite, fenómenos meteorológicos y nubes, además de imágenes de radar de alta resolución.

A pasar a la fase de evaluación se volvió cada

vez más difícil para un meteorólogo aportar una contribución útil. Muchos aspectos de la situación meteorológica parecieron perder el papel clave que tenían cuando se decidieron los procedimientos de inseminación a la vista de las situaciones meteorológicas en tiempo real.

En la fase de evaluación, los estadísticos trataron los fenómenos meteorológicos desatendiendo cualquier especificación que los meteorólogos pudieran emplear como explicación previa o posterior. Por otra parte, si hubiera habido que ampliar las clasificaciones estadísticas teniendo en cuenta las especificaciones de los meteorólogos, hubiera sido necesario recoger un gigantesco volumen de datos y, consecuentemente, llevar a cabo un experimento extremadamente largo (exploratorio y de confirmación), cuya financiación presumiblemente ningún decisor o administración hubiera garantizado [3].

En el informe oficial del Comité Científico (CC) [1] del Proyecto se afirma: "El resultado del análisis (estadístico) de los 260 días de lluvia disponibles fue que no podía hallarse ningún efecto apreciable de la inseminación". Al mismo tiempo, el informe del miembro del CC, B. Silverman, mostró algunos casos que mostraban efectos interesantes (63,5 por cien de incremento en la zona objetivo) y daban la oportunidad de proceder a estudios y clasificaciones adicionales de los datos.

En lo referente al proyecto italiano, la afirmación del CC significa verosímilmente el fin del experimento.

Quedan dudas y críticas sobre la definición de las unidades experimentales [3], [4], [5]. En necesi-

* Antiguo Director del Servicio Meteorológico de Italia

rio expresar el punto de vista de un meteorólogo sobre los datos pluviométricos recogidos en Puglia para su elaboración estadística:

- (a) los intervalos de tiempo de las unidades experimentales (tanto para las zonas objetivo como para las de control) abarcan 24 horas. Para un meteorólogo es un intervalo de tiempo demasiado largo si tenemos en cuenta que las perturbaciones atmosféricas de pequeña escala pueden introducir cantidades adicionales de lluvia no relacionadas con las operaciones de inseminación; los datos de precipitación diaria se emplean por lo general para la evaluación estadística, puesto que los bancos de datos pluviométricos nacionales existentes se basan sobre todo en observaciones de 24 horas;
- (b) en los días de inseminación, las duraciones de la siembra de las nubes son claramente inhomogéneas, puesto que las inseminaciones efectivas sobre el objetivo tuvieron una duración media de dos horas (¡menos de la décima parte de un día!) y, a veces, duraron sólo unos pocos minutos.

Es una tarea difícil evidenciar los efectos de la inseminación si consideramos la variabilidad extremadamente alta de la precipitación natural. En Puglia se instaló, en la zona del proyecto, una adecuada red pluviométrica de alta densidad [1] que permitió acortar el intervalo de tiempo de las unidades experimentales de acuerdo con la duración efectiva de la inseminación de las nubes. Simultáneamente, mediante el empleo de un radar meteorológico digital de segunda generación, fue posible obtener cada cinco minutos [6] las alturas de las cimas de las nubes, la reflectividad en sus bases y las precipitaciones totales en el área del proyecto. Dichas medidas se compararon con los datos pluviométricos en tierra.

Además, se adoptó un intervalo de tiempo que abarcaba desde la hora de inseminación más tres horas para tener en cuenta el tiempo medio empleado por una perturbación atmosférica en atravesar la zona del proyecto cubierta por el radar desde el flanco de las montañas a sotavento.

A pesar de que los resultados *post factum* obtenidos del análisis de los diferentes conjuntos de datos pluviométricos no mostraron significación estadística, afloraron algunos rasgos interesantes al transformar en imágenes los análisis mesoescalares de los datos de radar y observarlos en secuencia animada [7].

Los puntos más importantes deducidos de más de 14 000 imágenes de radar anteriores, simultáneas

y posteriores a la inseminación de las nubes, fueron los siguientes:

- se observaron frecuentemente alturas crecientes de las cimas nubosas (seleccionadas aleatoriamente) cercanas a la línea de inseminación en la zona objetivo y seguidas por el radar a sotavento;
- a lo largo de los campos nubosos se observaron, a sotavento de la inseminación, penachos lluviosos no adyacentes muy alejados, a veces, de la zona objetivo (véase la figura de la página siguiente);
- las máximas cantidades de precipitación dadas por el análisis del radar aportaron evidencia visual de los efectos de amplificación areolar de la inseminación.

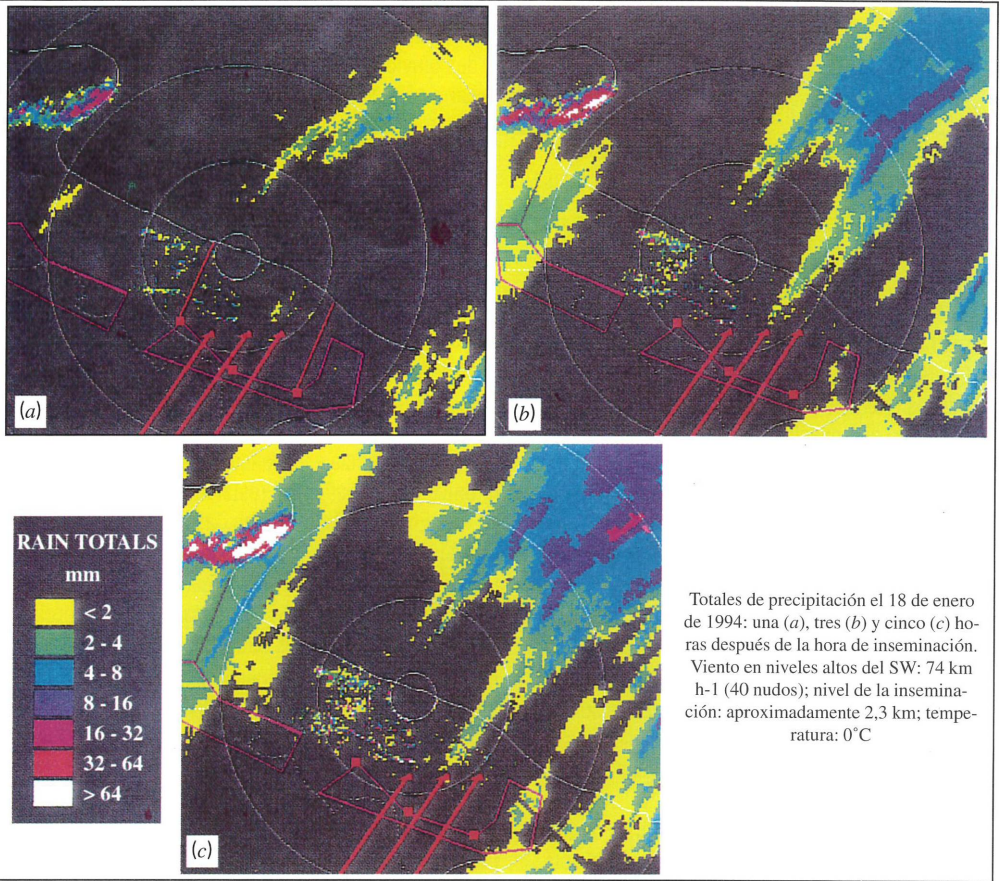
Ninguna de las anteriores características de las nubes y de la precipitación se mostraron simultáneamente en las zonas de control.

La evidencia visual aportada por el análisis del radar requirió ser apoyada por una demostración física. Para lograr dicho objetivo, los meteorólogos de TECNAGRO han desarrollado estudios detallados posteriores en colaboración con el Grupo del Servicio Meteorológico Regional de Bolonia (Paccagnella y otros) [8] y con la Universidad de Roma, "La Sapienza" (Palmieri y otros) [9].

El Grupo de Bolonia empleó el modelo numérico de área limitada del Centro Meteorológico Nacional de la Universidad de Belgrado para estudiar, desde un punto de vista climatológico, la influencia de la orografía local en la modificación de las corrientes de aire horizontales y verticales. El equipo de Palmieri empleó el análisis de Energía Potencial Convectiva Disponible (CAPE) e investigó también la distribución mesoescalar de otras magnitudes termodinámicas (agua precipitable y velocidad vertical del viento) en situaciones meteorológicas relacionadas con las operaciones de inseminación.

Resultados importantes de dichos estudios son los siguientes:

- la existencia probada de ondas orográficas en la zona del proyecto con influencias distintas en las zonas de control y en las zonas objetivo;
- los análisis CAPE revelaron los papeles preponderantes de diferentes fuentes locales de energía;
- el golfo de Taranto era la fuente de humedad al sur de la zona del proyecto y la seca llanura de Capitanata al norte.



Totales de precipitación el 18 de enero de 1994: una (a), tres (b) y cinco (c) horas después de la hora de inseminación. Viento en niveles altos del SW: 74 km h-1 (40 nudos); nivel de la inseminación: aproximadamente 2,3 km; temperatura: 0°C

Ambos modelos evidenciaron que los factores termodinámicos mesoescales contribuyen a modificar fuertemente la distribución de la precipitación en tierra.

La evidencia visual aportada por los análisis del radar sugiere que la precipitación estimulada que se esperaba recoger en la zona objetivo cayó, de hecho, fuera de ella. En otras palabras, las operaciones de inseminación de las nubes tuvieron éxito a menudo pero la precipitación estimulada falló el blanco oficial (véase la figura). Es más, dependiendo de la dirección de los vientos en niveles altos, se dio a veces contaminación pluviométrica inadvertida en la zona de control.

Estos hechos nos llevan a la conclusión obvia de que tanto las evaluaciones estadísticas realizadas como los diferentes conjuntos de datos pluviométricos analizados no podían reflejar los efectos beneficiosos de las operaciones de inseminación. Tal conclusión requiere comentarios y explicaciones adicionales: algunas se refieren al diseño científico original del proyecto y/o están condicionadas por la longitud

y anchura geográficas de la región de Puglia; otras dependen de las circunstancias en tiempo real que se dieron durante las operaciones de inseminación.

En la zona estaban en vigor restricciones de vuelo originadas en las autoridades de control del tráfico aéreo y debidas a la situación militar existente entonces y a las intensas actividades de apoyo aéreo en los aeropuertos que se daban entonces en el área del proyecto; retrasos y niveles de vuelo superiores a los requeridos se dieron entre los inconvenientes más frecuentes. La ocurrencia de efectos extendidos en superficie es de importancia primordial [10], [11], [12]. No existe indicio de que dichos aspectos se tuviesen en cuenta en el diseño original del proyecto.

Observaciones finales

Teniendo en cuenta la dirección predominante del viento asociada a los sistemas productores de precipitación en la región de Puglia, los análisis a posteriori mostraron:

- los campos de inseminación deben situarse considerablemente a barlovento de las zonas

objetivo, de forma que probablemente se recogería más precipitación en ellas;

- las zonas objetivo y de control están demasiado próximas entre sí;
- las zonas objetivo se encontraban demasiado próximas a la orilla del mar; sólo el radar podría detectar la precipitación sobre el mar.

Herramientas muy perfeccionadas, como los modelos numéricos de mesoescala, los radares meteorológicos digitales de alta definición y la red pluviométrica de alta densidad, brindaron conjuntamente descripciones meteorológicas detalladas de cada una de las operaciones de inseminación. El veredicto oficial sobre el proyecto italiano de estimulación artificial de la precipitación es que se trata, para un meteorólogo, de un ejercicio estadístico insatisfactorio.

En el proyecto italiano, las características de la precipitación estimulada observadas dentro y fuera de las zonas objetivo recibieron explicaciones meteorológicas aceptables desde el punto de vista operativo (efectos areolares ampliados, contaminación de las zonas de control) pero parecen no merecer la suficiente atención desde un punto de vista estadístico general, puesto que las zonas objetivo seleccionadas originalmente recogieron menos precipitación de la esperada.

Aunque se podría haber aplicado una corrección adecuada seleccionando campos de inseminación diferentes tan pronto como la lluvia estimulada cayó fuera de las zonas objetivo, los expertos decidieron no hacerlo para no comprometer la utilización de los datos pluviométricos recogidos previamente.

En los numerosos proyectos de estimulación de la precipitación llevados a cabo en el mundo, unas pocas personas informan de resultados controvertidos. Entre otros podrían mencionarse las evaluaciones de los proyectos israelíes I, II y III [13]. El análisis estrictamente tradicional de los datos pluviométricos recogidos durante los 30 años del proyecto israelí no ha generado ni una relación causa efecto ni resultados incontrovertidos en la inseminación de nubes y la precipitación estimulada.

El riesgo de sacar conclusiones inciertas, incluso tras un proyecto a largo plazo de estimulación de las nubes, como en Israel, fue estimado como demasiado grande por los decisores italianos.

Sic stantibus rebus, parece que la modificación del tiempo y la intensificación de la precipitación en particular, caminan por un callejón sin salida; debe alentarse a los expertos a que cambien de ruta. Esto daría la oportunidad de descubrir y aplicar metodologías alternativas que pudieran aportar una evidencia

objetiva de los efectos de la inseminación. A esos efectos, los radares meteorológicos digitales y las redes pluviométricas de alta densidad parecen ser las herramientas más prometedoras.

“...con nuestra gran falta de conocimientos sobre la física y la dinámica de las nubes, la mayor parte de los experimentos han sido esencialmente controlados por los estadísticos y por sus metodologías”. Esto escribió Changnon en 1979 [3]; ¿es válido hoy en día? ¿O puede la nueva generación de dispositivos electrónicos brindar una evidencia visual de los resultados de los experimentos que pueda ser aceptada por la comunidad científica y empleada como confirmación del éxito o del fracaso de la inseminación de nubes? El experimento de Schaeffer no requiere evidencia estadística; la evidencia visual fue la única característica del resultado.

En el proyecto italiano, las análisis del radar y las imágenes de la modificación de las nubes (cimas de las nubes y totales de la precipitación), que tuvieron lugar a sotavento en las zonas objetivo, aportaron a veces evidencias suficientes (p. ej. de extensión y volumen de la precipitación) y se vieron sostenidas por una explicación científica. Desde el punto de vista de un meteorólogo dicha evidencia puede considerarse “amplia e inequívoca” [3], y más que suficiente para indicar que “el sistema funciona”. El meteorólogo puede estar mirando demasiado lejos, pero la propuesta de una metodología instrumental alternativa para evaluar los proyectos de modificación del tiempo es digna de consideración. Son significativos los siguientes puntos:

- la declaración final acerca de la calidad de las operaciones de inseminación de nubes, más que una mera evaluación estadística del proyecto como un todo, debe asegurar la evaluación operativa de cada unidad experimental, en tanto que la evidencia visual de las operaciones de inseminación de nubes documentada por los análisis del radar merece mayor atención;
- la optimización de los procedimientos de inseminación de las nubes debería considerarse como una nueva frontera para la intensificación artificial de la precipitación. Los hechos positivos, aunque escasos en número, deberían estudiarse con detalle para aportar directrices a los experimentos futuros;
- pueden crecer los beneficios para el público y para la ciencia mediante la posibilidad (necesidad realmente) de que los meteorólogos puedan contribuir a la evaluación final de los proyectos operativos de inseminación de las nubes.

Referencias

- [1] *WMO Bulletin* **42** (4), October 1993.
- [2] *WMO Bulletin* **45** (2), April 1996.
- [3] CHANGNON, S.A., 1979: The statistical and physical design and evaluation of precipitation enhancement projects. WMO Training Workshop on Weather Modification for Meteorologists. PEP Rep. 13
- [4] SMITH, P.L., 1986: An engineer's view on the implementation and testing of seeding concepts. *Precipitation enhancement: A Scientific Challenge*. Amer. Met. Soc.
- [5] NANIA, A., 1994: Cloud seeding and rain: time intervals in experimental units. Sixth WMO Scientific Conference on Weather Modification, Paestum, Italy. WMP Report No. 22 WMO/TD No. 596.
- [6] COST-75, 1995: *Weather Radar Systems*. Report EUR 16013 EN.
- [7] TECNAGRO, 1996: *Il Progetto Pioggia*. (CD-ROM).
- [8] PACCAGNELLA T. *et al.*, 1993: *Interazione tra Strutture Orografiche e Flussi Troposferici nel Comparto Centro-occidentale della Basilicata*. Serv. Met. Emilia Romagna, Bologna.
- [9] PALMIERI, E. *et al.*, 1997: *Mesoscale Analyses and Cloud Seeding: Some Case Studies*. Physics Department, University "La Sapienza", Rome.
- [10] WMO, 1977: Areal Extent of seeding effects in relation to the Precipitation Enhancement Project. PEP Report No. 6.
- [11] WMO, 1979: Training Workshop on Weather Modification for Meteorologists. PEP Report No. 13.
- [12] ELLIOTT, R.D., 1986: Winter Orographic Cloud Seeding. *Precipitation Enhancement: A Scientific Challenge*. Amer. Met. Soc.
- [13] ROSENFELD, D. *et al.*, 1991: Thirty Years of Cloud Seeding in Israel: Achievements and Questions. Second International Meeting on Agriculture and Weather Modification. León, Spain. □

