

WALLACE E. HOWELL, Sc. D.  
CERTIFIED CONSULTING METEOROLOGIST

35 S.Mt. Vernon Country Club Rd.  
Golden, Colorado 80401 USA  
24 September 1990

Sr. D. Luis Montalvo Lobo  
Servicio Insular de Recursos Hidráulicos  
Excmo. Cabildo Insular de Gran Canaria  
Las Palmas de Gran Canaria

Querido Sr. Montalvo:

El pasado Junio envié a su oficina una cinta de video con los resultados de las grabaciones del radar, pidiéndole que me la devolviera a finales de Agosto. Todavía no me ha sido devuelta.

Apreciaría cualquier cosa que pudiera usted hacer para acelerar la devolución de este objeto.

## SUMARIO

Este informe evalúa tres preguntas: ¿Es efectivo el procedimiento de siembra de nubes usado en Gran Canaria, y, es el mejor para el propósito? ¿Han aparecido resultados claros aquí, en Gran Canaria? ¿Puede ser mejorada la operación?

La respuesta a la primera pregunta es, definitivamente, sí, el procedimiento es efectivo. Esta respuesta viene de un estudio de un número de operaciones similares sujetas al meta-análisis. Esto se explica más tarde en otro párrafo. Asimismo, la siembra higroscópica es preferible a la siembra por fases de hielo, ya que una revisión amplia de temperaturas de las nubes más altas desde las ventanas del Meteosat indica que las temperaturas para siembra por fases de hielo ocurren mucho menos frecuentemente que las de siembra higroscópica.

La respuesta a la segunda pregunta no es segura, probablemente sí. Cada uno de los ocho análisis presentados mas abajo da alguna evidencia, basándose únicamente en datos canarios, de que las precipitaciones durante e inmediatamente después de las operaciones de siembra de las nubes bajo condiciones meteorológicas favorables fueron entre 30 y 50 veces más pesadas de lo esperado en comparación con misiones "fantasmas". Sin embargo, las posibilidades de que incluso estas indicaciones selectivas puedan ser debidas a la casualidad son aproximadamente de uno entre cinco, mientras que normalmente se suelen tomar posibilidades de uno entre veinte para que un hecho pueda considerarse estadísticamente significativo. La dificultad estriba en que el proyecto de Gran Canaria ha sido dirigido como un esfuerzo de producir lluvia muy directo, nunca como un experimento científico, y los datos acumulados durante su transcurso no llevan a tipos de análisis científico aceptables. Consecuentemente, aunque se puede afirmar confidencialmente que la evidencia sugiere incrementos sustanciales de las precipitaciones durante las misiones operacionales, no pueden ser probadas.

La respuesta a la tercera pregunta es sí, pueden realizarse varias mejoras, de las cuales las más importantes son:

- Un avión que pueda transportar una mayor cantidad de solución sembradora y que sea capaz de mantenerse en estación más tiempo. Esto significaría que una proporción mucho mayor de tiempo de vuelo sería empleada productivamente, y se perdería menos tiempo en idas y venidas. Dependiendo de la distribución de la capacidad de carga entre combustible y solución sembradora, el avión utilizado en el pasado puede permanecer en estación unas 2 horas, de las cuales 90 minutos, más o menos, se emplean en la siembra.

- Grabacion adecuada de las observaciones de radar de las posiciones, movimientos, e incremento de los ecos de las precipitaciones. El equipo necesario para esta intencion se encuentra disponible, como lo demuestra la cinta de video prestada al Cabildo. El estado inútil de las grabaciones de radar pasadas atarcaba la más grave pérdida de datos hasta el presente análisis, ya que eran prácticamente los únicos datos que podian haber hecho posible el rastrear cada nube sembrada y ver como diferia su comportamiento del de nubes cercanas no sembradas.

- Establecer un plan operacional que permita la comparacion de misiones sembradas y no sembradas bajo condiciones meteorologicas comparables. Si esto pudiera conseguirse incluyendo a Tenerife en el programa, no se perderia capacidad operacional al distribuir aleatoriamente las misiones entre una isla y la otra.

- Mejor coordinacion de la direccion de operaciones y mantenimiento de registros. Para este análisis, apenas se consiguieron tablas meteorologicas adecuadas, y los registros de precipitaciones se presentaron de forma desordenada (no compilada).

- Valdria la pena esforzarse para conseguir informes de máxima altura de las nubes y alturas de inversiones, de aviones comerciales partiendo de y entrando a Gando.

- Deberia dedicarsele atención a establecer una fecha de comienzo mas temprana, en otoño. La mitad de las temporadas han comenzado el 29 de Noviembre o más tarde, perdiendo buenas oportunidades que tienen lugar antes en Noviembre.

Una cuarta pregunta es ¿Puede ser justificada la continuacion del proyecto en terrenos económicos y de prudencia pública? Este análisis no da consejo acerca de esta pregunta, ya que la evidencia necesaria para dar una respuesta no se hallaba disponible. Una cosa, sin embargo, ha quedado clara: en el pasado, votar sobre dicha pregunta, sin referencia a un análisis cuidadoso de la evidencia, ha sido en general mucho menos favorable para la innovacion que una decision basada en un análisis adecuado e imparcial. Se requiere un análisis cuantitativo de beneficios y riesgos, que será inevitable si el programa va a continuar durante un periodo largo de tiempo.

Podria ser de utilidad mencionar que varias de las preguntas acerca del clima de lluvias de las Islas Canarias que han surgido durante estos análisis podrian resultar temas adecuados para tesis estudiantiles en la recientemente abierta Universidad de Gran Canaria.

El intento de modelaje tuvo muy poco éxito debido a la insuficiencia de observaciones disponibles para el propósito.

## ANÁLISIS EFECTUADOS EN GRAN CANARIA

### 1.- Análisis global de precipitaciones

Se hizo un análisis global de los registros de precipitaciones, cubriendo todas las categorías de misiones sembradas y fantasmas. (Las misiones fantasmas son aquellas en las que las condiciones meteorológicas eran apropiadas para la siembra, pero ésta, por una u otra razón, no se efectuó. Las 29 misiones fantasmas proporcionaron un sustituto para las misiones no sembradas al azar, usadas para comparaciones estadísticas con las 121 misiones sembradas incluidas en el análisis). En esta amplia comparación, la frecuencia de precipitación durante las misiones sembradas fue un 9% mayor que durante las misiones fantasmas, pero la variabilidad de misión a misión era tan grande que este resultado tiene una probabilidad como mínimo de 4 de 5 de suceder por casualidad.

Varias circunstancias dejan este análisis global abierto a serias preguntas. Las precipitaciones de tormentas con viento de componente sur están muy mal documentados porque la pendiente sur de la isla apenas dispone de pluviógrafos, y las misiones operacionales tenían una mayor proporción de vientos del sur que las misiones fantasmas. Se esperaría que esto llevara a la comprensión de su contribución a las precipitaciones en misiones operacionales. En la tanda de 29 misiones fantasmas había una tormenta de excepcional magnitud (11 Nov. 1985) que sobrepasó la más pesada de las 124 misiones operacionales por más del 30% y contribuyó en más del 26% a la precipitación total de la tanda fantasma. ¿Hubiera debido incluirse, a pesar de que ocurrió antes de que la temporada comenzase oficialmente?

Otra pregunta viene de la selección, para la mayoría de las misiones fantasmas, del periodo de tres horas durante el día que comenzaba con los primeros signos de precipitación, algo que era imposible de hacer en el caso de las misiones operacionales. Parecía no haber ninguna forma alternativa de separar la hora del día asignada a las misiones fantasmas, y sin embargo ciertamente tendía a predisponer el resultado a favor de las misiones fantasmas sobre las operacionales. Por estas razones, el resultado de este análisis se considera inconcluso.

### 2.- Misiones con viento de componente Norte

Con el fin de eliminar la cuestión referente a la dirección del viento en relación a la disposición de los pluviógrafos, las misiones con viento de componente sur fueron eliminadas de la lista global. La categoría de las misiones restantes, las de viento de componente norte y

documentación de los pluviógrafos relativamente completa, se designó como la categoría NORD, e incluía 74 misiones sembradas y 20 fantasmas, documentadas por 18 de los 24 pluviógrafos.

Como se informaba en el Informe de Progresos del 31 de Agosto de 1.990, el análisis de la categoría NORD indicó una frecuencia de precipitación para las misiones sembradas un 68% mayor que las misiones fantasmas (basadas en tiempo-en-estacion+30 minutos), con una probabilidad de 4 de 5 que este resultado no se deba únicamente a la casualidad.

### 3.- Misiones sin máximas alturas de nubes frías

Se analizó otra categoría selectiva, eliminando las ocasiones en las que la siembra de nubes en la fase de hielo pudiera interferir en el efecto de la siembra higroscópica. El criterio usado para el rechazo fue una depresión del punto de formación del rocío menor de 10°C al nivel de -10°C, basándose esta selección en la observación al aire libre 1200' desde Tenerife, cuya representatividad para Gran Canaria a veces no es muy buena. Una capa húmeda lo bastante profunda como para alcanzar este nivel suele llevar a precipitaciones muy ampliamente distribuidas, de una clase no muy probable de ser influenciada por la siembra higroscópica.

Esta categoría comprendía 84 misiones sembradas y 24 fantasmas, y produjo un incremento estimado en la frecuencia de precipitación del 44%, pero con una probabilidad de 2 de 5 de que este resultado no sea debido sólo a la casualidad.

Se hizo otro análisis de la categoría que eliminaba al viento de componente sur y la humedad al nivel de -10°C. Sin embargo, el reducido número de casos, junto a la gran variabilidad de esta categoría, impidió la extracción de cualquier tipo de conclusiones.

### 4.- "Saltos" en la frecuencia de precipitación

Se ha mencionado previamente que, a medida que las tablas de los pluviógrafos iban siendo leídas, se tomaba nota de elevaciones abruptas en la frecuencia de precipitación (llamadas saltos), que podrían (o no) haber estado asociadas con la estimulación de lluvia en una nube sembrada que pasase sobre el pluviógrafo. En el conjunto de datos analizado, habían 0,31 saltos por hora de pluviógrafo en las misiones sembradas contra 0,11 en las misiones fantasmas. Como el resultado previo, este hallazgo soporta un efecto positivo de la siembra pero no puede considerarse estadísticamente significativo. Se aplican las mismas advertencias listadas más arriba.

## 5.- Datos de física de las nubes

En Agosto de 1.999 Airao Enterprises publicó "Evaluación Preliminar del Espectro de Gotas de Nubes Sembradas y No Sembradas. Gran Canaria, España", que contenía descripciones de 60 placas de impacto de gotas, expuestas por Mr. Albert Schnell en el transcurso de vuelos a través de precipitaciones de nubes sembradas y no sembradas, durante las operaciones de incremento de las precipitaciones. Estas placas (o láminas) están divididas por igual entre condiciones sembradas y no sembradas.

Estas impresiones de impactos fueron obtenidas exponiendo un pedazo pequeño de papel de aluminio de unos 25 cm<sup>2</sup> durante un segundo a la lluvia mientras el avión sembrador volaba a 46m/s a través de la precipitación de nubes cerca de sus bases.

Estas observaciones ofrecen apoyo para el efecto esperado de siembra de nubes con núcleos higroscópicos gigantes como "semillas" para el crecimiento de gotas de lluvia.

A su favor hay un grado sustancial de consistencia; el volumen medio de gotas en las nubes sembradas es aproximadamente 5 veces mayor que el de aquellos en las nubes no sembradas, y el número medio es aproximadamente 3 veces mayor. Sin embargo, en este caso también, hay varias advertencias. Las nubes no son normalmente uniformes en su estructura, y no hay forma de asegurarse de que las mediciones sean representativas de las partes clave de las nubes respecto a un efecto sembrador. También, en el caso de mediciones sucesivas dentro de una sola nube, se espera un incremento en el tamaño y el número de las gotas a medida que la nube envejece.

Por estas razones, las impresiones de impactos deberían ser consideradas como otra indicación sustentando un efecto positivo de la siembra higroscópica pero a la que no puede atribuirse significación estadística.

## 6.- Hacia un Modelo de Computación de Precipitación Esperada - Número de Proude

Como parte de un esfuerzo para desarrollar un modelo para la precipitación esperada en la ausencia de siembra, los factores que tienden a forzar al viento a soplar alrededor de la isla, o alternativamente a elevarse por encima de ella, fueron analizados, puesto que ambos la cantidad y la distribución de la precipitación están grandemente influenciadas en esta forma.

Esta tendencia es expresada cuantitativamente por el número de Froude, que es la relación entre la velocidad general del viento y la reacción de la capa del aire en la que la isla está situada (su resistencia al desplazamiento vertical) expresado como una velocidad de retroceso. La velocidad de retroceso es grande cuando el aire resiste fuertemente el ser abatido desde la parte superior de la capa hasta su base, es pequeña comparada con la velocidad del viento, sopla fácilmente por encima y sobre la isla, causando fuertes corrientes de aire ascendentes y favoreciendo la precipitación en la pendiente de barlovento. Si el viento es débil comparado con la velocidad de retroceso, el aire fluye alrededor de la isla en lugar de por encima de ella, una situación menos favorable para la precipitación.

Una excepción a esta relación ocurre cuando ambas, la velocidad general del viento y la velocidad de retroceso son muy pequeñas, de tal forma que el valor del número de Froude tiende a hacerse indeterminado. Con un viento muy suave y poca estabilidad, el calentamiento solar de la isla llega a ser el factor determinante de los modelos de lluvia; por el día las corrientes de aire ascendentes suben a lo largo de los declives calentados por el sol imperturbadas por el débil viento general, y pueden llegar a ser nubes de lluvia.

En la situación de Gran Canaria, con una elevación máxima de 1.900 m, el número de Froude ha sido evaluado desde el nivel del mar a la altitud normalmente afectada por la montaña, esto es, hasta los 3.000 m. El número de Froude fue calculado en efecto para cada misión. Usando una línea de promedios de las cantidades correspondientes, los de precipitación fueron tabulados como variable dependiente. El número de misiones fantasmas fue demasiado pequeño y las cantidades de precipitación demasiado dispersas como para encontrar una relación con los números de Froude. La mayor serie de misiones operacionales, sin embargo dió los siguientes resultados:

Quintil	Línea número Froude y mediana	Frecuencia media de precipitación (pulgadas por hora)
1	.88 - .50 - .40	0.630
2	.40 - .36 - .29	0.494
3	.29 - .25 - .23	0.520
4	.23 - .20 - .17	0.495
5	.16 - .11 - .02	0.194

sugiriendo que el número de Froude puede tener un lugar en un modelo de la cantidad de precipitación esperada y también que puede ser útil para fijar la capacidad de siembra en una ocasión dada. Su uso en un modelo de expectativa, tendrá que esperar el conjunto de una serie mucho mayor de misiones no sembradas.

## 7.- Hacia un Modelo Computacional - Altura de Inversión

La altura de la inversión de temperatura en la parte más alta de la capa marina limita la profundidad de las lluvias más convectivas y de aquí se espera que esté fuertemente relacionado con la frecuencia de la precipitación. En ocasiones cuando no hay inversión hasta una profundidad de 6 Km., incluso podría esperarse un mayor desarrollo de la nube, con incluso más precipitación. Esta expectativa llevó a un análisis de las frecuencias de precipitación como una función de altura de inversión para misiones operacionales, con los siguientes resultados:

Linea de altura de inversión	Número de Misiones	Media de precipitación
------------------------------	--------------------	------------------------

### Misiones Operacionales

No inversión por debajo de 6 Km.	30	0.569"
10.000 a 3.000 pies	17	0.541"
2.616 a 2.100 pies	18	0.273"
2.100 a 1.800 pies	17	0.107"
1.800 a 1.400 pies	18	0.005"
1.400 a 500 pies	17	0.037"

### Misiones Fantasmas

No inversión por debajo de 6 Km.	4	0.983"
4.200 a 2.500 pies	7	0.187"
2.400 a 1.700 pies	6	0.174"
1.600 a 1.100 pies	7	0.010"

Estos datos realmente muestran la dirección esperada, pero el número de misiones en cada apartado es muy pequeño para tener medias estables, por tanto no se puede hacer una comparación razonable entre misiones operacionales y fantasmas. Además, como mencioné en otra parte, la altura de

inversión como se midió en Sta. Cruz de Tenerife puede no ser representativa de la de Gran Canaria, especialmente en casos de vientos del oeste. De cualquier modo, la altura de inversión parece ser un prometedor candidato para ambos modelos esperados y previstos.

#### 8.- Hacia un modelo Computacional. Fotografías de las ventanas del Meteosat

El satélite europeo del tiempo, Meteosat, fotografía las radiaciones infrarrojas de la tierra a 11 micrometros de longitud de onda, la imagen se va formando de elementos de fotografía (pixels) que en el ecuador son aproximadamente 4.5 Km<sup>2</sup> y en la latitud de Gran Canaria están cerca de los 5 Km<sup>2</sup>. Estos datos, para una ventana que cubre una amplia parte del este del Atlántico Norte, fueron obtenidos del Centro de Operaciones Espaciales en cintas magnéticas digitales. Los valores de radiación infrarroja fueron convertidos en temperaturas y gráficamente mostrados con ocho escalas grises de valores en pasos de 5 grados entre +20 C y -20 C con blanco y negro a los extremos de la escala en una ventana de 40 pixels cuadrados (aprox. 200x200Km) centrada en Gran Canaria. Estas fotografías fueron entonces distribuidas en 8 clases de acuerdo con la temperatura predominante sobre Gran Canaria y comparadas con las características de la precipitación tabuladas abajo.

#### Características de las líneas de temperatura del Meteosat para frecuencias de precipitación en pulgadas por hora

##### Misiones Operacionales

Linea de temperatura	Número de casos	Promedio frecuencia precipitación	Porcentaje de casos con		
			0	>0.5	>1.0
+20 a +10C	12	.205	50	8	0
+10 a + 5C	12	.098	40	0	0
+ 5 a 0C	20	.383	9	35	9
0 a - 5C	25	.380	24	24	12
- 5 a -10C	16	.690	17	50	19
-10 a -15C	4	.699	25	25	25
-15 a -20C	12	.910	25	50	33
Por debajo -20C	17	.880	24	47	12

### Misiones Fantasmas

Línea de temperatura	Número de casos	Promedio frecuencia precipitación	Porcentaje de casos con		
			0	20.5	21.0
+20 a +10C	2	.407	33	0	0
+10 a + 5C	0	indeterminado			
+ 5 a 0C	5	.273	40	20	20
0 a - 5C	4	.320	0	25	0
- 5 a -10C	3	.089	0	0	0
-10 a -15C	1	.790	20	100	0
-15 a -20C	0	indeterminado			
Por debajo-20C	5	1.241	0	80	40

La comparación de los medios para todas las categorías indica una ventaja del 10% para las misiones sembradas. Si se excluye la categoría más fría (ya que la siembra tiene poco o ningún efecto bajo estas condiciones, como se ha explicado), la ventaja de las categorías sembradas pasa a ser del 31%. La mucho mayor frecuencia de precipitaciones más pesadas es la línea de temperatura de +5°C a -10°C, donde se espera que la siembra higroscópica tenga mayor efecto, es también estimulante. Sin embargo, como con los otros análisis, estos resultados, aunque sugieren éxito, no son estadísticamente significativos.

Las líneas más cálidas representan nubes de gran sólo unos pocos cientos de metros de profundidad, con escasas posibilidades para la lluvia. Las tres siguientes, de +5 a -10°C, representan la mayor parte de las nubes que se pueden sembrar. Las dos líneas siguientes, de -10 a -20°C, por el aspecto de las fotografías del Meteosat, parecen representar una convección incrementada localmente sobre la isla, mientras que la línea más fría, bajo -20°C, está dedicada principalmente a grandes expansiones de nubes altas asociadas con mayores sistemas tormentosos.

El Meteosat muestra las temperaturas bajo 20°C sobre Gran Canaria bajo dos circunstancias diferentes. Una es cuando las nubes llegan a ser tan espesas sobre la isla que se extienden hacia arriba hasta unos 4 Km de profundidad, indicando que hay una nube profunda en la cual puede formarse la precipitación. La otra es cuando una capa alta de nubes cubre la isla, que es separada de las nubes bajo ella. La primera circunstancia tiende a precipitaciones pesadas, abundantes, mientras que la segunda tiende a precipitaciones ligeras o nulas. Por consiguiente, en las clases de inferior temperatura las cantidades de precipitación suelen ser muy ligeras o bastante pesadas. En las clases más cálidas, la precipitación se incrementa de forma regular, en proporción al aumento de la profundidad de las nubes (temperaturas de máxima altura de las nubes más

frias); como podría esperarse, las mejores lluvias provienen cuando la temperatura de la máxima altura de las nubes está en la línea de temperatura de 0 a -5°C. Esta temperatura no es todavía lo suficientemente fría para la siembra por fases de hielo, porque el crecimiento de los cristales de hielo es demasiado lento para tener efecto dentro del periodo de tiempo disponible para las nubes que pasan sobre la isla.

En un número inesperadamente grande de casos, 25 en total, las fotos del Meteosat muestran a Gran Canaria bajo el extremo Este de una lengua de nubes extendiéndose en dirección Oeste. No hay explicación más allá de la que está asociada de alguna manera con la formación de nubes sobre Tenerife.

## METODOLOGIA DE LA EVALUACION

Partes significativas del protocolo para la evaluación como se estableció en Junio de 1.989, anticipándonos al contrato por servicios, están incluidos en este informe como un apéndice. La evaluación tal como fue hecha se corresponde con los dos primeros párrafos (con pequeñas diferencias), pero el esfuerzo para producir un modelo para pronosticar la precipitación esperada fué muy infructuoso porque la base de datos era insuficiente. Una explicación más completa se incluye al final de este apéndice.

Los datos hechos disponibles para la evaluación y los procedimientos de reducción de datos usados se describen bajo los siguientes encabezamientos.

### Datos de precipitación

Las tablas pluviográficas estuvieron disponibles de 24 pluviógrafos dispersos sobre la parte norte y central de la isla. Estos funcionaban con una frecuencia de una búsqueda diaria, las tablas generalmente cambiaban a intervalos semanales durante la temporada de siembra y llevaban normalmente siete búsquedas.

De estas tablas, las cantidades de precipitación que caían en cada pluviógrafo durante y por una media hora después de la siembra fueron tabuladas, junto con las cantidades que caían durante las misiones fantasmas. Los mapas mostrando la distribución de la precipitación durante cada misión fueron preparados y están incluidos en la II Parte de este informe. Parte del archivo desapareció o fué ilegible a causa de trazados superpuestos y fuera de la escala, pero en general la calidad de los datos fué satisfactoria. De estos datos, la frecuencia media de precipitación durante cada período de misión (período de siembra más 30 minutos), fué calculada y usada en todos los análisis subsiguientes. En ciertos casos ambos la raíz cúbica y la raíz cuarta de estas frecuencias se computaron con el fin de acabar con la simetría de la distribución y obtener una variable distribuida casi normalmente.

La precipitación está entre las más variables e impredecibles cantidades en meteorología. Las olas de calor y los períodos breves de frío son bien pronosticados, pero muchas inundaciones llegan por sorpresa. El primer paso para hacer frente a esta variabilidad ha sido usar promedios, pero el número de misiones operacionales, y especialmente el número de misiones fantasmas, ha sido demasiado pequeño para producir promedios estables. Un único suceso extraordinario como la tormenta del 11 de Noviembre de 1.984, puede

comprometer el valor del promedio fantasma como un pronosticador.

Para hacer frente a este problema de variabilidad, el primer acercamiento ha sido tratar con promedios acumulados durante un largo periodo de tiempo; una media de 30 años se usa habitualmente para describir el clima de precipitación de un sitio. Pero durante periodos más cortos de tiempo, una tormenta extraordinaria o un periodo seco puede arrojar una media fuera de base. En algunas aplicaciones, la media es preferible - la cantidad es la que excedió en la mitad de los datos brutos, ya que esto es menos probable de ser drásticamente afectado por unos pocos sucesos extraordinarios. Se hizo un intento de reducir la variabilidad, eligiendo categorías de misiones que eran internamente más consistentes que el conjunto entero (los conjuntos NORD y de secado aéreo), las cuales produjeron indicaciones más fuertes del efecto de la siembra, pero aun sin significancia estadística.

Si se encontrase una cantidad no afectada por la siembra que fuera un buen pronosticador de precipitación, el error de predicción sería menos variable que la precipitación misma, y la comparación entre ocasiones sembradas y de control sería más fiable. Se hicieron varios intentos en esta dirección (y fueron mencionados bajo el encabezamiento de análisis), usando la profundidad de la capa marina húmeda, el número de Froude, o la temperatura enviada por el Meteosat como variables de predicción. En cada caso se consiguió alguna reducción en la variabilidad, pero no la suficiente como para considerar la comparación fiable. El número de misiones fantasmas y la calidad de sus observaciones simplemente no eran lo bastante buenas.

Otra técnica que se ha usado en numerosas evaluaciones es una comparación blanco/control, comparando la precipitación en el blanco durante operaciones de sembrado con aquellas en lugares cercanos no afectados por la siembra. Esto no se hizo porque los registros pluviográficos de las islas vecinas no estaban disponibles.

### Mapas meteorológicos de superficie y aire superior

Para las primeras 58 misiones, los únicos mapas proporcionados fueron mapas de predicción del tiempo recortados del periódico de Las Palmas. Más tarde, fueron proporcionados mapas fascímiles generalizados, pero con escasez de informes meteorológicos, mapas del tipo usado por tripulaciones con órdenes, muchos de los cuales no cubrieron el área de las Islas Canarias.

Estos mapas no tenían la calidad apropiada para soportar una evaluación científica ni eran lo que se esperaría del Instituto Meteorológico Nacional para este propósito. Debido a la mala calidad de estas tablas, no fue posible usarlas metódicamente en el análisis.

## Observaciones por radar de ecos de precipitación

El proyecto de siembra de nubes estaba equipado con radar meteorológico para el propósito de observar la aproximación de lluvias a Gran Canaria y su paso sobre el área de blanco, y especialmente para observar cambios que podrían ser debidos a la siembra. Fueron proporcionados datos bajo la forma de posiciones de ecos dibujados en láminas transparentes superponibles y como películas de 8 mm. de lapsos de tiempo.

Las superposiciones fueron hechas a intervalos regulares y, a causa de varios cambios de personal, son inconsistentes en formato, mientras que a las películas les faltó documentación de los datos y tiempos cubiertos y por tanto no pudieron ser asociadas a misiones particulares. En consecuencia, el único uso hecho de las observaciones del radar fué el proporcionar datos ocasionales de la velocidad y dirección del viento como indicó el movimiento del eco registrado en las superposiciones.

Se había contado con los datos del radar para proporcionar casi la única comparación directa entre el comportamiento individual de las nubes sembradas y no sembradas. La falta de ellos comprometió seriamente la línea del esfuerzo de evaluación.

## Datos proporcionados por la tripulación del Proyecto

Esto incluía el tiempo y lugar de la actividad de siembra, la cantidad de agente sembrador distribuido, altitud y temperatura de la base de la nube, informes de las corrientes de aire ascendentes en la base de la nube, estimaciones ocasionales de la altitud máxima de la nube, y (en los últimos años) mediciones ocasionales de un punto del tamaño de la gota en la nube, concentración, y contenido de agua líquida. La tripulación también notó señales visuales de lluvias, pavimento mojado etc...

## Observaciones aerológicas

Los informes de radio sondas de globos de instrumentos soltados a mediodía y a media noche cada día desde Sta. Cruz de Tenerife (TEMPS) fueron proporcionados para casi todos los días de misión, bien en forma codificada o bien como diagramas pseudoadiabáticos en variedad de formato. Los TEMPS informan de la temperatura, humedad, y viento en niveles superiores.

Todos estos datos fueron rediseñados en un formato estandar para este análisis. Fueron usados para estimar la profundidad de la capa marina húmeda y relativamente inestable, la fuerza de la inversión que la corona, y la presencia de humedad de alto nivel asociada a sistemas tormentosos que pasen sobre o cerca de la isla. También se usaron para calcular del número de Froude para cada misión.

### Fotografías de nubes del Meteosat

Además de una variedad de fotografías de satélite en las bandas visible, infrarroja, y espectral del vapor de agua, ventanas infrarrojas detalladas, una para cada misión (con unas cuantas excepciones) que abarcan a Gran Canaria fueron obtenidas en forma digital en cintas magnéticas.

Estos datos, que dan la radiación infrarroja de cada elemento de la foto, fueron procesados para convertir la radiación a temperatura en grados Celsius en una ventana de unos 200 Km<sup>2</sup>, centrada en Gran Canaria. Procesos adicionales produjeron mapas de contorno de las temperaturas de la máxima altura de las nubes con una resolución espacial de unos 5 Km. Esta resolución es insuficiente para nubes de lluvia individuales y distintivas pero sí muestra el estado general de cobertura de nubes sobre y alrededor de Gran Canaria. Los gráficos resultantes muestran la distribución de temperaturas dentro de la ventana como si fuera visto desde el espacio, apareciendo el océano abierto como una expansión casi uniforme y relativamente cálida, mientras que las nubes aparecen más variadas y más frías conforme a su altitud.

Se hizo un intento de usar las fotos del Meteosat, tabulando ciertas propiedades de la precipitación para cada categoría de temperatura de máxima altura de las nubes sobre Gran Canaria. Como en otros análisis, el margen de variabilidad era demasiado grande como para distinguir una diferencia entre misiones sembradas y fantasmas.

## APENDICE

### SELECCION DE JUNIO DE 1984

#### PROTOCOLO PARA LAS PRUEBAS DE SIGNIFICANCIA DE LA EVALUACION DE GRAN CANARIA

La unidad básica del análisis será una misión, que podría ser una misión sembrada (cuando la siembra fue realizada) o una misión fantasma (cuando las condiciones meteorológicas eran propicias para la lluvia y otras características para la misión eran adecuadas, pero no se realizó la siembra). Se declarará una misión fantasma cuando alguna precipitación haya caído en el blanco durante las horas diurnas disponibles para las misiones sembradas pero se impidió una misión sembrada debido a circunstancias más allá del control del director del proyecto.

La precipitación asociada con una misión fantasma es la medida en un área de blanco designada entre el momento de la primera siembra y una hora después de que cese ésta. La cantidad de precipitación asociada con una misión fantasma será aquella medida en el blanco durante un periodo de 3 horas comenzando cuando cayó precipitación por primera vez en la isla o se observó un eco de radar sobre ella, pero sin comenzar más temprano que 3 horas antes del amanecer y sin extenderse más del anochecer.

Se usará un modelo estadístico para establecer la cantidad de precipitación esperada durante cada misión, sea sembrada o fantasma. El modelo incluirá una correlación múltiple en la cual la raíz cuarta de la cantidad o frecuencia de precipitación esperada (frecuencia - variable dependiente) se expresa como una función de no más de 3 variables independientes seleccionadas de la lista de más abajo, las que más contribuyen al coeficiente de la correlación múltiple. La raíz cuarta de la precipitación esperada se selecciona como la variable dependiente porque esta cantidad se sabe, en tormentas individuales, que sigue muy de cerca una distribución normal (Gaussian), mientras que la distribución de la precipitación misma es muy desigual.

Después de que el modelo haya sido terminado para el conjunto mezclado de misiones sembradas y fantasmas, se hallará la diferencia entre la precipitación esperada y la obtenida para cada misión, y cada una será clasificada según esa diferencia. La prueba no-paramétrica de Wilcoxon será aplicada entonces para determinar la significancia de las diferencias de clasificación entre misiones sembradas y

fantasmas.

Puede advertirse que las condiciones no tienen que ser propicias para la precipitación para dirigir una misión de siembra efectiva, porque, si se encuentran las condiciones necesarias, la siembra podría producir lluvia cuando de otra forma nunca hubiese sucedido. Sin embargo, parece muy difícil, si no imposible, establecer en estos momentos las condiciones necesarias porque la base estadística para una determinación tal podría ser auto-contaminante.  
(Fin de la transmisión FAX)

#### CANDIDATAS A VARIABLES INDEPENDIENTES

- El máximo teórico de contenido de agua condensada del elemento de la nube convectiva disponible para la siembra. Este es el contenido de vapor por unidad de volumen del aire en la base de la nube menos el contenido de vapor por unidad de volumen en la parte superior de la nube multiplicado por el volumen del elemento de la nube, tal y como se distingue en la imagen del METEOSAT en el momento de máximo desarrollo durante su paso sobre el blanco y las alturas de la base y parte superior de la nube.
- La diferencia en temperatura potencial equivalente entre la base de la nube y su parte superior.
- La diferencia en temperatura potencial equivalente entre el aire a nivel del mar y a nivel de la parte superior de la nube.
- La duración de la misión de sembrado.
- La clasificación de la media hora de la misión en una lista de clasificación de horas de acuerdo con su precipitación media.
- La clasificación de la dirección del viento (en intervalos de 10 grados) en una lista de clasificación de direcciones de viento de acuerdo con su precipitación media.
- La fuerza del viento.
- La fuerza de la inversión en la parte más alta de la capa húmeda.
- La temperatura del mar.
- La precipitación contemporánea en Tenerife.
- Combinaciones funcionales de las variables superiores.

#### STATUS DE VARIABLES MODELO SUGERIDAS

De las once variables propuestas para su posible inclusión en un modelo descriptivo, las tres primeras (las más importantes) dependían de mediciones de la altura y temperatura de la parte más alta de las nubes. Estas mediciones solo estaban disponibles para 13 de las misiones, y habiéndose sido estimadas por la tripulación volando a nivel de base de nube para 12 misiones más. La duración de una misión no se encontró relevante para la lluvia,

principalmente porque otros factores la determinaban, tales como la capacidad del avión sembrador para permanecer en estación. La dirección del viento fue descalificada como un hecho debido a la falta de pluviógrafos en la pendiente sur de la isla. La fuerza del viento y la frecuencia de lapsos se convirtieron en parte del análisis del número de Froude.

Creo que una construcción metódica de un modelo de predicción tendrá que esperar a una medida más regular de las principales entradas de datos incluídas.

Las pruebas estadísticas están abiertas a preguntas, por la única razón de que las misiones fantasmas fueron seleccionadas al azar y en la mayoría de los casos no fueron observadas desde el aire. Aún sin ser parte de una prueba estadística, se examinarían otras evidencias para determinar si son o no consistentes con la hipótesis de sembrado.

La hipótesis es que las partículas higroscópicas intriducidas en la corriente ascendente de la nube cerca de su base crecerán más deprisa que las gotas de lluvia naturales y alcanzarán un tamaño tal que comiencen a colisionar con las gotas de la nube, por tanto creciendo por adherencia y comenzando la formación de gotas de lluvia en una etapa más temprana en la vida de la nube que la natural.

Una clase de datos a examinar es la medida del tamaño de las gotas de las nubes en nubes sembradas contra no sembradas o partes de las nubes. La aparición más temprana o más dispersa de gotas más grandes en regiones de nubes afectadas por la siembra se tomará como consistente aunque no como prueba de la hipótesis de siembra. Hallazgos nulos o contrarios se tomarán como inconsistentes con la hipótesis de siembra.

La misma hipótesis lleva a la esperanza de que la siembra incrementará la intensidad y tamaño de las gotas de la lluvia de la nube sembrada y el tamaño de la huella de la lluvia. Además de contribuir a un efecto en los pluviógrafos, esta expectación puede ser comprobada examinando los ecos de radar de nubes sembradas y no sembradas; los ecos más grandes y más intensos de las nubes sembradas serán interpretados como tendentes a confirmar la hipótesis aunque no a probarla.

#### **AFIRMACIONES DE MI RE EVALUACION DE META-ANALISIS ORIGINAL**

Examinaré cada uno de los experimentos significativos (listados en el atlas) con atención para determinar si las observaciones hechas y datos acumulados en el proyecto de Gran Canaria son consistentes con las condiciones bajo las cuales los resultados significativos experimentales fueron obtenidos. Las conclusiones y recomendaciones se basarían en el grado de consistencia entre estos informes y todos los datos disponibles acumulados en el curso de las operaciones de Gran Canaria.

1. Sujeto a las limitaciones y métodos de procedimiento dichos más arriba, estoy preparado para evaluar el proyecto, revisando y utilizando todos los datos disponibles, y para exponer resultados y recomendaciones basados en dichos datos.