

01162

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**VERIFICACIÓN OBJETIVA DE CAMPAÑAS  
DE ESTIMULACIÓN DE LLUVIA**

**T E S I S**

PRESENTADA POR:

**JUAN JOSÉ CALDERÓN GARCÍA**

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA  
(HIDRÁULICA)**

DIRIGIDA POR:

**DR. MICHEL ROSENGAUS MOSHINSKY**



CIUDAD UNIVERSITARIA  
2001



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Resumen

Gracias a los avances tecnológicos es posible la realización de campañas experimentales de estimulación de lluvia, que incluyan mecanismos cuantitativos de verificación. Se presentan los conceptos básicos sobre estimulación de lluvia y un análisis sobre las deficiencias, en cuanto a verificación objetiva, de los experimentos del pasado realizados en México. Éstos se contrastan con el programa para el aumento de lluvia en Coahuila (PARC por sus siglas en inglés), cuyo propósito fue probar la técnica de sembrado higroscópico aplicada en nubes cálidas convectivas, en los alrededores de Monclova, Coahuila. Entre los instrumentos empleados en la verificación destacan el radar meteorológico, que provee evidencia física del efecto del sembrado y la red de pluviógrafos al proporcionar datos para el ajuste puntual de intensidad de lluvia contra reflectividad del radar. Se hace un amplio estudio de las capacidades del radar conectado a un sistema de procesamiento automático de datos y se presenta un proceso de calibración hidrológica con datos reales. Al mismo tiempo se analiza la utilidad de la instrumentación de física de nubes. Con la calibración, los resultados favorables obtenidos en el PARC sobre el efecto de la siembra en términos de reflectividad fueron reinterpretados para obtener el volumen de agua efectivamente precipitado sobre el suelo. Lo anterior permitió determinar el costo del metro cúbico de agua proveniente del sembrado de nubes. Resultó tan barato el metro cúbico de agua, que es conveniente la estimulación de lluvia aún de las tormentas más pequeñas para el caso del PARC.

## **Dedicatoria**

A Angélica, mi esposa.

A Juan José, Pablo Alan, Manuel y Adrián Alejandro, mis hijos

A mis padres, Benito y Margarita.



## **Miembros del jurado**

Actuaron como jurados en el presente trabajo de tesis los siguientes profesores:

Presidente: Dr. Fco. Javier Aparicio Mijares  
Vocal: Dr. Michel Rosengaus Moshinsky  
Secretario: Dr. Aldo Ivan Ramírez Orozco  
Suplente: Dr. Waldo Ojeda Bustamante  
Suplente: Dr. José Luis Oropeza Mota

## Créditos

Para generar la información que en este trabajo se describe y analiza muchas personas trabajaron. Se acredita el intenso trabajo de dirección y liderazgo del Dr. Michel Rosengaus Moshinsky (IMTA). La participación de José Alfredo Mundo Molina y de Guillermo Reza (IMTA) en trabajo que hizo posible la instalación de la red pluviográfica y de las estaciones meteorológicas. Francisco García Rodríguez que colaboró en la operación de la red pluviográfica y de las estaciones meteorológicas automáticas (SMN). A Darrel Baumgardner por su disposición para resolver las dudas surgidas sobre instrumentación de física de nubes. Así como la participación de múltiples investigadores, subcontratados y becarios del *National Center of Atmospheric Research*. Se remarca la buena voluntad que siempre mostraron Daniel W. Breed y Brant G. Foote del NCAR para proporcionar datos e información necesaria en el desarrollo de la tesis.

## Contenido

Resumen	ii
Dedicatoria	iii
Miembros del jurado	iv
Créditos	v
Contenido	vi
Índice de figuras	xi
Índice de tablas	xv

### CAPÍTULO I Introducción

I.1.- ¿Por qué es importante tratar este tema? .....	2
I.2.- La importancia del tema en el ámbito de la ingeniería hidráulica.....	2
I.3.- ¿A qué se refiere el término de verificación objetiva?.....	3
I.4.- Lo que se presenta en el resto del trabajo.....	3
I.5.- El contexto del PARC en que se realiza este estudio.....	5

### CAPÍTULO II Conceptos sobre la estimulación artificial de lluvia

II.1.- La controversia.....	7
II.1.1.- En el ámbito de toma de decisiones.....	7
II.1.2.- En el ámbito académico científico.....	9
II.1.3.- En el ámbito de las tecnologías del sembrado.....	9
II.2.- La dificultad de una verificación objetiva.....	10
II.3.- El proceso natural de generación de lluvia.....	10
II.3.1.- La inestabilidad atmosférica.....	10
II.3.2.- La condensación.....	11
II.3.3.- El crecimiento de las gotitas de nube.....	11
II.4.- Técnicas de estimulación de lluvia.....	13
II.4.1.- El sembrado de nubes con sales higroscópicas.....	13
II.4.2.- El sembrado de nubes con agentes glaciogénicos.....	15
II.5.- Técnicas glaciogénicas vs técnicas higroscópicas.....	16
II.6.- Vectores para la colocación de los químicos estimulantes.....	18
II.7.- Campañas operativas vs campañas de investigación.....	20
II.8.- Diseños experimentales que permiten verificación objetiva.....	22
II.8.1.- Evaluación estadística.....	22
II.8.2.- La evidencia física.....	23
II.8.3.- El modelo físico conceptual en el PARC.....	24
II.9.- Instrumentos necesarios o convenientes para campañas puramente operativas .....	25
II.9.1.- El radar meteorológico.....	25
II.9.2.- Red de pluviógrafos.....	26
II.10.- El sembrado de nubes como un instrumento rompe sequías.....	26
II.11.- La estimulación de lluvia y los sistemas productivos en las zonas áridas .....	28
II.11.1.- Las zonas áridas y semiáridas de la república Mexicana .....	28
II.11.2.- La variabilidad de la precipitación.....	28

II.11.3.- La vulnerabilidad de las actividades productivas. ....	29
II.11.4.- Los sistemas productivos y la sequía.....	29
II.11.5.- La estimulación de lluvia en las zonas áridas.....	31

### **CAPÍTULO III**

#### **La estimulación de lluvia en México**

III.1.- Introducción.....	36
III.2.- Los primeros intentos.....	37
III.3.- Experiencias en la cuenca del Río Necaxa (1949-1968).....	37
III.4.- Experiencias en Ensenada (1970 - 1976). ....	41
III.4.1.- Análisis de datos recopilados.....	42
III.5.- Experiencias en la cuenca del Río Mayo de 1977 a 1979.....	45
III.5.1.- Análisis de la metodología planteada.....	51
III.6.- El programa para el aumento de lluvia en Coahuila . . . . .	53
III.6.1 - La unidad experimental. ....	55
III.6.2.- Variables de respuesta e hipótesis estadísticas.....	56
III.7.- Análisis general.....	57

### **CAPÍTULO IV**

#### **Instrumentación para una verificación objetiva**

IV.1.- Redes pluviográficas.....	61
IV.1.1.- La red nacional de estaciones climatológicas tradicionales....	66
IV.2.- Radar meteorológico .....	69
IV.2.1-Principio de funcionamiento.....	69
IV.2.2.- La ecuación de radar. ....	70
IV.2.3.- Políticas de operación y productos.....	71
IV.2.4.- Resolución.....	73
IV.2.5.- ¿Caracterización de la lluvia o caracterización de las tormentas?.....	74
IV.3.- Instrumentos aerotransportados de física de nubes.....	76
IV.3.1.- Introducción.....	76
IV.3.2.- El espectrómetro de gota de nube y de aerosoles. ....	77
IV.3.2.1.- Principios de operación.....	77
IV.3.2.2.- Salidas o mediciones primarias y derivadas.....	79
IV.3.3.- Dispositivo óptico de dos dimensiones.....	80
IV.3.3.1.- Principios de operación.....	81
IV.3.3.2.- Interpretación de datos.....	83
IV.3.4.-El sensor de contenido de agua líquida .....	83
IV.3.4.1.- Principios de operación.....	83
IV.3.4.2.- Especificaciones.....	84
IV.3.4.3.- Interpretación de datos.....	84
IV.3.5.- El contador de núcleos de condensación.....	85
IV.3.5.1.- Principios de funcionamiento.....	85
IV.3.6.- Medidor estándar de la temperatura del punto de rocío. ....	86
IV.3.6.1.- Principios de funcionamiento.....	86

IV.4.- Navegación GPS.....	88
IV 4.1.- Posición y dirección sobre la superficie de la Tierra... ..	88
IV.4.2.- Historia y desarrollo.....	88
IV 4.3.- Características.....	88
IV.4.4.- Aplicaciones en los experimentos de estimulación de lluvia ..	89
IV.5.- El ejemplo del PARC.....	90
IV.5.1.- Introducción.....	90
IV.5.2.- Los radiosondeos para el perfil vertical de variables atmosféricas.....	92
IV.5.2.1.- Ejecución de un radiosondeo.....	93
IV.5.2.2.- Mediciones de la radiosonda.....	94
IV.5.3.- El sistema radar y programa TITAN.....	98
IV.5.3.1.- Capacidades de TITAN.....	99
IV.5.3.2.- Definición de tormentas.....	99
IV.5.3.3.- Selección de tormentas candidatas a ser sembradas.....	100
IV.5.3.4.- Climatología de tormentas obtenida a partir del procesamiento que hace TITAN.....	101
IV.5.4.- El avión.....	105
IV.5.4.1.- El espectro de gota de nube.....	107
IV.5.4.2.- Núcleos de condensación de nube.....	109
IV 5.5.- Mediciones al nivel de la superficie.....	110
IV.5.5.1.- Estaciones meteorológicas automáticas.....	110
IV.5.5.2.- Red pluviográfica.....	112

## CAPÍTULO V

### La calibración de un radar meteorológico

V.1.- Introducción.....	114
V.2.- La calibración electrónica de un radar meteorológico.....	114
V.3.- Dependencias de la reflectividad proporcionada por el radar .....	116
V.4.- Calibración hidrológica de un radar.....	122
V.4.1.- Contraste entre diversas relaciones z-R.....	125
V.5.- La calibración hidrológica del radar en el PARC.....	127
V.5.1.- La red pluviográfica utilizada en el PARC .....	127
V.5.1.1.- Preparación de instrumentos, pruebas de calibración y operación en laboratorio.....	128
V.5.1.2.- Prueba de operación simulando condiciones de campo.....	130
V.5.1.3.- Instalación de la red pluviográfica.....	132
V.5.1.4.- Operación de la red pluviográfica durante 98.....	137
V.5.2.- Procesamiento de datos pluviográficos.....	138
V.5.2.1.- Control de calidad de registros pluviográficos.....	138
V.5.2.2.- Corrección de la base del tiempo en registros Pluviográficos.....	142
V.5.2.3.- Adición de parámetros de calibración a registros Pluviográficos.....	143

V.5.3.- Preparación de datos de radar.....	143
V.5.4.- Extracción de acumulados de registros pluviográficos alrededor de los instantes con producto de radar.....	150
V.5.5.- Combinación de datos de radar y datos pluviográficos.....	151
V.5.5.1.- Obtención de datos previa a la combinación.....	151
V.5.5.2.- Obtención de la reflectividad de los 9 pixeles más ceranos a cada estación pluviográfica.....	153
V.5.5.3.- Obtención de promedios pesados de reflectividad....	155
V.5.6.- Integración de la base de datos para la calibración Hidrológica del radar.....	156
V.5.7.- Suavización en tiempo y espacio de registros pluviógrafo- radar.....	158
V.5.8.- Utilización de la relación de Marshall-Palmer para la transformación de reflectividad a intensidad de lluvia... ..	161
V.5.8.1. Análisis de tormentas y resultados.....	162
V.6.- Resultados de la calibración obtenida.....	169
V.6.1.- Trabajo sobre la base de datos de calibración .....	170
V.6.2.- La relación de transformación recomendada.....	173
V.6.3.- La dispersión de la nube de puntos para calibración Hidrológica.....	179
V.6.4.- Comentarios finales.....	185

## CAPITULO VI

### Resultados del PARC en términos de reflectividad y duración de las tormentas

VI 1.- Introducción.....	187
VI.2.- Técnica de análisis.....	187
VI.3.- Los resultados estadísticos del análisis de las series de tiempo de las variables de respuesta obtenidos por el NCAR.....	188
VI.3.1 - Flujo de precipitación.....	188
VI.3.2 - Masa total de la tormenta (kton) .....	189
VI.3.3.- Masa total de la tormenta (kton) por arriba de los 6- km s.n.m. ....	191
VI.3.4.- Area de precipitación (en km <sup>2</sup> ).....	193
VI.4.- Resultados del análisis estadístico obtenidos por el NCAR de otras variables de respuesta.....	194
VI.4.1 - Tiempo de vida de la tormenta.....	194
VI.4.2.- Integral tiempo área (ITA ) de precipitación en km <sup>2</sup> h.....	195
VI.4.3.- Precipitación total.....	195

**CAPITULO VII**  
**Análisis de resultados a la luz de la calibración**  
**hidrológica del radar**

VII.1.- La reinterpretación .....	197
VII.2.- Reinterpretación del flujo de precipitación.....	198
VII.3.- Diferencias en el volumen total precipitado utilizando z=200R <sup>1.6</sup> y z=113.24R <sup>1.136</sup> .....	205
VII.4.- El volumen de precipitación atribuible al incremento de área y tiempo de vida de las tormentas sembradas.....	207
VII.5.- El costo del m <sup>3</sup> de agua adicional obtenido aplicando la técnica de estimulación de lluvia probada en el PARC. ....	210
VII.6.- Comparación de los resultados del PARC con otros experimentos en México.. .	212

**CAPITULO VIII**  
**Conclusiones y recomendaciones**

Conclusiones y recomendaciones .....	214
Referencias.....	222

## Índice de figuras

<b>Figura II.1.-</b> <i>Tamaños comparativos, concentraciones, y velocidades terminales de caída de algunas de las partículas que intervienen en la física de las nubes (según MacDonald, 1958; citado por Rogers, 1977).....</i>	13
<b>Figura II.2.-</b> <i>Distribución de tamaños de gotita de nube (tamaño contra concentración).</i>	14
<b>Figura II.3.-</b> <i>Nube cúmulo típica y datos sobre el perfil vertical de temperaturas en la atmósfera, que circunda a la nube al inicio del verano en Monclova Coahuila.....</i>	18
<b>Figura II.4.-</b> <i>Mapa de precipitación acumulada observada con radar durante el mes de julio de 1998 en la región de Monclova Coahuila. Se remarca el contorno de las áreas con precipitaciones mayores a 50 mm.....</i>	32
<b>Figura II.5.-</b> <i>Bordo de almacenamiento de agua "cosechada" localizado en el Ejido Milian Municipio de Castaños, Coahuila.....</i>	33
<b>Figura III.1a.-</b> <i>Configuración orográfica de la región comprendida entre las zonas de Blanco de Necaxa y el Golfo de México. ....</i>	39
<b>Figura III.1b.-</b> <i>Resultado del análisis de doble masa para la zona alta de Necaxa, actualizados a 1968.....</i>	40
<b>Figura III.1c.-</b> <i>Se muestra gráficamente representados por barras los valores que toman los totales de precipitaciones de la zona alta, correspondientes a los eventos unitarios de la zona de control (Años de operación únicamente) (Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A., 1969). ....</i>	40
<b>Figura III.2.-</b> <i>Diagrama básico de un generador de tipo acetona-yoduro de plata.....</i>	43
<b>Figura III.3.-</b> <i>Gráfica de aportación al almacenamiento de la presa Adolfo Ruiz Cortines, calculada con base en los modelos.....</i>	49
<b>Figura III.4.-</b> <i>Comportamiento de la precipitación media en la zona testigo.....</i>	52
<b>Figura III.5.-</b> <i>Comportamiento de las aportaciones a la presa.....</i>	53
<b>Figura III.6.-</b> <i>Paisaje de lomerío y cadena de cerros localizado entre Monclova y Cuatro Ciénegas, Coahuila.....</i>	55
<b>Figura IV.1.-</b> <i>Instalación de una de las estaciones meteorológicas automáticas y de uno de los pluviógrafos digitales del IMTA, durante la campaña experimental de PARC-98...</i>	62
<b>Figura IV.2a.-</b> <i>Tormenta convectiva idealizada captada por una red de pluviómetros colocados en cuadrícula a 5 km.....</i>	65
<b>Figura IV.2b.-</b> <i>Precipitación acumulada para el mes de Julio de 1998 captada con la red de 23 estaciones climatológicas tradicionales en el área del proyecto PARC (existen otras 16 estaciones que no reportaron dato). La localización de las estaciones se marca con un asterisco. Todos los valores de lámina de lluvia están en mm.....</i>	67
<b>Figura IV.3.-</b> <i>El radar meteorológico inspecciona la atmósfera.....</i>	69
<b>Figura IV.4.-</b> <i>Esquema de definición del PPI (Rosengaus, 1995a).....</i>	73
<b>Figura IV.5.-</b> <i>Representación esquemática de la región de muestreo y del sistema óptico electrónico de detección del FSSP (modelo 100 y 300) .....</i>	78
<b>Figura IV.6.-</b> <i>Gráfica del FSSP (espectrómetro de gotas de nube) en forma estadística del número y diámetro de gotas de nube. Esta gráfica se obtiene con el sistema de adquisición de datos de la avioneta (DAS, Data Acquisition System).....</i>	80



<b>Figura IV.7.-</b> Diagrama esquemático del principio de operación del sensor óptico de dos dimensiones (2D).....	81
<b>Figura IV.8.-</b> Imágenes del medidor 2D para varios tipos diferentes de partículas de hielo con bordes y formas complejas.....	82
<b>Figura IV.9.-</b> Imagen del medidor 2D para gotitas de nube proporcionada por el DAS del avión.....	82
<b>Figura IV.10.-</b> Diagrama esquemático del medidor de agua líquida de hilo caliente PMS/CSIRO (Hot Wire Liquid Water Probe).....	84
<b>Figura IV.11.-</b> Cabina del avión con instrumentación de física de nubes rentado por el NCAR y utilizado en el proyecto PARC, durante una maniobra de sembrado.....	86
<b>Figura IV.12.-</b> Diagrama esquemático del sistema de espejo enfriado para la determinación de la temperatura del punto de rocío.....	87
<b>Figura IV.14.-</b> Avión Piper Cheyenne II instrumentado, rentado por el NCAR a Weather Modification Incorporated.....	91
<b>Figura IV.15.-</b> Medidores de distribución de tamaño de gota en la nube, precipitables y no precipitables .....	91
<b>Figura IV.16.-</b> Interior de la CLASS Mobile van del NCAR.....	93
<b>Figura IV.17.-</b> Ejemplo de datos de sondeo de temperatura, temperatura del punto de rocío y viento en función de la altura (o en escala logarítmica de presión a la izquierda).	96
<b>Figura IV.18.-</b> Diagrama de la razón de mezcla en perfil en función del tiempo - altura para julio de 1998 mostrando la historia de la humedad en el nivel bajo (debajo de 4 Km).	97
<b>Figura IV.19.-</b> Distribución del tiempo de vida de la tormenta (duración) observada por el radar del 31 de agosto al 31 de octubre de 1996.....	103
<b>Figura IV.20.-</b> Lo mismo que la Figura IV.19, excepto para las alturas medias del tope de tormenta.....	103
<b>Figura IV.21.-</b> Lo mismo que la Figura IV.19, excepto para la máxima reflectividad del radar .....	103
<b>Figura IV.22.-</b> Lo mismo que la Figura IV.19, excepto para las velocidades medias de desplazamiento de las tormentas.....	103
<b>Figura IV.23.-</b> Lo mismo que la Figura IV.19, excepto para el volumen de lluvia.....	104
<b>Figura IV.24.-</b> Una hora de seguimiento de la aeronave (18:00-19:00) el 21 de julio de 1998. ....	106
<b>Figura IV.25.-</b> Diagramas de series de tiempo de datos de la aeronave en una hora (18:00-19:00). ....	107
<b>Figura IV.26.-</b> Espectro promedio de gota de nube (tamaño contra concentración).....	108
<b>Figura IV.27.-</b> Datos de las estaciones meteorológicas en series de tiempo para una semana, junto con el área de precipitación derivada de los datos de radar .....	111
<b>Figura V.1.-</b> Comparación de las intensidades en pasos de tiempo de 5 minutos obtenidas con el EPO y el pluviógrafo de Balancín para el episodio registrado el día 16/09/94, en Barcelona (Sempere, et al., 1997).....	121
<b>Figura V.2.-</b> Comparación de las curvas de lluvia acumulada obtenidas con el EPO y el pluviógrafo de balancín para el episodio registrado el día 16/09/94 (Sempere, et al, 1997).....	122
<b>Figura V.3.-</b> El radar Enterprise utilizado en el PARC, a) torre; b) controles.....	123

<b>Figura V.4.a-</b> Localización de la red pluviográfica instalada en los alrededores de Monclova en el verano del 98. ....	134
<b>Figura V.4.b.-</b> Instalación de un pluviógrafo sobre el techo de una construcción, durante la campaña PARC-98.....	135
<b>Figura V.4.c.-</b> Instalación de un pluviógrafo directamente sobre el terreno, durante la campaña PARC-98. ....	135
<b>Figura V.5.-</b> Ejemplo de archivos pluviográficos crudos y tipo .PVG.....	140
<b>Figura V.6.-</b> Ejemplo de archivos pluviográficos tipo .PTC y .PCA.....	141
<b>Figura V.7a.-</b> Fracción de la matriz de 300x300 con datos de reflectividad instantánea en dBZ del producto de radar de las 16:55:50 hora Z del día 14 de julio de 1998 .....	147
<b>Figura V.7b.-</b> Despliegue completo de la imagen de reflectividad instantánea en dBZ del producto de radar de las 16:55 50 hora Z del día 14 de julio de 1998. Se le ha sobrepuesto el trazo de anillos concéntricos y la localización de algunos pueblos.....	148
<b>Figura V.7c.-</b> Evolución de la tormenta dentro del área delimitada por el cuadro pequeño en la imagen de la figura V 7c mostrada con seis productos consecutivos.....	149
<b>Figura V.8.-</b> Ejemplo de formato de archivo pluviográfico acumulado en 5 minutos.....	150
<b>Figura V.9.-</b> Conformación del producto de radar de 300 X 300 pixeles.. . . . .	152
<b>Figura V.10.-</b> Localización de la estación Castaños 98 con respecto al centro del pixel más cercano.....	153
<b>Figura V.11.-</b> Ejemplo de formato de archivo combinado tipo .P-R (CASTAN98.P-R).	154
<b>Figura V.12.-</b> Ejemplo de formato de archivo combinado tipo .Z-R .....	156
<b>Figura V.13.-</b> Gráfica de los registros pluviográficos suavizados con el promedio deslizante y gráfico de los mismos registros sin suavizar.....	159
<b>Figura V.14.-</b> Comportamiento de la reflectividad en dBZ en la tormenta del 98/08/18 sobre la estación trincheras para. . . . .	160
<b>Figura V.15a.-</b> Comparación de pluviogramas obtenido con pluviógrafo y obtenido con radar utilizando la relación de transformación de Marshall- Palmer.....	162
<b>Figura V.15b.-</b> Comparación de pluviogramas obtenido con pluviógrafo y obtenido con radar utilizando la relación de transformación de Marshall- Palmer y el promedio deslizante de tres intervalos de los datos de radar y pluviográficos (suavizados).....	163
<b>Figura V.16.-</b> Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshal-Palmer, sin suavizar en el tiempo.....	164
<b>Figura V.17.-</b> Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshal-Palmer, sin suavizar en el tiempo.....	164
<b>Figura V.18-</b> Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshal-Palmer, sin suavizar en el tiempo.....	165
<b>Figura V.19.-</b> Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshal-Palmer, sin suavizar en el tiempo.....	165
<b>Figura V.20 a, b, c, d, e, f y g.-</b> Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshal-Palmer, sin suavizar en el tiempo. ....	166
<b>Figura V.21.-</b> Datos originales y ajuste a modas de las distribuciones de frecuencia por bandas.....	172
<b>Figura V.22 a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k y l.-</b> Pluviograma de pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación obtenida del proceso de calibración hidrológica suavizados en el tiempo.....	173

<b>Figura V.23 a, b y c.-</b> Distribución de la reflectividad para las bandas de precipitación definidas en la Tabla V.4.....	182
<b>Figura VI.1.-</b> Valores de cuartiles de Flujo de Precipitación ( $m^3 s^{-1}$ ) contra tiempo transcurrido desde el momento de decisión para casos sembrados y no sembrados. . . . .	189
<b>Figura VI.2.-</b> Valores de cuartiles de Masa Total de Tormenta (kilotoneladas) contra el tiempo transcurrido desde el “instante de decisión” para casos sembrados y no sembrados.....	190
<b>Figura VI.3.-</b> Valores de cuartiles de Masa Total de Tormenta (kilotoneladas) por encima de los 6 Km de altura contra el tiempo transcurrido desde el “instante de decisión” para casos sembrados y no sembrados .....	192
<b>Figura VI.4.-</b> Valores de cuartiles de Área de Tormenta (en $Km^2$ ) contra el tiempo transcurrido desde el “instante de decisión” para casos sembrados y no sembrados.....	193
<b>Figura VI.5.-</b> Porcentaje de casos activos contra tiempo después del instante de decisión para tormentas sembradas y no sembradas.....	194
<b>Figura VII.1.-</b> Comparación entre las series de tiempo de flujo de precipitación (en $m^3/s$ ) calculado con $z=200R^{16}$ y con $z=113.24R^{138}$ para tormentas sembradas y no sembradas correspondientes al 1er cuartil.....	203
<b>Figura VII.2.-</b> Comparación entre las series de tiempo de flujo de precipitación (en $m^3/s$ ) calculado con $z=200R^{16}$ y con $z=113.24R^{138}$ para tormentas sembradas y no sembradas correspondientes al 2° cuartil.....	203
<b>Figura VII.3.-</b> Comparación entre las series de tiempo de flujo de precipitación (en $m^3/s$ ) calculado con $z=200R^{16}$ y con $z=113.24R^{138}$ para tormentas sembradas y no sembradas correspondientes al 3er. cuartil.....	204
<b>Figura VIII.1.-</b> Bengalas colocadas en las alas del avión, listas para ser encendidas en el momento adecuado y soltar las sales higroscópicas en la base de la nube.....	215
<b>Figura VIII.2.-</b> Bengalas colocadas en las alas del avión en el proceso de liberación de sales higroscópicas en la base de la nube.....	221

## Índice de tablas

<b>Tabla III.1.-</b> <i>Algunas de las características sobresalientes del área de trabajo.....</i>	46
<b>Tabla III.2.-</b> <i>Posición y altitud de las estaciones meteorológicas.....</i>	47
<b>Tabla III.3.-</b> <i>Información promedio de la precipitación en las cinco estaciones y las aportaciones al vaso.....</i>	47
<b>Tabla III.4.-</b> <i>Análisis de regresión de las aportaciones contra la precipitación.....</i>	48
<b>Tabla IV.1.-</b> <i>Ejemplo de salida de datos impresos de un sondeo. Descripción.....</i>	95
<b>Tabla IV.2.-</b> <i>Resumen de características de tormenta con base en el análisis de TITAN...</i>	104
<b>Tabla IV.3.-</b> <i>Parámetros del espectro de CCN (de <math>N = CS^k</math>).....</i>	109
<b>Tabla V.0.-</b> <i>Estimación de intensidad de lluvia con cinco diferentes relaciones z-R.....</i>	127
<b>Tabla V.1.-</b> <i>Muestra de los resultados obtenidos simulando condiciones de campo con los pluviógrafos.....</i>	130
<b>Tabla V.2.-</b> <i>Resumen de información de bitácora de campo de la estación Castaños utilizada para correr los programas de corrección del tiempo y adición del factor de calibración a los pluviogramas.....</i>	143
<b>Tabla V.3.-</b> <i>Ejemplo de algunos registros de la base de datos de calibración.....</i>	157
<b>Tabla V.4.-</b> <i>Bandas utilizadas para el cálculo de estadísticos.....</i>	171
<b>Tabla VI.1.-</b> <i>Valores de los cuartiles de la integral tiempo área (ITA) en <math>Km^2h</math> para casos sembrados y casos no sembrados, para todas las tormentas.....</i>	195
<b>Tabla VI.2.-</b> <i>Valores de los cuartiles de precipitación total (Kilo toneladas) para casos sembrados y casos no sembrados, para todas las tormentas.....</i>	195
<b>Tabla VII.1.-</b> <i>Intensidad de la tormenta en mm/h con Marshal-Palmer.....</i>	199
<b>Tabla VII.2.-</b> <i>Reflectividad de tormenta z en <math>mm^6/m^3</math> para las tormentas sembradas y no sembradas correspondiente a los cuartiles <math>1^\circ</math>, <math>2^\circ</math> y <math>3^\circ</math>.....</i>	200
<b>Tabla VII.3.-</b> <i>Intensidad de tormenta en mm/h, con <math>z=113.24R^{1.138}</math>.....</i>	201
<b>Tabla VII.4.-</b> <i>Flujo de precipitación en <math>m^3/s</math> utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia resultante de la calibración hidrológica del radar: <math>z=113.24R^{1.138}</math>, para las tormentas sembradas y no sembradas correspondientes a los cuartiles indicados en la tabla.....</i>	202
<b>Tabla VII.5.-</b> <i>Diferencias en el volumen total de lluvia precipitada (en <math>m^3</math>) en tormentas sembradas y no sembradas correspondientes a los cuartiles <math>1^\circ</math>, <math>2^\circ</math>, y <math>3^\circ</math>, para <math>z=113.24R^{1.138}</math>, considerando desde el instante de decisión <math>t=0</math> hasta <math>t=55</math> min.....</i>	205
<b>Tabla VII.6.-</b> <i>Diferencias en el volumen total de lluvia precipitada (en <math>m^3</math>) en tormentas sembradas y no sembradas correspondientes a los cuartiles <math>1^\circ</math>, <math>2^\circ</math>, y <math>3^\circ</math>, para <math>z=200R^{1.6}</math>, considerando desde el instante de decisión <math>t=0</math> hasta <math>t=55</math> min.....</i>	205
<b>Tabla VII.7.-</b> <i>Subestimación de las diferencias en el volumen total de precipitación por la aplicación de <math>z=200R^{1.6}</math> en la obtención del flujo de precipitación de las tormentas sembradas y no sembradas correspondientes a los cuartiles <math>1^\circ</math>, <math>2^\circ</math> y <math>3^\circ</math>, considerando del instante <math>t=0</math> hasta <math>t=55</math> min.....</i>	206

<b>Tabla VII.8.-</b> <i>Volumen total precipitado por las tormentas sembradas calculado con su duración (D) y área promedio (A) reales y considerando que no hubo incremento en la intensidad promedio, para lo que se utiliza la intensidad promedio de las tormentas no sembradas correspondientes a los cuartiles 1°, 2° y 3°, considerando desde el instante t=0 para valores correspondientes a cada 5 minutos, con <math>z=113.24R^{1/3}</math>. La duración (D) está en minutos, la intensidad en mm/h, el área (A) en km<sup>2</sup> y el volumen precipitado en m<sup>3</sup> ..</i>	207
<b>Tabla VII.9.-</b> <i>Porcentaje del volumen total precipitado que se puede atribuir al incremento de intensidad de lluvia (mm/h) de la tormenta sembrada correspondiente a los cuartiles indicados utilizando <math>z=113.24R^{1/3}</math> ..</i>	208
<b>Tabla VII.10.-</b> <i>Porcentaje del volumen total incrementado de precipitación (como efecto del sembrado) que se puede atribuir al incremento de intensidad de lluvia (mm/h) en las tormentas correspondientes a los cuartiles indicados utilizando <math>z=113.24R^{1/3}</math> ..</i>	208
<b>Tabla VII.11.-</b> <i>Área de tormenta en km<sup>2</sup> y promedio de los valores de la misma considerados cada 5 minutos a partir del instante de decisión t=0, obtenidos de la figura VI.4.....</i>	209
<b>Tabla VII.12.-</b> <i>Tabla con los valores de flujo de precipitación (m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) contra tiempo transcurrido desde el momento de decisión para casos sembrados y no sembrados, obtenidos de la figura VI.1.....</i>	210

# **CAPÍTULO I**

## **Introducción**

- I.1.- ¿Por qué es importante tratar este tema?**
- I.2.- La importancia del tema en el ámbito de la Ingeniería  
Hidráulica**
- I.3.- ¿A qué se refiere el término de verificación objetiva?**
- I.4.- Lo que se presenta en el resto del trabajo**
- I.5.- El contexto del PARC en que se realiza este estudio**

## CAPITULO I

### Introducción

#### **I.1.- ¿Por qué es importante tratar este tema?**

Desde los años cincuenta en muchos países se han venido realizando actividades de modificación del tiempo atmosférico por medio del sembrado de nubes. La necesidad de ver incrementada la precipitación natural ha motivado en México diversas actividades relacionadas con la modificación de las nubes (CONACYT, 1973; INSISA, 1976; Luz y Fuerza, 1969; Ramos, 1987). El impacto que puede tener un incremento en el volumen total de agua disponible, obtenido por estimulación de la lluvia en una región dada, hace que el tema de la estimulación de lluvia sea importante para los profesionistas de la hidráulica.

Algunas similitudes entre las acciones de sembrado de nubes en México son las siguientes: han estado dirigidas principalmente hacia la mitigación de sequías; han representado iniciativas apoyadas por el Gobierno e inversiones considerables y pretendido aliviar las fuertes presiones sociales en torno a la escasez de agua. En cuanto a los resultados obtenidos, para todos los casos, ha faltado una verificación objetiva y a falta de ésta los programas de sembrado han representado actos de fe.

Hoy gracias a los avances tecnológicos no sólo es posible obtener una verificación cuantitativa sino que es posible estimar el orden de magnitud del costo del metro cúbico de agua resultado de la estimulación.

#### **I.2.- La importancia del tema en el ámbito de la ingeniería hidráulica**

Dentro del ámbito de la ingeniería es de interés el conjunto de conocimientos y técnicas que permiten aplicar los descubrimientos científicos y los recursos naturales a la industria y al servicio del hombre. En particular para la rama de la ingeniería especializada en la planeación, abastecimiento, conducción, control y aprovechamiento industrial de las aguas. La determinación del grado en que se ve afectada la precipitación con la estimulación de lluvia, definiendo así la efectividad de la estimulación de lluvia, es de capital importancia.

La efectividad de una metodología de sembrado debe estar dada en términos del volumen de agua efectivamente precipitado; así, el hidráulico puede considerar el efecto, en las variables que son de su interés, en las siguientes fases del ciclo hidrológico y determinar la mejor manera de incluir dicho efecto en el diseño y operación de obras hidráulicas y en los planes de gestión integral del recurso agua.

### **1.3.- ¿A qué se refiere el término de verificación objetiva?**

A las campañas de estimulación de lluvia siempre estará asociada la necesidad de verificar sus resultados. Verificar quiere decir comprobar o examinar la verdad o exactitud del resultado esperado mediante las pruebas y operaciones convenientes. La verdad reside en la conformidad entre lo afirmado en un enunciado o proposición y los objetos, estados o hechos a los que hace referencia.

En el éxito que puede tener la estimulación de lluvia intervienen elementos que pueden variar y que son de naturaleza diferente como los atmosféricos, el funcionamiento de equipo e instrumentación de diagnóstico, el criterio y pericia del piloto en la selección de tormentas (cuando se usa avión), cambios en el personal e incluso posible variación de la calidad de las sustancias utilizadas en la siembra, entre otras pueden afectar la eficacia de una campaña de estimulación de lluvia. Por lo anterior y para detectar y corregir posibles anomalías es recomendable que la verificación sea una constante en el tiempo.

Verificar es sinónimo de demostrar y desde este punto de vista es probar una cosa mediante datos, es poner de manifiesto la verdad de una proposición mediante otras proposiciones verdaderas, de las cuales ésta deriva necesariamente. Es esencial que la verificación sea de carácter objetiva (lo verificado o descrito existe fuera del sujeto y es independiente de él) lo cual le es dado por la comprobación del cumplimiento de las hipótesis y leyes. La verificación se lleva en cada una de sus fases atendiendo principalmente los aspectos cuantitativos y por lo tanto observables. La objetividad implica imparcialidad y una sujeción total al método científico. La verificación será objetiva dado que se adecua a la realidad que pretende conocer al fundarse en el objeto.

### **1.4.- Lo que se presenta en el resto del trabajo**

En el Capítulo II se presentan algunos conceptos sobre la estimulación artificial de lluvia. Se aborda el aspecto más conocido por todos, lo controversial del tema. Se hace hincapié en la dificultad de la verificación objetiva de los resultados de la estimulación de lluvia. Se ubica dentro del proceso natural de generación de lluvia a los fundamentos de las hipótesis del sembrado higroscópico y del sembrado glaciogénico. Se especifican las diferencias entre campañas operativas y campañas de investigación al mismo tiempo que se plantea la necesidad de contar con mecanismos de verificación objetiva y de control permanentes. Se abordan las características de los diseños experimentales que permiten verificación objetiva y de la instrumentación empleada, se califica al radar meteorológico y a la red de estaciones pluviográficas como indispensables también en las campañas operativas.



Para ubicar la utilidad de la estimulación de lluvia exitosa se analiza el sembrado de nubes como instrumento rompe sequías y su impacto en la reducción de vulnerabilidad de los sistemas productivos de las zonas áridas.

En el Capítulo III se abordan ejemplos de proyectos de estimulación de lluvia realizados en México y en los que se destaca las limitaciones de los mecanismos de verificación utilizados, cuando éstos existían. Se aborda la definición de la unidad experimental y de las variables de respuesta e hipótesis estadísticas en el PARC (Program for the Augmentation of Rainfall in Coahuila). Se remarca la importancia de la instrumentación para una verificación objetiva por lo que ésta se describe en los dos capítulos siguientes (Cap. IV y Cap. V)

En el Capítulo IV se describe y analiza el papel que juegan en la obtención de evidencia las redes pluviográficas, el radar meteorológico, la navegación GPS y los instrumentos aerotransportados de física de nubes. Como ejemplo se presenta la instrumentación utilizada en el PARC.

Las mediciones hechas por el radar meteorológico proveen de la evidencia más importante en la verificación de los efectos del sembrado. Si la verificación se hace con un radar meteorológico calibrado hidrológicamente es posible evaluar los resultados del sembrado en términos del agua efectivamente precipitada sobre el suelo, que son los términos de interés para el hidráulico y el hidrólogo. Por lo que en el Capítulo V se aborda con detalle el proceso de calibración hidrológica de un radar meteorológico, se pone énfasis en la obtención de los datos para calibración.

En el Capítulo VI, se presentan los resultados del efecto del sembrado de nubes con sales higroscópicas en términos relativos (en porcentajes de aumento de reflectividad) obtenidos por el NCAR (National Center of Atmospheric Research). En el Capítulo VII se hace una reinterpretación de los resultados del NCAR a la luz de la calibración hidrológica para obtener el incremento de lluvia atribuible al sembrado en términos absolutos (en metros cúbicos de agua). Es posible estimar el costo del metro cúbico de agua calculado del volumen de lluvia atribuible a la estimulación y comparar los resultados del PARC con otros experimentos en México. Finalmente en el Capítulo VIII se presenta el resumen de resultados y conclusiones.

## 1.5.- El contexto del PARC en que se realiza este estudio

Este estudio se realiza en el contexto del Program for the Augmentation of Rainfall in Coahuila (Programa para el Aumento de Lluvia en Coahuila, PARC por sus siglas en inglés) ejecutado durante los años de 1996, 1997 y 1998. El proyecto fue contratado por el Gobierno del Estado de Coahuila con el Research Applications Program (Programa de Investigación Aplicada, RAP por sus siglas) del National Center of Atmospheric Research (Centro Nacional de Investigaciones Atmosféricas, NCAR por sus siglas) de los EUA para una duración original de cuatro años. El objetivo del proyecto es el de realizar una campaña científica de estimulación de lluvia en la zona de Monclova, Coahuila, para calificar objetivamente la bondad de una metodología de sembrado de nubes con agente higroscópico que ha mostrado ser efectiva en otras zonas con clima similar, específicamente en Sudáfrica (Mather *et al*, 1996, Mather *et al*, 1997, Bigg, 1997).

El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) participó en el PARC cada uno de los años bajo convenio con la Comisión Nacional del Agua (CNA). Uno de los objetivos de esta participación fue el de producir personal capacitado en las técnicas empleadas en el PARC, de donde se derivó la oportunidad de que el autor de este trabajo participara con personal del IMTA en la campaña experimental durante el año 1998 y durante el año 1999 con el procesamiento de datos pluviográficos y de radar. A principios del año 2000 se conocen los resultados experimentales obtenidos por el NCAR en el PARC, quedando así configuradas las condiciones para que el tema de la evaluación objetiva de campañas de estimulación de lluvia se retomara como trabajo de tesis para obtener el grado de maestro en ingeniería en el campo mayor hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. El desarrollo de este trabajo tuvo como única limitación el tiempo disponible para su realización.

## **CAPÍTULO II**

### **Conceptos sobre la estimulación artificial de lluvia**

- II.1.- La controversia**
- II.2.- La dificultad de una verificación objetiva**
- II.3.- El proceso natural de generación de lluvia.**
- II.4.- Técnica de estimulación de lluvia.**
- II.5.- Técnicas glaciogénicas vs técnicas higroscópicas**
- II.6.- Vectores para la colocación de los químicos estimulantes**
- II.7.- Campañas operativas vs campañas de investigación.**
- II.8.- Diseños experimentales que permiten verificación objetiva**
- II.9.- Instrumentos necesarios o convenientes para campañas puramente operativas.**
- II.10.- El sembrado de nubes como un instrumento rompe Sequías**
- II.11.- La estimulación de lluvia y los sistemas productivos en las zonas áridas**

## CAPÍTULO II

### Conceptos sobre la estimulación artificial de lluvia

#### II.1.- La controversia

Desde sus inicios el tema de la estimulación de lluvia ha despertado controversias. Para abordar esta polémica conviene tratar por separado aquellas que se dan en el ámbito de la toma de decisiones, incluidos organismos públicos y privados de diferente nivel, y posteriormente las presentes en el ámbito científico – técnico.

##### II.1.1. En el ámbito de toma de decisiones

Por ejemplo en el ambiente gubernamental a la hora de decidir sobre apoyar o no un programa de estimulación de lluvia son varios aspectos que entran en disputa y que hace difícil tomar la decisión final. Entre estos aspectos pueden citarse los siguientes.

Cuando se decide sobre la viabilidad de un proyecto (otro que no sea de estimulación de lluvia) se hace bajo la consideración de índices financieros y económicos (relación beneficio costo, tasa interna de retorno etc.). Antes se ha hecho un estudio de viabilidad técnica y ésta debió haber resultado satisfactoria. Muchos proyectos son sólo repeticiones de otros que en la práctica ya han demostrado ampliamente su conveniencia. En el caso de un proyecto de estimulación de lluvia, el esquema anterior no es aplicable; hay características particulares que lo hacen diferente. A continuación se presentan los aspectos particulares.

En el sembrado de nubes la experiencia práctica internacional ha demostrado que lo que ha resultado exitoso para una región y una época determinada puede presentar resultados incluso totalmente contrarios para otra región o época (Maybank, 1977; Kessler, 1973).

La elección de una tecnología de sembrado no resulta nada fácil. Se requiere de un equipo de científicos y técnicos de las más diversas especialidades (meteorólogos, electrónicos, informáticos, hidrólogos etc.) que estudien el régimen de lluvias y las características de las tormentas y las nubes, y realicen el censo de las mismas. Lo anterior arroja información clave sobre la física de las nubes de la región, de donde se deriva el planteamiento del modelo físico conceptual. En concordancia con el modelo físico conceptual se elige la tecnología de sembrado y la metodología de verificación objetiva. La tecnología y estrategia de sembrado resultante es la que tendrá las mayores posibilidades de modificar de manera favorable al proceso natural

de precipitación, lo cual todavía deberá ser objetivamente verificado. Esta fase requiere un año como mínimo y se complica si no se cuenta con el recurso humano calificado para llevarla a cabo. La falta de un modelo físico conceptual en los programas de estimulación de lluvia del pasado, con fundamento en mediciones de las características de las nubes que se sembraron, es una constante en México; pero hay que aclarar que aún los programas de estimulación de lluvia más completos de la actualidad en el mundo entero no explican todo lo que se relaciona con el proceso natural de precipitación y la forma como es completado por la intervención del sembrado (WMO, 2000).

La determinación de la viabilidad técnica de la tecnología de sembrado seleccionada está lejos de ser sencilla. Primero deberá de diseñarse el método de evaluación de la tecnología de sembrado por medio del cual se asegure la obtención de evidencia estadística y física del efecto del sembrado. El experimento se ejecuta usando como laboratorio a la misma atmósfera y puede tener una duración de varios años. Aun siendo etapa experimental los costos pueden llegar a ser de alrededor de un millón de dólares por año o más si hay que adquirir un radar. Finalmente los resultados obtenidos estarán en términos de diferencias en las variables de respuesta (definidas por el método de evaluación y relacionadas directamente con la precipitación), diferencias que deben tener al menos un 95% de probabilidad de ser ocasionadas por el efecto del sembrado (ver capítulo VI).

El volumen de agua que puede obtenerse vía estimulación de lluvia en ningún caso es constante. El resultado de un programa operativo en los siguientes años está ligado a la variabilidad natural del régimen de precipitación. Es decir el número de nubes aptas para ser sembradas puede variar mucho año con año.

La polémica más fuerte alrededor de la estimulación de lluvia se deriva del hecho de que en toda la historia de ésta en México no ha habido un solo programa que haya cumplido con los requisitos mínimos anteriores (el primero en seguirlos es el PARC). Puede afirmarse que en la mayoría de programas falta un adecuado entendimiento de las bases científicas y adecuación de la metodología de sembrado a las hipótesis físicas. Además la falta de evidencia física del efecto del sembrado en la nube añade incertidumbre y aumenta la polémica. Finalmente se suma a lo anterior, de manera sobresaliente, el hecho de que la evidencia estadística recabada no alcanza un nivel de significancia adecuado.

En México los intentos de establecer relaciones beneficio costo han sido sujetos a severas críticas por falta de sustento objetivo. Las inversiones han resultado polémicas porque finalmente son un acto de fe. Las críticas se recrudecen por los que opinan que las inversiones se deben dirigir hacia proyectos con probada viabilidad técnica, financiera y económica. La ciencia y la técnica actuales están en camino de resolver dichos problemas.

### II.1.2. En el ámbito académico científico

En el ámbito académico las controversias giran alrededor de los siguientes factores (U.N.A.M y Droplet Measurement Technologies, 1999):

- a) Insuficiente entendimiento de la física de los procesos (los dinámicos contra los microfísicos y los sinópticos contra los de mesoescala). Los procesos de formación de la precipitación natural han resultado ser mucho más complejos de lo que se pensaba.
- b) El sembrado induce cambios dentro del rango de la variación natural de la precipitación.
- c) Carencia de indicadores físicos que permitan pronosticar la variación natural y estratificar los datos.
- d) Falta de soporte financiero para los periodos largos de tiempo requerido por el experimento de sembrado aleatorio. El tiempo de apoyo está en función del número de casos requeridos. El número de casos depende de la variabilidad natural de la precipitación y de la magnitud del efecto esperado.
- e) Incapacidad para desarrollar y correr modelos numéricos avanzados debido a limitaciones de cómputo e insuficiente entendimiento de los procesos naturales.
- f) Resultados mixtos en los primeros experimentos estadísticos que son considerados de caja negra (Universidad de Nuevo León, 1970; Kessler, 1973; CONACYT, 1973, Cía. de Luz y Fza. del Centro, 1969).

### II.1.3. En el ámbito de las tecnologías del sembrado

Changnon y Lambright (1990), citados por Bruintjes (1999) identifican varios problemas y dificultades en los experimentos de modificación del tiempo atmosférico en el mundo, los cuales han generado la mayoría de las controversias:

- 1) Los ejecutores de los programas procedieron con un inadecuado entendimiento de las bases científicas.
- 2) Existencia de un proceso defectuoso de planeación del proyecto.
- 3) Diferencias de opinion entre agencias de financiamiento y los responsables del proyecto científico.
- 4) Falta de un compromiso continuo por parte de las principales agencias conductoras del experimento.
- 5) Cambio de directores del proyecto.
- 6) Pobre ejecución del proyecto científico.

## **II.2. La dificultad de una verificación objetiva**

¿Pero que hace que los resultados de un experimento o programa de estimulación de lluvia sean tan susceptibles de ser afectados por los factores arriba enumerados?. La respuesta gira en torno a dos aspectos: la primera es la naturaleza multifacética del problema y la segunda es el gran rango de escala en que se desarrolla. Dichas características son citadas por Bruintjes (1999) como la causa de que la investigación de la modificación del tiempo atmosférico requiera la participación de un gran número de expertos.

Sumados a la naturaleza multifacética y de escala del problema se tiene a la variabilidad natural de las nubes, de las tormentas y de la precipitación. Dado que el sembrado genera cambios que no sobrepasan la variabilidad natural de las características de las tormentas, en la verificación necesariamente se tiene que comparar lo que sucedió contra lo que hubiera sucedido si no se utilizara el sembrado artificial. El comparar necesariamente implica hacer mediciones, por lo que se tiene que diseñar una estrategia experimental (ver sección II.8) que defina las variables de interés y la manera de hacer las mediciones y los análisis requeridos sobre los datos. La instrumentación utilizada debe permitir obtener mediciones en todo el rango de escala en que tiene lugar el desarrollo de la precipitación, lo que hace a la instrumentación un asunto complejo (ver Capítulo IV). Del análisis de datos se debe desprender la evidencia objetiva que pruebe la efectividad de la tecnología de sembrado.

A todo lo anterior se puede atribuir la diversidad de resultados de los primeros experimentos de estimulación de lluvia, donde además no pudieron modificar a tiempo su estrategia de sembrado cuando ésta alteraba de manera negativa al tiempo atmosférico por no tener evidencia física de las variables clave de la cadena de eventos que se desarrollan para generar la precipitación.

## **II.3. El proceso natural de generación de lluvia.**

### **II.3.1. La inestabilidad atmosférica**

El movimiento vertical de elementos de aire o convección se presenta como resultado de inestabilidad atmosférica. La inestabilidad en el perfil de la atmósfera permite que asciendan masas de aire (parcelas) de las capas bajas que se calienta al estar en contacto con determinadas zonas de la superficie terrestre en los días de fuerte radiación solar. La parcela al ir ascendiendo se enfría dilatándose por la disminución de la presión atmosférica, debido a la inestabilidad existente el aire que rodea a la parcela es más frío y más denso por lo que la parcela continua subiendo. Si además el contenido de humedad en el aire que asciende es suficiente, pronto se llega a la saturación la cual ocurre únicamente por el enfriamiento que acompaña a la ascensión (dado que es un proceso adiabático). La saturación se define como una situación de equilibrio en la que las velocidades de evaporación y condensación son iguales. Junto con la saturación inicia la condensación del vapor de agua.

### II.3.2. La condensación

La condensación es un fenómeno físico por el cual un gas pasa a estado líquido. La condensación que se produce cuando el aire está saturado de vapor de agua es de las más comunes, y a nivel del suelo el sobrante se condensa y da lugar a rocíos o escarchas sobre las superficies sólidas. En la atmósfera para que la condensación se facilite se requiere de pequeñas partículas que sirven como núcleos de condensación. Si no existen estas superficies y se tiene vapor de agua puro se requiere humedad relativa muy por arriba del 100% (Rogers, 1977 menciona que incluso del orden ¡de varios cientos por ciento!) para condensar gotas de apenas unas micras.

Por lo tanto las nubes se forman por condensación del vapor de agua suspendido en el aire. La condensación se produce por enfriamiento del aire; para que se verifique es necesaria una humedad relativa próxima al 100 %, en estas condiciones los núcleos más higroscópicos (atractores de agua) empiezan a actuar como centros de condensación. Los núcleos de condensación pueden ser pequeñas partículas de humo, polvo, polen o cristales de sal; éstas tienen la característica de tener superficies que son higroscópicas. Se señala que como estas partículas higroscópicas son además solubles, la presión de vapor de saturación es menor sobre una gota de disolución que sobre una gota de agua pura del mismo tamaño y temperatura. El proceso en virtud del cual las gotitas de agua se forman sobre los núcleos, a partir de la fase de vapor, se denomina nucleación heterogénea y el resultado es la formación de nubes.

### II.3.3. El crecimiento de las gotitas de nube

Para que las gotitas que forman una nube puedan caer en forma de lluvia éstas tienen que crecer lo suficiente para con su peso vencer las corrientes de aire ascendente. El agregado de gotitas de nube conforma una estructura que en general es muy estable por lo que las gotitas (unas 100 por centímetro cúbico y del orden de 10 micras de radio) manifiestan muy poca tendencia a juntarse o a cambiar de tamaño. La precipitación se genera cuando el conglomerado se hace inestable, y entonces unas gotas crecen a expensas de otras (Rogers y Yau, 1989). Todavía existen dudas sobre el proceso físico por el que crecen las gotas de nube hasta convertirse en gotas de lluvia, pero dos mecanismos de este proceso han sido bastante explorados por la comunidad científica internacional; el primero implica la colisión o choque directo y la coalescencia (o reunión) de las gotitas de agua; el segundo entraña la interacción entre gotitas de agua y cristales de hielo y está reservado a aquellas nubes cuyas cimas se extienden por encima del nivel de los 0 °C (Kessler, 1973).

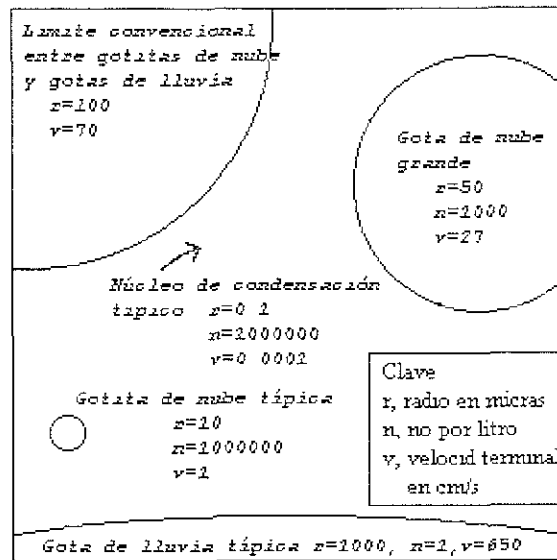
Para que el proceso de coalescencia-colisión sea importante, las gotas de nube deben alcanzar primero un tamaño mayor a las 20 micras, lo que las hace descender o caer. Las gotas en su caída alcanzan gotas de menor tamaño con las que se pueden juntar y formar gotas más grandes por medio del proceso de coalescencia o



romperse por la colisión. Además la gota al ir cayendo sufre los efectos del aire (fricción y flotación) que ocasionan que la gota cambie de forma haciéndose más obloide. Al continuar su descenso este cambio en la forma produce su fracturación por lo que la gota original se convierte en dos o más gotas; por lo tanto las gotas de lluvia son de tamaño limitado debido a que la probabilidad de que se fraccionen aumenta con el tamaño. Las gotas resultantes seguirán el mismo proceso que el de la gota madre, produciendo una reacción en cadena. En el crecimiento por coalescencia resulta clara la importancia del desarrollo vertical que alcanza la nube ya que un escaso desarrollo vertical limita la interacción entre las gotas que caen.

Cuando existe un cristal de hielo, en presencia de gran número de gotas de agua enfriadas a temperaturas más bajas que  $0^{\circ}\text{C}$ , la situación es inmediatamente inestable; ésta inestabilidad es explicada por la teoría de Bergeron-Findeisen (Bergeron, 1935; Findeisen 1942). Esta teoría tiene como base el hecho de que la humedad relativa del aire es mayor con respecto a una superficie de hielo que con respecto a una superficie de agua. Cuando la temperatura del aire alcanza un valor inferior a los cero grados la presión de vapor atmosférica disminuye más rápidamente sobre una superficie de hielo que sobre una superficie de agua, dando como resultado que la presión de vapor en equilibrio sobre el hielo es inferior a la correspondiente al agua a la misma temperatura y en consecuencia el cristal de hielo crece por difusión del vapor, al mismo tiempo que las gotas se evaporan para compensar la pérdida de vapor (Sumner, 1988). La presión de vapor de saturación sobre el agua es mayor que sobre el hielo, especialmente entre las temperaturas de  $-5$  y  $-25^{\circ}\text{C}$ , en que la diferencia sobrepasa los  $0.2$  mb. Queda explicado por que al coexistir en una nube cristales de hielo y gotas de agua superenfriadas las gotitas tienden a evaporarse y el vapor se deposita directamente sobre los cristales de hielo. Al igual que la presencia de los núcleos de condensación es necesaria para la formación de las gotitas de agua, también es necesario que existan núcleos de congelación antes de que puedan formarse las partículas de hielo, generalmente a muy bajas temperaturas. De hecho, las pequeñas gotas de agua pueden estar superenfriadas en el aire puro hasta  $-40^{\circ}\text{C}$  antes de que tenga lugar la congelación homogénea (en ausencia de núcleos de congelamiento). No obstante cuando existen los núcleos adecuados, la congelación puede ocurrir a unos pocos grados por debajo de cero (Kessler, 1973; Rogers, 1977; Maybank, 1977)

Al crecer el cristal de hielo alcanza el peso suficiente para descender haciendo posible colisiones. Una vez que la partícula en su caída se encuentra por debajo del nivel de los  $0^{\circ}\text{C}$  puede iniciarse su fusión y con ello emerger, por debajo de la base de la nube, en forma de gota de lluvia. Para apreciar las diferencias entre las partículas que intervienen en la generación de lluvia, se presenta la comparación entre ellas en tamaño, concentración y velocidades de caída en la figura II.1. En ésta se aprecia la amplia diferencia existente en tamaño entre un núcleo de condensación típico y, por ejemplo, una gota de lluvia.



**Figura II.1.-** Tamaños comparativos, concentraciones y velocidades terminales de caída de algunas de las partículas que intervienen en la física de las nubes (según McDonald, 1958; citado por Rogers, 1977).

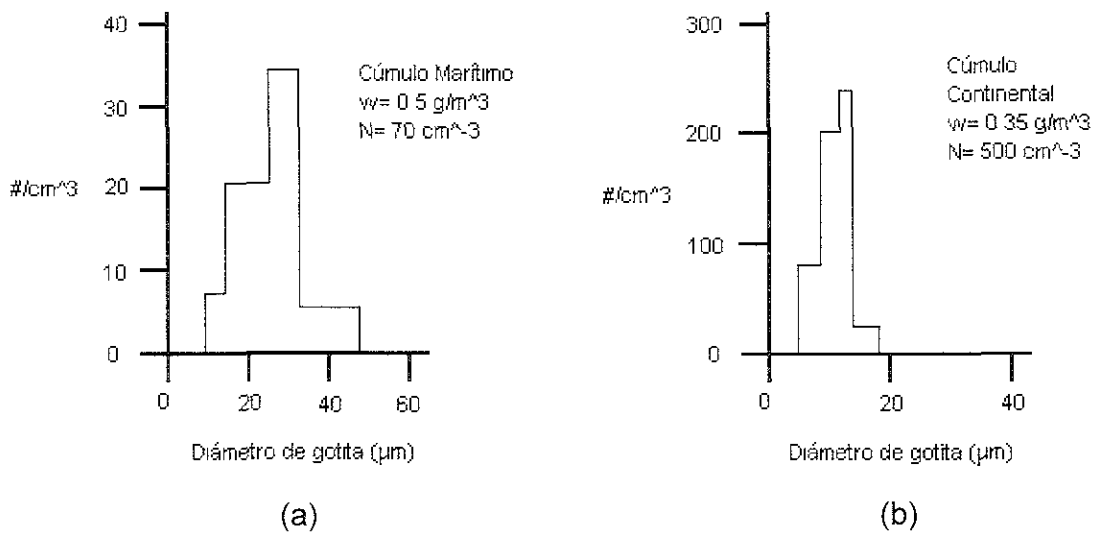
## II.4. Técnicas de estimulación de lluvia.

La mayoría de las técnicas de estimulación de lluvia utilizan un proceso de "sembrado de nubes". Proceso por medio del cual se introducen partículas, en el lugar adecuado dentro de la nube, que actúan como núcleos de condensación en nubes con base cálida o como núcleos de congelamiento en nubes frías. Tiene su base en el hecho de que la física de las nubes está fuertemente influenciada por la concentración y la distribución de tamaños de los núcleos de condensación, y por la concentración de los núcleos de hielo.

### II.4.1. El sembrado de nubes con sales higroscópicas

Si por medio del sembrado se agregan núcleos de condensación artificiales (sales higroscópicas) cuyas características (más higroscópicas, mayor tamaño) les permitan competir con ventaja ante los núcleos de condensación naturales entonces se logrará que la distribución de tamaños de gotas de nube se ensanche, sobre todo en el rango de los diámetros más grandes incidiendo de manera directa en el aumento de lluvia al incrementar la eficiencia del crecimiento de las gotas por colisión y coalescencia. Las sales higroscópicas colectan gotas de nube para formar gotas de lluvia. Resulta conveniente remarcar que la deficiencia de gotitas de nube detectada en nubes continentales al compararlas con nubes marítimas, no es en cantidad o concentración de gotitas de nube, ya que en las nubes continentales la concentración es mayor que en nubes marítimas debido a la presencia de un excesivo número de núcleos de condensación (aunque de menor tamaño). La deficiencia radica en que

las gotitas de nube para las nubes continentales presentan tamaños muy uniformes (distribución angosta) que limitan su crecimiento por colisión y coalescencia y por lo tanto es difícil que alcancen el tamaño de gotas de lluvia. Lo anterior queda ilustrado en la figura II.2, en la cual puede hacerse la comparación del espectro de gotita de un cúmulo marítimo (considerado como muy eficiente para desarrollar lluvia) con el espectro de gotita de una nube cúmulo continental; donde destaca el cambio en la escala para la concentración de gotita de nube y donde  $w$  es el contenido de agua líquida en la nube expresado en  $g/m^3$  (esta medida no incluye al vapor de agua).



**Figura II.2.-** Distribución de tamaños de gotita de nube (tamaño contra concentración) en (a) cúmulo marítimo y (b) cúmulo continental, con contenido de agua líquida ( $w$ ) y concentración ( $N$ ) (Squires, 1958; citado por NCAR, 1997) La nube se muestreó 600 metros por encima de su base

Dado que la evidencia recabada sobre la efectividad del sembrado con bengalas higroscópicas presenta resultados que son difíciles de explicar, solamente a partir de los eventos desencadenados por el ensanchamiento del espectro de gota de nube ocasionado por la introducción de núcleos de condensación artificiales (Mather et al., 1997; Silverman et al., 1999; NCAR, 1999), es necesario que se contemple una componente de efectos dinámicos del sembrado higroscópico en el desarrollo de la nube y consecuente generación de más gotas de lluvia. Un efecto representado por una mayor organización de las corrientes descendentes con respecto a las ascendentes puede implicar directamente una mayor duración de la nube y de la lluvia, además de propiciar la activación de celdas convectivas vecinas con lo que es posible que también se vea incrementada el área total de la tormenta por lo que es necesario hacer estudios de efectos dinámicos relacionados con el sembrado.

La tecnología de sembrado más avanzada, en la actualidad, que utiliza sales higroscópicas se originó en Sudáfrica (Mather, 1991) y consiste básicamente en la utilización de cartuchos que al ser quemados liberan sales higroscópicas de un tamaño considerado como cuatro veces más grandes que los núcleos de condensación encontrados de manera natural en la atmósfera continental, lo cual los hace más eficientes que estos (Cooper *et al.*, 1997). Esta tecnología se aplica a tormentas convectivas con una base bien formada, una temperatura cálida y con corrientes ascendentes fuertes además que, de preferencia, presenten un buen desarrollo vertical.

La tecnología de sembrado de nubes utilizando cartuchos o bengalas es la empleada en el experimento de estimulación de lluvia en Coahuila (PARC). El diseño de estas bengalas se considera como uno de los acontecimientos más importantes para el desarrollo de la estimulación de lluvia, estos cartuchos son colocados en las alas de un avión (Mather *et al.*, 1997) y quemados justo en la zona de corrientes ascendentes en la base de la nube. El avión que se emplea en proyectos operativos puede ser incluso una avioneta; pero en general el tipo de avión elegido estará en función del número de cartuchos que se quieran transportar colocados en las alas, de la velocidad de crucero y tasa de ascenso y del tiempo de independencia en cuanto a combustible durante el vuelo (ver sección IV.5.4).

Una vez seleccionada la nube que será sembrada el avión se dirige a la parte de la nube de vientos ascendentes en la base. Estando en el lugar adecuado se inicia la combustión de los cartuchos; la nube de partículas que ésta produce es succionada de manera natural, iniciando éstas una ascensión vertical y propiciando la formación de gotas de lluvia. El resultado de la combustión del cartucho son partículas higroscópicas de estructura cristalina que al entrar en contacto con las gotas de nube, se rompen o disuelven en sus iones con carga negativa o positiva debido a que las moléculas de agua son polares. En la molécula de agua el hidrógeno es atraído por los iones negativos y el oxígeno como terminal negativa es atraído por cargas positivas

#### II.4.2. El sembrado de nubes con agentes glaciogénicos

Los núcleos de congelamiento artificiales o agentes glaciogénicos deben ser introducidos en una nube fría que presente un déficit de núcleos de congelamiento el cual se manifiesta en la atmósfera por la presencia de una gran cantidad de gotitas de nube enfriadas a temperaturas más bajas que 0 °C, hasta el extremo de que sobre enfriamientos de 15 °C o más son frecuentes debido a que no existen superficies con la cualidad de servir como núcleos de hielo (Rogers y Yau, 1997). Lo anterior es la razón de que la forma más popular de modificar artificialmente las nubes sea mediante la adición de núcleos de hielo en aquellas nubes cuyo tope se extiende más allá del nivel de los 0 °C (Rogers, 1997). Los agentes glaciogénicos utilizados tienen similitud en su estructura con los cristales de hielo existentes de manera natural, los que en número son más bien escasos en la atmósfera frente a la

gran abundancia de núcleos de condensación. La literatura señala que una gran cantidad de agentes son efectivos para convertir gotas de agua superenfriadas en cristales de hielo, algunos de estos agentes son: hielo seco, propano líquido, yoduro de plomo, mezcla de yoduro de plata con perclorato de amonio y algunos materiales orgánicos. De manera lógica, en la utilización de estas sustancias se señala como la zona más propicia para su aplicación a la zona de las nubes donde se encuentran las gotas de agua superenfriadas. Cuando se emplea este método en nubes convectivas se recomienda aplicar el agente de sembrado cuando la nube ya presenta un buen desarrollo vertical; de lo contrario se corre el riesgo de desencadenar prematuramente la precipitación, destruyendo los vientos ascendentes y ocasionando una disipación prematura de la nube. También se utilizan los agentes glaciogénicos en tormentas vinculadas a frentes fríos en cuya atmosfera también exista un déficit de núcleos de hielo.

### II.5. Técnicas glaciogénicas vs técnicas higroscópicas

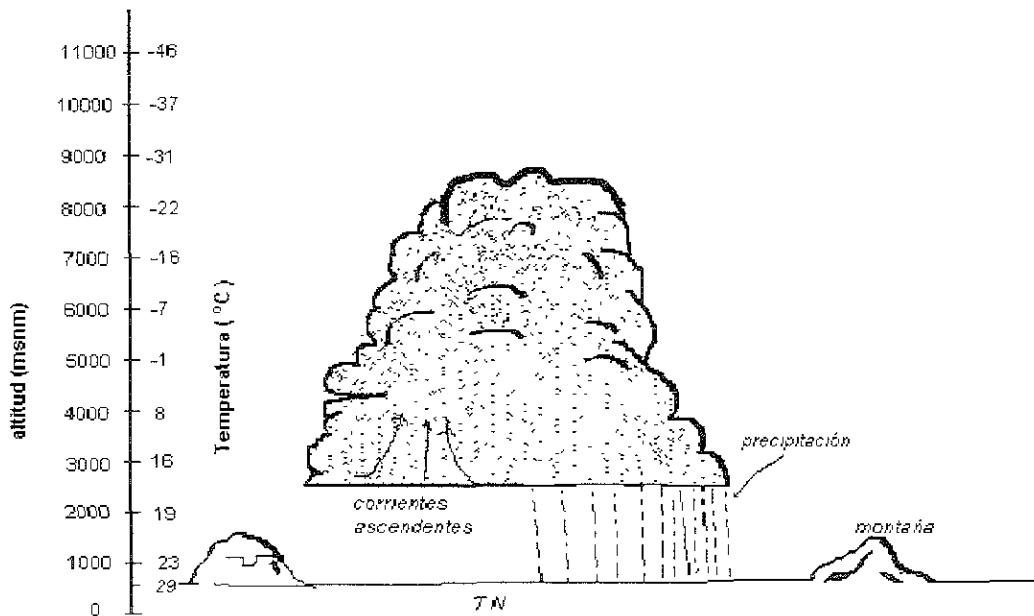
En una nube el inicio de la precipitación y su desarrollo puede seguir varios caminos físicos, envolviendo varios procesos microfísicos que siguen adelante simultáneamente, pero en diferentes tasas, con un camino dominante sobre los otros a causa de condiciones atmosféricas dadas que lo hacen más eficiente, Bruintjes (1999). Las hipótesis de aumento de precipitación tratan de mejorar la eficiencia del camino evolutivo de la precipitación. Así para definir la tecnología de sembrado que resulta más conveniente utilizar en las nubes presentes en un lugar y época del año dados se requiere primero definir cuál proceso microfísico es más importante en el desarrollo de la precipitación ¿El crecimiento de las gotas de nube por coalescencia o por el proceso de hielo?. Posteriormente se deberá definir si existe alguna deficiencia en el número y distribución de tamaños de núcleos de condensación o en su defecto en el número de núcleos de hielo. Al considerar lo anterior, junto con la dinámica de mesoescala para determinar las características del sistema de nube, se puede hacer un planteamiento del *modelo conceptual de sembrado*, que en esencia se refiere a la formulación de las hipótesis físicas. Éstas intentan describir como el proceso de precipitación puede, por decirlo así, ser completado por la intervención del sembrado, como la iniciación y desarrollo de la precipitación en nubes sembradas difiere de las nubes no sembradas, cómo se afecta la dinámica de la nube (Bruintjes, 1999). La definición de las hipótesis físicas normalmente se consigue en un año de experimentación (ver sección II.7).

De manera general puede afirmarse que una técnica que utiliza sales higroscópicas para la estimulación de lluvia es aplicable en nubes que tienen la categoría de continental y cuando el perfil vertical de temperaturas presenta temperaturas predominantes por arriba de los 0°C. La distribución de tamaños de gotas de nube debe ser estrecha y en concentraciones moderadamente altas para que el sembrado higroscópico sea efectivo y la base de nube debe ser cálida para lo que deberá tener una temperatura superior a los 10°C, este tipo de nubes son características de latitudes bajas.

En contraste, las técnicas glaciogénicas de estimulación de lluvia son útiles en nubes en las que el perfil vertical de temperaturas es predominantemente por debajo de los 0°C. Los materiales glaciogénicos son utilizados al identificarse que el factor limitante para el desarrollo del proceso de precipitación es la falta de núcleos de congelamiento, con lo que se aumentan la concentración de cristales de hielo en las nubes, ya sea nucleando nuevos cristales o congelando las gotas de nube. Este proceso es efectivo en nubes cuya base tiene una temperatura por abajo de los 10°C, denominada de base fría, siendo este tipo de nubes características de latitudes altas.

Sin embargo es posible tener una combinación de características, por ejemplo, cuando se tiene base cálida y los topes de nube alcanzan temperaturas más frías que los 0°C la fase de hielo se desarrolla y la precipitación evoluciona a través de un conjunto diferente de pasos. Se da una combinación de crecimiento de la precipitación por coalescencia y procesos de hielo. Esta situación es de esperarse en lugares de latitudes medias. Un programa en estas condiciones podría combinar los agentes glaciogénicos de sembrado con los higroscópicos dependiendo de las características térmicas de la nube.

En los vuelos realizados en la siembra de nubes en Monclova y algunos vuelos exploratorios realizados de Monclova a Aguascalientes, en los que el autor tuvo la oportunidad de participar, la temperatura de las bases de nube en el verano de 1998 resultó claramente cálida (ver figura II.3). Resultando lo anterior en un choque tremendo con los programas de estimulación de lluvia que emplearon técnicas glaciogénicas en el pasado en estas mismas zonas. De aquí se desprende la enseñanza de tener mucho cuidado con la aplicación de técnicas desarrolladas en otras latitudes del primer mundo. Aunque cabe la posibilidad de que en tormentas de invierno puedan utilizarse con éxito las técnicas glaciogénicas en algunas partes de México, como Ensenada por ejemplo.



**Figura II.3.-** Nube cúmulo típica y datos sobre el perfil vertical de temperaturas en la atmósfera, que circunda a la nube al inicio del verano en Monclova Coahuila.

## II.6. Vectores para la colocación de los químicos estimulantes

La elección del vector a usar para la colocación de los químicos estimulantes en primer lugar debe responder a las definiciones hechas por el modelo conceptual de sembrado. El mejor vector es el que de más seguridad sobre la modificación efectiva del enlace clave de la cadena de eventos de la precipitación, de tal manera que asegure los mejores resultados, en términos de producción de lluvia. En segundo lugar está el factor financiero que llega a influir para modificar o sustituir el vector por otro que resulta más barato, pero que no asegura los mejores resultados.

Lo anterior tiene implicaciones importantes, ya que los cambios hechos en la estrategia de sembrado con el fin de reducir costos (o para optimizar la detección de una respuesta al sembrado en una campaña experimental) pueden tener un efecto adverso en la precipitación sobre el suelo; es decir puede reducir la precipitación sobre el suelo o no presentar ningún efecto (Cotton, 1986). Lo anterior indica que la intervención en el proceso natural de la precipitación debe ser muy específica en su forma y debe estar planeada para que se dé alrededor del momento preciso en que se presenta la cadena de eventos óptimos para depositar el agente de sembrado.

Hay dos aspectos que condicionan fuertemente la eficiencia y la efectividad del vector utilizado para la colocación de los químicos estimulantes: la capacidad que este medio o vector tenga para colocar dichos químicos, en concentración y cantidad

requerida, en la zona de la nube definida por el modelo conceptual como la más propicia; y la capacidad de este vector para realizar dicha colocación en el momento más adecuado del desarrollo de la nube. En conclusión, si se utiliza un vector sobre el que no tenemos mucho control, la posibilidad de causar efectos adversos se incrementa. Un ejemplo es cuando se siembra una nube cuando ésta no ha alcanzado suficiente desarrollo vertical. En este caso se corre el riesgo de desencadenar prematuramente la precipitación y esto puede destruir los vientos verticales ascendentes y ocasionar la disipación de la nube.

Los vectores utilizados para la colocación de los químicos estimulantes son desde cohetes, generadores en tierra y aviones. Los agentes de sembrado van desde sales higroscópicas, hielo seco, yoduro de plata, propano líquido y otros compuestos orgánicos. Se han usado combinaciones de generadores en el suelo con generadores en el avión.

Rosengaus y Reza (1997) realizan un análisis del sembrado desde el suelo contra sembrado aéreo. Califica al método terrestre como más pasivo al depender del flujo del viento y de la orografía natural de la zona viento abajo de los quemadores para llevar a los químicos al nivel atmosférico adecuado. Los quemadores son operados a control remoto o con operadores que reciben instrucciones a través de radio o teléfono y utilizando estaciones de radio para girar instrucciones. El sembrado desde el suelo usualmente depende del efecto de rampa que las cadenas montañosas producen, mismo que es (al menos parcialmente) responsable de la ascensión inicial del aire húmedo hasta niveles que hacen a las masas de éste encontrarse en una situación inestable, es decir, seguir ascendiendo ya por efectos de flotación propia. Por ejemplo esto ocurre en las campañas realizadas en Baja California norte para lluvias invernales quemando una solución que provee de núcleos de congelamiento. En principio el método es lógico, pero la literatura actual presenta resultados de modelos teóricos de formación de nubes que indican que de hecho un porcentaje muy pequeño de los núcleos totales alcanza el nivel deseado (por efectos de dispersión natural de la pluma). Por las características mismas del sembrado terrestre, este es considerado del tipo pasivo o estático, es decir que hace disponibles los núcleos para ser incorporados a las nubes utilizando los mecanismos naturales de formación de éstas.

Con todas las precisiones hechas antes, las nubes orográficas constituyen la situación más favorable para el sembrado con generadores en tierra; siempre y cuando la barrera sea suficientemente alta para que la deflexión del aire hacia arriba proporcione un medio conveniente de transportar los núcleos a las regiones efectivas de la nube.

El uso de aeronaves en los programas de estimulación de lluvia para transportar los agentes de sembrado y ser colocados en las zonas más adecuadas ha representado el mayor costo y en comparación con los generadores en tierra es mucho más caro; pero también más efectivo. El sembrado higroscópico antiguo se realizaba a granel desde el interior de la aeronave. En la actualidad, el sembrado se realiza encendiendo bengalas colocadas sobre adaptadores especiales en las alas o



soltando o disparando las bengalas desde el interior de la aeronave. Cuando se trata de aeronaves presurizadas el mecanismo de soltar o disparar desde el interior de la aeronave se encuentra descartado, aunque se pueden colocar disparadores automáticos externos que emulan dicha operación. Con aeronaves el sembrado puede ser de tipo estático o dinámico (activo) que busca modificar (intensificar) los mecanismos naturales de formación de nubes de precipitación a través de colocar los núcleos específicamente en zonas de la nube que muestran déficits de ellos con respecto al ideal. Un sembrado pasivo (similar al terrestre) es el volar inyectando continuamente sobre la trayectoria de vuelo dejando los químicos en una franja donde (presumiblemente) serán incorporados a las nubes que pasen por ésta aplicado en lluvias invernales de tipo sinóptico (Gagin y Neumann, 1981). Un sembrado activo (o dinámico) se realiza buscando las zonas específicas de formación de núcleos convectivos inyectando los químicos dentro de las corrientes ascendentes de cada uno de ellos, de tal manera que éstos sean distribuidos en la nube (verticalmente) por esta corriente. Este método es el único viable para zonas gobernadas por fenómenos de precipitación aislada de pequeña escala, como la mayor parte de México durante el verano, aunque se puede concebir que, de identificarse las líneas de producción frecuente de celdas convectivas (por orografía o brisa del mar), se pudieran utilizar métodos pasivos (o estáticos), con menor eficiencia, también en estos casos (Rosengaus y Reza, 1997). Otra ventaja del uso de la aeronave es cuando ésta se instrumenta para la obtención de evidencia física del efecto del sembrado.

## **II.7. Campañas operativas vs campañas de investigación.**

La definición de las hipótesis físicas de sembrado es el primer objetivo de una campaña de investigación sobre los mecanismos de estimulación de lluvia. Especial interés se pone en el estudio de los núcleos de condensación y de congelamiento en las nubes y en la definición de la termodinámica de la cadena de eventos en la precipitación. Durante la etapa de investigación el propósito de aumentar la lluvia precipitada en la zona es secundario.

La construcción del modelo conceptual de sembrado permite definir una técnica específica para estimular la lluvia, por lo que el siguiente paso será evaluar científicamente ésta técnica supuesta como la más adecuada; esto cuando se elige de entre técnicas ya existentes y muy probablemente probadas en otros lugares. Si de los estudios iniciales de los diferentes caminos por los cuales procede la iniciación y desarrollo de la precipitación indicaran que ninguna de las técnicas de estimulación de lluvia que ha sido aplicada en otro lugar garantiza, con una buena probabilidad, su éxito entonces el camino de investigación y desarrollo de una técnica específica para dichas condiciones se alargará.

Si de acuerdo al modelo conceptual de sembrado se utiliza una técnica de sembrado ya definida, la campaña de investigación ejecutará lo necesario para evaluar la efectividad del sembrado; es decir se encaminará a obtener la evidencia requerida para establecer que la metodología de sembrado de nubes está objetivamente

probada en el lugar y época definidos. La evidencia requerida es evidencia física y evidencia estadística.

Una vez que la campaña experimental ha logrado reunir la evidencia requerida para probar que una tecnología de sembrado determinada es efectiva es cuando tiene sentido lógico el planear y ejecutar una campaña operativa de estimulación de lluvia basada en dicha tecnología de sembrado previamente probada científicamente. Si se instrumenta una campaña "operativa" de sembrado de nubes con una tecnología que no ha sido probada científicamente en el lugar y época pretendidos, entonces lo más probable es que sólo sea un gasto infructuoso de recursos y con posibilidades de tener el efecto contrario al de aumentar la precipitación. La gravedad de realizar acciones de sembrado en programas operativos sin el sustento probatorio de su efectividad, aumenta cuando son recursos públicos los que se gastan en ello.

Una campaña operativa seria es entonces aquella que es instrumentada después de una campaña experimental satisfactoria, entendiéndose que, con base en la evidencia física y estadística recabada, se logra demostrar científicamente la efectividad de una tecnología de sembrado. Para darle más seriedad al programa operativo, este debe incluir un mecanismo permanente de evaluación de resultados, que incluya como mínimo la obtención de evidencia estadística del aumento de precipitación. Como en la campaña operativa se trata de maximizar los resultados interviniendo el mayor número de casos con las características necesarias y suficientes para ser sembrados, se hace necesario dejar una que otra tormenta sin sembrar, si es que el número de las tormentas con buenas características que no pudieron ser sembradas de por sí es muy bajo. Pudiera darse el caso que en la región donde opera el programa, las celdas convectivas se disparen en un lapso muy corto de tiempo por la tarde, lo que implicaría que uno o dos aviones sólo puedan tratar a unas cuantas tormentas por día.

La necesidad de mantener mecanismos objetivos de verificación de resultados en las campañas operativas tiene dos motivaciones principales; la primera que no se abordará aquí por ser obvia, tiene que ver con la obtención de índices financieros y económicos con los cuales pueda demostrarse la viabilidad de la continuación de la campaña de estimulación de lluvia. La segunda motivación tiene que ver con la variación natural de las condiciones atmosféricas medias a través de los años. Por lo que existe la posibilidad de que las condiciones atmosféricas medias, definidas durante los 3 o 4 años en que se realizaron las pruebas experimentales, al ser comparadas con las condiciones atmosféricas medias de años posteriores permita la detección de variaciones que pudieran estar afectando positiva o negativamente la eficiencia del sembrado.

## II.8. Diseños experimentales que permiten verificación objetiva

La dificultad de la verificación de resultados concernientes a la aplicación de una tecnología de sembrado radica en el hecho de tener que comparar lo que sucedió, contra la que hubiera sucedido si no se utilizara el sembrado artificial. Esto necesariamente implica el comparar lo que sucedió en unidades experimentales sembradas contra lo que sucedió en unidades experimentales no sembradas durante la misma temporada (Rosengaus y Reza, 1997).

### II.8.1. Evaluación estadística

Un diseño experimental tiene el propósito de asegurar la obtención de la evidencia requerida para probar hipótesis. La evaluación estadística facilita la detección, de la manera más imparcial posible, de cambios (señales de sembrado) en una variable de respuesta, como lo especifica el modelo conceptual de sembrado, el cual es generalmente pequeño comparado con la variabilidad natural de dicha variable.

Para el caso de la verificación objetiva de una tecnología de sembrado se requiere la obtención de evidencia estadística y evidencia física. La evidencia estadística se obtiene de un experimento basado en el modelo conceptual de sembrado y que es conducido y evaluado en concordancia con el diseño original, usando procedimientos y principios estadísticos aceptados y resultando en el rechazo de la hipótesis nula a un aceptable nivel de significancia estadística y poder de detección, Bruintjes (1999).

Las unidades experimentales pueden ser distintas zonas o días siendo unos sembradas y otros no, más frecuentemente en lluvias de carácter sinóptico (gran escala). Pueden ser celdas convectivas donde de manera aleatoria se define si se siembra o no se siembra cada caso (NCAR, 1999; Cooper *et al.*, 1997), más frecuentemente para lluvias de carácter de mesoescala. Pueden ser volúmenes atmosféricos fijos que tienen como centroide la localización inicial de la tormenta candidata (la cual puede ser tratada o no ser tratada) (Silverman *et al.*, 1999). Si las muestras así definidas, tendieran a un tamaño infinito, todas las variaciones ajenas al sembrado - no sembrado estarían igualmente representadas en ambas muestras y su única diferencia estadística radicaría en el sembrado-no sembrado. Lo anterior bajo la condición de que la selección de unidades experimentales que se sembrarán y no se sembrarán se dé a partir de un proceso aleatorio, 100% honesto desde el punto de vista de los que ejecutan el programa (Rosengaus y Reza, 1997).

El tamaño requerido de la muestra depende directamente de la magnitud de la alteración o efecto producido por el sembrado y del nivel de significación estadística que se requiera obtener para un poder de detección dado. Frecuentemente el tiempo requerido de experimentación para alcanzar el tamaño de muestra es de varios años.

### 11.8.2. La evidencia física

Usualmente la presentación de evidencia estadística es suficiente para convencer, a los directamente beneficiados, de la efectividad de tal o cual tecnología de sembrado. Demostraciones estadísticas han dado lugar a que se implemente determinada tecnología de estimulación de lluvia, ya de manera operativa. La comunidad científica exige un nivel de prueba mayor; solicita evidencia física y califican a los resultados de experimentos del pasado, basados sólo en evidencia estadística, como experimentos de caja negra, en los cuales es muy difícil la explicación de resultados de manera física. No tiene sentido el hecho de emprender campañas operativas cuando no se cuenta con evidencia sólida, ya sea física y/o estadística.

La evidencia física constituye la medida de eslabones claves en la cadena de eventos asociados con el modelo conceptual de sembrado; establece la plausibilidad física del efecto de sembrado (sugerida por el resultado del experimento estadístico). La evidencia física facilita el establecimiento de una relación causa-efecto entre la intervención del sembrado y los cambios en las variables de respuesta como documentó la evaluación estadística. Esto se efectúa usualmente por medio de estudios de caso del comportamiento de nubes sembradas y no sembradas que son parte de la muestra de nubes envueltas en el experimento estadístico o puede estar separada de él, y/o como una parte integral del experimento estadístico a través de la identificación de una serie de variables de respuesta asociadas con el modelo conceptual de sembrado. Se debe tener la capacidad para medir tales variables a un grado necesario que permita percibir los cambios anticipados debidos a la intervención del sembrado.

La evidencia física es esencialmente una confirmación de la validez del modelo conceptual de sembrado a fin de proporcionar las bases para transferir la metodología de sembrado de nubes a otros lugares. El modelo conceptual de sembrado determina el reconocimiento de oportunidades de sembrado, implementación de estrategias de sembrado y la evaluación de sus efectos (Bruitjes, 1999).

En conclusión, para que una tecnología de sembrado pueda ser considerada como científicamente probada se requiere de evidencia estadística y física. Cada una de éstas evidencias es considerada como evidencia objetiva que demuestra la efectividad del sembrado y que es utilizada para justificar la iniciación de un programa operativo. Lo que resulta inconcebible es que por falta del conocimiento más elemental de los diferentes caminos por los cuales procede la iniciación y desarrollo de la precipitación (los cuales se originan en la variabilidad meteorológica en espacio y tiempo) existan personas que crean que se puede prescindir de ésta evidencia objetiva.

### II.8.3. El modelo físico conceptual en el PARC

El modelo físico conceptual o hipótesis física en que se fundamenta la tecnología de sembrado en el proyecto para el aumento de lluvia en Coahuila es la siguiente: el material higroscópico de sembrado al ser dispersado en la zona de flujo ascendente en la base de la nube y en presencia de una humedad relativa próxima al 100% genera que la condensación del vapor de agua en la nube se dé primero sobre las partículas sembradas (núcleos de condensación artificiales) debido a que estas partículas son más grandes y más higroscópicas que las partículas naturales (núcleos de condensación naturales). Si el aire húmedo continúa su enfriamiento por ascenso adiabático, se produce sobresaturación y ésta disminuye (e incluso se agota) por condensación sobre los núcleos, de aquí que las gotitas de nube formadas como resultados del sembrado limitan la sobresaturación máxima y de ésta manera se inhibe la activación de los núcleos de condensación naturales más pequeños; ya que éstos se activan a mayores sobresaturaciones. Por sobresaturación se entiende el exceso de humedad relativa respecto al valor de equilibrio del 100%, por ejemplo un aire cuya humedad relativa es del 101.1% tiene una sobresaturación de 1.1%. El resultado es un espectro de gotitas de nube más ancho cerca de la base de la nube, lo que incrementa el potencial para el rápido desarrollo de la precipitación al mismo tiempo que propicia un mayor tiempo de vida de la nube. Los efectos del sembrado se propagan a otras partes de la nube incrementando la formación de precipitación. El efecto último es una mayor eficiencia en los procesos de precipitación (NCAR, 1997). Falta una hipótesis que explique como se propagan los efectos a otras partes de la nube.

La hipótesis establecida en el PARC se fundamenta en los resultados obtenidos en el experimento de sembrado higroscópico de Sudáfrica, constituyendo un intento por replicar los resultados de aquel (lo que ocurrió efectivamente). Gracias a los estudios y pruebas realizadas durante el verano de 1996 en Coahuila se pudieron documentar las características naturales de las nubes y el desarrollo de la precipitación y definir su similitud con las del experimento en Sudáfrica con lo que se pudo diseñar el experimento de sembrado aleatorio de nubes. Se contempló una duración para el experimento de tres a cuatro años. Los resultados del experimento aleatorio en el PARC son presentados en términos de una evaluación estadística de variables que están relacionadas con el efecto del sembrado como lo son: flujo de precipitación, masa total de lluvia, masa de lluvia por arriba de los 6 km, área de lluvia, tiempo de vida de la tormenta, integral tiempo-área de precipitación y precipitación total. Se analizan todas las nubes sembradas y no sembradas. Se obtiene una medición de estas variables para cada tormenta y para cada uno de los productos volumétricos proporcionados por el radar utilizando el programa TITAN (Thunderstorm Identification Tracking Analyses and Nowcasting) por sus siglas en ingles desarrollada por el NCAR.

El PARC se caracteriza por la utilización de una aeronave en la aplicación de las sales higroscópicas que además cuenta con instrumentación de física de nubes, la cual permite medir la temperatura de la base de la nube y definir el espectro de

gotitas de nube y el desarrollo de la precipitación. Esto permite verificar su concordancia con el modelo conceptual de sembrado. La utilización de un radar meteorológico, cuyos datos se procesan con el programa TITAN, permite caracterizar la estructura y evolución en el tiempo de las nubes sembradas y de las no sembradas, haciendo lo anterior de manera totalmente automática. Así mismo TITAN permite definir de manera totalmente objetiva a la unidad experimental, ya que para los cálculos, TITAN considera el volumen atmosférico definido con el límite preestablecido de reflectividad de 30 dBZ. La evolución de las variables de respuesta en el tiempo son presentadas por TITAN en forma de series de tiempo, tanto para las tormentas sembradas como las no sembradas, las que se analizan estadísticamente desde 20 minutos antes del instante de decisión hasta 60 minutos después del instante de decisión. El instante de decisión corresponde al momento en que las características de una tormenta son juzgadas como adecuadas para ser considerada como unidad experimental, procediendo a continuación al sorteo para ver si se aplica el sembrado. Los datos obtenidos en el PARC, sobre las tormentas sembradas y no sembradas, en concordancia con el modelo conceptual de sembrado lo hacen un proyecto verificable. Estas características se profundizarán en los siguientes capítulos.

### **II.9. Instrumentos necesarios o convenientes para campañas puramente operativas.**

En este apartado se complementa el análisis de los aspectos que involucran las campañas operativas, iniciado en el apartado II.7. Allí se comentó que una campaña operativa debe contener mecanismos de verificación y se abordaron las razones por las que no es conveniente desechar estos mecanismos.

Existen dos instrumentos especialmente importantes, tanto para una campaña experimental como para una operativa, que son: una red de pluviógrafos digitales y el radar meteorológico.

#### II.9.1. El radar meteorológico

Una campaña experimental que se implemente en la actualidad y que no cuente con radar meteorológico es inconcebible. Los beneficios obtenidos del radar a través de la información que proporciona sobre la evolución y comportamiento de tormentas completas hace que su utilización arroje una relación beneficio costo mayor a la unidad. El radar es una herramienta imprescindible en la localización de tormentas que inician su desarrollo y unido a un adecuado programa es posible llevar su historial y hacer predicciones sobre su evolución. Esto proporciona información para identificar el momento más propicio para realizar el sembrado, lo anterior ha sido probado ya en tormentas convectivas. Dada la posibilidad de procesar la información de radar que corresponda a cualquier volumen atmosférico de interés, la utilidad del radar se extiende más allá de las tormentas convectivas. También es importante explorar la capacidad del radar meteorológico para definir la actividad de tormentas

(convectivas) embebidas dentro de tormentas de mayor amplitud o de tipo sinóptico (ver Capítulos IV y V).

### II.9.2. Red de pluviógrafos

La red de pluviógrafos digitales proporciona información de la precipitación en tierra permitiendo encontrar relaciones entre la reflectividad de los meteoros en la atmósfera ( $z$ ) y la precipitación medida en tierra ( $R$ ). Lo que permite evaluar en términos volumétricos a la precipitación. Con un radar que aplique la relación de transformación de reflectividad a intensidad de lluvia adecuada es posible estimar el campo de precipitación de las tormentas completas y su variación a través del tiempo. Se define de manera muy precisa el dónde y el cuándo llueve además de otras características de la tormenta como volumen total, área y duración, lo que resulta muy importante cuando se prueba la efectividad de una tecnología de sembrado. Para obtener características como el área de una tormenta convectiva, su duración o su intensidad a través del tiempo se requieren densidades de redes de pluviógrafos que resultan irrealistas y muy caras (ver sección IV.1).

## II.10. El sembrado de nubes como un instrumento rompe sequías

Los programas de estimulación de lluvia generalmente se han instrumentado en tiempos declarados como de emergencia por sequía. La agricultura y la ganadería son las actividades que primero son amenazados por los estragos que causa la escasez de agua. La mayoría de las veces estos programas son cancelados cuando el grado de emergencia disminuye.

Antes de abordar el tema de los programas de estimulación de lluvia en condiciones de sequía, es decir en condiciones donde el número de nubes con características adecuadas para ser sembradas es muy reducido, conviene hacer un análisis general del fenómeno natural y social. Este análisis se realiza bajo la suposición de que en la región de sequía ya se ha evaluado positivamente una tecnología de sembrado, siendo conveniente aclarar que esto nunca ha ocurrido en México.

Es claro que en condiciones de sequía la eficiencia de un programa de sembrado de nubes, en términos del volumen total de agua adicional atribuible a la estimulación, será muy baja. Un programa verá aumentada su eficiencia y su eficacia conforme el número de tormentas con las características adecuadas para ser estimuladas se incrementa. Resulta que el peor panorama para implementar el sembrado de nubes es durante una sequía y lógicamente el mejor panorama se da en los años con abundante precipitación. Pero hay factores que agregan complicaciones a la interpretación del fenómeno y estos son el factor social y el del impacto que la estimulación de lluvia tiene en los ecosistemas amenazados por sequía.

La productividad marginal del agua (incremento en beneficio producido por una unidad adicional de agua) es mucho más alta en condiciones de escasez de agua;

esto implica que un aumento de un 40% a 60% en el volumen de agua precipitado en las pocas tormentas que se presenten durante el periodo de sequía puede ser sumamente benéfico (McEachern, 1998). Una buena tormenta puede disminuir fuertemente las pérdidas de un ganadero al proporcionar el agua que requiere para abrevadero. Por otro lado, al disminuir las condiciones de sequedad del ambiente y refrescarlo, disminuye también el número de incendios y el impacto de la sequía sobre la flora y fauna silvestre.

Un panorama similar se da para las lluvias tempranas en las regiones áridas y semiáridas. Un aumento en la eficiencia de las primeras lluvias puede ser también sumamente benéfico desde el punto de vista de la sociedad en su conjunto, aunque el número de tormentas sea escaso. Por otro lado ¿cuanto vale la preservación de la flora y fauna de un lugar al mitigar las condiciones adversas y disminuir el número de incendios?. ¿Cuánto vale un m<sup>3</sup> de agua para un ganadero cuyo ganado pierde peso o incluso muere por falta de agua? ¿Cómo evaluar el impacto en la sociedad a través de los otros usos del agua?.

Lo ideal sería evaluar financiera, económica y ecológicamente los resultados de un programa de estimulación de lluvia bajo diferentes escenarios de disponibilidad de tormentas, por ejemplo 5%, 10%, 15%, 25%, 35% y 50% por debajo de lo normal. De los índices que arroje dicha evaluación debería deducirse la decisión final. Lo anterior presupone que el grado de efectividad del método de siembra ha sido previamente determinado.

En conclusión se puede decir que la estimulación de lluvia puede ser un instrumento que ayude en la mitigación de los efectos de una sequía. La relación beneficio costo resultante de las evaluaciones financieras y económicas variarán fuertemente con el grado de severidad de la sequía, no obstante que con el aumento de severidad se incrementa el precio marginal del agua. Un programa de estimulación de lluvia maximizará sus beneficios, solo si es parte de otro programa más general de manejo integral del recurso agua, que permita utilizar a la estimulación como una herramienta que provee de agua adicional durante los temporales buenos y que puede ser almacenada en presas o en los acuíferos para mitigar los efectos negativos de los temporales malos. Por lo que de establecerse un programa de estimulación de lluvia este debe ser permanente (para la mejor época del año), debiendo cuidar mucho el no comprometer el volumen adicional obtenido en el incremento de usuarios y manejar dicho volumen como mitigador de la eventual escasez de precipitación. Claro que el aumento de precipitación directamente sobre los cultivos, pastizales y montes representa beneficios inmediatos que también deben ser evaluados. Bruintjes (1999), señala que "la decisión de sí se implementa o continúa un programa operativo de estimulación de lluvia se vuelve un asunto de costo/beneficio - manejo de riesgo" que es comparado con la respuesta dada a la pregunta de ¿Qué se considera como un programa exitoso?. Respuesta que varía dependiendo de quién la contesta.



## II.11. La estimulación de lluvia y los sistemas productivos en las zonas áridas

### II.11.1. Las zonas áridas y semiáridas de la república Mexicana

Se han encontrado pinturas rupestres en el desierto del Sahara que dan testimonio artístico de cazadores de caza mayor en un Sahara ahora completamente desierto. ¿Será este el destino de nuestras zonas áridas y semiáridas?

En México se ha usado en los inventarios en zonas áridas y semiáridas una definición que considera los diferentes factores físicos y biológicos involucrados definiendo las zonas áridas como aquellas regiones cuya precipitación pluvial es menor de 350 mm al año, con una distribución irregular durante el ciclo vegetativo, temperatura media anual entre los 15 y 25°C, con presencia de 7 meses de estiaje y cubierta vegetal menor de 70%, dominando principalmente especies xerófilas (Maldonado, 1985). Así mismo las zonas semiáridas se definen como aquellas áreas en que la precipitación pluvial varía de 350 a 600 mm al año, con una temperatura media anual de 18° a 22°, con 6 a 8 meses de estiaje. Su cubierta vegetal es superior al 70% y la vegetación dominante está formada principalmente por diferentes tipos de matorrales y pastizales.

En las superficies con las características anteriores, se localiza parte del desierto de la región de Norteamérica, incidiendo en México las subregiones del desierto Chihuahuense, el Sonorense y el de la Baja California, con una superficie total superior a 105 millones de ha, lo que representa más del 55% del área del país. El desierto Chihuahuense comprende la parte norcentral del país entre la sierra madre oriental, el eje neovolcánico y la sierra madre occidental. El desierto Sonorense se localiza entre la sierra madre occidental y la costa del mar de Cortés. El desierto de Baja California se localiza en la península Baja Californiana (Maldonado, 1985). Precisamente es en el desierto Chihuahuense donde la técnica de estimulación de lluvia con sales higroscópicas es aplicable.

### II.11.2. La variabilidad de la precipitación

Con los datos sobre la lluvia que proporciona la red de estaciones pluviométricas, pluviográficas e hidrometeorológicas en México es posible obtener indicadores sobre la variabilidad interanual (entre un año y otro) de la precipitación. Esta información junto con la del comportamiento de los acuíferos permite programar técnicamente el nivel de explotación al que es posible someter los recursos hídricos de una región, también es posible tomar decisiones en torno a medidas previsoras para enfrentar determinado déficit en las disponibilidades de agua y cuando ha sido evaluado previamente un programa de estimulación de lluvia permite visualizar cuál sería el panorama con un programa operativo en marcha. Otra utilidad de esta información es que a partir de ella es posible situar años, durante los cuales se haya ejecutado algún experimento o campaña de estimulación de lluvia, dentro de esta variabilidad

interanual, es decir definir si la campaña de estimulación de lluvia se realizó en años con precipitación por arriba o por abajo de la normal.

### II.11.3. La vulnerabilidad de las actividades productivas

Es evidente que todas las actividades productivas en las regiones áridas y semiáridas de México son cada vez más vulnerables a los periodos de disponibilidad de agua por debajo de la disponibilidad media. Las actividades más vulnerables siguen siendo la agricultura, la ganadería y el sector hidroeléctrico. Entre las causas del aumento de ésta vulnerabilidad pueden citarse el gran incremento en la demanda de agua relacionada con el aumento de la actividad económica que a su vez ha ocasionado un notable incremento de la población en estas regiones. Las fuertes presiones sociales y políticas mal encaminadas y la debilidad de las autoridades administradoras de los recursos orillan a estas a fungir solo como otro espectador, que para el caso del uso del recurso agua, ven como este se explota hasta un límite que la misma naturaleza o la rentabilidad establecen. Ejemplos de lo anterior son: el agotamiento del acuífero o su profundización hasta niveles de extracción antieconómicos para algunas actividades, así como la disminución de la calidad del agua de los acuíferos y en el caso de las presas extracciones hasta niveles no permitidos por un buen programa de operación.

Esta explotación del recurso llevada al límite y sumada con la alta variabilidad natural de la precipitación dan como resultado que una población en constante aumento sea peligrosamente vulnerable a periodos de sequía.

Es innegable que el hombre juega un papel clave en el manejo de los recursos naturales y que sólo con una sociedad organizada, consciente y participativa éste podrá contribuir a disminuir su propia vulnerabilidad y la de otras comunidades vivas ante la escasez de agua. Disminuir los efectos de una sequía es tarea organizada de todos los elementos de la sociedad. La comunidad científica tiene el reto de definir los modelos de explotación de los recursos naturales y del tiempo atmosférico (también visto como recurso) que permitan obtener el máximo de bienestar financiero y social.

### II.11.4. Los sistemas productivos y la sequía

Los matorrales cubren alrededor del 45% del territorio nacional. Se les considera como comunidades vegetales de porte arbustivo propias de las zonas áridas. En el desierto Chihuahuense el matorral se distribuye en amplias áreas del altiplano Mexicano, abarcando desde el norte del país (en los estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, San Luis Potosí, Zacatecas y Aguascalientes) hasta los estados de Guanajuato, Jalisco, Hidalgo y México; y prolongándose hacia el sur una estrecha franja que penetra a través de Puebla y llega hasta Oaxaca.

Podría pensarse que la cubierta vegetal de matorrales (zona semiárida) ha sido poco afectada debido a que las características ecológicas no son las más adecuadas para el desarrollo de una ganadería o agricultura intensiva (considerarse como notables excepciones a las áreas o zonas de riego, donde existe una agricultura altamente tecnificada), pero no es así. La agricultura de temporal se practica en lugares donde existen captaciones de humedad, en los mejores suelos y en las regiones con aridez menos acentuada. También se usan de manera alternativa los ecocultivos que manejan especies vegetales nativas de las zonas áridas como praderas de gramíneas, arbustos forrajeros, maguey, nopal tunero, orégano, damiana, jojoba etc., (Gómez, 1975). La realidad es que hasta ahora las prácticas ganaderas constituyen el uso más extendido de las zonas áridas y este uso se hace de una forma nada científica con pocas excepciones de tecnificación, dominando en general el sobre pastoreo que afecta gravemente a la cubierta vegetal.

El impacto que causa la ganadería en la cubierta vegetal de los matorrales es la desaparición paulatina de las especies deseables y la aparición de especies invasoras. Este impacto puede revertirse, si el deterioro de los suelos no es muy grave, aplicando prácticas de manejo de agostadero hasta llegar a elevar la producción y la productividad de los suelos. Lo que ocurre en el sobre pastoreo es lo siguiente: a).- el animal come todo lo comible de las especies deseables, b) la planta utiliza las reservas de nutrientes almacenadas en raíces y tallo para formar nuevos brotes, c) el animal come de nuevo los brotes antes de que estos logran fotosintetizar energía del sol que fortaleciera a la planta, d) la planta genera nuevos brotes con las reservas que le restan y si no hay reservas ésta entra en peligro de muerte. Si al sobre pastoreo se agregan los periodos de sequía prolongada es fácil entender porqué la cubierta vegetal es cada vez más pobre en estas zonas áridas y porqué cada vez son más las áreas que pasan de la condición de semiáridas a áridas. Con la disminución de la cubierta vegetal el suelo queda más expuesto a los agentes de la erosión. Junto con el agua que llega a las presas llegan cientos de toneladas de suelo que disminuyen la capacidad de los almacenamientos y su vida útil. La capacidad de infiltración también se ve afectada al disminuir la vegetación.

Sin entrar en más detalles se puede concluir que el desierto crece debido principalmente al aumento en fragilidad de los ecosistemas. Este aumento de fragilidad está relacionado con la actividad del hombre directamente sobre estos ecosistemas, con la variabilidad climática y muy probablemente con los cambios climáticos (de un decenio para otro). En relación con el cambio climático es claro que hace falta mucha medición y labor científica para fundamentar estos cambios y sus consecuencias; pero la variación climática debe tomarse efectivamente en serio en la planificación del desarrollo social y económico. Por otro lado, las leyes que norman el uso del suelo y de los recursos hídricos deben pasar a ser leyes efectivas en su aplicación y no letra muerta; debiendo promover sistemas productivos y de manejo que consideren la conservación efectiva de la capacidad de regeneración de estos sistemas.

La sequía climática es la falta de precipitación esperada; supone por consiguiente un choque para cualquier economía que ejerce ya una sobre tensión sobre su sistema alimenticio y sobre sus recursos naturales (Hare, 1985)

La sequía es el principal azote climático debido a sus efectos ecológicos, económicos y sociales y es un comportamiento natural de la variabilidad del clima. Si se considera al clima como un sistema interactivo en el que la atmósfera, la cobertura viviente de la tierra y la actividad humana se influyen mutuamente es claro que debe prestarse especial atención a los efectos antropogénicos sobre los elementos del clima. En México la sequía ha contribuido a que cada vez más familias emigren del campo a la ciudad en busca de actividades con menor riesgo y una vida más tranquila.

Se ha asociado a la sequía con los procesos de desertificación y a la actividad humana con la aceleración de estos procesos. A pesar de lo terrible y amenazante que resulta la desertificación poco se ha hecho para revertir este proceso. Las imágenes de alta resolución obtenidas desde el espacio muestran un territorio nacional que en su mayor parte se ve como un desierto con un alto grado de erosión y es del dominio público que cada vez son más tierras las que presentan condiciones de improductividad que se asocian a la intensificación de la ganadería y al uso de tierras no aptas para la agricultura (por su pendiente, por el grosor y tipo de material de la capa arable etc.) que además son cultivadas con las técnicas convencionales de la agricultura moderna que poco a poco agotan y “matan” al suelo debido al uso intensivo de fertilizantes químicos e insecticidas. En la agricultura convencional (o moderna) es grave la disminución paulatina del contenido de materia orgánica del suelo que afecta directamente su estructura y su capacidad de almacenamiento de agua.

Como respuesta de la vegetación a una cantidad de precipitación menor que la esperada, ésta va perdiendo sus hojas y de ésta forma protegen al máximo las reservas contenidas en sus raíces y tallos. Estas hojas que caen al suelo son de vital importancia en la protección del mismo ya que constituyen una protección contra el poder erosivo de las torrenciales lluvias y el viento. En condiciones naturales ésta protección llega a formar una corteza superficial de varios centímetros de espesor. Esas formaciones son muy vulnerables al pastoreo o ramoneo excesivos y es necesario que se considere su protección en la determinación de los índices de agostadero.

#### II.11.5. La estimulación de lluvia en las zonas áridas

La precipitación media anual en las zonas áridas y semiáridas, como ya se mencionó anteriormente, difícilmente sobrepasa los 600 mm. Se presentan tormentas de tipo convectivo que precipitan sobre áreas con dimensiones que van de 8 a 20 km de longitud y que llegan a tener con frecuencia intensidades de lluvia mayores a los 100 mm/hora. Se estima que estas lluvias convectivas en el desierto de Chihuahua aportan de un 60 a un 80 % de la precipitación media anual (NCAR, 1999). Por

ejemplo, en la figura II.4, destaca el hecho de que hay áreas que fueron muy favorecidas por la lluvia y otras donde ésta puede ser nula; sin embargo los escurrimientos generados por estas torrenciales lluvias pueden llevar beneficios varias decenas de kilómetros aguas abajo de donde ocurren, infiltrándose en el lecho de los arroyos y/o siendo captadas por las numerosas redes de drenaje superficial dispuestas de manera que interceptan los escurrimientos para ser conducidos y almacenados en bordos o vasos de almacenamiento hechos de tierra compactada en el sitio (ver figura II.5) al cual llega el agua precipitada en los alrededores conducida por medio de la red de drenaje superficial artificial construida para tal fin. En el desierto de chihuahua, lo anterior constituye una verdadera cosecha de agua que ha permitido el abastecimiento para abrevadero y hasta para el riego de pequeñas áreas, además de infiltrar una buena cantidad de agua al acuífero y llegar a aportar volúmenes considerables a almacenamientos superficiales importantes.

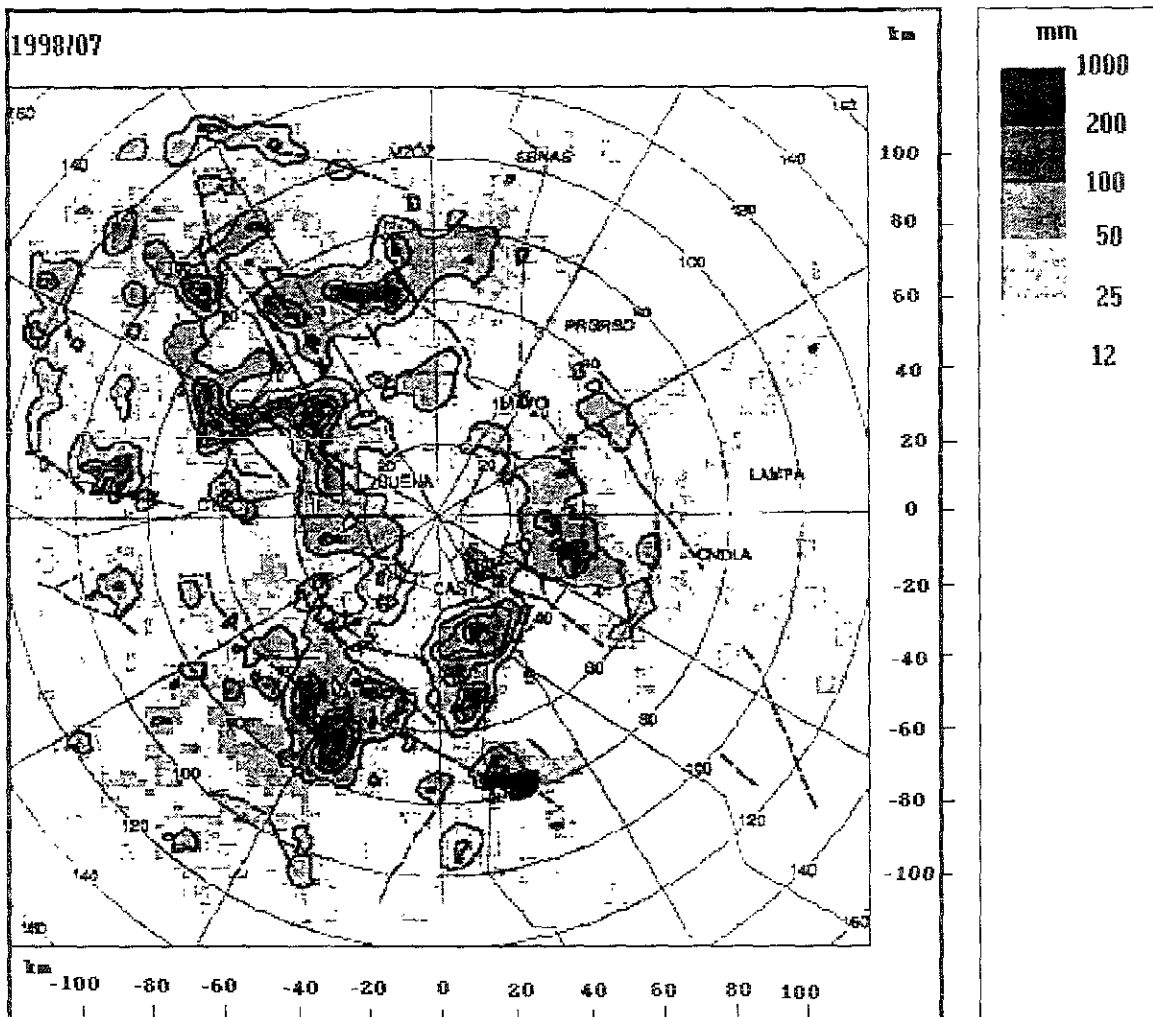


Figura II. 4.- Mapa de precipitación acumulada observada con radar durante el mes de julio de 1998 en la región de Monclova Coahuila. La escala de valores es mostrada en el lado derecho del mapa. Se remarca el contorno de las áreas con precipitaciones mayores a 50 mm. Las líneas de guiones indican la cima de las montañas, las líneas continuas indican los caminos principales, y los círculos marcan la distancia al radar cada 20 km (NCAR, 1999).

El aspecto torrencial de las lluvias es lo que las hace interesantes para realizar su estimulación por medio del sembrado con agentes higroscópicos. Estimular tipos de lluvia de baja intensidad que proporcionan láminas medias anuales menores a 300 mm en varios eventos, resulta menos atractivo que estimular la precipitación en tormentas convectivas que proporcionen una lámina media anual de 200 mm. Lo anterior se explica debido a que, con lluvias de baja intensidad y lámina total baja, el escurrimiento superficial generado es mínimo y difícilmente humedecerá la totalidad del perfil de suelo seco para enseguida llegar a aportar agua al acuífero. Al no infiltrarse el agua hasta el nivel del acuífero ésta volverá a la atmósfera por evaporación. De la misma manera los escurrimientos resultan mínimos por lo que la cosecha de lluvia en estas condiciones se imposibilita.

A la luz de lo anterior, en un área donde la precipitación media anual sea de 250 mm, es razonable pensar que mínimo hay que considerar por cada hectárea de pastoreo o de cultivo la existencia de otras 3 hectáreas usadas como área de amortiguamiento de la actividad del hombre. Aquí el 75% de la superficie es usada para “cosechar” en ella el agua que se requiere para sustentar una actividad del hombre más intensa en el otro 25% de la superficie (es claro que se requieren estudios específicos para definir estos porcentajes). Remarcando que con lo anterior no se quiere decir que en el 75% de la superficie restante no habrá actividad humana, sino que ésta actividad no debe afectar la estabilidad del ecosistema o hacerle perder capacidad de revivir o regenerarse a sí mismo en pos de una utilidad financiera.



**Figura II.5.-** Bordo de almacenamiento del agua “cosechada” localizado en el Ejido Milian Municipio de Castaños, Coahuila.

Lo que es claro es que si el hombre no se relaciona de manera responsable y respetuosa con el entorno natural de la zona árida, la degradación de ésta puede llegar a ser de tal magnitud que sea irreversible; convirtiéndose en un sistema incapaz de sustentar la vida del hombre y de otras formas vivas.

La tecnología de estimulación de lluvia con sales higroscópicas utilizadas en tormentas convectivas debe verse como un medio de fortalecer al ecosistema para disminuir su vulnerabilidad al aumentar la cantidad de agua que cae directamente sobre las plantas y como un medio de mitigar los efectos adversos de la sequía en las actividades productivas y en la salud del hombre. Esto quiere decir que los volúmenes obtenidos vía estimulación de lluvia, no deben usarse para desarrollar más actividad productiva o para cubrir requerimientos nuevos de agua, sino para almacenarse ya sea en los acuíferos o en almacenamientos superficiales para ser usados en los años de sequía.

La tecnología de sembrado de nubes con agentes higroscópicos evaluada en la región de Monclova, Coahuila, México (PARC) ha demostrado ser muy efectiva para aumentar el volumen de precipitación total en tormentas convectivas individuales de verano (ver resultados en el Capítulo VI y VII). Otro experimento en el estado de Durango, con el que se esperaba replicar los resultados obtenidos en el PARC, no sobrevivió más que el año de exploración, 1999. Al contar con tecnologías de sembrado objetivamente probadas, se abre un extenso campo de trabajo para el hidráulico y todos los profesionistas vinculados con el manejo y preservación del recurso, mismos que deberán evaluar el impacto de la aplicación de estas tecnologías (en campo) en programas operativos.

## **CAPÍTULO III**

### **La estimulación de lluvia en México**

- III.1.- Introducción:**
- III.2.- Los primeros intentos**
- III.3.- Experiencias en la cuenca del Río Necaxa (1949-1968)**
- III.4.- Experiencias en Ensenada (1970 - 1976)**
- III.5.- Experiencias en la cuenca del Río Mayo de 1977 a 1979**
- III.6.- El proyecto para el aumento de Lluvia en Coahuila (PARC)**
- III.7.- Análisis general**



---

## CAPÍTULO III

### La estimulación de lluvia en México

#### III.1.- Introducción

Se analizan algunos aspectos de los programas de estimulación de lluvia en México desde el punto de vista de la metodología empleada para evaluar sus resultados. A pesar de que la gran mayoría de programas de estimulación de lluvia en México carecieron de mecanismos de evaluación objetiva se pretende, mediante los ejemplos abordados en este capítulo, contrastar estos experimentos del pasado con el estado actual de los mecanismos de verificación. Los pocos programas en los que sí existió algún mecanismo de verificación, se presentan a manera de ilustración y se analizan de forma general remarcando los defectos con respecto a una verificación objetiva, aunque resulta claro que no hay mucho que decir cuando la evaluación se fundamenta sólo en mediciones pluviográficas, pluviométricas e hidrométricas (ver sección II.1).

Son muy raros los programas experimentales (ver sección II.7) realizados en México y estos pocos tienen como característica que la metodología de evaluación utilizada ha consistido en una evaluación estadística con base en datos de escurrimiento y precipitación en áreas blanco y testigo o en días sembrados y días no sembrados (ver sección II.8). Ninguno de estos programas permitió comparar efectivamente lo que ocurrió al sembrar las nubes con lo que hubiera ocurrido de no sembrarla. En las bibliotecas mexicanas no existe información sobre experimentos o programas que hayan sido evaluados por medio de la obtención de evidencia física del efecto de los químicos estimulantes en la nube, lo que convierte a los pocos experimentos ejecutados en México en experimentos de caja negra. Lo anterior a pesar de que existen reportes de intentos de equipamiento para microfísica de nubes desde 1970. Por ello estos programas científicos del pasado a lo más obtuvieron algunos indicios de los efectos de la siembra que en ningún caso resultaron probatorios o verificativos de la efectividad de la tecnología de sembrado utilizada.

Se presenta al proyecto para el aumento de lluvia en Coahuila (PARC), como el experimento de estimulación de lluvia más completo que se ha ejecutado en México, en cuanto a la instrumentación para verificar objetivamente sus resultados. Se analiza como se define la unidad experimental en el PARC, las variables de respuesta analizadas y las hipótesis estadísticas hechas, pero los resultados y su análisis son presentados hasta los Capítulos VI y VII.

### III.2.- Los primeros intentos

Ya en 1947 se sembró durante algunos días en las proximidades de la ciudad de México; pero de esta experiencia no se tiene información sobre resultados (INSISA, 1974). De 1953 a 1955 la extinta Secretaria de Recursos Hidráulicos (SRH) trató de incrementar la precipitación en algunas regiones de los estados de Chihuahua, Nuevo León, Durango, Coahuila y Tamaulipas, realizando vuelos durante los cuales se dispersó hielo seco; en 1956 se inició otra operación en la zona de aguas arriba de la presa Calles, Aguascalientes, utilizándose durante dos años 5 generadores de yoduro de plata instalados sobre el terreno y en 1958 se aumentó a 8 generadores. Entre 1957 y 1958 el Instituto de Ciencias Aplicadas de la UNAM trató de aumentar el almacenamiento en la presa Lázaro Cárdenas, Durango, dispersando 40 toneladas de cloruro de sodio desde avión; el análisis no mostró resultados significativos. En todos estos proyectos, la falta de una planeación y de un control adecuado (en cuento a encendido y apagado de los generadores, falta de elección al azar de las tormentas a sembrar, falta de criterios para definir las tormentas o días favorables para la siembra, escasos pluviómetros y pluviógrafos operando en la zona de interés, etc.) produjo evaluaciones subjetivas y poco confiables, motivando su suspensión y dejando pocas conclusiones dignas de tomarse en cuenta, (INSISA, 1974).

De 1967 a 1970 la Comisión de Agua Potable de Monterrey, la Universidad de Nuevo León (teniendo a su cargo esta última las operaciones de campo) y la SRH efectuaron siembras en una zona de Monterrey, NL y sus alrededores, con generadores de yoduro de plata instalados en tierra y utilizando información de la estación de radiosondeo localizada en la misma entidad. Aparentemente se obtuvieron buenos resultados; pero no se definió la significancia estadística (Universidad de Nuevo León, 1970).

### III.3.- Experiencias en la cuenca del río Necaxa (1949-1968)

Las operaciones de mayor duración corresponden a la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A. en la cuenca del río Necaxa, iniciándose en 1949. En éstas se usó yoduro de plata. Al inicio, las siembras se efectuaron desde un avión por un intervalo de 5 años y después solo mediante generadores en tierra reportando 10 generadores para 1961. Durante los primeros 5 años en que se operó con avión, el plan fue sembrar las nubes todos los días en que existieran buenas perspectivas de éxito. A partir de 1956 con el objeto de obtener una evaluación sin prejuicios se decidió al azar los días en que se efectuarían las siembras. Las operaciones al azar comprendieron 103 días por año dejando 50 días de la temporada de lluvias (junio a octubre) para muestras sin siembra (Compañía de Luz y Fuerza Motriz, S.A., 1962).

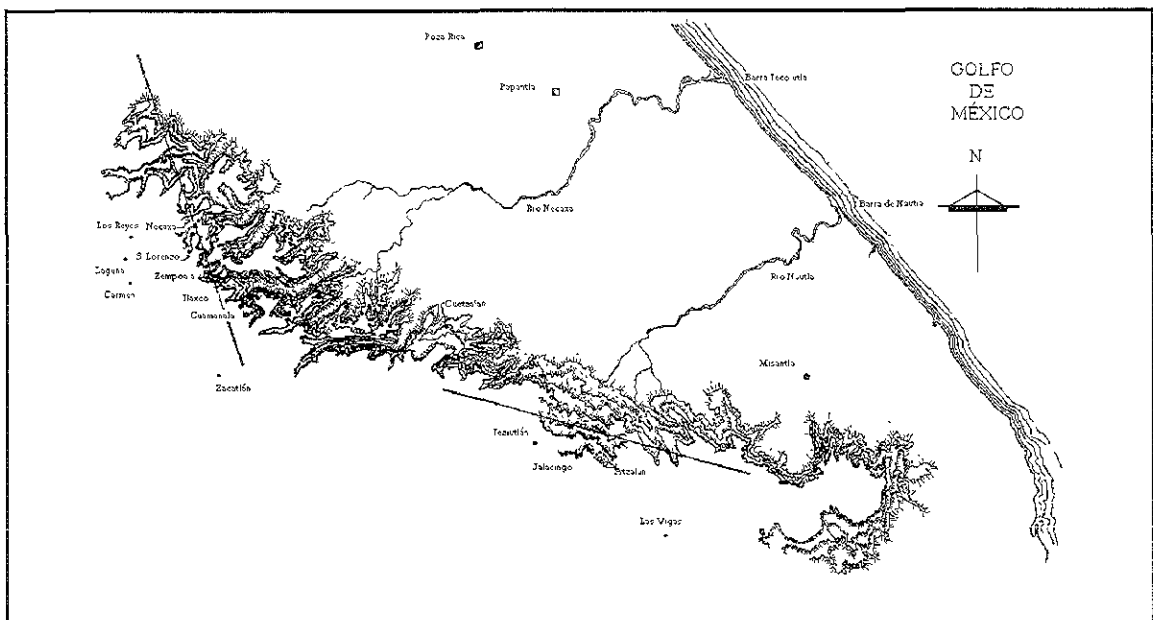
Este experimento, por su duración, es el más famoso de los experimentos hechos en México. La verificación de la efectividad se realiza con base en lecturas

pluviométricas hechas en la zona determinada como blanco y en un área determinada como de control. Para 1961 los pluviómetros localizados en: Chignahuapan, Zacatlan, Cuamanala, Tlaxco, Zempoala, San Lorenzo, Laguna, Los Reyes, Huauchinango, Necaxa, Honey y Villa Juárez se encontraban dentro de la zona blanco. En el mismo 1961 los pluviómetros localizados en Cuetzalán, Zacapoaxtla, Teziutlán, Jalacingo, Atzalán y las Vigas corresponden a la zona o área de control. El área así definida se encuentra 100 km al ESE de la cuenca del río Necaxa. La zona de control se considera libre del efecto de la siembra (en la mayor parte de los días), dado que el viento alisio no perturbado portador de la humedad que produce la lluvia pasa primero por esta zona y unas 2 a 3 horas después sobre la región de Necaxa, en cuya parte oriental se colocaron la mayoría de los quemadores de yoduro de plata. El total de pluviómetros localizados en la zona blanco y de control para 1961 fue de 19. Los generadores se localizaban en: Laguna, Atexca, Honey, Los Reyes, Huauchinango, Villa Juárez, Necaxa, San Lorenzo, Zacatlán y Chignahuapan. El área del experimento puede observarse en la figura III.1a. En esta figura se muestra, representado por las líneas rectas, la orientación del eje de las cadenas montañosas presentes en la zona blanco y de control, la cual se relaciona con la capacidad de forzamiento orográfico que estas cadenas montañosas ejercen sobre los vientos alisios y que pueden dar lugar a precipitaciones de diferente intensidad dependiendo de la dirección del viento con respecto al eje de la cadena montañosa.

La relación cuantitativa entre las precipitaciones en la zona blanco y de control, se reportan como visiblemente constantes en los años históricos, lo que arroja un alto coeficiente de correlación en el análisis por el método de regresión (0.96). Se analizan totales precipitados en días sembrados y días no sembrados utilizando el método del análisis de masa por categorías de precipitación de 0 a 19.9 mm, 20 a 49.9 mm y más de 50 mm por día, tomada esta clasificación de la lluvia caída en la zona de control. En este método se grafica, para cada categoría, la precipitación acumulada en la zona de control para días con siembra y para días sin siembra contra los valores de precipitación acumulada en la zona alta de Necaxa para los mismos días. Notándose un efecto favorable de la siembra en las categorías bajas de 0 a 20 mm diarios y estando este efecto positivo restringido a esta categoría. Para las lluvias mayores aparece el dato dudoso e incluso ligeramente negativo como se puede observar en la figura III.1b. La hipótesis del método es que un cambio en la pendiente refleja el efecto de la siembra, puesto que un cambio debido únicamente a causas meteorológicas, no producirá un cambio de pendiente, puesto que todas las estaciones utilizadas para la comparación serían afectadas similarmente.

El análisis por el método del histograma se aplicó en un análisis de las lluvias moderadas limitado a las zonas de control y alta de Necaxa haciendo evidente una profunda alteración del histograma para días sembrados, cuando se compara con la notable simetría de la curva para días no sembrados. En este método se sumaron cronológicamente las lluvias de la zona de control hasta alcanzar cada "evento" 100

mm y se sumaron las caídas en la zona de Necaxa en los mismos días que formaron el “evento” repartiendo proporcionalmente las diferencias cuando el total de 100 mm (del evento de la zona de control) se alcanzó en solamente parte de un día. En la figura III.1C se ven las cantidades que llovió en la zona blanco, representadas con barras, en días sembrados y sin sembrar por cada 100 mm caídos en la zona de control. Obsérvese los promedios parciales de 90.5 mm y 92.1 mm para los días no sembrados y de 109.9 mm y 108.5 mm para los eventos correspondientes a los días sembrados de la zona blanco, observándose a simple vista la diferencia a favor de los eventos con siembra (Compañía de Luz y Fuerza Motriz, S.A., 1962), (Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A., 1969).



**Figura III.1a.-** Configuración orográfica de la región comprendida entre las zonas de Blanco de Necaxa y el Golfo de México. Las dos líneas rectas representan la dirección del eje principal de las cadenas montañosas (Fuente, Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A., 1969).

Los análisis se hacen utilizando datos de la red pluviométrica de la Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A. y del Servicio Meteorológico Nacional. La verificación de la efectividad de las acciones de sembrado de nubes en la cuenca de Necaxa con base sólo en las lecturas de unos pocos pluviómetros distribuidos en el área del experimento, independientemente del método estadístico de análisis, no soporta las críticas científicas sobre todo cuando no existe evidencia física del efecto del sembrado en la nube. La falta de evidencia física no permite establecer relaciones de causalidad. El resultado reportando una redistribución de la lluvia que benefició a los valles de Tulancingo y la Zona de Apan presenta una base todavía más débil (Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A., 1969).

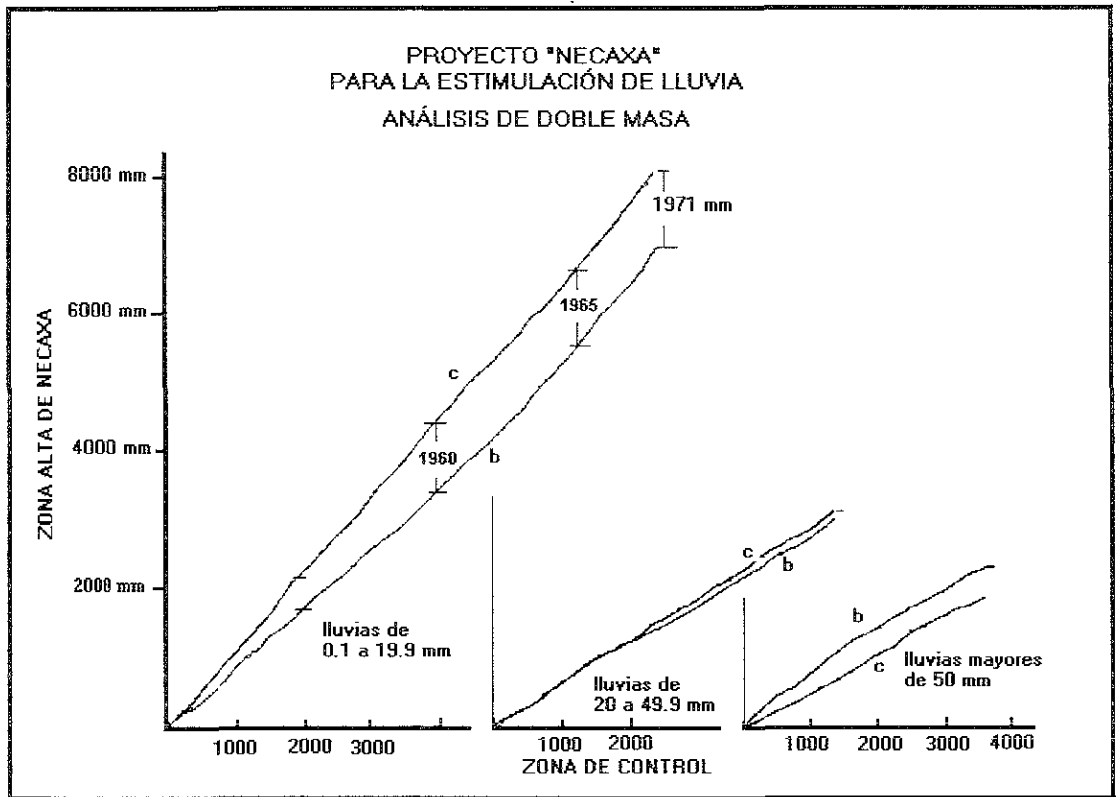


Figura III.1b.- Resultado del análisis de doble masa para la zona alta de Necaxa, actualizados a 1968. En la figura las curvas masa "c" corresponde a los días con siembra y las curvas "b" a días sin siembra (Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A., 1969).

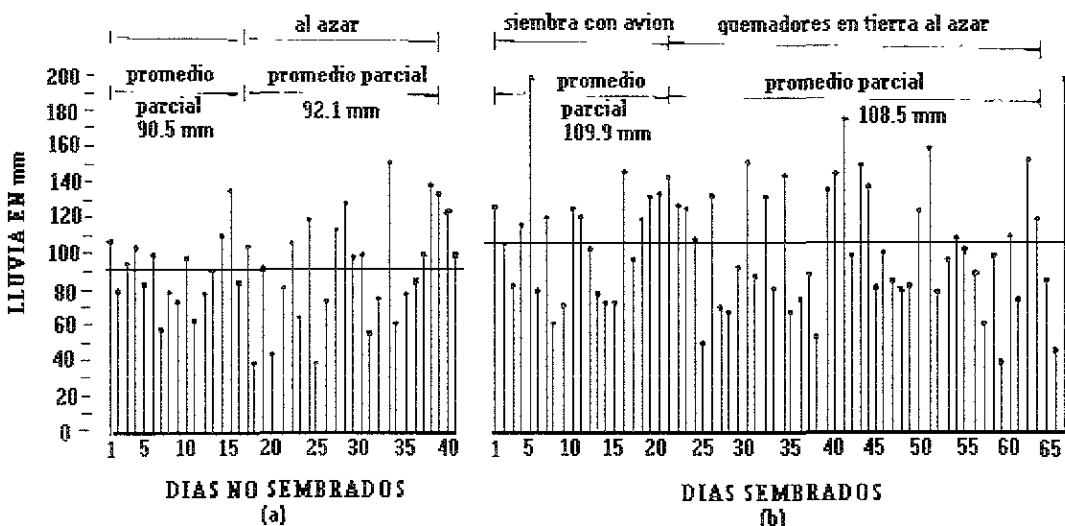


Figura III.1c.- Se muestra gráficamente representados por barras los valores que toman los totales de precipitaciones de la zona alta, correspondientes a los eventos unitarios de la zona de control (Años de operación únicamente) (Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A., 1969).

### III.4.- Experiencias en Ensenada (1970 - 1976)

Del 1 de octubre de 1970 al 15 de abril de 1976 se realizó un programa experimental de estimulación de lluvia en la región de Ensenada y sus alrededores, en el estado de Baja California Norte aprovechando la presencia de nubes de frentes fríos estimuladas por la orografía. El experimento fue conducido por la empresa INSISA Consultores S.A. contratada por la SRH. Los objetivos del programa fueron: a) analizar teórica y prácticamente la forma de incrementar la precipitación en la zona a fin de aumentar el escurrimiento y la recarga; b) determinar con el número mínimo de puntos muestrales mediante un análisis con significancia estadística, en el menor número de años posible y en forma concluyente, la magnitud del incremento o redistribución de la precipitación y c) determinar la factibilidad técnica y económica de transferir las experiencias que se obtengan a otras zonas del país que representen condiciones propicias.

La hipótesis de sembrado considera la existencia de severos frentes fríos que son los que contribuyen en mayor parte a las precipitaciones invernales registradas en la Alta y Baja California. Se considera que la barrera orográfica existente en Ensenada ayuda a producir una deflexión del aire hacia arriba, proporcionando un medio de transportar los núcleos hasta las regiones suficientemente frías de la nube para producir la cristalización de los núcleos. Sin embargo, se advierte que dada la altura máxima de unos 1600 m de esta barrera montañosa, se requiere de un proceso semiorográfico-semiconvectivo para que allí pueda realizarse con posibilidades de éxito un sembrado desde tierra.

Para la evaluación se determinó una zona blanco que en los dos primeros años, 1970 y 1971, fue de 6400 km<sup>2</sup> y en los años posteriores, es decir hasta 1976 fue de 9000 km<sup>2</sup>. Se consideraron dos zonas de control una al norte y otra al sur de la zona blanco. Estas zonas tienen una precipitación media anual que fluctúa entre 200 y 450 mm. Con la temporada lluviosa presente entre octubre y marzo con el 70% del volumen total anual. Se usaron 11 generadores en tierra del tipo acetona yoduro de plata; mediante la combustión de su mezcla se produce el material nucleante. La figura III.2 muestra el generador tipo de núcleos de yoduro de plata (AgI) utilizado en el experimento.

La aportación de las lluvias invernales es baja y los volúmenes escurridos medios son también muy reducidos, siendo éstos de 0.046 y 0.053 m<sup>3</sup>/seg para los ríos Guadalupe y San Carlos, lo que hace al análisis hidrométrico en el área de estudio poco atractivo para un hidrólogo. La unidad básica de tratamiento es la tormenta durante todo el periodo de tiempo que dura esta (normalmente de 1 a 3 días), debiendo afectar tanto a la zona blanco (o área de sembrado) como a las zonas de control. Una vez hecho el diagnóstico de favorabilidad de las tormentas para su sembrado se elegía de manera aleatoria si se aplicaba el tratamiento o no se aplicaba. El tener zonas de control es útil, sobre todo, para evaluar programas de estimulación de lluvia operacionales en los cuales se siembra en todas las ocasiones

favorables que se presentan y cuando las precipitaciones entre zonas blanco y de control tienen una alta correlación. Si la correlación no es muy alta (digamos más de 90%) es más probable que las diferencias que se encuentren se deban únicamente a la variabilidad natural de la precipitación entre las zonas o al azar. Por otro lado la siembra aleatoria de los casos en la unidad de tratamiento hace posible atribuir las diferencias, entre muestras lo suficientemente grandes, únicamente a dicha alteración de la muestra. Esto es de hecho lo más recomendable. Si la ubicación de zonas de control se facilita no está de más contar con esta información en un programa experimental. Para el diagnóstico se utilizó información diaria de la red de estaciones meteorológicas sinópticas existentes en el estado de California, EUA y al norte de la República Mexicana, así como fotografías desde satélite y la estación de radiosonda de San Diego, California. Se analizaron la humedad relativa, la presión atmosférica y la velocidad y dirección del viento.

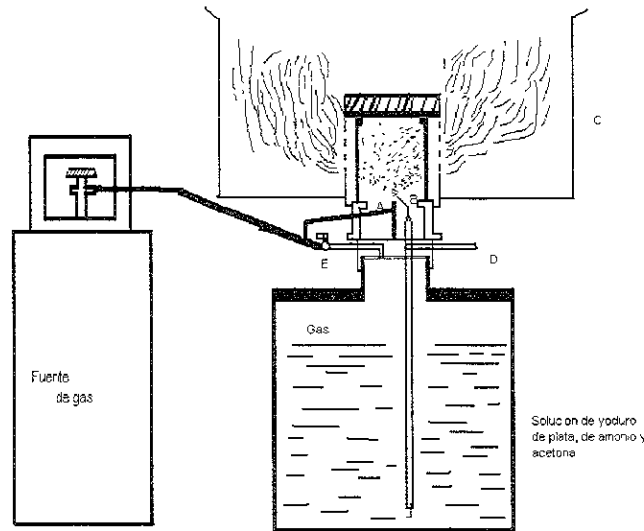
#### III.4.1.- Análisis de datos recopilados

Se dispuso de los datos aportados por 34 estaciones climatológicas y dos hidrométricas. Durante el periodo de tiempo en que se ejecutó el experimento se presentaron sobre la región en estudio 59 tormentas con características favorables para su siembra. Al analizar variaciones o diferencias entre láminas de precipitación sobre una zona blanco, provocadas artificialmente, se afirma que existe diferencia entre la lámina de lluvia correspondiente a la zona blanco y las correspondientes a las zonas control para una misma tormenta, que la diferencia es debida a la siembra de nubes y que las afirmaciones anteriores son correctas con cierta probabilidad. La probabilidad es una medida de la validez de una hipótesis estadística y se le llama nivel de significancia. El nivel de significancia varía en función del número de muestras obtenidas y existen diversos métodos estadísticos para calcularlos, los cuales se describen en publicaciones especializadas.

Para el análisis de los datos que conforman la muestra de precipitación medida en días sembrados contra la muestra conformada con datos de la precipitación medida en días no sembrados, en la zona blanco y de control, se utilizó el procedimiento de la razón simple y el de la razón compuesta. Se señala que se siembran las tormentas en forma aleatoria, quedando las no sembradas como testigo de muestra inalterada.

En el procedimiento de la razón simple se calcula el cociente entre la precipitación promedio ponderada por el método de Thiessen en la zona blanco y la correspondiente a la zona de control, o bien la relación entre las láminas medias de tormentas sembradas entre las no sembradas.

Figura III.2.- Diagrama básico de un generador de tipo acetona-yoduro de plata.



- A- Esprea
- B- Aguja hipodérmica
- C- Pantalla contra el viento
- D- Tubería para limpieza
- E- Válvula

El método de la razón compuesta se define como el cociente de las precipitaciones promedio para las unidades sembradas entre las no sembradas, dividiendo las de la zona blanco entre el valor correspondiente para la zona de control. Se considera que este método tiene la ventaja de eliminar aproximadamente las variaciones naturales que afectan las dos zonas (INSISA, 1976). Se define como sigue:

$$R_k = \frac{\sum TS_{ik} / \sum CS_i}{\sum TNS_{jk} / \sum CNS_j}$$

donde:

- $R_k$  = valor de la razón compuesta en la estación  $k$ ,
- $TS_{ik}$  = precipitación acumulada de la tormentas sembrada  $i$  en la estación  $k$ ,
- $CS_i$  = precipitación promedio, ponderada por el método de Thiessen, en la zona de control para la tormenta sembrada  $i$ ,
- $TNS_{jk}$  = precipitación acumulada de la tormenta no sembrada  $j$  en la estación  $k$ ,
- $CNS_j$  = precipitación promedio, ponderada por el método de Thiessen, en la zona de control de la tormenta no sembrada  $j$ .



Este cálculo se efectúa para cada una de las estaciones localizadas en el área blanco y respecto a cada una de las dos zonas de control. La precipitación acumulada corresponde a todo el tiempo que dura una misma tormenta. Observe que mientras se utilizan las precipitaciones promedio ponderada de la zona control para tormentas sembradas y no sembradas, sólo se utiliza la información de la lámina registrada para tormentas sembradas y no sembradas en la estación de interés de la zona blanco. Por lo que se tendrán tantos valores de la razón compuesta como estaciones existan en la zona blanco.

Para calcular los niveles de significancia de los resultados se escogió la prueba de Wilcoxon-Mann-Whitney (U), la cual se consideró como la más adecuada para el tipo y tamaño de las muestras disponibles (INSISA, 1976). Las hipótesis utilizadas fueron:

Hipótesis de nulidad:

$H_0$  = las poblaciones  $TS_{ik}/CS_i$  y  $TNS_{jk}/CNS_j$  tienen la misma distribución.

Hipótesis alterna:

$H_1$  = la población  $TS_{ik}/CS_i$  es estadísticamente mayor que la población  $TNS_{jk}/CNS_j$ ,

Aún cuando se considera indicativa, podría objetarse que la evaluación estadística basada en la razón compuesta es poco significativa, pues el estudio puntual de la modificación atmosférica, o sea por estación, tiene la desventaja de no considerar la variabilidad meteorológica global de las zonas de interés (SRH, 1974). Se consideró alcanzar un nivel de significancia de un 10 % haciendo la prueba para cada una de las estaciones del área blanco, así como para la precipitación promedio ponderada de la misma zona correspondiente a cada tormenta (INSISA, 1976).

El problema con este experimento, y con muchos otros en México, es que la hipótesis física de sembrado no es verificada, ni siquiera al nivel más elemental. Por ejemplo en Ensenada no se verificó cuántos núcleos artificiales de congelamiento llegaban realmente a la zona de la nube con las condiciones requeridas para activar dichos núcleos. En cuanto a los resultados del análisis estadístico con respecto a la zona control norte la zona blanco tuvo un incremento según la razón compuesta de 1.09, con un 30% de probabilidad de que el aumento se deba a variaciones naturales del ciclo (no se alcanzó el nivel de significancia proyectado de 10%). Con respecto a la zona control sur, no se detectó ni aumento ni disminución de la lluvia (INSISA, 1976).

Para ilustrar el tipo de precipitación que se presenta en el área del experimento, se tiene que la precipitación media durante el periodo invernal histórico (octubre a marzo desde 1948 hasta 1969) en el área blanco fue de 175 mm y en la zona control sur de 137 mm; mientras que para los seis años del experimento la precipitación media invernal se mantuvo casi igual a la del periodo histórico en el área control sur, con 135 mm; en la zona blanco se observaron 185 mm. Considerar como

incremento, atribuible al sembrado de nubes, la diferencia de 10 mm presenta varias objeciones como el espacio de tiempo corto de 22 años considerado en el cálculo de la media para el periodo histórico y el periodo de tiempo todavía más corto para el periodo del experimento (octubre a abril desde 1970 hasta 1976) y el número tan bajo de estaciones meteorológicas que se usó por lo que el cálculo de las precipitaciones medias necesariamente se ve afectado por las variaciones naturales de la precipitación en espacio y tiempo.

### **III.5.- Experiencias en la cuenca del Río Mayo de 1977 a 1979**

Puesto que la mayoría de las campañas de estimulación de lluvia realizadas no incluyeron un mecanismo de verificación de resultados se ha buscado como obtener conclusiones después de realizada la campaña con base en información que ya se obtenía de por sí en las áreas de interés. Uno de los métodos propuesto para evaluar la efectividad del sembrado es el que considera la siguiente hipótesis: "la cantidad de agua aportada al almacenamiento en una presa está estrechamente relacionada con la cantidad de lluvia en una o varias de las cuencas vecinas o con la lluvia registrada en la zona de riego correspondiente a la presa". Se correlaciona la variable precipitación en un área testigo con los caudales aportados a la presa por la cuenca o área blanco. De la hipótesis se deduce que si en forma natural la aportación se calcula con la precipitación multiplicada por un coeficiente, entonces se acepta que un procedimiento de estimulación de lluvias funciona cuando este altera positivamente el coeficiente. En otras palabras, se acepta que un procedimiento de estimulación de lluvias funciona si y sólo si la cantidad de agua aportada a la presa es mayor cuando se usa el procedimiento que cuando no para una misma cantidad de lluvia registrada en la zona o zonas elegidas fuera de la cuenca de captación que se constituye en zona de control.

Se requieren datos que correspondan a un período histórico previo al funcionamiento del programa y los correspondientes al período durante el que se efectúa el programa de estimulación con lo que se tienen dos subconjuntos de datos. Los datos requeridos para realizar dicho análisis consisten en: Datos de precipitación medidos con pluviómetros de las zonas o cuencas vecinas y de la cuenca de captación de la presa. Datos de caudales de aportación a las presas, medidos con aforos tomados todos los días a la misma hora (usualmente a las ocho de la mañana). Conociendo el volumen inicial almacenado en la presa, los volúmenes aportados y las extracciones, se calcula también el almacenamiento en la presa.

La metodología empleada para el análisis incluye una prueba de bondad de ajuste para justificar el uso de alguna distribución de probabilidad en las pruebas estadísticas. Una vez justificado el uso de la distribución, se lleva a cabo el análisis de correlación con el objeto de encontrar la o las zonas o cuencas cuyas precipitaciones resultan estar más asociadas con las aportaciones de agua a la presa y de esta manera proceder al análisis gráfico y tener elementos para emitir un

juicio acerca del modelo que pudiese explicar con certidumbre razonable las aportaciones de agua a la presa, en función de la precipitación de la zona seleccionada previamente.

Una vez hecho lo anterior, se lleva a cabo la prueba central del trabajo, la cual consiste en mostrar si la relación entre la precipitación y la aportación es diferente para los dos subconjuntos de datos (histórico y programa) que se separó inicialmente o si las diferencias entre ambos obedecen única y exclusivamente al azar.

Un ejemplo de la utilización de esta metodología es la evaluación que hace el Dr. Oscar H. Moreno Ramos del programa de estimulación de lluvia efectuado en la cuenca del Río Mayo durante los años 1977 al 1979. En este programa se utilizó el método de estimulación de lluvia patentado bajo el nombre de Ingeniero Manuel Menéndez Osorio. El cuadro III-1, muestra algunas de las características del área de trabajo.

**CUADRO III-1.** *Algunas de las características sobresalientes del área de trabajo.*

CARACTERISTICAS		
Área bajo riego	95800	Ha
Precipitación promedio ( jul-oct.)	363	mm
Valor Máximo (jul-oct.)	688	mm
Valor Mínimo (jul-oct.)	249	mm
Capacidad de Almacenamiento	1114 x10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup>
Aportación Promedio (jul-oct )	670 x10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup>
Aportación Máxima (jul-oct.)	1257 x10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup>
Aportación Mínima (jul-oct )	415 x10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup>

En este análisis se utilizó información histórica para un subconjunto de datos que comprende los años de 1956 a 1975 y datos que forman el otro subconjunto que comprende el período de ejecución del programa de estimulación de lluvia. La información pluviométrica corresponde a 5 estaciones meteorológicas ubicadas en la parte costera fuera de la cuenca en el Distrito de Riego No.38, cuya posición y altitud se puede consultar en el cuadro III.2. Los aforos volumétricos corresponden a las aportaciones a la presa Adolfo Ruiz Cortines durante el período de ejecución del programa de estimulación de lluvia.

Datos sobre el área testigo se presentan en el Cuadro III-1. Los datos utilizados corresponden a las estaciones climatológicas de Huatabambo, Etchojoa, Navojoa, Tres Hermanos y Cortina, ver cuadro III-2 para más información sobre las estaciones.

**CUADRO III-2.- Ubicación y altitud de las estaciones meteorológicas.**

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ALTURA MSNM
Huatabampo	26° 50'	109° 38'	15
Etchojoa	26° 55'	109° 39'	39
Navojoa	27° 04' 20"	109° 26' 30'	38
Tres hnos.	27° 12'	109° 12'	100
Cortina	27°15'	109°	110
Tesocoma	27° 10'	109° 22'	100
San Bernardo	27° 24'	108° 51'	308

Se hicieron correlaciones con los datos pluviográficos de cada una de las estaciones meteorológicas para encontrar la o las estaciones meteorológicas cuyas precipitaciones estuviesen más asociadas con las aportaciones de agua a la presa. Se probó estación por estación durante los cuatro meses del experimento, estación por estación para cada mes, el promedio de todas las estaciones para cada mes y el promedio de todas las estaciones para los cuatro meses del experimento. Ésta última correlación precipitación aportación fue la que resultó mejor correspondiente al promedio de las cinco estaciones para los cuatro meses del año donde se estimula la lluvia, resultando un coeficiente de correlación relativamente bajo de 0.72, los datos para la correlación con el promedio de las cinco estaciones se muestran en el cuadro III-3.

**CUADRO III-3.- Información promedia de la precipitación en las cinco estaciones y las aportaciones al vaso.**

Año	Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Sumas	
	P	A	P	A	P	A	P	A	P	A
1962	83.5	118.3	108.9	75.8	77.9	191.4	18	37.5	288.3	423
1963	102.2	180.2	129.1	281.6	59.2	94.8	44.1	29.9	334.6	586.5
1964	100.4	151.9	106.1	361.1	83.8	346.2	20.7	24.6	311	883.8
1965	68.7	81.2	178.3	143.8	62.5	213.3	4.9	16.7	314.4	455
1966	142.5	182.1	147.2	639.1	89.5	123.4	0.1	16.6	379.3	961.2
1967	133.7	204.3	153.4	229.1	60.9	150.9	29.1	8.8	377.1	593.9
1968	112.2	241.9	155.5	282.5	36.6	134	48.1	39.4	352.4	697.8
1969	91.9	214.2	100.6	107.9	33.3	87.8	23.4	5.2	249.2	415.1
1970	132.6	149	115.8	289.9	121.1	132.1	0.1	14	369.6	585
1971	71.2	236.7	218.7	389.4	35.5	100.2	128.6	530.3	452	1257
1972	81.4	106.1	409.3	209.3	57.9	130.9	138.9	193.8	687.5	640.1
1973	74.4	94.2	142.4	386.4	35.2	133.1	1.8	9.6	253.8	623.3
1974	160.2	262.4	170.3	143.9	98.5	221.7	5.8	35.9	434.8	663.9
1975	136.3	125.8	78	251.5	61.6	203.2	0	13.3	275.9	593.8
1976	79	165.7	140.2	110	146.5	149.4	14.3	89.5	380	514.6
1977	60	167.4	137	336.9	17	143.4	27.9	18	241.9	665.7
1978	98.5	95.9	62	257.3	65.4	207.1	56.7	237.4	282.6	792.7
1979	32	66.2	60.8	147	110.7	49.8	0	10.6	203.5	273.6

P = Precipitación en milímetros

A = Aportación en millones de m<sup>3</sup>

Con los datos del Cuadro III-3, se llevó a cabo el análisis de regresión para cada subconjunto previamente separado (Histórico y Programa). Este análisis, se realizó por mes, por subconjunto y usando la aportación total en el período de trabajo contra la precipitación total en el mismo período para cada subconjunto. Esta información se presenta en el cuadro III-4.

De los datos del cuadro III-3, se observa que, en general, la precipitación (promedio) fue siempre mayor durante el período histórico que la correspondiente durante el período del programa. Este hecho indica que la región pasaba por una etapa de escasa precipitación o etapa relativamente mas seca que el promedio de los años. Este mismo hecho puede apreciarse en lo que se refiere a la información relativa a las aportaciones al almacenamiento de la presa, destacando que las diferencias observadas entre ambos períodos no son tan drásticas en este caso, como también se puede apreciar en las figuras III-4 y III-5.

Aún cuando el análisis de regresión se llevó a cabo para cada mes y para cada estación climatológica, solo se presenta en el Cuadro III-3 el promedio de las 5 estaciones. Para la discusión de resultados sólo se usó la suma de los cuatro meses donde se realiza la estimulación de lluvia. Se recomienda usar las funciones resultantes para predecir precipitaciones mayores a 200 mm (dado que es la mínima registrada) y menores a 700 mm, (que es la máxima registrada).

**CUADRO III-4.- Análisis de regresión de las aportaciones contra la precipitación.**

CARACTERISTICA			JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	SUMA
Valor Mín.	P	Hist	68.7	78.0	33.3	0.0	249.2
Valor Máx.	P	Hist	160.2	409.3	121.1	138.9	687.5
Valor Min	A	Hist	81.2	75.8	87.8	5.2	415.1
Valor Max	A	Hist	262.4	639.1	346.2	530.3	1256.6
Media	A	Hist	167.73	345.62	161.42	69.69	669.93
Media	P	Hist	99.37	138.47	62.96	31.75	362.85
Desviación Estándar	A	Hist	58.556	124.284	68.848	148.784	228.119
Desviación Estándar	P	Hist	40.953	39.283	30.312	46.118	111.945
Ordenada en 200		Hist	125.44694	228.1704	99.55388	-9.70205	564.1857
Pendiente	P-200	Hist	0.42556	0.84231	0.9861	2.50040	0.64933
Correlación		Hist	0.30	0.27	0.40	0.82	0.32
<hr/>							
Valor Mín	P	Pro	32.0	60.8	17.0	0	203.5
Valor Máx	P	Pro	98.5	137.0	110.7	56.7	282.6
Valor Min	A	Pro.	66.2	147.0	49.8	10.6	273.6
Valor Max.	A	Pro	167.4	336.9	207.1	237.4	797.7
Media	A	Pro	109.83	247.05	175.30	88.67	579.0
Media	P	Pro	63.50	86.60	41.20	28.20	242.67
Desviación Estándar	A	Pro.	52.019	95.363	31.850	128.850	272.59
Desviación Estándar	P	Pro	33.388	43.652	24.200	28.351	39.55
Ordenada en 200		Pro.	90.31481	91.2354	121.04270	-24.64169	298.4441
Pendiente	P-200	Pro	0.30738	1.79944	1.31612	4.01945	6.5920614
Correlación		Pro	0.20	0.82	0.99	0.88	0.96

Hist = Período Histórico

Pro = Período de programa de estimulación de lluvias

P = Precipitación en la zona testigo mm

A = Aportaciones al vaso MMC zona de tratamiento

Las ecuaciones resultantes del análisis de regresión se muestran a continuación y en la figura III.3 se muestra su gráfica.

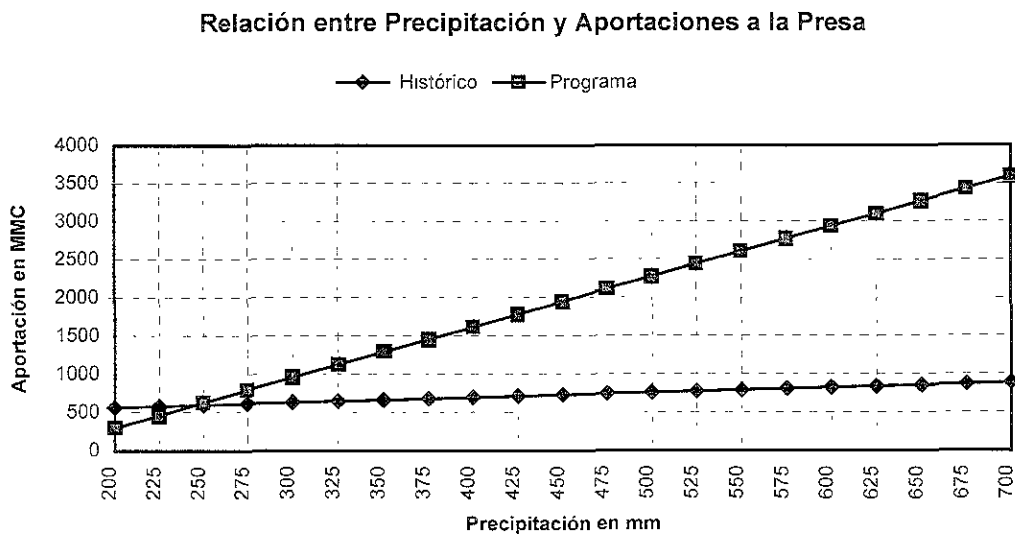
$$A_H = 564.1857 + 0.64933(P_H - 200)$$

$$A_P = 298.4441 + 6.592061(P_P - 200)$$

$A_H$  = Aportaciones en período histórico.  
 $A_P$  = Aportaciones en período programa.  
 $P_H$  = Precipitación en período histórico.  
 $P_P$  = Precipitación período programa.

Debe remarcarse que la precipitación a la que se hace referencia en la figura III.3 se midió fuera de la cuenca en la que se estimula la lluvia. La cuenca en la que se estimula la lluvia (zona blanco) es precisamente la que aporta sus escurrimientos a la presa Adolfo Ruiz Cortines. Por tanto, los datos de precipitación utilizados no incluyen ningún efecto de la siembra de nubes. Considerando que la precipitación histórica está asociada (correlación de 72%) con las aportaciones a la presa se deduce, en este estudio, que el incremento en escurrimiento para igual lluvia fuera de la zona blanco es atribuible a un incremento en la precipitación sobre la cuenca de captación como resultado del sembrado de nubes.

**Figura III.3.-** Gráfica de aportación al almacenamiento de la presa Adolfo Ruiz Cortines, calculada con base en los modelos,  $MMC = m^3 \times 10^6$ .



De acuerdo con estos resultados, se observa que la función histórica y la de programa, almacenan sensiblemente la misma cantidad de agua a valores bajos de precipitación, también puede constatarse que la pendiente de la función resultó mucho mayor en período del programa; siendo estas de 0.65 y 6.59, para precipitación en mm de lluvia registrados para los períodos históricos y programa

respectivamente y aportaciones en millones de metros cúbicos(MMC). Este hecho parece indicar que, en el ámbito estudiado, la aportación al almacenamiento de la presa es mucho mayor durante el período de estimulación de lluvias, que las correspondientes al período histórico para precipitaciones mayores que 240 mm (promediadas las cinco estaciones fuera de la cuenca). Esta precipitación ocurre de acuerdo con la información, una vez cada 17 años.

La prueba central de esta metodología es la de mostrar que la función calculada es diferente para los dos períodos previamente separados. A fin de decidir si la estimulación de lluvia funciona se analiza el valor de la pendiente de la curva resultante de la regresión, esta deberá ser mayor durante el período del programa, respecto a la correspondiente durante el período histórico (prueba de los coeficientes). Para probar esta hipótesis (estadística), se usó la distribución t, cuyo cálculo es de la siguiente manera:

$$t_c = \frac{b_2 - b_1}{\sqrt{S_p^2 \left( \frac{1}{\sum x_1^2} + \frac{1}{\sum x_2^2} \right)}}$$

$t_c$  = t calculada

$b_2$  = coeficiente de regresión en el período programa

$b_1$  = coeficiente de regresión en el período histórico.

$S_p$  = varianza ponderada

$x_1$  = precipitación zona testigo período histórico.

$x_2$  = precipitación zona testigo período programa.

$$t_c = \frac{6.596062 - 0.64933}{\sqrt{47726.09 \left( \frac{1}{162910.7} + \frac{1}{3129.3} \right)}}$$

$$t_c = 1.507$$

P{E(I)}%	t
1	2.161
5	1.771
10	1.350
15	1.079

De aquí se deduce que los coeficientes (los correspondientes a la pendiente) de las funciones calculadas son diferentes siendo mayor el del período del programa con un 8 % de probabilidad de que esto sea falso. Del análisis breve de la información en el Cuadro III-4 se observa que la precipitación media resultó de 362.85 y de 242.67

mm, en los períodos históricos y del programa respectivamente; esto significa que la lluvia durante el programa fue el 67 % de la histórica. La aportación al almacenamiento de las presas fue de 669.83 y de 579.0 millones de metros cúbicos para período histórico y del programa respectivamente; es decir 87 por ciento de la aportación histórica. Esto indica que con el 67 por ciento de la lluvia se captó el 87% de las aportaciones; lo cual parece indicar una mayor eficiencia durante el período donde se llevó a cabo la estimulación de lluvia.

### III.5.1.- Análisis de la metodología planteada

Se indica en el estudio del Dr. Moreno que en el lapso del programa 1977 a 1979 y especialmente durante 1979, la temporada fue seca en extremo, lo que sumado a la presencia de tormentas tropicales, que afectaron los pluviómetros del área testigo y que no produjeron precipitaciones en la cuenca, abre la posibilidad de que el análisis matemático de la información esté afectado drásticamente. Un valor fuera de la realidad puede llevar a cambios drásticos en la función debido al período tan corto de tiempo de ejecución del programa. Se pone de manifiesto que la zona testigo tiene diferencias meteorológicas con la zona blanco que pueden resultar importantes, puesto que estudios sobre las lluvias monzónicas de verano en el NW de México han puesto de manifiesto que la distancia a la costa si resulta muy importante (Comunicación personal del Dr. Michel Rosengaus).

Esta metodología utiliza datos que son obtenidos de manera regular por instrumentos ya instalados. No utiliza una red de pluviómetros en el área del proyecto (área blanco) que por su tamaño tendría que ser grande y sólo utiliza unas cuantas estaciones climatológicas en el área testigo, resultando en una metodología que al ejecutarse resulta muy económica. Es claro que el número de estaciones utilizadas es muy bajo y que es probable que cambie la correlación entre la precipitación y las aportaciones a la presa, si el número de estaciones para medir la precipitación aumenta, además de que no se consideran los cambios en la cuenca que afectan el escurrimiento como cambios de uso del suelo, construcción de infraestructura etc., además los datos de escurrimiento podrían no ser homogéneos. No hay que olvidar que en este estudio se usan las estaciones ya existentes y que además operaron de manera consistente, tanto en el periodo del programa como en un buen número de años antes (periodo histórico). Si se aumentara el número de estaciones durante el periodo del programa y se quisiera utilizar esta misma metodología en el análisis de este programa; se tendrían que operar todas las estaciones por un buen número de años después del periodo de ejecución del programa.

Con todas sus inconveniencias esta metodología es preferible a no utilizar ningún análisis en un programa operativo donde se ha decidido realizar la estimulación de lluvia en todos los casos favorables; y donde previamente se ha demostrado la efectividad de la técnica de sembrado utilizando como unidad experimental a

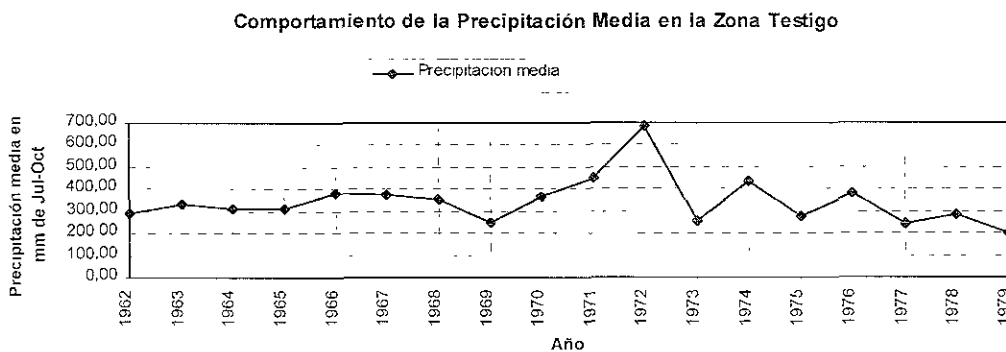


tormentas individuales. Este programa operativo debe contar con los medios suficientes para aprovechar la mayoría de los casos de nubes con las características adecuadas para ser sembradas.

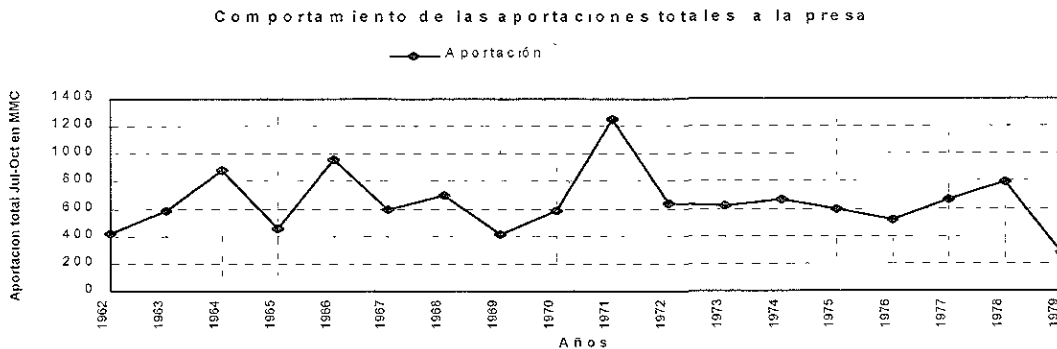
En el ejemplo utilizado resalta el bajo número de años que proporcionan datos en el período del programa con los cuales se realiza la correlación. Lo anterior hace que esta función no sea muy confiable ya que un valor que pudiera ser muy poco frecuente tendría efectos drásticos en la forma de la pendiente de la función. Lo anterior no resta valor a la metodología planteada ya que esta aumentaría su contundencia al contar con un número mayor de años, idealmente unos 10 años, de programa. Este hecho refuerza la afirmación de que esta metodología no es utilizable para evaluar un programa experimental ya que es inconcebible esperar de 6 a 10 años para evaluar un programa que pudiera estar dando resultados negativos desde su inicio.

Existe la posibilidad de que un método de estimulación de lluvia pueda tener diferente eficiencia dependiendo del escenario hidrometeorológico general en que se realiza. Si las tormentas sembradas pertenecen a un período donde la precipitación total está muy por debajo de la normal su comportamiento puede diferir de aquellas tormentas sembradas en un periodo lluvioso que se encuentre por arriba de la normal. Por ejemplo; ¿cómo se comportaría la respuesta de las nubes al sembrado en años como 1972 y 1973 en los cuales las condiciones atmosféricas generales propiciaron una precipitación por arriba de la normal (ver figuras III-4 y III-5). Por lo que lo ideal resulta ser el identificar las características del período de programa y correlacionar con otro periodo histórico de características semejantes.

**Figura III.4.-** Comportamiento de la precipitación media en la zona testigo.



**Figura III.5.-** Comportamiento de las aportaciones a la presa.



En un programa donde no se obtenga evidencia física de acuerdo con un modelo conceptual de sembrado cabe la posibilidad de que el método de siembra en sí pueda ser útil; pero quizás durante el período de siembra las nubes no eran las adecuadas, por otro lado sin evidencia física es difícil extrapolar resultados a otras localidades.

El método empleado, tomando en cuenta las observaciones hechas en los párrafos anteriores, permite obtener directamente un volumen de agua que entra a la presa y que se atribuye a la estimulación de lluvia. Definido el volumen de agua por estimulación y conociendo los costos del programa se obtiene el costo por metro cúbico estimulado. Los beneficios además comprenderán los ocasionados por la lluvia que cae directamente sobre los cultivos, bosques y pastos y aquella agua que se almacena en los acuíferos y vasos de almacenamiento de pequeñas dimensiones distribuidos en toda la cuenca o zona blanco.

### III.6.- El proyecto para el aumento de lluvia en Coahuila (PARC)

El proyecto para el aumento de lluvia en Coahuila (PARC por sus siglas en inglés) se caracteriza por ser el experimento de estimulación de lluvia más completo, con relación a verificación objetiva, que se ha ejecutado en México. La técnica a probar es la técnica de sembrado higroscópico aplicado en tormentas convectivas de verano en los alrededores de Monclova, Coahuila. El modelo físico conceptual en que fundamenta sus acciones el PARC se presentó en la sección II.8.3. El Capítulo V trata sobre la calibración hidrológica del radar utilizado en el PARC. Con el objeto de facilitar que los resultados del PARC sean debidamente comprendidos, estos se presentan después del estudio de la instrumentación para una verificación objetiva de la estimulación de lluvia, tratada en el Capítulo IV, y después de abordar el tema de la calibración hidrológica del radar meteorológico, en el Capítulo VI y VII. Los resultados que se obtienen a partir del radar permiten comprender la razón por la

cual el radar meteorológico constituye hoy en día el instrumento más importante en la evaluación objetiva y estadística de los efectos del sembrado de nubes. En este apartado se presenta la unidad experimental y las variables de respuesta consideradas en el análisis estadístico propuesto por el NCAR.

El objetivo de la fase experimental del proyecto para el aumento de lluvia en Coahuila es probar la efectividad de la siembra de nubes con sales higroscópicas para incrementar la lluvia. El área del experimento se delimitó en términos del alcance confiable del radar definido en 112.5 km, siendo esta distancia el radio de un círculo visto en planta con centro en la ubicación del radar en el aeropuerto de Frontera, Coahuila. Para efectos del seguimiento de las tormentas definidas como caso de estudio detectadas por el radar se contempló un área todavía menor formada por un radio o alcance del radar de 90 km como límite superior y de un radio de 10 km como límite inferior, las tormentas caso deberán “nacer” y “morir” dentro de estos límites; de lo contrario son eliminadas de la muestra. Más allá de la distancia radial de 90 km con respecto al radar, los hidrometeoros empiezan a ser detectados con una considerable deformación en la dirección tangencial, debido a la apertura del haz o pulso electromagnético enviado por el radar, además de que las tormentas empiezan a ser muestreadas a una considerable altura sobre el terreno. Por el contrario, los hidrometeoros localizados a una distancia menor a 10 km del radar no son detectados de manera completa durante su desarrollo.

La detección parcial de un hidrometeoro localizado a una distancia radial menor a 10 km es ocasionada por la poca altura que alcanza el haz de pulsos electromagnéticos del radar al realizar los cambios en el ángulo de elevación ( $\phi$ ) para obtener el producto volumétrico (ver sección IV.2.3). Además en el centro hay que considerar el área ciega del radar la que resulta del siguiente hecho: si el haz de pulsos electromagnéticos emitido por el radar choca con un blanco muy cercano entonces las ondas reflejadas llegan de nuevo al radar antes de que éste logre cambiar del modo de emisión al modo de recepción y no quedarán registradas. Si el cambio al modo de recepción tardara del orden de 4  $\mu$ s el radio del área ciega será del orden de 600m. En el área de trabajo así definida, destaca la existencia de cerros y cadenas montañosas que rompen la monotonía del paisaje y que aunque su altura sobre el nivel del mar está alrededor de los 1500 m y la de los valles en los 500 m.s.n.m., por medio de los productos de radar se ha determinado que las tormentas convectivas de la región se incrementan en las proximidades de estos cerros y cadenas montañosas (ver figuras II.3, II.4, III 6 y V.4.a).



**Figura III.6.-** Paisaje de Imerio y cadena de cerros localizado entre Monclova y Cuatro Ciénegas, Coahuila

### III.6.1.- La unidad experimental

La unidad experimental es definida por el programa TITAN (ver sección IV.5.3) considerando el umbral de reflectividad de 30 dBZ y un periodo de tiempo comprendido desde 20 minutos antes a 60 minutos después del momento de decisión. La definición objetiva de la unidad experimental evita un posible sesgo entre los casos sembrados y los no sembrados. Si la tormenta no existía 20 minutos antes del momento de decisión, el caso arranca en la primera detección que TITAN haga de ésta. Similarmente, si la tormenta muere antes de transcurridos los 60 minutos después del momento de decisión, el caso finaliza cuando TITAN ya no la detecta. Cualquier unión y división de tormenta que ocurre durante el periodo de tiempo especificado es incluida en el análisis, pero cualquier unión o división ocurrida fuera del periodo de tiempo es ignorada. Se remarca que el seguimiento y análisis de TITAN es totalmente automático, por tanto no hay posibilidades de sesgo basados en el conocimiento de la decisión de sembrar/no-sembrar. TITAN genera series de tiempo de propiedades de tormenta que son usadas en el análisis (NCAR, 1999).

La aplicación o no-aplicación del tratamiento de sembrado a la nube definida como unidad experimental se decide de manera aleatoria. De esta manera se evita que los resultados estadísticos del análisis de datos de tormentas sembradas y no sembradas tengan algún sesgo por decisiones de los operadores del experimento.

Hasta el año 98 el número total de tormentas sembradas y no sembradas es similar. En el proceso aleatorio participa el personal del avión y el personal que opera el radar. El personal operador del radar abre uno de los sobres que contienen la instrucción de sembrar o no sembrar y la comunica al personal del avión. El personal del avión cuenta con sobres similares cerrados de los cuales abre uno que contendrá la instrucción de sembrar o no sembrar. La acción a seguir por el personal del avión dependerá de la combinación resultante, como se muestra en la tabla siguiente:

RADAR	AVIÓN	ALEATORIZACIÓN
sembrar	Sembrar	sembrar
sembrar	no sembrar	no sembrar
no sembrar	sembrar	no sembrar
no sembrar	no sembrar	sembrar

### III.6.2.- Variables de respuesta e hipótesis estadísticas

Las series de tiempo generadas por el programa TITAN corresponden a las siguientes variables de tormenta: flujo de precipitación ( $m^3/s$ ), masa total de la tormenta (kton), masa total de tormenta por arriba de los 6 km (kton) y área de precipitación ( $km^2$ ). Otras variables fueron calculadas para el tiempo de vida completo de las tormentas como: tiempo de vida de la tormenta (min), integral tiempo área de precipitación ( $km^2h$ ) y volumen precipitado total (miles de  $m^3$ ). Para estas variables, la naturaleza de la respuesta en el tiempo de las nubes sembradas comparadas con la respuesta de las nubes no sembradas es usada para confirmar o cuestionar la validez de las hipótesis de sembrado (ver capítulo VI).

Las hipótesis a probar, para cada variable de respuesta representada en series de tiempo con la variable evaluada a intervalos de 5 minutos, es la validez de la hipótesis alternativa (o falta de validez de la hipótesis nula) para demostrar que los casos sembrados muestran un incremento en la cantidad de respuesta sobre los casos no sembrados durante el periodo de tiempo de 10 a 60 minutos después de momento de decisión. Para variables que son medidas sobre el tiempo de vida de la tormenta (cantidades totales) se prueba la hipótesis de un incremento en la cantidad de respuesta por encima de los casos no sembrados. Lo anterior contra la hipótesis nula de que no existe diferencia en las variables de respuesta para los casos sembrados y no sembrados (NCAR, 1999).

La técnica de análisis de datos empleada en el PARC y los resultados estadísticos se presentan en la segunda parte del Capítulo VI.

### III.7.- Análisis general

Si las unidades experimentales son tormentas que afectan a grandes extensiones haciendo que las mediciones de lluvia tengan que hacerse en estas mismas grandes áreas y si además son tormentas que aportan una lámina total de lluvia baja (como las del experimento de Ensenada), entonces es muy posible que el efecto de la siembra quede oculto y superado por el error en la medición de la lluvia con estaciones pluviográficas o pluviométricas. Lo mismo ocurre en tormentas individuales de tipo convectivo que precipitan sobre áreas muy específicas ya que al querer detectar el efecto producido por la estimulación en un área muy grande e instrumentada con pluviómetros y pluviógrafos el error para obtener la precipitación media sobre el área puede resultar muy grande y ocultar el efecto de la siembra en las tormentas convectivas individuales. Esto es analizado con detalle en las secciones IV.1 y IV.2.5. Dicho de otra manera, el querer evaluar la efectividad de una tecnología de sembrado con base en la medición de una única variable como lo es la lámina de lluvia acumulada, ya sea por tormenta, a escala diaria o mensual con unas pocas estaciones pluviométricas o pluviográficas dentro del área de interés dará por resultado que la estimación de la cantidad de lluvia total aportada por cada tormenta (o día) con siembra pueda ser muy diferente a la real. Lo anterior definitivamente contribuye a producir resultados poco concluyentes en aquellos programas con tecnologías de sembrado con efectos reducidos y aún en aquellos que teniendo efecto considerable sobre la cantidad de precipitación por tormenta individual no cuentan con la suficiente infraestructura para aplicar el tratamiento a la mayoría de las tormentas lo que origina que el aumento de lluvia en unas pocas tormentas tenga efectos mínimos en la media de precipitación de una región.

La evaluación de una tecnología de sembrado en primer término debe hacerse a nivel de la tormenta individual y con un experimento que seleccione los casos a ser tratados de manera aleatoria (Bruintjes, 1999). La evaluación por tormenta individual, especialmente para el caso de tormentas convectivas, sólo puede realizarse mediante la combinación adecuada de radar meteorológico, estaciones pluviográficas e información sobre el número y distribución del tamaño de gotas de lluvia (pluviógrafo óptico y/o disdrómetro). Se complementa con instrumentos de física de nubes montados en una aeronave que proporcionan datos sobre la cantidad de núcleos de condensación en el aire que alimenta a la nube y datos sobre la población de gotitas de nube. En conjunto se consigue la evidencia necesaria para probar la efectividad de la tecnología puesta a prueba con base en más de una variable relacionada con el aumento de lluvia en una tormenta (área, duración, intensidad, etc.), y no solo en láminas acumuladas en puntos aislados (ver capítulo IV y V).

La evaluación de una tecnología de estimulación de lluvia considerando tormentas individuales de tipo convectivo es el objetivo principal del PARC. Una vez que se conoce el efecto en tormentas individuales y contando con el censo de recursos de

nube se puede tener una idea de la intensidad mínima de estimulación que debe tener un programa para que se refleje en un aumento del agua disponible en toda la cuenca o subcuenca donde se ejecute el programa. La intensidad mínima de estimulación se refiere al número de aviones necesarios para aplicar el tratamiento a un mínimo de tormentas.

Es también posible que el total de recursos de nube disponibles en la región no sea suficiente para producir un cambio detectable a un buen nivel de significancia en el sistema hidrológico o geohidrológico. Resulta todavía más complejo el querer usar el desarrollo fenológico de las plantas como un indicador de un cambio en la disponibilidad de agua producido por estimulación de lluvia.

Se aclara que los ejemplos presentados en este capítulo son de los pocos que han existido en México con intentos de verificación. La realidad es que existen decenas de programas que no contaron con ningún tipo de mecanismo de verificación sobre el efecto de los químicos colocados en la nube con el propósito de estimular la lluvia.

## **CAPÍTULO IV**

### **Instrumentación para una verificación objetiva**

- IV.1.- Redes pluviográficas.**
- IV.2.- Radar meteorológico**
- IV.3.- Instrumentos aerotransportados de física de nubes**
- IV.4.- Navegación GPS**
- IV.5.- El ejemplo del PARC**



## **CAPITULO IV**

### **Instrumentación para una verificación objetiva**

La instrumentación tiene por objeto la obtención de datos sobre diferentes variables meteorológica en una cantidad y calidad que describan adecuadamente el comportamiento de las variables de interés, y para el caso de la estimulación de lluvia, con una resolución que permita la detección de cambios atribuibles al efecto del sembrado. El tener la capacidad de detección de cambios en el comportamiento de las variables es el requisito que le da sentido al análisis estadístico de las variables meteorológicas de interés. Sólo mediante este tipo de análisis es posible determinar si se pueden atribuir los cambios a los efectos del sembrado o si son sólo cambios atribuibles al azar o variabilidad natural; lo anterior bajo un esquema de tratamiento de tormentas aleatorio. Se buscan efectos o señales de cambios en la micro física y la dinámica de la nube y efectos en el número y distribución del tamaño de las gotas de nube y de lluvia en concordancia con la hipótesis del modelo conceptual de sembrado.

La verificación de la estimulación de lluvia comprende mucho más que la medición de precipitación a nivel del suelo (que en términos prácticos es lo más importante). En la verificación debe tomarse en cuenta que la estimulación de lluvia se desarrolla dentro de un gran rango de escalas por lo que habrá que utilizar instrumentos diferentes y adecuados para cada nivel. El hecho de que la estimulación de lluvia ocasione cambios que quedan dentro de la variabilidad natural de las nubes, de las tormentas y de la precipitación agrega complejidad al fenómeno y obliga a que el análisis de los cambios sea estadístico y al nivel de tormentas individuales, sobre todo en campañas puramente experimentales. Por lo que una evaluación empleando la instrumentación adecuada resulta ser de naturaleza compleja y multifacética.

La escala del fenómeno de la precipitación involucra mediciones al nivel de la microescala, la mesoescala y la escala sinóptica. La instrumentación debe comprender instrumentación de física de nubes (microescala), redes pluviográficas (mediciones puntuales), radar meteorológico (campo de precipitación), sensores satelitales (sinóptica y mesoescala) e instrumentación varia que proporcione datos sobre el estado de la atmósfera (como los radiosondeos verticales de la atmósfera, sensores sobre aeronaves e incluso sensores colocados en el mar, etc.).

Al concluir una campaña experimental bien instrumentada debe quedar evaluada la efectividad de una tecnología de sembrado al nivel de tormentas individuales y debe haber quedado hecho el censo de recursos de nube aptos para la siembra.

Con los resultados de una evaluación favorable y con el censo de recursos de nube es posible hacer una estimación de cuál debe ser la intensidad mínima de una campaña operativa (principalmente en cuanto al número de aviones) para producir un incremento en la lluvia que pueda ser detectado al nivel de escurrimiento superficial o de almacenamiento subterráneo. Sólo en estas condiciones tiene sentido la instrumentación hidrométrica con fines de verificación del impacto de la aplicación de una tecnología de sembrado.

#### **IV.1. Redes pluviográficas.**

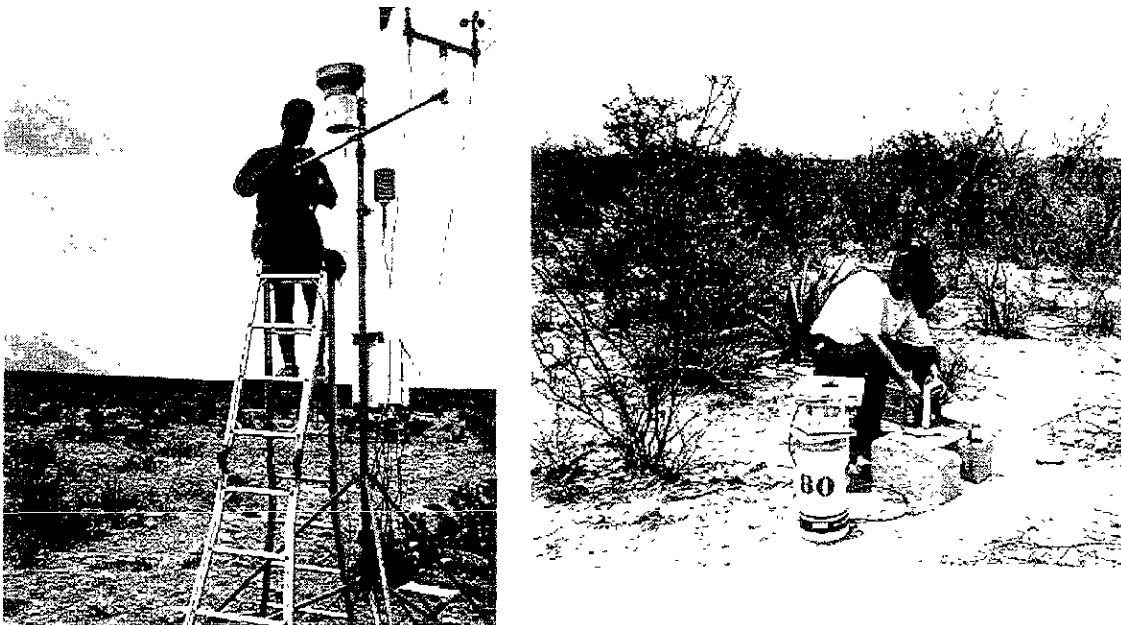
Las aplicaciones comunes en ingeniería: planeación, desarrollo, operación de obras hidráulicas y administración del recurso agua no demandan un conocimiento muy preciso del volumen total de lluvia sobre una determinada área y muchas veces los ingenieros se las arreglan con conocer un aproximado de la lluvia promedio anual de la cuenca de captación o a lo mucho requieren la variabilidad de la lluvia mes a mes y a través de un período largo de años para el diseño hidrológico de los embalses.

La evaluación más completa de la estimulación de lluvia idealmente requiere la medición de variables meteorológicas a diferentes niveles o alturas de la atmósfera en todo el volumen afectado por cada tormenta, incluyendo el nivel del suelo y con énfasis durante el tiempo que dura cada una de las tormentas; entre estas variables está la caracterización de la población de gotas de lluvia de la que depende la intensidad de lluvia. En la estimulación de lluvia es importante separar las láminas aportadas por cada tormenta individual y definir la evolución en el tiempo de: la intensidad de lluvia, el área y el volumen total de la tormenta, ya que estas son variables que reflejan el efecto de los químicos estimulantes en la tormenta y en un momento determinado indican el potencial de la tormenta para ser sembrada. La modelación hidrológica de cuencas, la alerta hidrometeorológica y el estudio del cambio climático son áreas que también se ven beneficiadas con la caracterización de eventos hidrometeorológicos en el tiempo y en el espacio.

En el ámbito de la estimulación de lluvia resulta importante remarcar que una instrumentación para verificación objetiva basada en redes pluviográficas únicamente (colocadas a nivel del suelo) nunca podrá arrojar resultados concluyentes sobre una tecnología de estimulación de lluvia por más sofisticadas que estas estaciones sean. Lo anterior se debe a que una tormenta es mucho más que la lluvia que cae a nivel del suelo por lo que utilizando únicamente datos pluviográficos es imposible determinar si la aplicación de los químicos estimulantes se hace en el momento más adecuado que fuera definido por el modelo conceptual de sembrado (ver sección II.6 y II.8.3). Para el caso del PARC (tormentas convectivas) el momento más adecuado consiste en la ventana de tiempo en que la nube presenta una base bien formada con fuertes corrientes ascendentes, un buen desarrollo vertical y que el pronóstico a corto plazo del desarrollo del área, volumen, cantidad de agua líquida y tope de la tormenta sea al incremento.

Por otro lado las mediciones al nivel del suelo de la lluvia con pluviógrafo seguirán siendo indispensables para ajustar puntualmente las mediciones que se hagan con otros instrumentos al nivel de las nubes, en los que se incluye al radar meteorológico.

En este apartado se abordan las capacidades y limitaciones de las mediciones en tierra de la lluvia utilizando redes de pluviógrafos. En términos hidrológicos la lluvia regional quedaría definida a la perfección, si a cada punto afectado sobre el suelo fuera posible definirle la intensidad de lluvia instantánea durante todo el tiempo de ocurrencia de la tormenta; es decir se requeriría definir el campo de lluvia para todas las tormentas. Como los datos que proporciona una red pluviográfica son puntuales, el campo de lluvias es el resultado de interpolar entre estos puntos.



**Figura IV.1.-** *Instalación de una de las estaciones meteorológicas automáticas y de uno de los pluviógrafos digitales del IMTA, durante la campaña experimental de PARC-98.*

A través de las redes pluviográficas se obtienen datos sobre la lluvia con los cuales los ingenieros reconstruyen el campo de lluvias, a partir de la intensidad y duración en puntos aislados donde se encuentran los pluviógrafos. Las capacidades y limitaciones de una red pluviográfica dependen del tipo de precipitación (convectivas, orográficas, ciclónicas o de frente) que se pretenda caracterizar y del uso que se pretenda dar a los datos. Así mismo, existen limitaciones inherentes al tipo de pluviógrafo, como lo es el error de medición en función de la cantidad de agua que llega a su cono de captación. Estas limitaciones pueden estudiarse y caracterizarse por medio de una adecuada calibración en laboratorio al mismo tiempo que se define el rango de mediciones confiables para un determinado pluviógrafo.

En condiciones de operación reales no existe en la actualidad ningún medio para definir el error de medición de un pluviómetro, es decir que no existe ningún método para cuantificar con un grado de precisión conocido, la cantidad de precipitación que recibe un punto sobre la superficie de la tierra. Lo anterior debido al gran número de factores que influyen y determinan la cantidad de lluvia medida por un pluviómetro, pues tal medición es una función del valor real de precipitación, de la naturaleza del pluviómetro, de las características del sitio y de las condiciones meteorológicas; el error ocasionado por el viento puede ser considerable con un efecto de disminución del valor real que puede llegar a ser tan grande como el 80 por ciento el cual es mucho mayor que la influencia de todos los otros errores sumados (Rodda, J.C. 1971, citado por Campos A., 1992).

Resulta conveniente evaluar el error ocasionado por el viento en la medición de la lluvia en tormentas convectivas de verano en México, en las cuales la velocidad del viento puede llegar a ser considerable. Este tipo de estudios puede aportar elementos que permitan aplicar un factor de corrección por viento a los datos que proporcionan los pluviógrafos utilizando la velocidad del viento medida en las estaciones meteorológicas. Hay que reconocer que resulta problemático colocar un anemómetro junto a cada pluviógrafo.

Para la utilización de redes pluviográficas en la verificación, monitoreo o evaluación de programas o experimentos de estimulación de lluvias es necesario obtener información para tormentas individuales completas sembradas y no sembradas y durante toda su duración. La densidad de las estaciones pluviográficas requerida para medir la lluvia a un nivel de detección adecuado depende principalmente del tamaño típico de las tormentas que se pretende caracterizar y con seguridad esta densidad es mucho mayor que la recomendada por la O.M.M. para una red pluviográfica común. La densidad de los pluviógrafos debe ser tal que se asegure la detección de todas las tormentas convectivas dentro de una zona; a su vez el área instrumentada debe ser de dimensiones tales que se asegure captar un mínimo de tormentas caso durante el tiempo de desarrollo del experimento, aumentando la probabilidad de alcanzar así el grado de significancia estadística establecido para el experimento.

Debe tomarse en cuenta que para disminuir el error de detección de las características de las tormentas caso debe aumentarse la densidad de la red de pluviógrafos. Por otro lado si se disminuye la densidad de pluviógrafos el error de medición introducido puede ser tan grande que se requiera un tamaño de muestra tan grande que solo pueda alcanzarse en muchos años; recordando que las tormentas caso son las que presentan las características prefijadas como adecuadas para ser sembradas, independientemente de que en el sorteo aleatorio resulten seleccionadas para ser tratadas con los químicos estimulantes.

Considérese de forma gráfica idealizada la manera como se registra una tormenta convectiva típica de diámetro igual a 10 Km por una red de pluviómetros al considerar dos trayectorias de la tormenta en una red con pluviógrafos dispuesto en cuadrícula a 5 km de distancia uno con otro y teniendo la tormenta una velocidad de

desplazamiento de 14.4 km./h y una intensidad máxima en su centro y decreciente del centro para afuera, como se muestra en la figura IV-2a. Obsérvese como para la trayectoria A se registra en los pluviómetros una lámina máxima de 6 mm y como cambiando la trayectoria de la tormenta apenas 2.5 km paralela a la trayectoria A, la trayectoria B registra una lámina máxima acumulada de apenas 1 mm de lluvia. Vea la tremenda diferencia y eso que se considera una red de pluviógrafos con una densidad que nunca ha sido instrumentada en México (Rosengaus, 1998).

¡Imagínese ahora una red de pluviógrafos con separación de 30 kilómetros entre pluviógrafos utilizada para reconstruir el campo de lluvias de un grupo de tormentas convectivas cuyo tamaño típico sea de 12 kilómetros, mientras unas son sembradas y otras no! Cualquiera que sea la interpolación que se utilice entre los acumulados puntuales será muy inadecuada para definir el campo de lluvia con la aproximación requerida para que sea útil en un monitoreo de la efectividad de una técnica de estimulación de lluvia. Todavía más habrá tormentas que escaparán totalmente a su detección por la red y habrá otras que pasarán centradas por arriba de las estaciones interpretándose que la zona de lluvias intensas es mucho más amplia que en la realidad.

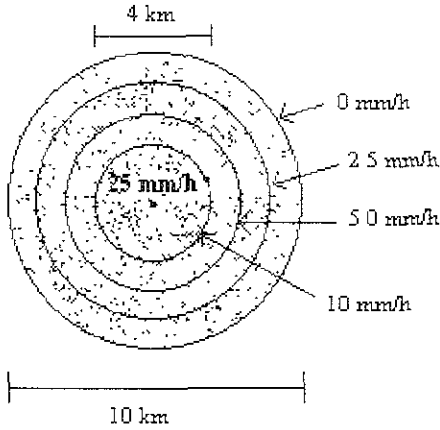
La obtención de un buen grado de detección de una tormenta convectiva por medio de una red pluviográfica claramente hace antieconómica la evaluación experimental de la efectividad de la estimulación de lluvia utilizando pluviógrafos. Aunque pueden utilizarse un considerable número de pluviógrafos pertenecientes a redes portátiles para ser utilizadas precisamente en campañas de tipo experimental.

Las estaciones pluviográficas son preferibles sobre las pluviométricas por las siguientes razones: a).- dos tormentas en un acumulado de 24 horas, una sembrada y la otra no, podrían aportar precipitación para el mismo pluviómetro o el mismo grupo de pluviómetros y sus aportaciones ser indistinguibles por la red mencionada, (Rosengaus y Reza, 1997), b)- No es posible utilizar la información para obtener una relación que de manera directa permita transformar la reflectividad de un hidrometeoro medida con radar a lluvia; ya que no es posible calcular la intensidad de lluvia instantánea a partir de una lámina acumulada en 24 horas.

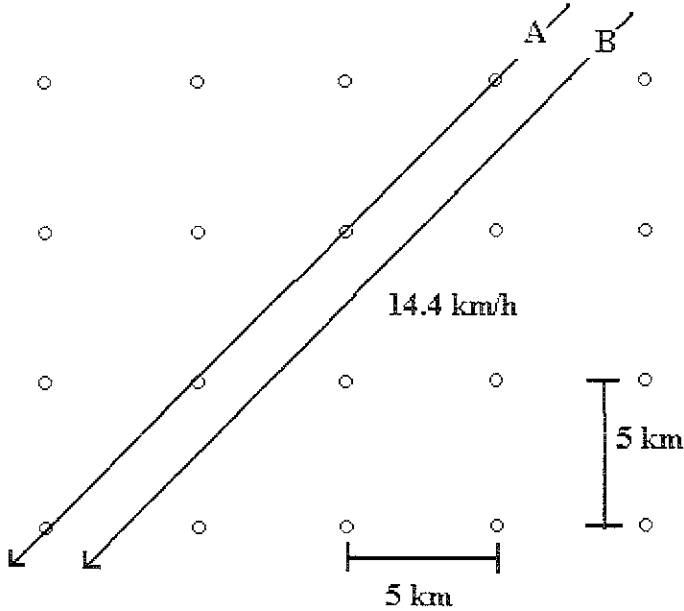
Hasta ahora se cree que la utilización de una red de pluviógrafos o pluviómetros es adecuada para medir la lluvia de tipo sinóptico, lo anterior sería verdad si estas tormentas de tipo sinóptico no anidaran tormentas de tipo convectivo. En la situación de México en donde los contrastes orográficos rompen la uniformidad de las lluvias extensas en el tiempo y en el espacio al propiciar la convección, la efectividad de las redes de pluviógrafos para medir la lluvia de tipo sinóptico se ve disminuida. Las tormentas de tipo sinóptico en nuestro país anidan tormentas convectivas cuyos incrementos de lluvia dados de manera localizada no son percibidos adecuadamente por las redes de pluviógrafos o pluviómetros.

Figura IV.2a.- Tormenta convectiva idealizada captada por una red de pluviómetros colocados en cuadrícula a 5 Km.

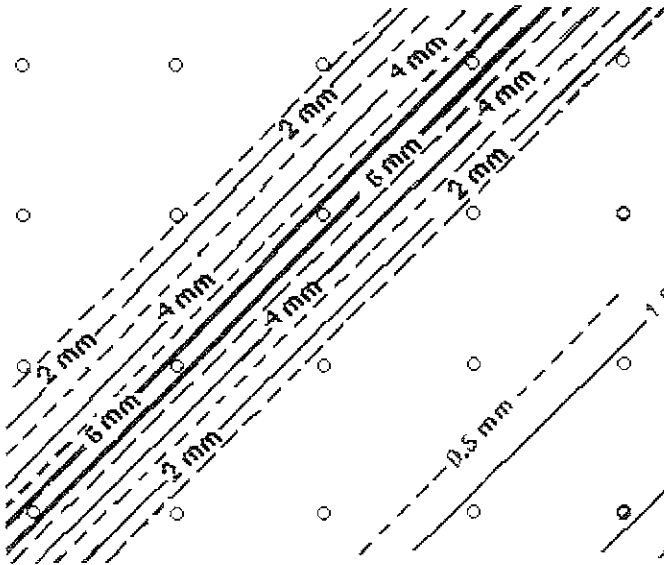
Tormenta Convectiva idealizada



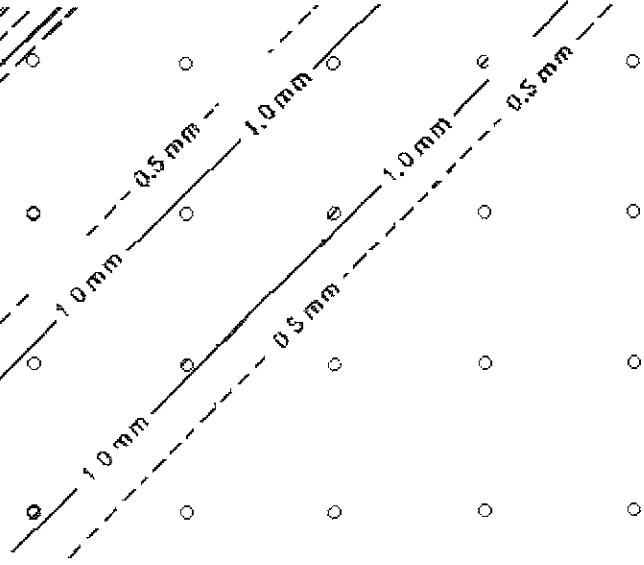
Dos posibles trayectorias de la tormenta



Mapa de isoyetas para la trayectoria A



Mapa de isoyetas para la Trayectoria B



#### IV.1.1.- La red nacional de estaciones climatológicas tradicionales

A partir de los años veinte, se encuentran instaladas en la República Mexicana estaciones climatológicas que tienen por objeto adquirir información sobre las condiciones climáticas de una región. Al contar con un número suficiente de años esta información constituye, en forma promediada, las condiciones climáticas del sitio donde se encuentra. Es de destacarse que el periodo de tiempo en el que hay información climatológica es muy corto como para poder decir algo objetivo sobre el cambio a largo plazo de algunos elementos del clima como la precipitación y la temperatura.

En general la información que es posible obtener de las diferentes estaciones climatológicas en el país se caracteriza por una gran porosidad en la continuidad en el tiempo debido a periodos irregulares de operación. La falta de toma de datos en periodos de tiempo que en ocasiones es bastante grande, limita la utilidad de los datos obtenidos y afecta mucho a elementos como la precipitación por ser un elemento del clima con gran variación en su distribución espacial y temporal. Por ejemplo hay una alta probabilidad de que tormentas de intensidad máxima en algunas regiones ni siquiera hayan sido detectadas a la fecha por la red de estaciones. Sobre todo en el desierto y en las regiones montañosas donde las estaciones se concentran en las planicies en las que existe actividad agrícola o pecuaria en escala económica importante. El autor de éste trabajo no ha visto, todavía, una estación climática en la cima de un cerro siendo que el forzamiento orográfico intensifica las tormentas en sus alrededores. De aquí el planteamiento de la probable no detección de tormentas de intensidad máxima por la red de estaciones climáticas.

Con el fin de comparar la detección de la lluvia acumulada del mes de julio, entre el radar y la red nacional de estaciones climatológicas tradicionales, se considera el dato de lluvia acumulada del mes de Julio de todas las estaciones tradicionales que se encuentran a una distancia menor que 112.5 km del radar, encontrándose un total de 39 estaciones, de las cuales sólo 23 reportan dato de lluvia acumulada para el mes de julio de 1998: Las isoyetas para este mes con los datos de las 23 estaciones se presentan en la figura IV.2b, éstos datos pueden ser consultados en el extractor rápido de información climatológica, ERIC (Quintas, 1999). La figura II.4 que corresponde precisamente a un mapa de precipitación acumulada observada con radar durante el mes de julio de 1998, en la región de Monclova, Coahuila, se reinsertó aquí nuevamente para una fácil comparación. El centro de la figura IV.2b corresponde a la localización del radar meteorológico.

**Figura IV.2b.-** Precipitación acumulada del mes de Julio de 1998 captada con la red de estaciones climatológicas tradicionales en el área del proyecto PARC. La localización de las estaciones se marca con un asterisco. Todos los valores de lámina de lluvia están en mm.

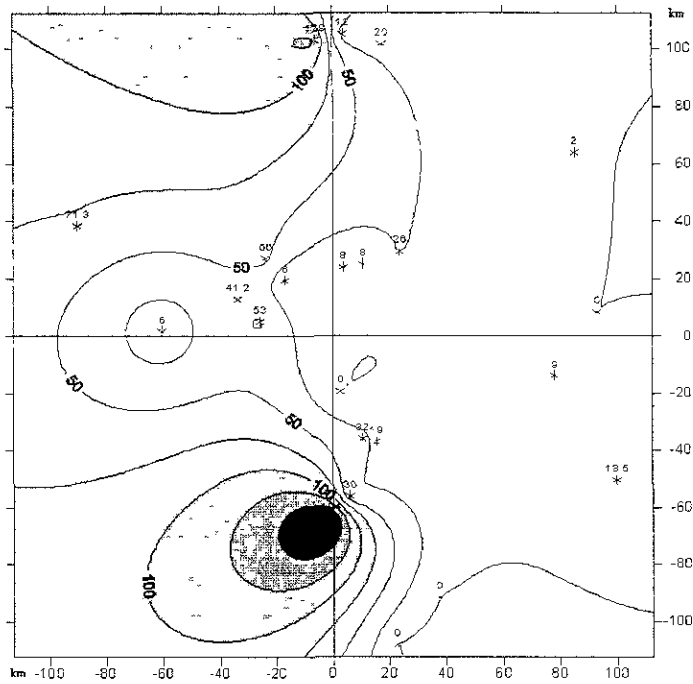
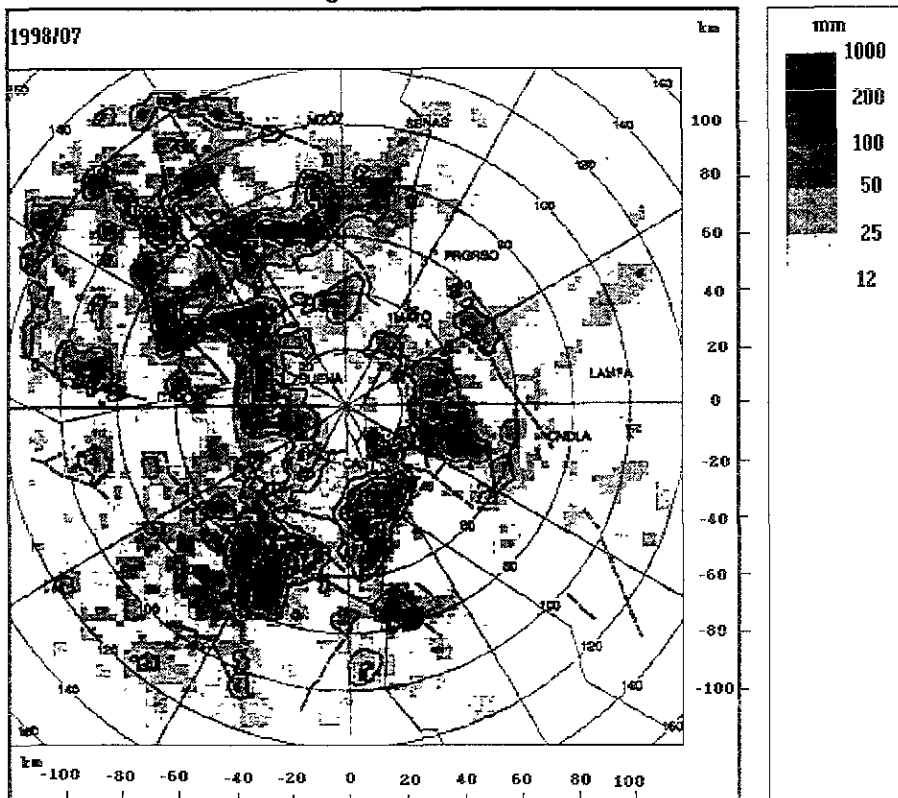


figura II.4 reinsertada





Obsérvese como en la figura IV.2b, al comparar con la figura II.4, las áreas con precipitaciones altas (primer cuadrante región superior y tercer cuadrante región inferior) son sobrestimadas, mientras que la precipitación en otras áreas, ni si quiera es detectada (del centro a la derecha). Lo anterior se obtiene considerando el acumulado mensual, ahora imagínese lo que ocurre con la capacidad de detección de la lluvia por hora, por día o por tormenta. En el acumulado de lluvia obtenido con radar se utilizó para transformar la reflectividad a lluvia, la relación de Marshall-Palmer (Marshall y Palmer, 1948).

En relación con la información disponible obtenida con la red de estaciones meteorológicas nacional y específicamente para el análisis de la precipitación en términos de datos pluviométricos adquiridos en las condiciones señaladas; se puede concluir sin mas preámbulos que una afirmación de cambios en incremento o disminución de la precipitación media durante un periodo de varios años no puede ser sustentada objetivamente por medio de los datos pluviográficos con que se cuenta. Aún si fuera posible definir algún cambio con relación a algún otro periodo de tiempo no es posible precisar si este cambio es efectivamente un cambio climático natural o artificial o es un comportamiento normal de la variación natural interanual del comportamiento de la precipitación, dado que pudo haberse presentado ya antes un periodo así. Este aspecto se ve acentuado en las regiones áridas y semiáridas de la república donde las precipitaciones son del tipo convectivo y por lo mismo muy localizadas y donde las medias de precipitación están fuertemente afectadas por fenómenos meteorológicos extremos como lo son los huracanes.

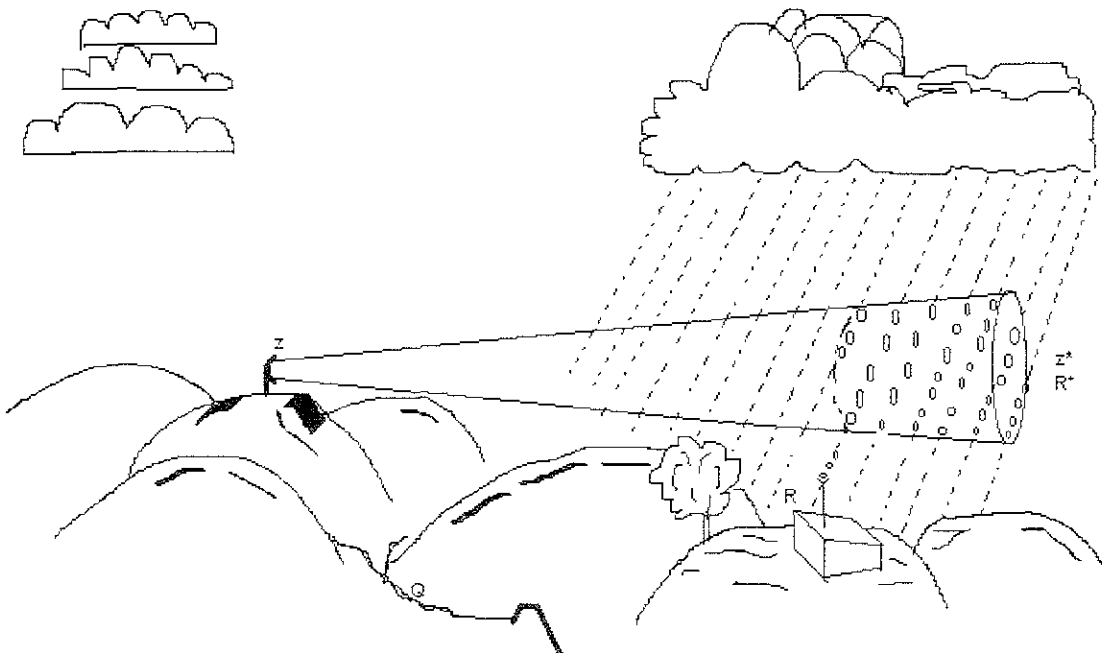
Para poder decir algo objetivo, sobre el aumento o disminución de la precipitación por medio de registros directos, se requiere mucho más que estaciones pluviométricas; es necesario la aplicación conjunta y eficiente de estaciones pluviográficas, pluviógrafos ópticos (para definir el número y distribución del tamaño de gota), satélite y radar meteorológico con el que es posible medir características que involucran a toda la tormenta. Este último utilizado en todo su potencial en barrido volumétrico y capacidad Doppler e integrado a una red de instrumentos que se complementan entre sí. Es decir, el estudio de los fenómenos hidrometeorológicos requiere de observaciones precisas y completas de la atmósfera, realizadas lo más continuo posible en el tiempo para poder ampliar su conocimiento y comprensión y poder describir la forma en que se producen.

## IV.2.- Radar meteorológico

El campo de lluvias definido a partir de una red de pluviógrafos en combinación con los datos que proporciona el radar hace posible hoy una mejor aproximación al campo de lluvias, lo que se conoce como instrumentación combinada.

### IV.2.1-Principio de funcionamiento

El radar envía pulsos electromagnéticos de gran potencia (del orden de 250 kW) y de muy corta duración (del orden de  $1 \mu\text{s}$ ) en dirección radial hacia el infinito (formando o siguiendo un haz cónico) por medio de una antena móvil, repitiéndolos entre unas cien y mil veces por segundo. Entre pulso y pulso el radar se encuentra a la escucha de posibles reflejos o ecos durante el 99.9% del tiempo de operación. Las partículas de precipitación que lleguen a encontrarse en el paso de la onda irradiada, reflejarán parte de la energía recibida (dispersión) comportándose como un pequeño emisor que transmite en todas direcciones. Una pequeña porción de esta energía viajará de regreso en dirección al radar, donde es recibida por la misma antena y que al detectarla le permitirá ubicar la posición de la tormenta, así como su opacidad. La extensión espacial de la tormenta se obtiene mediante la rotación de la antena, esta tiene giro en azimut ( $\theta$ ) y en ángulo de elevación ( $\phi$ ) lo que permite obtener información de la estructura tanto en planta como en altura de la precipitación (Rosengaus, 1995a y b).



**Figura IV.3.-** El radar meteorológico inspecciona la atmósfera.

Utilizando tarjetas de adquisición de datos la señal correspondiente se transforma a los ecos atmosféricos de analógica a digital y esto es lo que hace posible manejar dichos datos por medio de programas de cómputo e identificar los niveles de

reflectividad correspondientes de acuerdo con tablas que son consultadas cada vez que el radar recibe información de rastreo en forma analógica.

El radar meteorológico proporciona de manera directa el factor de reflectividad,  $z$  (en  $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ), de las gotas de agua contenidas en el volumen de muestreo de su haz. El factor de reflectividad es una propiedad de la lluvia que se puede relacionar con otras de sus propiedades, como el contenido en agua líquida por unidad de volumen de aire o la intensidad de lluvia. Así, estudiando las características de la lluvia se puede llegar a establecer una relación  $z$ - $R$  entre reflectividad (lo que medimos) e intensidad (lo que nos interesa estimar) en función de la distribución de tamaños de las gotas. Sin embargo la comparación que generalmente se realiza es entre la reflectividad detectada por el radar  $z$  y la intensidad de lluvia detectada por pluviógrafos sobre la superficie terrestre  $R$ . Pudiendo existir diferencias entre la intensidad de lluvia a nivel del suelo,  $R$  y la intensidad de lluvia,  $R^*$  en la altura a la que el radar inspecciona la atmósfera (ver figura IV.3). Algunas posibles diferencias entre la reflectividad  $z^*$ , como propiedad de una población de gotas contenidas en el volumen de control definido por el volumen de muestreo del haz del radar, y la reflectividad  $z$  reportada como medición del radar se detallan en la sección V.6.3.

#### IV.2.2.- La ecuación de radar

En la ecuación de radar queda establecida la relación entre los valores de reflectividad proporcionada por las mediciones del radar y las magnitudes de las que depende dicha reflectividad. Para poner a punto la ecuación de radar es necesario determinar los valores de los parámetros o factores de la ecuación basándose en las características del radar particular y hacer una simple aplicación del principio de conservación de energía.

La cantidad que los radares reportan como resultado de su medición se conoce conocida como reflectividad logarítmica  $Z$  y es una versión expresada en decibelios (dBZ) del factor de reflectividad del radar  $z$ , que corresponde a

$$z = \frac{P_r}{P_t} r^2 \left( \frac{1}{C_{rad}} \right) \left( \frac{1}{|K|^2} \right) \quad \text{ec. (4.1)}$$

donde:

$P_t$ : potencia transmitida por el radar

$P_r$ : potencia recibida por el radar

$r$ : distancia del radar al blanco

$C_{rad}$  Factor que aglomera diversas características del radar (como ganancia de la antena, apertura del haz, longitud de onda, longitud del pulso, entre otros y algunas constantes numéricas relacionadas con pérdidas); constante para un radar dado.

$|K|$ : magnitud del índice complejo de refracción que depende fundamentalmente del material del blanco (agua o hielo en el caso que nos ocupa)

Un decibelio, dB, no es estrictamente una unidad, sino un indicador de una relación (adimensional) entre dos cantidades expresadas de manera logarítmica.

Específicamente si  $A$  tiene una magnitud  $n$  veces la magnitud de  $B$ , se dice que entre ellas existen

$$10 \log_{10} \left( \frac{A}{B} \right) = 10 \log_{10} n \text{ decibelios} \quad (\text{Ec.4.2})$$

Por ejemplo,  $A/B=n=1,000,000$  corresponde a 60 dB mientras que el inverso  $B/A=0.000001$  corresponde a -60 dB. Cuando la relación se refiere a reflectividad (proporcional a la potencia recibida entre la potencia emitida) se acostumbra indicar como unidades dBZ, Rosengaus (1995a).

#### IV.2.3.- Políticas de operación y productos del radar

La utilidad del radar meteorológico se ha visto incrementada conforme se ha hecho más fácil manejar y almacenar los productos de radar que es posible obtener. Los productos de radar han evolucionado desde aquellos ecos que sólo eran apreciables en la pantalla de la consola del radar y algunas veces eran calcados sobre plantillas para análisis posteriores (común todavía en toda la década de los 80's en México) conocido como producto indicador de posición en planta o PPI (*plan position indicator*) haciendo una copia sobre la pantalla por lo regular cada media hora. El producto PPI es de difícil interpretación puesto que representa mediciones a mayores niveles atmosféricos conforme la distancia radial aumenta (suponiendo el ángulo de elevación  $\phi \geq 0$ ). Los productos modernos digitales actuales también incluyen al PPI (ver figura IV.4).

La característica más importante de los radares modernos es la inclusión del control y procesamiento digital que permite realizar un análisis en tiempo real o diferido del comportamiento de los hidrometeoros. Una computadora es la encargada de controlar los movimientos automáticos de la antena, realizar conversiones de la señal analógica original a digital y viceversa utilizando un programa de control y adquisición de datos de radar. La computadora también ordena los datos en forma tal que los programas de manejo de datos puedan utilizarlos de manera eficiente y al mismo tiempo puede desplegarse en el monitor de esta computadora la información captada en tiempo real.

Los datos primitivos recibidos del radar son la reflectividad medida como una función de la distancia radial ( $r$ ), el ángulo de azimut ( $\theta$ ) y el ángulo de elevación ( $\phi$ ). El volumen atmosférico total de muestreo queda definido al considerar giros de la antena completos en azimut ( $\theta$ ) y un determinado número de cambios en el ángulo de elevación ( $\phi$ ) dentro de un rango. Por ejemplo: puede haber 17 cambios en el ángulo de elevación dentro de un rango que puede ir de  $2^\circ$  a  $46^\circ$  grados de ángulo de elevación, integrando lo que se conoce como barrido volumétrico.

Una buena política de operación debe considerar la obtención de la mayor cantidad posible de información con base en la capacidad del radar. Por ejemplo existen radares de los llamados modernizados pertenecientes al SMN (Servicio

Meteorológico Nacional) que aunque proporcionan la información en formato digital están limitados (limitación que no es física sino de política de operación) a operar girando en azimut manteniendo fijo un cierto ángulo de elevación; por lo tanto el producto obtenido será el PPI o indicador de posición en planta.

Un procesamiento adicional hecho a los datos primitivos de reflectividad  $z(r, \theta, \phi)$  por el programa de control y adquisición es la transformación de coordenadas esféricas a coordenadas cartesianas utilizando un algoritmo de interpolación entre los píxeles volumétricos (formado por el volumen de muestreo del haz del radar) del sistema esférico al sistema cartesiano donde la medición de reflectividad queda manifestada como  $z(x, y, h)$ , donde  $x=0, y=0$  representan la posición en planta del radar y  $h$  es la elevación sobre el nivel del mar.

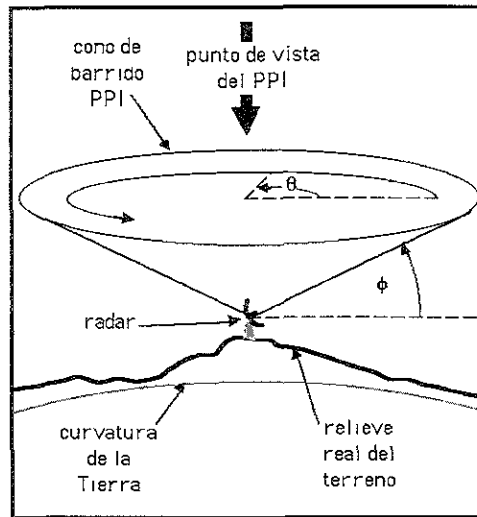
El barrido volumétrico incluye todas las mediciones realizables por el radar, puede visualizarse como un conjunto de productos PPI con el ángulo de elevación  $\phi$ , variando en pasos un determinado número de veces desde un valor inicial  $\phi_i$  hasta un valor máximo  $\phi_{\max}$ . En el barrido o producto volumétrico se almacenan en un medio permanente todas las mediciones. Los medios de almacenamiento han evolucionado y se han abaratado lo suficiente como para no dejar de aprovechar la versatilidad del barrido volumétrico en proyectos de investigación y desarrollo. El costo de la puesta en marcha, operación y mantenimiento de los radares exige se aprovechen al máximo sus productos. Las computadoras con gran cantidad de memoria y velocidad de procesamiento y almacenamiento de datos son en la actualidad muy accesibles. No hay pretextos, los datos de radar deben ser aprovechados hoy en día al máximo.

Del producto volumétrico se deriva el conocido producto de máxima reflectividad en la vertical, frecuentemente usado en la comparación de mediciones de intensidad de lluvia obtenida con pluviógrafo contra reflectividad de radar con el propósito de obtener la relación de transformación de reflectividad a lluvia. Para una misma ubicación de píxel en planta, se elige la reflectividad con mayor valor de entre el conjunto de productos PPI que conforman al producto volumétrico.

La información de radar en la forma de datos digitales debidamente ordenada puede ser transmitida para su análisis a diferentes y lejanas estaciones de trabajo capaces de correr programas que procesan rápidamente la información. Se utilizan algoritmos que operan sobre datos de reflectividad para ubicar tormentas, rastrear las características de interés y con base en el registro y análisis de su evolución, incluso, realizar pronósticos a muy corto plazo sobre el comportamiento de los sistemas.

Un ejemplo de programa de análisis de información digital de radar es el programa TITAN (“Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting”) que traducido al español sería “Identificación, rastreo, análisis y pronóstico a muy corto plazo de tormentas convectivas”. Este programa facilita la exhibición y análisis de datos de radar relacionando estos datos con características de las tormentas. La utilidad del programa TITAN se analiza ampliamente en el apartado IV.5.3.

Figura IV.4. Esquema de definición del PPI (Rosengaus, 1995a).



#### IV.2.4.- Resolución del radar

Los pulsos de energía emitida por el radar se propagan a lo largo del eje radial distribuida en un haz cónico cuyo eje longitudinal es esta dirección radial. La longitud del pulso define la longitud del volumen de muestreo. La longitud del pulso depende de la longitud de onda, de las ondas que lo componen y de la cantidad de éstas. La longitud del pulso permanece constante durante toda su propagación; lo que no ocurre con la dimensión perpendicular al eje del haz ya que esta se incrementa linealmente conforme el haz se aleja del radar. Las mediciones que un radar realiza en la atmósfera no son puntuales pues la reflectividad percibida se refiere al promedio en el volumen de muestreo así definido (Rosengaus, 1995 a).

Este incremento en el volumen de muestreo del haz del radar depende del ángulo de apertura ( $\Delta$ ) del haz. Típicamente esta apertura es del orden de  $1^\circ$  y aunque puede parecer un ángulo muy reducido, dado el gran alcance nominal de los radares, esta apertura tiene importantes implicaciones. Usando un radar idealizado, una tormenta sintética de tres celdas y un perfil radial de precipitación pluvial sintéticos Rosengaus (1999) llega a las siguientes conclusiones sobre el efecto de disminución de la resolución:

- La definición de la estructura de la tormenta siempre se degrada al aumentar la distancia al radar.
- Las máximas intensidades de lluvia siempre son suavizadas y subestimadas por el radar, aumentando este efecto con la distancia radial.
- El área de tormentas convectivas intensas usualmente será sobreestimada.
- Por lo tanto, dada la combinación de (b) y (c), la producción de agua de los núcleos convectivos y la tormenta en general no presenta un error con tendencia sistemática al aumentar la distancia al radar. En contra de la suposición

generalizada, el radar no disminuye consistentemente su eficacia como estimador de producción de agua de núcleos convectivos o tormentas al incrementarse la distancia al radar; los errores son significativos pero aparecen como aleatorios dependiendo de la posición de la tormenta en relación con la malla de medición del radar.

#### IV.2.5.- ¿Caracterización de la lluvia o caracterización de las tormentas?

Tradicionalmente los ingenieros han partido de mediciones puntuales de lluvia obtenidas por medio de pluviógrafos y pluviómetros colocados sobre la superficie del terreno para caracterizar la lluvia y derivar la información que requieren para construir y operar los sistemas hidráulicos necesarios para el aprovechamiento del recurso agua, complementando la información cuando es necesario con mediciones de escurrimientos en ríos y arroyos o con estudios del agua almacenada en los acuíferos y en los almacenamientos artificiales.

El hecho de que la base de la información sobre la lluvia utilizada en hidrología sean mediciones puntuales se debe a que antes sólo se contaba con pluviógrafos y pluviómetros y a que la hidrología con radar apenas se está desarrollando y le queda mucho camino por recorrer; por ello tiene (como toda tecnología nueva) como oponente a todos los que consideran que han obtenido buenos resultados con la tecnología vieja y como tibios defensores a los que visualizan su potencial por arriba de lo ya establecido.

En este contexto la hidrología con radar, primero como resultado de su misma evolución y después algo para conciliar intereses, ha intentado caracterizar a la lluvia de una región utilizando mediciones puntuales de su intensidad, o determinando el número y distribución de tamaños de gotas en espacios puntuales para después pasar al propósito de encontrar la mejor relación con la reflectividad de los hidrometeoros proporcionada por el radar, la que pertenece al volumen de la atmósfera muestreado bastantes metros arriba de la superficie del terreno. En este afán conciliador con las herramientas viejas se ha dejado de lado el hecho de que las aplicaciones hidrológicas no requieren de estimaciones puntuales del campo de lluvia, sino de sus estimaciones sobre áreas relativamente importantes en comparación con los 162 cm<sup>2</sup> del muestreo hecho por los pluviógrafos. Además la confianza que se tiene en las mediciones o estimaciones puntuales es criticable al tomarlas verdadera sin más consideraciones (ver sección IV.1.).

La intensidad de lluvia (o la distribución de tamaños de gotas) pueden variar tremendamente en el espacio y en el tiempo al interior de una tormenta. Las estimaciones que se pueden hacer de manera puntual con pluviógrafo (o con disdrómetro o pluviógrafo óptico) en la superficie del terreno no son las más útiles para la representación del fenómeno de la precipitación. Por lo tanto, la evolución natural irá en el sentido de replantear el enfoque basado en caracterizar la lluvia por medio de estas mediciones puntuales solamente, ya que existe la percepción de que para conocer la verdad hay que estudiar el fenómeno a la escala en que se

desarrolla, es decir hay que conocer todas sus partes. Así lo más recomendable es enfocarse en conocer e interpretar el fenómeno de la precipitación considerando a la tormenta completa y no sólo lo que ocurre en una pequeña parte de ella.

Considerar tormentas completas, especialmente del tipo convectivo, hoy en día se hace posible gracias al radar meteorológico el cual por medio de programas de procesamiento y almacenamiento de datos de radar puede caracterizar tormentas basándose en propiedades como la proyección en planta de su área, el volumen total de la tormenta (considerado a partir de cierta altura sobre el nivel del suelo), la cantidad total de agua líquida contenida en la tormenta, la altura del tope de la tormenta y la evolución en el tiempo de todas estas características; así como su localización geográfica y su trayectoria. Con el radar meteorológico se logra “ver” a la tormenta completa, saber dónde se encuentra y se tienen datos que permiten medirla de forma continua, desde que nace hasta que muere.

En el caso de tormentas de gran extensión el uso de redes de radares y de sensores satelitales pueden proporcionar la información requerida para caracterizar a este tipo de tormentas.

Así, partiendo de caracterizar a tormentas completas empleando el radar meteorológico se llega a la necesidad de utilizar redes pluviográficas para ajustar puntualmente lo ocurrido en la tormenta al nivel de la atmósfera con lo efectivamente precipitado en el suelo; es decir no hay ningún instrumento que sea mejor que el radar para conocer cuándo y dónde está precipitando una tormenta además de proporcionar muchas características de la misma; pero para que se pueda contestar adecuadamente a la pregunta de cuánto llovió efectivamente sobre el suelo es necesario utilizar información pluviográfica basándose en las características de la tormenta para encontrar la relación que permita transformar los datos de reflectividad de radar en intensidad de lluvia.

Debido a que se relacionan datos de reflectividad promedio sobre un volumen relativamente grande de la atmósfera a una altura considerable sobre el nivel del terreno con datos de intensidad de lluvia obtenidos de manera puntual por medio de pluviógrafos, la nube de puntos resultante de esta comparación necesariamente tendrá una dispersión considerable. Lo que esta dispersión indica es que la transformación de reflectividad a lluvia dentro de una tormenta tendrá una buena precisión en el promedio de todos los píxeles y no en la transformación instantánea de píxel por píxel. La transformación de reflectividad instantánea a intensidad de lluvia instantánea por píxel necesariamente tendrá que ser considerada como probabilística (ver sección V.6.3).

Dada la importancia de la relación entre la reflectividad de los hidrometeoros y la intensidad de lluvia sobre el suelo, se retoma el tema en todo el Capítulo V: Calibración del Radar Meteorológico.



### IV.3. Instrumentos aerotransportados de física de nubes

#### IV.3.1.- Introducción

El estudio de los procesos atmosféricos, que incluye la condensación de la humedad, el desarrollo de pequeñas gotas en las nubes y la aparición de precipitaciones, recibe el nombre de física de las nubes. Debido a la importancia económica de la lluvia y la nieve, esta disciplina ha tenido gran interés en años recientes. El crecimiento de las gotas de agua de las nubes y la aparición de precipitaciones son procesos complejos que no se conocen suficientemente bien; para su estudio son utilizados instrumentos montados en aeronaves que miden algunas características físicas de los procesos complejos mencionados. Hasta ahora técnicamente es imposible seguir por medio de mediciones en la nube toda la cadena de eventos asociada con la precipitación, pero se ha logrado medir enlaces o puntos clave que ayudan a establecer relaciones causa efecto.

En el contexto de la estimulación de lluvia la instrumentación de física de nubes se utiliza para verificar las condiciones supuestas en la hipótesis física de sembrado. Por ejemplo, si la hipótesis señala que los núcleos de condensación existentes de manera natural son inhibidos por los núcleos sembrados artificialmente por una mayor eficiencia de los artificiales debido a su mayor tamaño entonces es necesario estudiar los tamaños de los núcleos de condensación naturales (CCN) de la zona donde se pretende implementar una determinada técnica de estimulación de lluvia y esto durante toda la temporada que se pretende sembrar. El estudio de los núcleos de condensación naturales es sumamente importante en la elección de los químicos estimulantes así como en la cantidad que hay que usar de estos.

Si la hipótesis de sembrado establece que los químicos colocados en la nube modifican el número y distribución de tamaños de gotas se hará necesario obtener mediciones al respecto, tanto en nubes sembradas como en las no sembradas.

La distribución de los tamaños de gotas en la nube es muy importante ya que por ejemplo solo las gotas de nube que alcanzan un tamaño por arriba de los 20  $\mu\text{m}$  tienen posibilidades de crecer por coalescencia.

La medición de variables como la temperatura del aire, la temperatura del punto de rocío, la humedad relativa, la cantidad de agua líquida, la cantidad de aerosoles, la velocidad del viento es útil para analizar los procesos y evaluar el desarrollo de la nube; tanto de las que son sembradas como de las que no lo son.

Por medio de las impresiones que es posible hacer durante el vuelo, de las mediciones que se estén haciendo, se vigila el buen funcionamiento de los instrumentos y se toman decisiones sobre la marcha. Como todos los datos que proporcionan los instrumentos de física de nubes son almacenados; posteriormente se procesan para obtener parámetros que pueden ser utilizados para calibrar modelos matemáticos que intentan representar el comportamiento atmosférico de la precipitación.

#### IV.3.2.- El Espectrómetro de gota de nube (FSSP-100) y de aerosoles (FSSP-300)

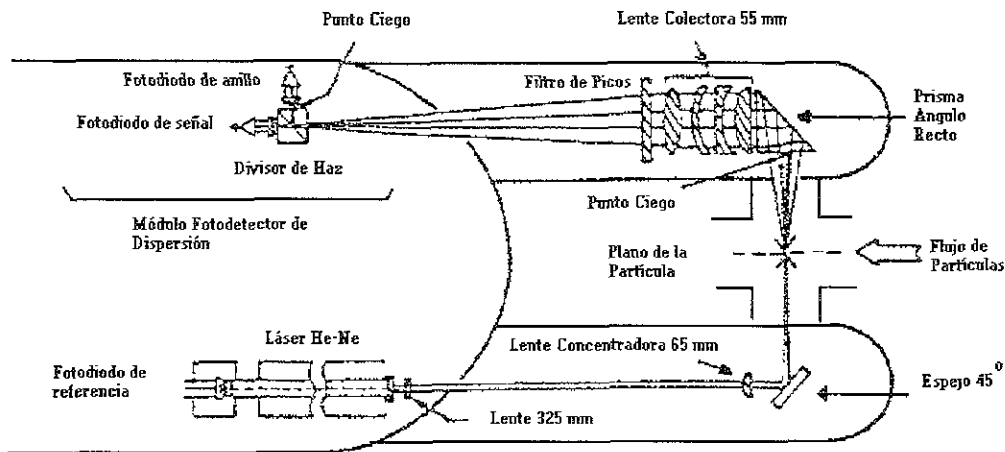
El espectrómetro mide los diámetros de las gotas y proporciona el número de gotas clasificadas en rangos de tamaño. El más popular entre los investigadores de la física de las nubes hoy en día, es el espectrómetro de gotas de dispersión frontal (FSSP: "*Forward Scattering Spectrometer Probe*"), entre estos el fabricado por *Particle Measuring System, Inc.* de Boulder, Colorado, E.U.A. El modelo PMS-FSSP-100, es capaz de muestrear partículas con velocidades (velocidad de las partículas con respecto al equipo) entre 10 y 125 m s<sup>-1</sup> y diámetros entre 2.0 μm y 47 μm con una exactitud de ±20% en los diámetros y de ±16% en la concentración medida, pudiéndose elegir rangos de medición, clasificando las mediciones en 15 canales (o tamaños) para el rango que se haya elegido. La salida digital del equipo proporciona el tamaño de la partícula en código binario que con un sistema de adquisición de datos e interfases adecuadas se graba en medios magnéticos para su análisis posterior. El sensor es usado principalmente para el estudio de los procesos microfísicos en la nube; particularmente la nucleación y el crecimiento de las gotitas de nube a través de condensación y coalescencia.

Originalmente diseñado por Knollenberg (1976) para ser montado en un avión, al FSSP de fabricación comercial se le han implementado mejoras al paso de los años. Además, diferentes usuarios han hecho modificaciones a sus respectivos espectrómetros. Por estas razones, no existen dos equipos cuyas características de respuesta sean idénticas, lo que hace necesario evaluar las limitaciones de funcionamiento propias y calibrar cada FSSP en particular (García y Montañez, 1994).

##### IV.3.2.1.- Principios de operación

El FSSP cuenta con una región de muestreo (figura VI-5) iluminada por un rayo láser de He-Ne de longitud de onda 0.6328 μm, el cual es interceptado por partículas en el flujo al que el equipo queda expuesto. La luz dispersada por cada partícula (gotitas de nube) se detecta en un ángulo sólido definido por el diámetro del punto ciego, la distancia de la partícula a este, y la apertura del tubo de muestreo. La luz pasa entonces por un prisma y lentes colectores y es dirigida hacia un segundo prisma que actúa como divisor. Parte de la luz ilumina un fotodetector (el detector de "señal") y la otra porción cae en un segundo fotodetector parcialmente bloqueado (el detector de "anillo") donde se concentra sólo luz proveniente de ángulos de dispersión grandes. Aquellas partículas que pasan lejos del plano focal dispersan proporcionalmente más luz sobre el detector de anillo que sobre el de señal, y viceversa. Así, comparando los voltajes de señal y de anillo, se define electrónicamente una profundidad de campo.

**Figura IV.5.-** Representación esquemática de la región de muestreo y del sistema óptico electrónico de detección del FSSP (Dye y Baumgardner, 1984).



El tamaño de la partícula se puede deducir usando la teoría de dispersión de Mie si se conoce la intensidad de la luz detectada, la longitud de onda de la luz incidente, el índice de refracción de la partícula y el ángulo sólido de detección. Así una gotita líquida y esférica tiene un índice refractivo de 1.33. Si una nube contiene mezclas de agua y hielo, la distribución de tamaños resultante de esta medición debe ser observada con gran precaución puesto que las partículas de hielo no serán medidas correctamente debido a su índice de refracción diferente y a que no tienen forma esférica. Esto limita en cierta forma la utilización del equipo para estudios de aerosoles, ya que se requiere de un conocimiento a priori del índice de refracción del material investigado así como de su forma geométrica. El espectrómetro hace la conversión de voltaje de señal a tamaño de partícula usando analizadores de altura de pulsos con 15 canales, cuyos niveles de comparación se fijan con base en la calibración del instrumento.

Un promedio electrónico del tiempo de tránsito de las partículas que pasan dentro de los límites de la profundidad de campo es generado con el fin de eliminar aquellas que pasan por la periferia del haz. Así, las partículas cuyos tiempos de tránsito son menores que el promedio son rechazadas por el sistema electrónico.

Una vez que las partículas salen del rayo láser, se genera un tiempo muerto durante el cual aquellas son evaluadas y contadas, y el espectrómetro no puede detectar nuevas partículas que atraviesan el haz. Este tiempo muerto consta de dos períodos de magnitudes constantes: el "retardo lento", para partículas que pasan dentro de los límites de la profundidad de campo; y el "retardo rápido", para aquellas que transitan fuera de esos límites. Diferentes modificaciones han sido efectuadas por los usuarios con el propósito de hacer correcciones de conteo durante el tiempo muerto (García y Montañez, 1994; Knollenberg, 1976, 1981; Dye y Baumgardner, 1984).

#### IV.3.2.2.- Salidas o mediciones primarias y derivadas

El tamaño se ordena dentro de uno de los 15 canales (cada uno representando un diferente rango de tamaños) y esta información se envía al sistema de manejo de datos donde el número de partículas en cada canal es acumulado sobre un período preseleccionado de tiempo, así se tiene un parámetro que representa al total de partículas en la profundidad de campo (*total strobes*), otro parámetro para el total de partículas fuera de la profundidad del campo (*fast resets*) y otro para la fracción de tiempo o período muestra en que la sonda estuvo activa (*activity*). De estos parámetros primarios se derivan otros parámetros como el número de gotitas por unidad de volumen o concentración [número por centímetro cúbico], masa total de gotitas denominado contenido de agua líquida [ $\text{gm}^{-3}$ ] y el promedio aritmético del diámetro de gotitas [micrómetros], (Haggerty y Baumgardner, 1997).

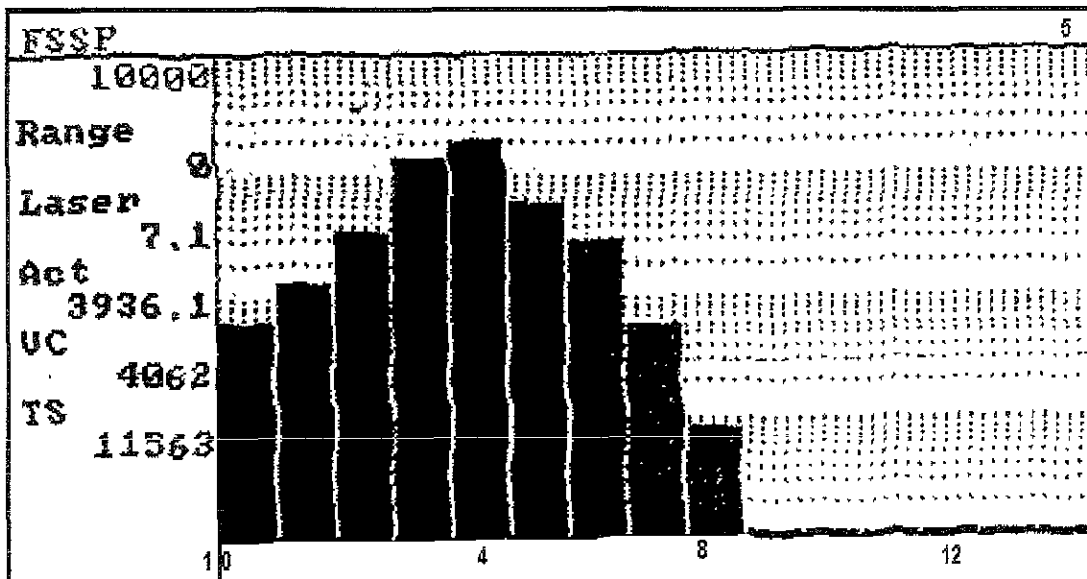
El FSSP modelo 300 es un instrumento utilizado para la medición de la distribución de tamaños de partículas aerosoles. El sensor fue originalmente desarrollado para el estudio de la distribución de aerosoles en la estratosfera pero ahora es muy utilizado en estudios de química de la troposfera y física de aerosoles. El principio de funcionamiento es el mismo que el modelo 100; pero los tamaños son clasificados en uno de 31 canales, midiendo un rango de tamaños de partícula que va de  $0.3 \mu\text{m}$  a  $20.0 \mu\text{m}$  con la misma aproximación que el modelo 100. Se asume que la luz esparcida detectada es de una partícula esférica con un índice de refracción de 1.58. Las salidas primarias son en 31 canales en los que se acumula el conteo; así se cuenta y se mide el total de partículas pasando a través del rayo. Como salidas derivadas se tienen la concentración, área de superficie total, volumen y diámetro medio; calculados al considerar la muestra de volumen medido en un período de tiempo muestra dado. La distribución de tamaños producto de esta medición debe ser vista con mucho cuidado en aerosoles de composición mixta; las partículas no serán correctamente medidas debido a su diferente índice de refracción y a su forma diferente a la esférica, (Haggerty y Baumgardner, 1997).

En la figura IV.6 se muestra un resultado de las mediciones hechas por el FSSP modelo 100, mostrando el tamaño de las gotas de nube ordenado en uno de los 15 canales en el eje de la abscisas con tamaños en  $\mu\text{m}$ . En el eje de las ordenadas se muestran datos importantes como el alcance de medición de la concentración, que para este caso resulta ser de 0-10000 (Range). Se proporciona el voltaje de referencia de 7.1, dato que no es importante para la interpretación del resultado (Laser). Se indica la actividad de 39.36% que indica el porcentaje de tiempo en que el FSSP fue ocupado, solo que aquí la actividad está multiplicada por 100 (Act). El número de cuentas digitales consideradas en la determinación de la distribución de tamaños reportadas en la figura es de 4062 (VC), relacionado con los tiempos para los que el espectrómetro no puede detectar nuevas partículas. El total de partículas que pasan a través del láser, dentro de la profundidad del campo resultó de 11563 (TS).

INIA - INSTITUTO NACIONAL  
DE INVESTIGACIONES  
AGROPECUARIAS

Otro dato importante sobre las mediciones del FSSP en la obtención de la distribución de tamaños de gotas es su resolución. Por ejemplo, el FSSP tiene un área de muestra de aproximadamente 0.36 mm<sup>2</sup>. La resolución depende de la velocidad del avión y la toma de muestras en el tiempo. Cuando la velocidad del avión es de 100 m/s y el sistema de adquisición de datos tome muestras cada segundo, el volumen muestreado por segundo es de 36000 mm<sup>3</sup>/s.

**Figura IV.6.-** Gráfica del FSSP (espectrómetro de gotas de nube) en forma estadística del número y diámetro de gotas de nube. Esta gráfica se obtiene con el sistema de adquisición de datos de la avioneta (DAS, Data Acquisition System). En el eje horizontal se representan los rangos de tamaño en  $\mu\text{m}$  y en el vertical la concentración o número de gotas de nube junto con información sobre las mediciones (cortesía del NCAR).



#### IV.3.3.- Dispositivo óptico de dos dimensiones (2D)

El hecho de que en la nube pueden existir partículas de agua en forma esférica y cristales de hielo en forma de dendritas hace que para su análisis cualitativo y cuantitativo se requiera la utilización de más de un instrumento para lograr la diferenciación entre el agua y el hielo. Utilizando el dispositivo óptico de dos dimensiones, 2D, instrumento desarrollado por Particle Measuring Systems (PMS, Inc., Boulder, Co), en sus modelos 2D-C y 2D-P, las partículas en fase mixta en la nube pueden ser detectadas en un rango de diámetros que va de 25 a 6400 micrómetros (25  $\mu\text{m}$  a 800  $\mu\text{m}$  para el 2D-C y de 200  $\mu\text{m}$  a 6400  $\mu\text{m}$  para el 2D-P). Este sensor es usado principalmente para estudiar los procesos microfísicos en la nube, por ejemplo el crecimiento de las gotas de nube.

IV.3.3.1.- Principios de operación

El dispositivos óptico bidimensional graba sombras en dos dimensiones de gotas que pasan a través de un rayo láser He-Ne (ver figura IV-7). La sombra se proyecta en un arreglo lineal de diodos y el estado de encendido/apagado de esos diodos son almacenados durante el paso de las partículas a través del rayo láser. Esta información es enviada al sistema de datos y grabada para su análisis posterior. La resolución dada por el tamaño de los diodos es de 8 mm para el modelo 2D-C por lo que sombras con dimensiones menores a los 8 mm son bien detectadas. En la figura IV.9 se observa una imagen del dispositivo óptico bidimensional en la que el ancho de cada banda es precisamente de 8 mm. Este dispositivo es especialmente útil para definir la forma de las partículas.

La información sobre la forma y tamaño de las partículas se deduce a partir de los datos de las sombras grabadas con una variedad de algoritmos de patrones reconocidos. La figura IV.8 ilustra algunas mediciones efectuadas por el sensor 2D, mostrando principalmente cristales de hielo puro con una ramificación compleja. La figura IV.9 ilustra mediciones en una nube conteniendo solo partículas de agua en estado líquido.

**Figura IV.7.-** Diagrama esquemático del principio de operación del sensor óptico de dos dimensiones (2D) (Haggerty y Baumgardner, 1997).

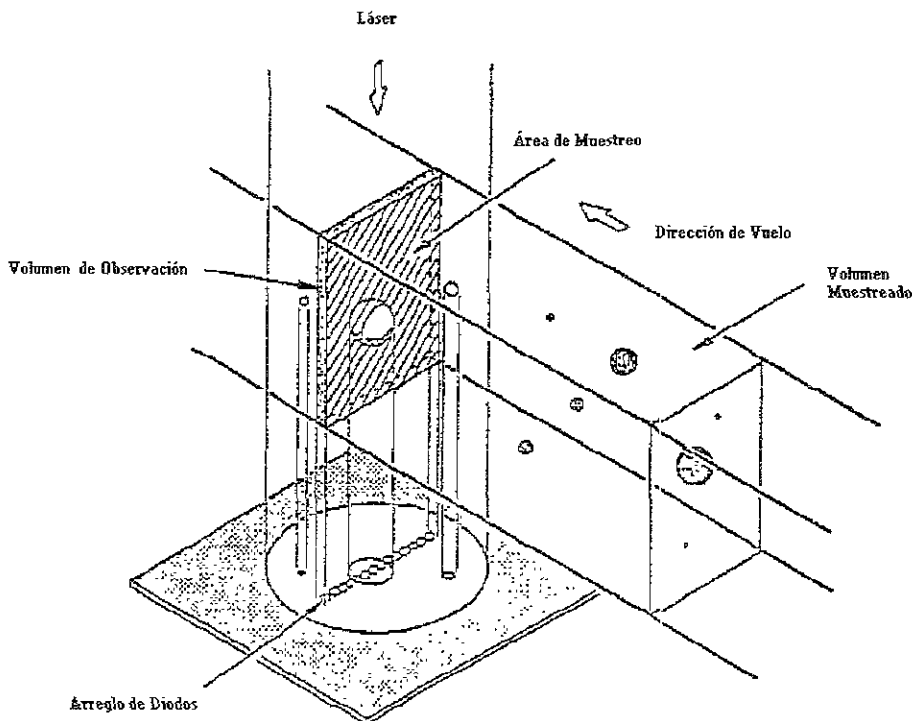


Figura IV.8.- Imágenes del medidor 2D para varios tipos diferentes de partículas de hielo con bordes y formas complejas (Haggerty y Baumgardner, 1997).

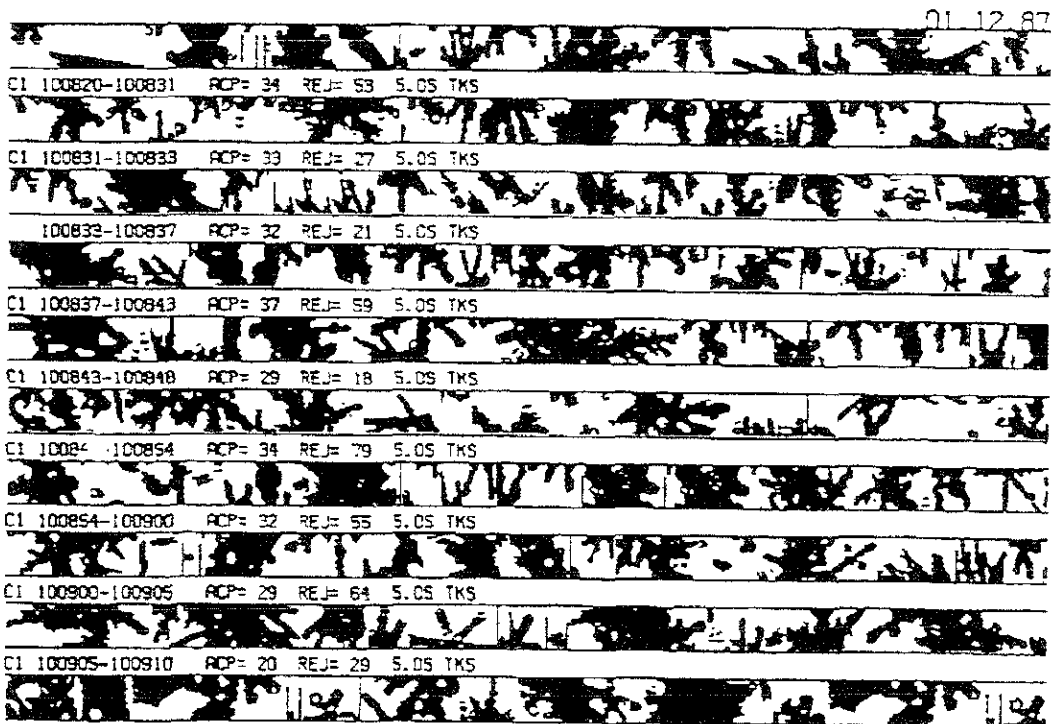
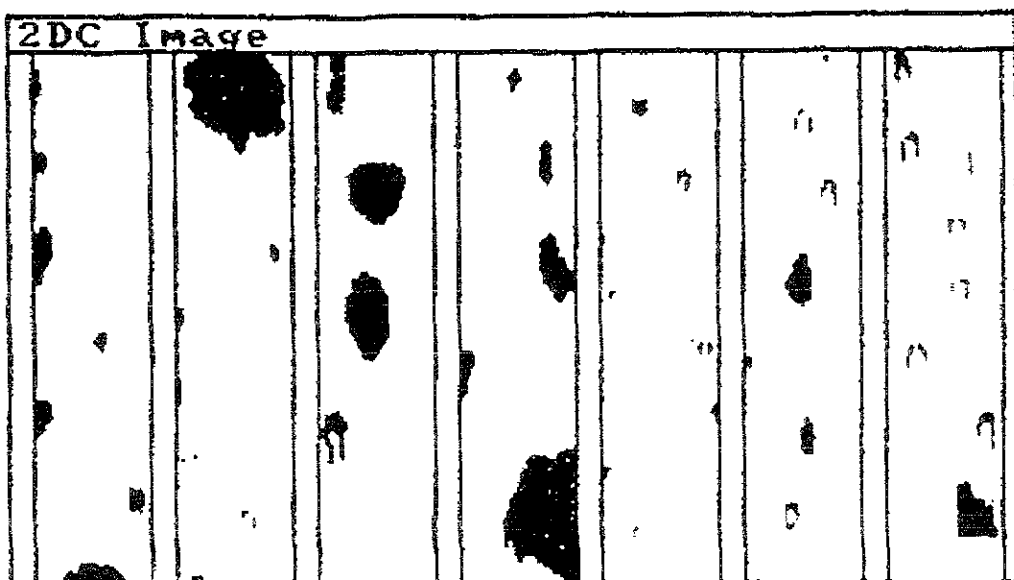


Figura IV.9.- Imagen del medidor 2D para gotitas de nube proporcionada por el DAS del avión (cortesía del NCAR).



#### IV.3.3.2.- Interpretación de datos

El tiempo de respuesta electrónico del 2D impone algunas limitaciones sobre el tamaño mínimo detectable. Los bordes de las partículas algunas veces serán perdidos y las partículas en el límite inferior del rango de tamaño pueden pasar sin ser detectados cuando la velocidad de la partícula a través del rayo excede la respuesta del sensor. La velocidad de  $100 \text{ ms}^{-1}$  impone un tamaño menor que 30-40  $\mu\text{m}$  en el 2D ya que a esta velocidad partículas más grandes son arrastradas y deformadas e incluso divididas en varias partículas.

El 2D es un instrumento para mostrar partículas, no es un sensor de contenido de agua líquida. Los 2Ds son útiles para capturar la mayor cantidad de información sobre una partícula a partir de su sombra; sin embargo, si se desea conocer el contenido de agua que corresponde a las partículas de hielo, se pueden hacer algunas consideraciones con respecto a la fase, recubrimiento y densidad de la partícula; pudiéndose producir errores de consideración en la estimación del contenido de agua líquida (Haggerty y Baumgardner, 1997).

#### IV.3.4.-El sensor de contenido de agua líquida (LWC)

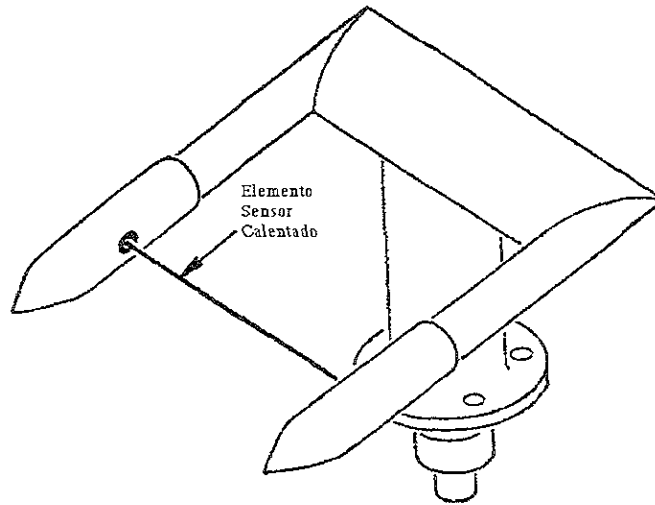
Un instrumento para la medición del contenido de agua líquida es el *PMS/CSIRO (hot wire "King" probe)* instrumento comercializado por *Particle Measuring Systems*; el cual mide la cantidad de agua líquida para un volumen dado de aire en una nube. Es usado para el estudio de procesos microfísicos en la nube y en estudios de congelamiento.

##### IV.3.4.1.- Principios de operación

El medidor de agua líquida de hilo caliente (*Hot Wire Liquid Water Probe*), modelo PMS/CSIRO, opera bajo el principio siguiente: la cantidad de agua líquida puede calcularse a partir de las mediciones de la cantidad de calor utilizado para evaporarla. Un cilindro caliente es expuesto a la corriente de aire e intercepta las gotitas que pasan a través de él. Los circuitos electrónicos mantienen a este sensor a una temperatura constante de aproximadamente 130 grados centígrados y monitorea la potencia requerida para regular la temperatura de las gotitas evaporadas. La potencia está relacionada directamente con la cantidad de calor tomado por la convección del calor de vaporización. El calor convectivo perdido es conocido empíricamente y varía con la velocidad del aire, temperatura y presión (ver figura IV.10.)



**Figura IV.10.-** Diagrama esquemático del medidor de agua líquida de hilo caliente PMS/CSIRO (Hot Wire Liquid Water Probe), (Haggerty y Baumgardner, 1997).



#### IV.3.4.2.- Especificaciones

El rango de medición va de 0.05 a 3.0 g/m<sup>3</sup>, con una precisión de  $\pm 15\%$ . La salida primaria es la potencia consumida en watts para mantener el sensor de alambre caliente a una temperatura constante. Como salida derivada se tiene al contenido de agua líquida que describe la masa de agua de las gotitas de nube dada en gramos por metro cúbico.

#### IV.3.4.3.- Interpretación de datos

El PMS/CSIRO está limitado en sus mediciones por la eficiencia de colección de pequeñas gotas de nube y por el tiempo de vaporización en grandes gotas. El cable caliente tiene un diámetro aproximado a los 2 mm y gotitas de agua pequeñas, menores que 10 micrómetros, no se impactarán con el 100% de eficiencia ya que estas siguen el flujo de aire alrededor del sensor. Estas pérdidas representan un 5 % para gotitas de 10  $\mu\text{m}$ ; pero son más grandes que el 20% para diámetros menores a 5  $\mu\text{m}$ . Esto normalmente no es un problema, puesto que la mayor fracción de masa de agua está representada por gotitas de tamaños mayores a 10  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, en el desarrollo de la nube, cerca de la base de la nube donde las gotitas son todavía pequeñas, o en las etapas de la nube donde el ascenso y evaporación están ocurriendo, la subestimación del contenido de agua puede ser significativa.

En sitios de gotas de nube grandes (mayores de 30 - 40  $\mu\text{m}$  de diámetro) se empieza a subestimar el agua líquida como resultado de la evaporación incompleta ya que estas gotas de nube se impactan y son llevadas por la corriente de aire antes de que calor en cantidad suficiente haya sido transferido para vaporizarlas (Haggerty y Baumgardner, 1997).

#### IV.3.5.- El contador de Núcleos de Condensación

La concentración de aerosoles activos como núcleos de condensación de nube (CCN) influye de manera importante en la formación y evolución de las nubes a través del proceso de nucleación heterogénea (Hudson, 1983). Se sabe además que ciertos contaminantes atmosféricos producidos por el hombre contribuyen a aumentar el número de dichos aerosoles; modificando la climatología de una determinada región (Huff y Changnon, 1986).

Así en los experimentos de estimulación de lluvia se utiliza un contador de núcleos de condensación montado en la aeronave. Esta vuela en los alrededores de la tormenta de interés para determinar la cantidad de núcleos de condensación existentes en el aire que alimenta a la tormenta

Un contador de núcleos de condensación de nube es el diseñado por TSI, Inc., Modelo 3760 el cual mide el número o concentración de partículas con un diámetro mayor a 0.01 micrómetros.

##### *IV.3.5.1.- Principios de funcionamiento*

En el contador TSI CN, se hace que las partículas crezcan hasta un tamaño detectable; el crecimiento se da por la condensación en su superficie de butanol. Se utiliza en la detección un dispositivo óptico. El flujo muestra se conduce a un depósito que contiene alcohol en algo así como una esponja con lo que se tiene saturado de vapor de butanol. La muestra es entonces enfriada dentro de un tubo de condensación, donde el vapor se supersatura y condensa sobre las partículas. Después que las partículas han crecido, se pasan a través del detector óptico de diodo-láser con el que se cuentan. Ya que todas las partículas han crecido aproximadamente al mismo tamaño en la condensación el contador de núcleos de condensación no proporciona la concentración por tamaños de las partículas (mucho menos indica algo sobre su constitución química).

Diferentes usuarios han hecho modificaciones o adiciones al contador de núcleos de condensación básico. Por ejemplo se le han agregado filtros para el vapor de butanol, bombas de vacío, medidores de flujo, escape externo (external exhaust port) (Haggerty y Baumgardner, 1997). En especial este tipo de instrumentos es considerado por el NCAR como en etapa de desarrollo.

**Figura IV.11.-** *Cabina del avión con instrumentación de física de nubes rentado por el NCAR y utilizado en el proyecto PARC, durante una maniobra de sembrado.*



#### IV.3.6.- Medidor de la temperatura del punto de rocío

La medición estándar de humedad se ejecuta usando la técnica del espejo enfriado para mediciones de la temperatura del punto de rocío. Este sistema combina una buena exactitud y una respuesta adecuada para las mediciones de humedad con la capacidad de proveer lecturas continuas sobre un amplio rango de condiciones del medio ambiente (Haggerty y Baumgardner, 1997).

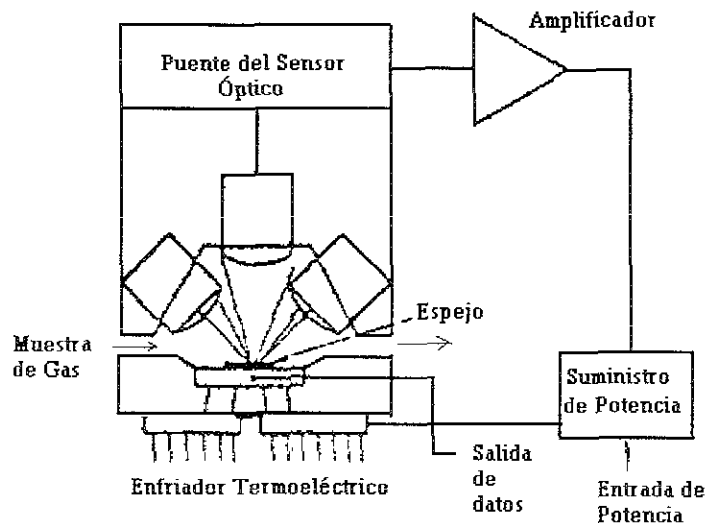
##### IV.3.6.1.- Principios de funcionamiento

El higrómetro EG&G modelo 137, tiene un sistema con el que la temperatura de una superficie reflejante (un espejo metálico) se disminuye hasta que se alcanza la saturación del vapor de agua presentando condensación en su superficie, siendo la temperatura en ese momento la temperatura del punto de rocío. El control de temperatura requiere un sensor embebido inmediatamente atrás de la superficie y un mecanismo para calentar y enfriar el espejo (con una bomba de calor miniaturizada). La detección del instante de condensación requiere de un emisor de luz y de uno o dos detectores de luz, que detecten el momento en que el espejo deja de reflejar unidireccionalmente el haz de luz que incide sobre él. La figura IV.12 ilustra el sistema termoeléctrico para la medición del punto de rocío.

Aunque en apariencia se trata de un método directo, existen factores que obligan a una calibración empírica:

- Posibles diferencias de temperatura entre el sensor y la superficie del espejo.
- El mecanismo de control de temperatura requiere conocer la rapidez de cambio de la humedad (que es lo que mide el instrumento) y la temperatura ambiente.
- Muy sensible a contaminantes solubles en agua sobre la superficie del espejo.
- Requiere limpieza del espejo con agua de características conocidas e invariantes.
- A bajas temperaturas la condensación puede ser de agua o de cristales de hielo, teniendo que utilizarse diferentes expresiones pero es difícil detectar en forma automática cuál es el caso (no tan importante en México).

**Figura IV.12.-** Diagrama esquemático del sistema de espejo enfriado para la determinación de la temperatura del punto de rocío (Haggerty y Baumgardner, 1997).



## IV.4. Navegación GPS

La navegación electrónica es el sistema más importante y avanzado de navegación en la actualidad, que usa la radio y el equipo electrónico. Se encuentra entre estos el sistema Navstar GPS de EUA y el antiguo sistema de satélites militares Glonass de la antigua Unión Soviética que también están disponibles para uso civil.

### IV.4.1.- Posición y dirección sobre la superficie de la tierra

Los problemas básicos de la navegación aérea implican la determinación de su posición y dirección y la medida de la velocidad, la distancia y el tiempo en el desplazamiento desde un punto a otro. El Sistema global de posicionamiento, conocido también como GPS, es un sistema de navegación basado en un sistema de radio espacial. Consta de 21 satélites que proporcionan posiciones precisas en tres dimensiones, velocidad y tiempo, las 24 horas del día, en cualquier parte del mundo y en todas las condiciones climáticas. Al no haber comunicación bidireccional entre usuario y satélites, GPS puede dar servicio a un número ilimitado de usuarios

### IV.4.2.- Historia y desarrollo

Dirigido por el departamento de Defensa de Estados Unidos, el sistema global de posición Navstar apareció en 1973 para reducir los problemas en la navegación. Al ser un sistema que supera las limitaciones de la mayoría de los sistemas de navegación existentes, GPS consiguió gran aceptación entre la mayoría de los usuarios. Desde los primeros satélites se ha probado con éxito en las aplicaciones de navegación habituales. Como puede accederse a sus funciones de forma asequible con equipos pequeños y baratos, GPS ha fomentado muchas aplicaciones nuevas.

### IV.4.3.- Características

El sistema global de posición (GPS) está disponible en dos formas básicas: SPS, iniciales de *Standard Positioning Service* (servicio de posicionamiento estandar o normal) y PPS, iniciales de *Precise Positioning Service* (servicio de posicionamiento preciso). SPS proporciona la posición horizontal precisa dentro de los 100 m de la posición real. La precisión horizontal de PPS es a los 20 m de la posición real. A los usuarios autorizados, generalmente militares de Estados Unidos y sus aliados, el PPS también proporciona mayor resistencia a la saturación e inmunidad a las señales engañosas.

Las técnicas de mejora como el GPS diferencial (DGPS) y el uso de frecuencia portadora permiten a los usuarios de DGPS alcanzar hasta 3 m de precisión horizontal. Los investigadores fueron los primeros en usar portadoras para calcular posiciones con una precisión de 1 cm. Todos los usuarios tienen a su disponibilidad SPS, DGPS y técnicas portadoras.

#### IV.4.4.- Aplicaciones en los experimentos de estimulación de lluvia

Formando parte de la instrumentación del avión se tiene un receptor de señales del GPS como parte del sistema de localización. El aeroplano instrumentado para estudios de microfísica de nubes y equipado para la colocación de los químicos estimulantes cuenta con estos receptores multicanales a fin de que varios satélites puedan ser rastreados simultáneamente sin interrupción. Un receptor multicanales admite cada segundo actualizaciones sin pérdida de datos dentro de una situación altamente dinámica. Con una alta exactitud son recibidos los datos de efemérides (datos de la rotación de los satélites en torno a la Tierra) y datos de reloj y demás datos que los satélites envían y que el sistema de recepción de abordaje utiliza para calcular la ubicación de los satélites y realizar los ajustes necesarios para precisar las posiciones y derivar de manera tridimensional la posición del avión y su velocidad con respecto al suelo (vector absoluto de velocidad) y en combinación con el sensor de velocidad relativa del viento permite establecer el vector absoluto de la velocidad del viento. El GPS es manejado por el Departamento de Defensa de E.U, el cual por razones de seguridad nacional, tiene deliberadamente degradado el sistema por la adición de errores en los datos de reloj y efemérides. La precisión resultante es de 100 metros en la horizontal y 140 metros en la vertical (tres desviaciones estándar) correspondiendo la señal al servicio de posición oficial SPS (*Standard Positioning Service*).

Los datos proporcionados por la instrumentación del avión son manejados por un sistema de adquisición de datos computarizado (DAS, data acquisition system). Se cuenta además con un sistema de telemetría de enlace (Data Radio DR) con el que se pueden enviar datos (y voz) manejados por el DAS a estaciones receptoras en tierra que pueden desplegar la información en tiempo real. Entre esta información se encuentra la información ya procesada del GPS; lo que permite conocer la ubicación del avión en el centro de operaciones en todo momento y desplegarla en un mapa por computadora sobre el mapa de ecos de radar.

La exactitud con la que se determina la posición del avión es suficiente para definir y diferenciar las tormentas que son tratadas de las que no son tratadas con los químicos estimulantes y relacionar la posición del avión con respecto a los datos proporcionados por el radar meteorológico. Sin los datos de GPS sería imposible determinar dónde se encuentra el avión sembrando o midiendo variables microfísicas de la atmósfera en relación con la posición de las tormentas detectadas por el radar.

## IV.5- El ejemplo del PARC

### IV.5.1.- Introducción

La instrumentación utilizada en el "Proyecto para el Aumento de Precipitación en Coahuila, PARC, responde a los requerimientos de cada una de las áreas en que se divide el proyecto. Este proyecto tiene como primer objetivo el definir la factibilidad técnica de utilizar una tecnología de sembrado de nubes con sales higroscópicas. El PARC se ha venido desarrollando desde los años de 1996, 1997 y 1998, su conclusión debió haberse realizado en el año de 1999. Por razones financieras, el último año de esta fase ha quedado pospuesto.

Los componentes básicas del experimento para los años 1996, 1997 y 1998 son:

- a) Sistema de sondeos verticales de la atmósfera, para lo cual se cuenta con el instrumental de la estación móvil de radio sondeo (CLASS Van).
- b) El sistema formado por el radar y el programa TITAN; el radar con capacidad de barrido volumétrico.
- c) Avión con capacidad para realizar el sembrado en la base de la nube e instrumentada para estudios de microfísica de nubes, mediciones de temperatura, presión, GPS, etc.
- d) Medición de variables que definen el estado del tiempo atmosférico al nivel de la superficie del suelo con estaciones meteorológicas automáticas y estaciones pluviográficas.

El aparato experimental montado por el NCAR no incluía ninguna provisión para mediciones de precipitación pluvial en superficie por lo que el IMTA propuso complementar el experimento y proporcionar una red de estaciones pluviográficas, quedando esta área bajo responsabilidad del IMTA (ver sección IV.1).

La infraestructura enumerada ha permitido el estudio de la precipitación, sembrado de nubes y la caracterización del tiempo atmosférico dando el mayor énfasis al estudio del sembrado de nubes con sales higroscópicas (ver figura IV-14 y 15).

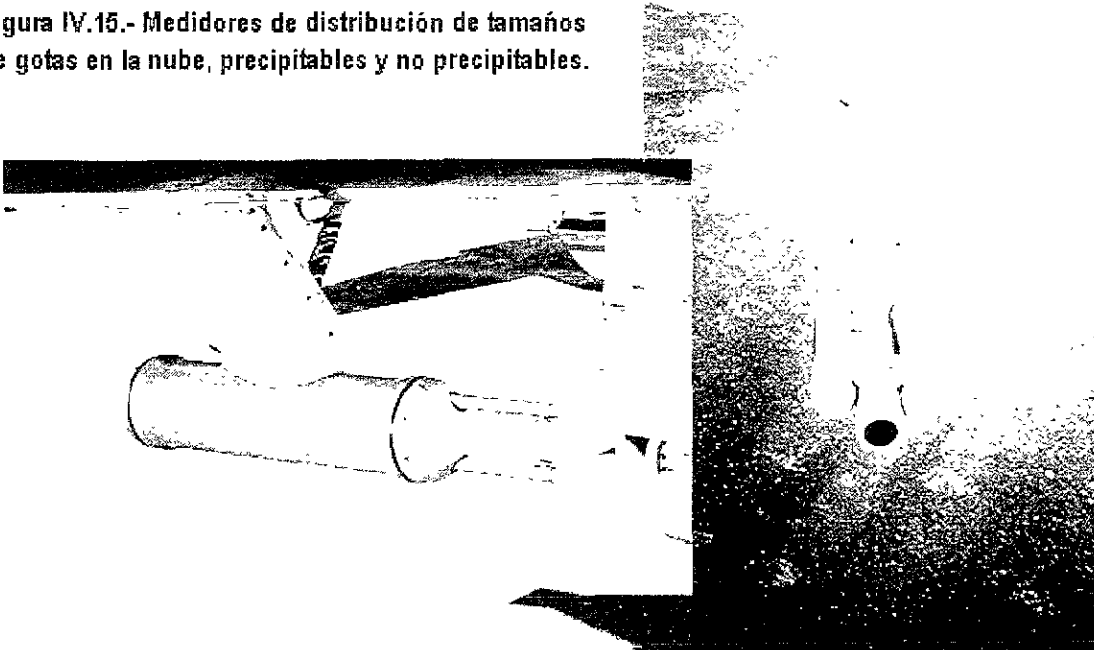
Este experimento fue diseñado por científicos del NCAR incluyendo las decisiones para determinar el método de sembrado a emplear, el tipo y cantidad de agente de sembrado a utilizar, el instrumental y equipo necesarios, las variables a medir, etc. Todo fue determinado por científicos del NCAR con base en sus experiencias previas.

El experimento está diseñado para obtener una gran cantidad de información que es proporcionada por cada uno de los cuatro componentes básicos del experimento: sondeos, radar, avión y estaciones meteorológicas y pluviográficas. Los datos son analizados, parte en tiempo real y parte posteriormente. La información se utiliza para tomar decisiones sobre las acciones inmediatas en el sembrado de nubes. Los datos y la información son guardados y respaldados en medios magnéticos para análisis y usos posteriores.

**Figura IV.14.-** Avión Piper Cheyenne II instrumentado, rentado por el NCAR a Weather Modification Incorporated.



**Figura IV.15.-** Medidores de distribución de tamaños de gotas en la nube, precipitables y no precipitables.





#### IV.5.2.- Los radiosondeos para el perfil vertical de variables atmosféricas

La radiosonda es un conjunto radiotransmisor de instrumentos transportados en la atmósfera por un globo. La utilización de estas sondas en meteorología empezó después de la 1er. Guerra Mundial, pero no se emplearon de forma regular hasta el final de la década de los años treinta.

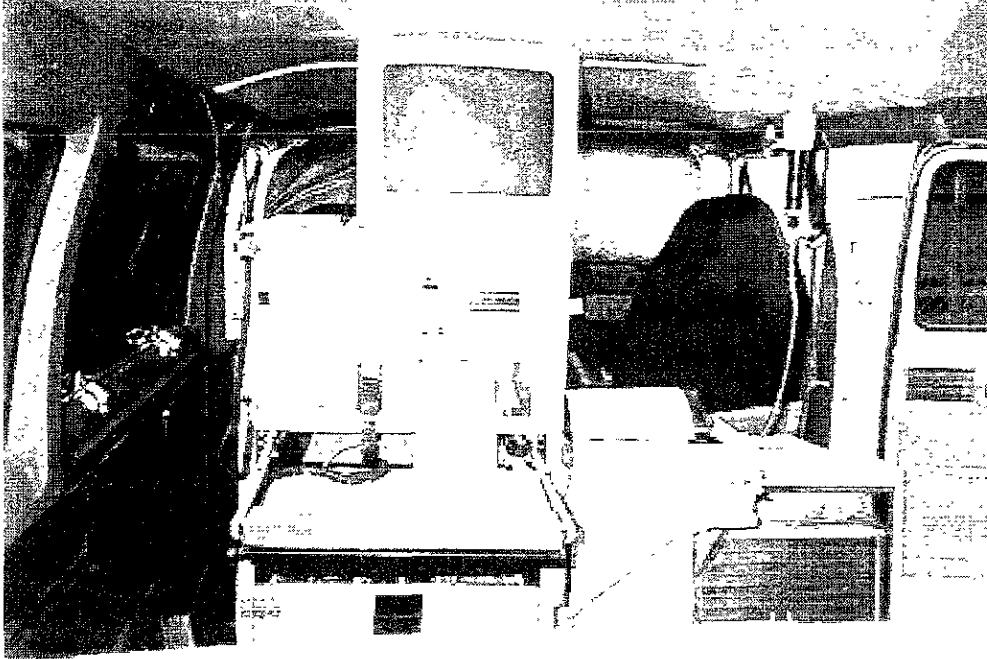
Las radiosondas son una fuente muy importante de información meteorológica, y también son útiles en investigaciones atmosféricas y de otros tipos. Acostumbran llevar una combinación compacta de sensores de temperatura, presión y humedad. Los movimientos del globo informan también sobre las direcciones de los vientos a distintas alturas. La cota máxima para el uso de las radiosondas ronda los 30,000 metros de altitud, pero pueden diseñarse globos para llegar mucho más alto coincidiendo esta altitud con su explosión.

En el PARC los sondeos se realizaron todos los días alrededor de las 15 horas Z (hora del meridiano de Greenwich). La localización del sondeo fue fija con las siguientes coordenadas: 101° 27.48'W de longitud, 26° 57.63'N de latitud y 563.9 m de altura sobre el nivel del mar.

La radiosonda utilizada en el PARC tiene la característica de ser desechable y su tamaño no sobrepasa los 15 cm. La sonda tiene como componente a un transmisor de radio que envía de manera continua las lecturas hechas por los sensores, por lo que también tiene una antena y su batería. De aquí el nombre de radiosonda. La radiosonda está enlazada a un moderno aparato de radio recepción llamado navegador LORAN, abreviatura de *long range navigation* (navegación de largo alcance). Las señales de radionavegación LORAN se reciben por la sonda y son retransmitidas a la estación de superficie, donde se hace el procesamiento de la señal. Tanto los datos de la termodinámica como las señales de radionavegación son transmitidas a la superficie separadas utilizando una banda transmisora de 403 MHz. Las dos señales son separadas y dirigidas a sus procesadores respectivos. En la actualidad existen sondas que utilizan un sistema GPS que sustituye al navegador LORAN.

La CLASS van, o sistema móvil del NCAR para realizar sondeos es un sistema CLASS (*Crosschain LORAN Atmospheric Sounding System*) dentro de una camioneta tipo van (ver figura IV.16 ). El sistema está montado dentro de la van con todo el equipo requerido para realizar el sondeo atmosférico e incluye el equipo para hacer las observaciones meteorológicas de superficie. La van brinda la opción de moverse a diferentes sitios para realizar el sondeo. Los componentes del sistema Mobile CLASS son los mismos que el estándar CLASS. Los sondeos se realizan utilizando el navegador LORAN-C y con la radiosonda suministrada por VAISALA, Inc.

**Figura IV.16.-** Interior de la CLASS Mobile van del NCAR.



La CLASS Mobile van del NCAR tiene todo lo requerido para realizar el lanzamiento de la radiosonda. El equipo de llenado del globo por gas helio está en la parte posterior de la Van. Se tiene un regulador de presión que se instala en el tanque en turno, de entre tres tanques, para suministrar el gas en la cantidad adecuada a los globos que al soltarse arrastran consigo a la radiosonda. Con un tanque de gas se hacen unos cinco lanzamientos.

#### *IV.5.2.1.- Ejecución de un radiosondeo*

La ejecución del radiosondeo CLASS puede dividirse en cuatro fases, una vez que se cuenta con todo el material y el equipo necesario. Desde que inicia el proceso hasta que termina, se da seguimiento a un algoritmo que invariablemente es el mismo para todos los lanzamientos y de cuyos pasos la computadora va indicando los detalles a cuidar y su secuencia; por lo que si no se recuerda algo, las indicaciones que aparecen en el monitor son suficientes para resolver el conflicto.

La primera fase consiste en el llenado del globo de 200 gramos de peso con 40 pies cúbicos de gas helio. Al mismo tiempo se prepara la radiosonda activando su batería y se enciende la computadora, el controlador y los procesadores. Se realiza la lectura de datos de calibración de la cinta de papel específica para el paquete de instrumentos desechable. Se ata la radiosonda al globo ya inflado.

La segunda fase consiste en la verificación de la telemetría de la sonda y de la verificación de recepción de señales de navegación. Los datos termodinámicos -

presión, temperatura y humedad - son revisados en cuanto a la rapidez y el número de señales adquiridas del LORAN; verificado lo anterior la sonda puede ser lanzada.

La tercera fase inicia en el momento en que se suelta el globo y éste asciende llevando la sonda marca VAISALA modelo RS80-15LH hasta una altura que corresponde a 50 o 60 mb de presión antes de que el globo estalle por exceso de volumen. La velocidad de ascenso es de alrededor de 4.5 m/s, subiendo el globo hasta presiones atmosféricas de 50 o 60 mb donde explota, pero para los propósitos del proyecto sólo se analiza hasta los 200 mb que corresponde a unos 12 km de altura (ver figuras II.3 y IV.7). Durante esta fase se verifica constantemente el funcionamiento correcto de todo el sistema.

La última fase inicia en el momento en que el globo llega a los 200 mb y se le indica a la computadora el fin del proceso de captación de datos de sondeo. Al terminar el sondeo se cuenta con un archivo de datos que contiene las lecturas hechas durante el sondeo de la atmósfera almacenado en el disco duro, además de una impresión de dicho archivo y la gráfica del comportamiento de algunas variables en el perfil de la atmósfera.

#### IV.5.2.2. Mediciones de la radiosonda

Para ilustrar las mediciones de la radiosonda se presenta el archivo resultante del radiosondeo conteniendo las siguientes columnas de datos ejemplificados en la tabla IV.1.

- 1) Tiempo. La primera columna pertenece al tiempo, medido en segundos y reportado en intervalos de 10 segundos y a partir de cero.
- 2) La presión Atmosférica. La unidad de presión empleada es el mb (milibar).
- 3) Temperatura del aire. Se mide en grados Celsius.
- 4) Temperatura del punto de rocío,  $T_d$  (Dewpt).
- 5) La humedad relativa(H.R.) dada en porcentaje.
- 6, 7,8,9 y 10) Medición de las características del viento y posición de la radiosonda. Los cambios de posición del globo se define- viéndolo en planta- por dos componentes de velocidad del viento ( $U_{wind}$  y  $V_{winds}$ ), además de su resultante  $W_{spd}$  las tres en m/s. También del cambio de latitud y longitud de la posición del globo se obtiene la dirección del viento en grados. Utilizando, no el dato de altura que proporciona el navegador, sino el obtenido por la medición directa de la presión por el sensor de presión de la radiosonda se obtiene el incremento en la altura en cada uno de los intervalos de tiempo de 10 segundos con lo que se calcula la velocidad media de ascensión vertical  $dZ/dt$  en m/s (columna 10).

Para la posición se tiene la latitud, longitud y altura además de calcularse la distancia radial en planta de la posición ( $R_{ng}$ ) en km, con respecto al punto donde se soltó el globo; y con lo que se calcula también el azimut  $Az$  en grados. Las últimas 6 columnas de la tabla que muestra los resultados del sondeo, corresponden al "ruido" de la señal al ser adquirida.

**Tabla IV.1.- Ejemplo de salida de datos impresos de un sondeo atmosférico. Descripción:** Se muestra el encabezado de la impresión que contiene datos como la fecha, coordenadas del punto de salida, etc inmediatamente después del encabezado de datos proporcionados por la radiosonda cada 10 segundos y los datos calculados por el sistema CLASS, cada columna inicia con un encabezado. Al final se presenta una anotación del tiempo de terminación y observaciones generales hechas por los operarios

Data Type: CLASS 10 SECOND DATA  
 Project ID: PARC98 - MONCLOVA, MEXICO (LA SONDE)  
 Launch Site Type/Site ID: MOBILE, MOV  
 Launch Location (lon, lat, alt): 101 27.48 W, 26 57.63 N, -101.458, 26.9605, 563 9  
 GMT Launch Time (y, m, d, h, m, s): 1998, 07, 02, 15:10:09  
 VAISALA RS80-15LH 0, 0, 403.275  
 NCAR T880 PROCESSOR, 10 SECONDS  
 LORAN-C, ANI-7000, 60 SECONDS  
 CAMPBELL SCIENTIFIC CR10  
 ARMANDO, NOHEMI, DWIGHT, JJ  
 System Operator/Comments:

CAUTION !!! THIS DATA SET IS UNEDITED AND HAS NOT BEEN REVIEWED FOR ACCURACY

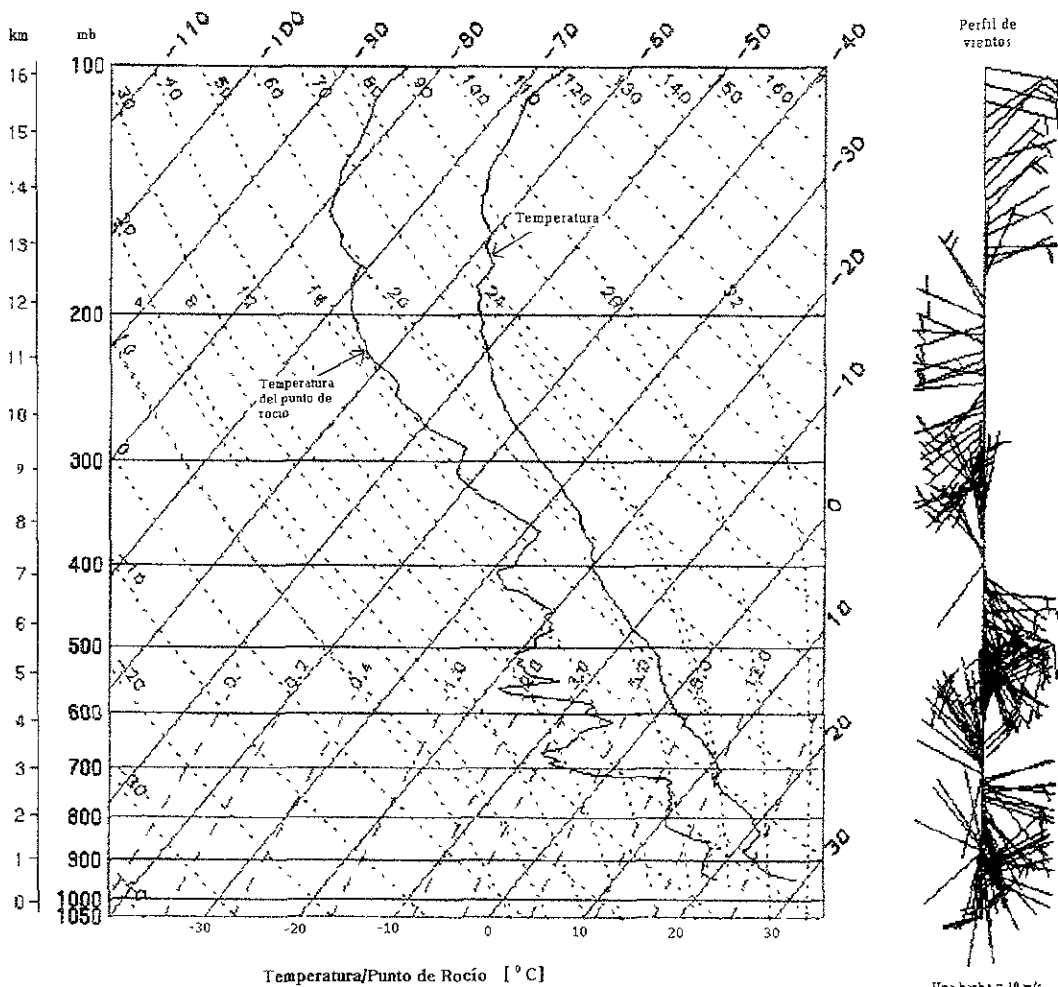
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
Time	Press	Temp	Dewpt	RH	Uwind	Wwind	Wspd	Dir	dz	Lon	Lat	Rng	Az	Alt	mb	%	Qh	Qu	Qv	Qw
Sec	mb	°C	°C	%	m/s	m/s	m/s	deg	m	deg	deg	km	deg	m	mb		mb	mb	mb	mb
-10.0	947.6	28.9	20.5	60.6	1.9	0.4	2.0	257.0	0.0	-101.458	26.961	0.0	0.0	563.9	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0	77.0
10.0	944.4	26.5	16.3	53.6	0.1	2.5	2.5	181.9	3.0	-101.458	26.960	0.0	143.7	594.1	0.1	0.1	0.3	0.8	1.3	1.5
20.0	939.2	25.9	17.0	58.2	-0.5	1.4	1.5	158.9	4.9	-101.458	26.960	0.0	125.4	642.9	0.1	0.1	0.4	0.5	0.9	1.0
30.0	932.0	25.3	17.1	60.3	-0.8	0.7	1.1	129.4	6.8	-101.458	26.961	0.0	303.8	710.6	1.1	0.1	0.2	0.4	0.7	1.2
40.0	926.4	24.5	16.9	62.3	-1.3	-1.3	1.9	44.3	5.3	-101.458	26.961	0.0	317.7	763.6	0.7	0.1	0.4	0.2	0.8	0.8
170.0	848.5	18.9	12.6	66.8	-4.2	2.2	4.8	117.4	5.2	-101.452	27.007	5.2	6.1	1525.5	1.0	0.1	0.4	0.1	0.3	0.3
180.0	844.3	18.8	11.8	63.5	-5.3	1.7	5.6	107.8	4.3	-101.453	27.007	5.2	5.7	1568.5	1.6	0.1	0.9	0.2	0.4	0.4
190.0	838.6	18.7	10.3	57.8	-5.7	2.2	6.1	111.3	5.8	-101.450	27.031	7.8	5.5	1626.5	1.3	0.1	0.3	0.1	0.3	0.3
200.0	834.2	18.6	9.7	56.1	-5.8	2.3	6.3	111.4	4.5	-101.450	27.036	8.4	5.5	1671.5	1.1	0.1	0.4	0.1	0.2	0.3
210.0	829.1	18.7	8.8	52.4	-6.0	1.9	6.3	107.6	5.3	-101.445	27.061	11.3	6.7	1724.4	0.7	0.1	0.4	0.1	0.3	0.3
220.0	827.0	19.0	7.5	47.3	-5.8	2.0	6.1	109.0	2.2	-101.448	27.059	11.1	5.3	1746.1	88.0	88.0	88.0	0.1	0.3	0.3
230.0	820.5	18.7	7.2	47.2	-5.5	3.5	6.6	122.4	6.8	-101.449	27.059	11.0	4.6	1814.4	0.3	0.1	0.2	0.1	0.3	0.3
240.0	816.8	18.5	6.7	46.2	-6.1	3.9	7.2	122.3	3.9	-101.450	27.059	11.0	4.2	1853.4	0.3	0.0	0.1	0.1	0.4	0.4
250.0	827.2	20.3	6.2	39.7	-6.7	3.3	7.5	116.3	-1.0	-101.451	27.059	11.0	3.8	1743.8	47.9	6.4	15.0	0.1	0.3	0.3

FLIGHT TERMINATION TIME 17 20.02  
 Number of raw MET points: 2003  
 Number of raw NAV points: 2800  
 Operator comments:

Los datos resultantes de un sondeo también se presentan en forma gráfica conocida como termo diagrama (ver figura IV.17). Una interpretación de la presentación gráfica de los datos del sondeo permite conocer las condiciones de temperatura, humedad y velocidad del viento en el perfil vertical de la atmósfera y hacer un pronóstico rápido sobre las condiciones para que se desarrollen ese día tormentas convectivas. En la interpretación se observa la separación entre el trazo que representa el perfil de temperatura y el trazo que representa la temperatura del punto de rocío, entre más próximos estén estos trazos uno del otro, una parcela de aire al ascender se satura más rápido de vapor de agua y viceversa. La condición más propicia es cuando los trazos de temperatura del aire y temperatura del punto de rocío se encuentran próximos uno del otro desde el nivel del suelo hasta los 200 mb y existe inestabilidad atmosférica.

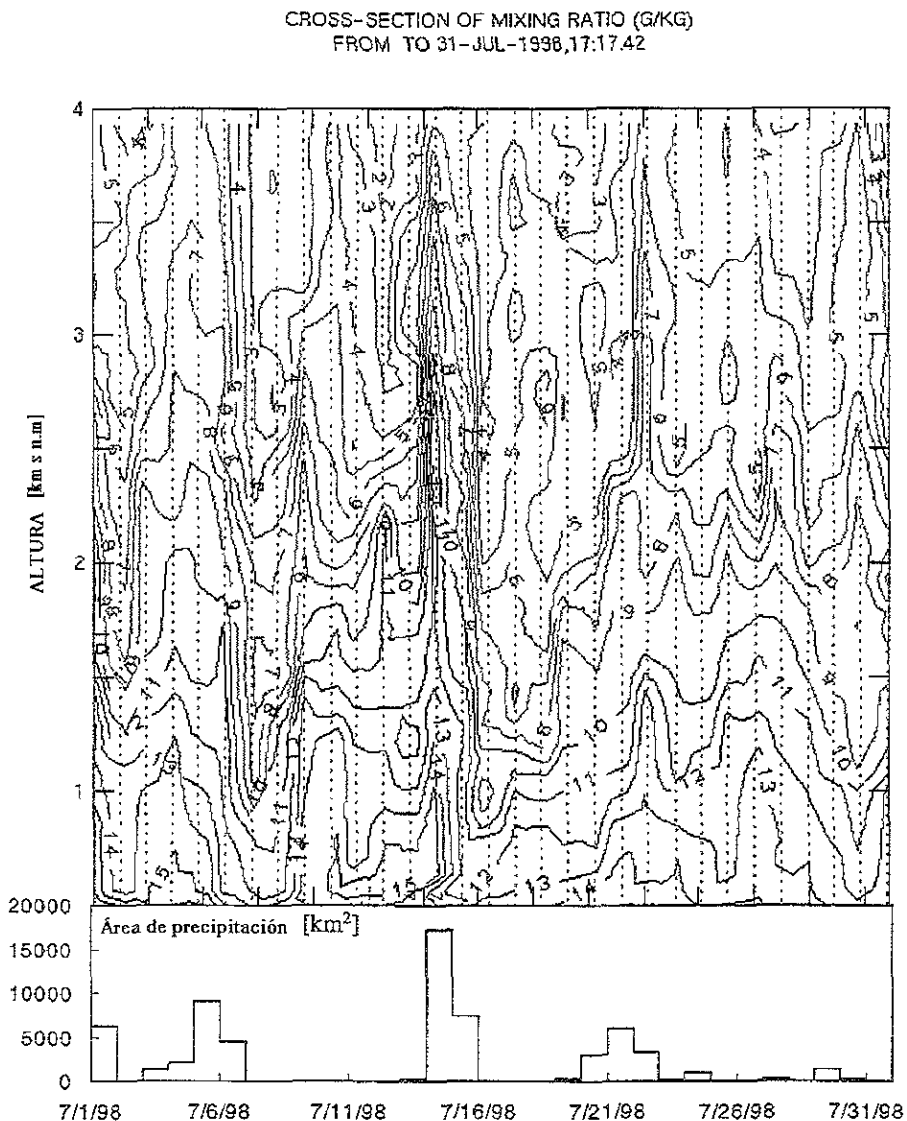
**Figura IV.17.-** Ejemplo de datos de sondeo de temperatura, temperatura del punto de rocío y viento en función de la altura (o en escala logarítmica de presión a la izquierda) (NCAR, 1999).

SITE: MOBILE, MOV TIME: 21-JUL-1998,14:54:40 (721) TEMP/WINDS DEWPOINT



Un análisis posterior de todos los sondeos permite definir cuales son las mejores condiciones potenciales para el sembrado. En la figura IV.18 se combinan los resultados del sondeo de varios días para formar un diagrama de la razón de mezcla (MR), que es una forma de expresar el contenido de vapor de agua definida como la masa de vapor por unidad de masa de aire seco; en este caso el vapor de agua se representa en gramos y el kilogramo es la unidad de masa para el aire seco. El área con precipitación, estimada con radar, es totalizada para cada día y graficada constituyendo un indicador que representa la actividad de tormenta (NCAR, 1999).

**Figura IV.18.-** Diagrama de la razón de mezcla (MR) en perfil en función del tiempo - altura para julio de 1998 mostrando la historia de la humedad en el nivel bajo (debajo de 4 Km). Las líneas de igual razón de mezcla (mixing ratio) están a cada 1 g/kg y los días de sondeo se denotan por líneas de guiones verticales. El área de precipitación calculada de los datos de radar colectados en un radio de 120 km desde Monclova, está graficada más abajo mostrando los días lluviosos (NCAR, 1999).



## IV.5.3.- El sistema "radar – programa TITAN"

El radar utilizado es de marca Enterprise. Sus componentes son el transmisor de pulsos, la guía de onda para los pulsos transmitidos y los recibidos, el receptor y las computadoras, además de la antena y la torre. Las características son las siguientes: banda C, antena de 2.4 m de diámetro, potencia pico 250 kw, ancho del haz de 1.6°, 5.16 cm de longitud de onda, alcance 112.5 km, control automático, movimiento rotatorio, frecuencia de 256 pulsos por segundo. Con estos datos la ecuación 4.1 toma la siguiente forma

$$P_r = \frac{C * Z}{r^2} \quad \text{ec. (4.3)}$$

con

$$C=122.61 \text{ dB (ó } 1.8239 \times 10^{12}\text{)}$$

donde:

$P_r$ : potencia recibida por el radar

$r$ : distancia del radar al blanco

$C$ : Factor que aglomera diversas características del radar (como ganancia de la antena, apertura del haz, longitud de onda, longitud del pulso, entre otros y algunas constantes numéricas relacionadas con pérdidas y que con relación a la ec. 4.1 incluye ahora a  $P_t$  o potencia transmitida por el radar y el valor de  $K$  para gotas de agua); constante para un radar dado.

El radar meteorológico proporciona una gran cantidad de información en tiempo y espacio sobre las tormentas; para aprovechar esta información se hace uso de las computadoras. El programa o paquete de software TITAN es un programa de cómputo que permite analizar los datos que proporciona el radar, de manera automática, sobre las tormentas que quedan en su campo visual (Dixon, 1993). La figura II.4 es un ejemplo de un cálculo rutinario que se puede hacer con TITAN en la que se observa un mapa de precipitación acumulada observada por el radar en la región de Monclova para el mes de Julio de 1998.

A intervalos de aproximadamente cada cuatro minutos, el radar proporciona información de reflectividad de los hidrometeoros que quedan dentro del volumen atmosférico de cobertura del radar, este volumen corresponde a un rango de variación en el ángulo de elevación de 1.5° a 48.4° el cual se cubre en 16 cambios de ángulo o inclinaciones al completar cada uno de los 16 giros de 360° en azimut, dando lugar al producto volumétrico que se analiza con TITAN.

#### *IV.5.3.1.- Capacidades de TITAN*

Las capacidades de TITAN se desprenden directamente de la información suministrada por el radar sobre el comportamiento de la reflectividad de los hidrometeoros ubicados dentro de su campo visual. Este comportamiento de la reflectividad atmosférica es obtenido por el receptor del radar en forma analógica y convertido en señal digital por el sistema de adquisición de datos del radar, de esta manera quedan accesibles los datos para un programa como TITAN en un arreglo en forma de matriz. Así TITAN hace operaciones matemáticas con sentido físico sobre estas matrices de datos de reflectividad.

Por ejemplo, se puede transformar la reflectividad a intensidad de lluvia aplicando una relación de transformación (ver sección V.4.1) de reflectividad a intensidad de lluvia para después (integrando en el tiempo) obtener la lámina acumulada. Por la importancia que tiene la capacidad de TITAN para definir el espacio atmosférico en el que se desarrolla una tormenta esta capacidad se trata en el apartado siguiente. Las capacidades útiles para la elección de tormentas candidatas a ser sembradas se abordan en la sección IV.5.3.3. Como resultado de un procesamiento posterior de la información de TITAN, el NCAR obtuvo información de climatología de tormentas, que es muy útil en la toma de decisiones durante el proceso de planeación de la explotación del recurso nubes, estos resultados se presentan en la sección IV.5.3.4.

El programa TITAN cuenta con una interfaz gráfica con la que se puede visualizar líneas y puntos base que representan a carreteras y parteaguas principales, algunos nombres y anillos concéntricos con la indicación de su radio. Se indica la fecha y hora Z. Proporciona una vista en planta del área de interés donde las tormentas, de acuerdo a su intensidad, están coloreadas con los colores correspondientes de una escala de intensidad-color; además están enmarcadas con una línea cerrada. También tiene la capacidad de mostrar la trayectoria del avión representada por una línea continua que, lógicamente, tiene su inicio en la ubicación del aeropuerto. Cada una de las capacidades del programa TITAN queda representada por un comando con el que se puede activar o desactivar. Así se tiene comando de ayuda, zoom, para mostrar la trayectoria de las tormentas, para activar un pronóstico, etc. Cuenta con ventanas gráficas que muestran en función del tiempo el volumen, área, índice de lluvia y masa de lluvia de la tormenta seleccionada, lo que permite ver si la tormenta está en desarrollo o en decaimiento y permite hacer comparaciones entre tormentas.

#### *IV.5.3.2.- Definición de Tormentas*

Se define como tormenta a una región continua del espacio atmosférico en la que se presenta una reflectividad mínima prefijada, que para el caso de las tormentas tomadas como unidad experimental en el PARC se considera de 30 dBZ (NCAR, 1997). Considerando este umbral TITAN define la isosuperficie de 30 dBZ que encierra a cada una de las tormentas que quedan dentro de su campo visual



realizando un análisis de correlación entre un instante y otro para identificar cada tormenta y poder seguir su evolución en el tiempo. Para evitar el ruido por ecos falsos se considera también un volumen mínimo para la región continua del espacio con reflectividad por encima del umbral prefijado cuyo valor es del orden de  $50 \text{ Km}^3$ . La información obtenida de la tormenta, así definida, es almacenada y se tiene de esta manera la historia del comportamiento de los hidrometeoros.

El pronóstico que hace TITAN se basa en la historia reciente de la tormenta. En el pronóstico se utilizan las siguientes propiedades de la tormenta: centro de reflectividad medida, volumen, masa, tamaño y forma del área. Las hipótesis de pronóstico son: una tormenta tiende a moverse a lo largo de una recta, la tormenta crece o se disipa siguiendo una tendencia lineal, ocurren partidas al azar de nuevas células tormentosas vinculadas a una ya existente.

#### IV.5.3.3.- Selección de tormentas candidatas a ser sembradas.

El pronóstico a corto plazo hecho con TITAN es especialmente útil en la selección de tormentas candidatas a ser sembradas. En el proceso de selección se toma en cuenta la tasa a la que crecen propiedades de la tormenta como: cantidad de agua en forma de gotas que contiene una tormenta, altura del tope, volumen, área, intensidad y velocidad de desplazamiento. El historial de estos parámetros junto con la predicción hecha a corto plazo de su comportamiento es analizada para tomar la decisión de sembrar o no sembrar una tormenta dada. Si las propiedades de la tormenta han entrado en decaimiento, no se siembra. Dos características de la tormenta que son muy importantes para decidir si es un buen candidato para ser sembrada y que el radar no puede determinar son: la evaluación de una base de nube bien formada y la presencia de fuertes corrientes ascendentes en esta. La evaluación de la base y de las corrientes ascendentes es una tarea muy importante que realiza el personal a bordo del avión. En resumen, una vez que en el radar se ha localizado una posible candidata a la siembra, los puntos clave para la decisión final de si es considerada un buen candidato son:

- *La reflectividad de la tormenta.* La tormenta debe tener una reflectividad mínima de 30 dBZ. La distribución vertical de la reflectividad debe ser tal que las máximas reflectividades se encuentren arriba y las mínimas en la parte baja de la nube. Si las máximas reflectividades se encontraran abajo esto indicaría que en la nube ya se encuentra lloviendo y por lo tanto no es adecuado sembrar.
- *La altura del tope de la nube.* Si la nube tiene un desarrollo vertical en donde su tope se encuentre por debajo de los 8000m, no se siembra aún presentándose alta reflectividad y área. La razón es que su bajo desarrollo vertical no permite el ascenso y mezclado adecuado de las sales higroscópicas.
- *Historia de la tormenta:* si al analizar la historia de la tormenta sus características van en ascenso esta tormenta es una buena candidata; si están en descenso o decaimiento no es una buena candidata. En este punto es muy importante tomar en cuenta la predicción, ya que si el avión

está lejos de la tormenta y al considerar el tiempo que transcurre para que éste llegue, las condiciones pudieran ser inadecuadas.

- *Proyección del área de la tormenta.* Si la proyección en planta del área de la tormenta es muy pequeña, aún teniendo alta reflectividad no es adecuado sembrar. Se hace necesario un análisis de la velocidad con que aumenta el área, la masa y el volumen para poder predecir si en el futuro inmediato pudiera transformarse en un buen candidato.
- *Localización de la tormenta.* La localización de la tormenta es de importancia desde el punto de vista de la seguridad de las maniobras del avión. Si la nube se encuentra en una zona con cimas de montañas que se encuentran inmersas o muy próximas a la base de la nube no se siembra, ya que en estas condiciones resulta peligroso hacerlo. Si la nube se encuentra fuera del perímetro determinado para la campaña; tampoco se siembra.

Otros criterios de selección de tormentas candidatas aplicados al experimento de sembrado en Monclova son: la tormenta debe estar lo suficientemente alejada de la influencia de otras; es decir debe estar aislada. Además la tormenta debe estar localizada, al momento de decisión, entre el área determinada por los círculos de radio de 10 km y de radio 90 km con centro en el radar. La tormenta durante su evolución no debe salirse de esta área. Lo anterior es comunicado por radio al personal que se encuentra en el avión, los cuales complementan la información con lo que ellos mismos observan directamente al llegar a la nube, además de la información que los instrumentos de abordo les proporcionan. Todo lo anterior es interpretado para tomar la decisión de siembra.

Por parte del NCAR, en el procesamiento de los datos de radar por TITAN en el PARC se asume la relación de Marshall-Palmer,  $z = 200R^{1.6}$  para los cálculos que requieren la transformación de reflectividad a lluvia.

A estas alturas es claro que sin la información del radar es imposible documentar la estructura a gran escala de lo ocurrido en la atmósfera.

#### IV.5.3.4.- *Climatología de tormentas obtenida a partir del procesamiento que hace TITAN.*

Enseguida se presenta la climatología de tormentas para remarcar la utilidad de la herramienta radar y programa TITAN. Las características básicas de tormenta son estimadas a partir de la historia de tormenta proporcionada por TITAN. El NCAR obtuvo la distribución de algunas características básicas de las tormentas de la campaña 1996; éstas se muestran en las figuras IV-19 a la IV-23. La figura IV-19 muestra la distribución de los valores de duración de las tormentas. Esta distribución muestra que la mayoría de las tormentas (alrededor del 70%) duró menos de una hora. Unas pocas tormentas duraron tres horas o más. La figura IV-20 muestra la distribución de la altura media del tope de tormenta. La mayoría de las tormentas tuvieron toques que estuvieron entre alturas de 7 a 9 Km, aunque algunas tormentas

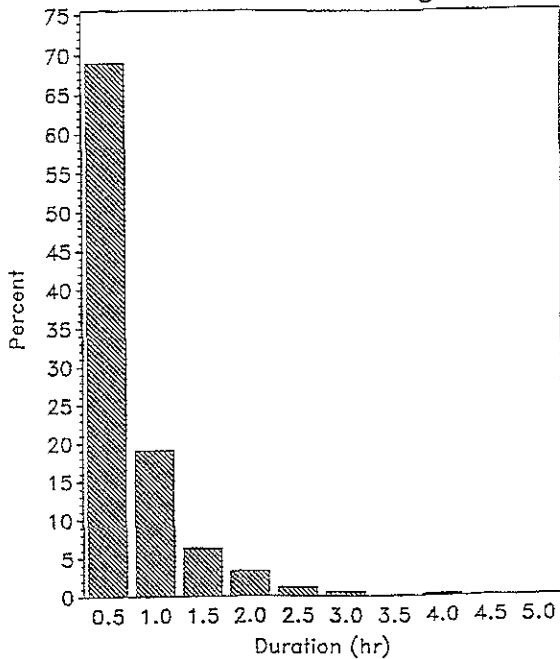
alcanzaron alturas de 15 km. La distribución de máxima reflectividad (máximo temporal espacial), una medida de la fuerza de la tormenta, se muestra en la figura IV-21. Las barras verticales en esta figura indican que la mayoría de las tormentas alcanzaron reflectividades inferiores a 50 dBZ. Más del 15% de las tormentas tuvieron valores de máxima reflectividad mayores a 60 dBZ, mientras que alrededor del 10 % de las tormentas nunca fueron más fuertes que 40 dBZ. Como ya se explicó antes, TITAN procesa la información proporcionada por el producto de radar volumétrico, define tormentas y obtiene de estas series de tiempo de los parámetros que ilustran su comportamiento. Del análisis posterior de la información que proporciona TITAN sobre los parámetros de tormenta se obtienen las siguientes figuras que pueden ser consideradas como climatología de tormenta y que ilustran el potencial de la herramienta radar-TITAN. Remarcando que esto es posible porque se tiene definido para todas las tormentas.

La figura IV-22 muestra el porcentaje de tormentas que se movieron a diferente velocidad. La representación gráfica en esta figura indica que alrededor de 6% de las tormentas se movieron muy lentamente, a menos de 1 metro por segundo. Alrededor del 77% de las tormentas se movieron a una velocidad media de aproximadamente 3 m/s o menos; pero una fracción de alrededor de 16% se movió a velocidades de 4 m/s o más rápido. Unas pocas tuvieron velocidades de 9 m/s o más. Las frecuencias de categorías diferentes de volumen de lluvia asociado con la tormenta están representadas en la figura IV-23. Debido a que algunos de los valores del volumen de lluvia para la tormenta individual son muy grandes, los valores de la figura IV-23 se presentan en escala logarítmica (base 10) a los valores de volumen en metros cúbicos (NCAR, 1999).

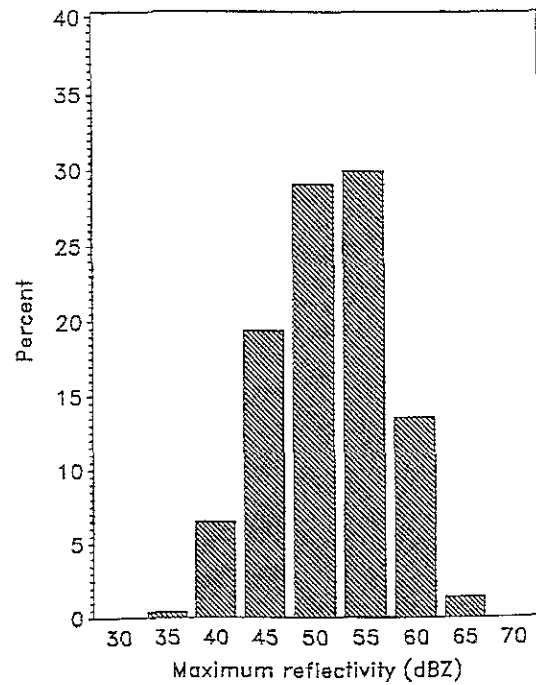
En la tabla IV-2 se presenta un resumen de la distribución de varias de las características de las tormentas. Debido a que las características generalmente no tienen una distribución normal, se utiliza el percentil 10 y el 90 para representar la distribución. La mediana representa la mitad de la distribución, con la mitad de los valores más pequeños y la mitad de valores más grandes que la mediana. El percentil 10 y el 90 representan a los valores extremos más bajos y más altos, con el 10 por ciento de los valores siendo más pequeños que la cantidad correspondiente al percentil 10 y con el 10 por ciento de los valores o datos siendo más grandes que la cantidad que corresponde al percentil 90 (NCAR, 1999).

El NCAR ha encontrado que varias de las características de las tormentas están relacionadas unas con otras. Por ejemplo, un análisis de correlación indica que el volumen de lluvia está fuertemente relacionado con la duración de la tormenta, área, masa y volumen; la máxima reflectividad; y la altura del tope de tormenta. Por ejemplo, cuando el área de la tormenta se incrementa, (no sorprende) el volumen de lluvia también se incrementa. El área de la tormenta y la máxima reflectividad están fuertemente relacionadas con la velocidad de la tormenta, y aquí ya no es tan simple establecer la relación de causalidad. Cuando la velocidad de la tormenta se incrementa, el área de la tormenta también se incrementa pero la reflectividad máxima decrece (NCAR, 1999).

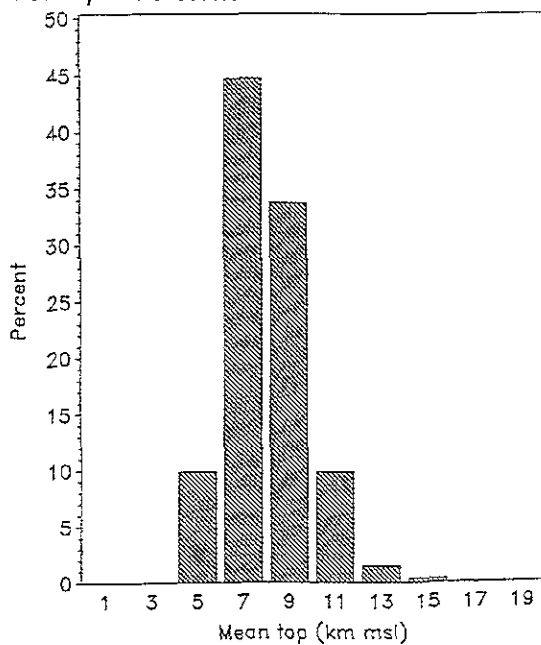
**Figura IV.19.-** Distribución del tiempo de vida de la tormenta (duración) observada por el radar del 31 de agosto al 31 de octubre de 1996. Las barras verticales indican el porcentaje de tormentas que tuvieron el valor de duración dentro de cada categoría.



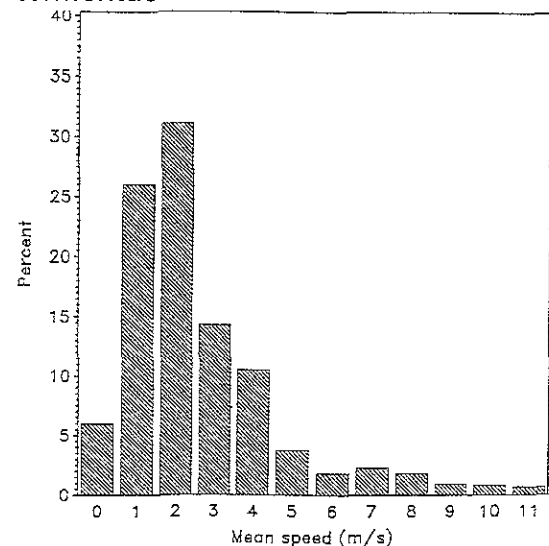
**Figura IV.21.-** Lo mismo que la figura IV.19, excepto para la máxima reflectividad del radar.



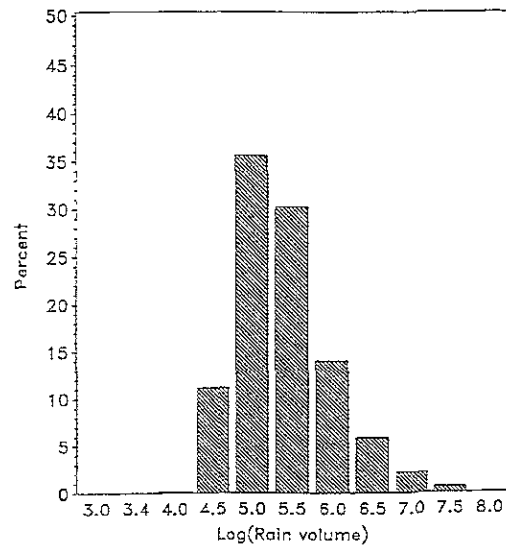
**Figura IV.20.-** Lo mismo que la figura IV.19, excepto para las alturas medias del tope de tormenta.



**Figura IV.22.-** Lo mismo que la figura IV.19, excepto para las velocidades medias de desplazamiento de las tormentas.



**Figura IV.23.-** Lo mismo que la figura IV.19, excepto para el volumen de lluvia. El volumen de lluvia es mostrado sobre una escala logarítmica base 10 (p. e., un valor de 5.0 representa  $10^5$  metros cúbicos de lluvia).



**Tabla IV.2.-** Resumen de características de tormenta con base en el análisis de TITAN. Los datos corresponden al periodo del 28 de agosto al 31 de octubre, y representa 1085 tormentas que por lo menos duraron lo de 4 barridos volumétricos del radar (aproximadamente 20 minutos en 96), (NCAR, 1999).

Característica rastreada de la tormenta	Percentil 10	Mediana	percentil 90
Duración (hr)	0.3	0.6	1.4
Volumen Medio ( $\text{km}^3$ )	26.2	53.5	180.4
Volumen máximo ( $\text{km}^3$ )	35.9	86.5	356.1
Area media ( $\text{km}^2$ )	13.4	23.2	58.7
Area máxima ( $\text{km}^2$ )	18.0	34.9	106.9
Altura media del tope de tormenta (km)	6.0	7.8	10.2
Altura máxima del tope de tormenta (km)	6.1	9.1	12.9
Reflectividad media (dBZ)	35.0	38.6	41.4
Máxima reflectividad (dBZ)	43.5	51.5	58.5
Volumen de lluvia ( $\text{m}^3$ )	52,842	197,597	1,501,110

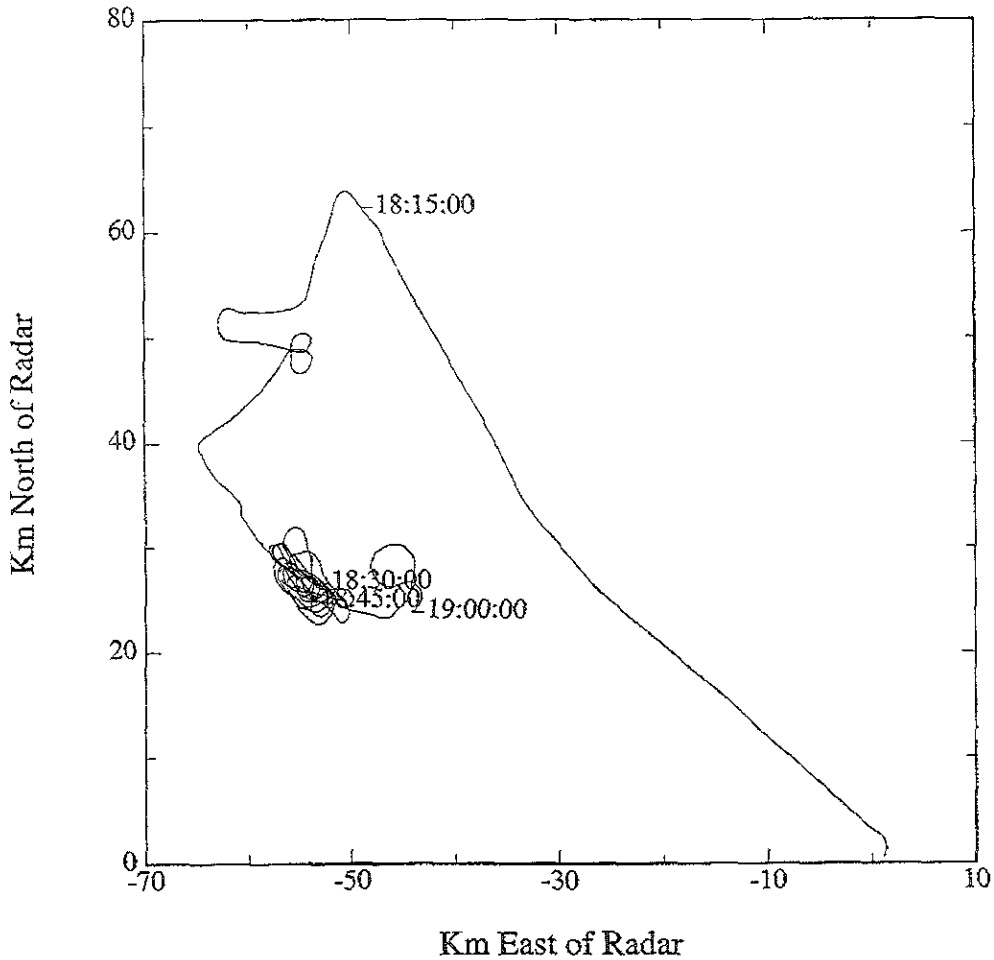
La información presentada en la tabla puede interpretarse como tres puntos de la distribución de la variable con los que se intenta dar una idea de su comportamiento.

Los resultados del experimento de sembrado aleatorio en términos de reflectividad y duración de las tormentas (datos provenientes del sistema radar-TITAN) obtenidos en series de tiempo, se presentan en el capítulo VI.

#### IV.5.4.- El avión

Por medio del avión se hace la dispersión de sales higroscópicas (ver sección II.4.1) en la base de la nube. El avión empleado en el PARC es un Piper Cheyenne (PA-31T) bimotor, que cuenta con protección anticongelante en sus alas y equipo que le permite volar en condiciones de baja visibilidad, con número de registro N300HP; el cual puede llevar montadas en las alas hasta 24 bengalas de sales higroscópicas para sembrar con ellas las nubes. El avión está también equipado para hacer mediciones de microfísica de nubes y atmosféricas; por lo que se hacen, también, penetraciones en las nubes con el objeto de hacer reconocimientos, muestreos, estudios o evaluar los efectos de la siembra. Las mediciones de la aeronave incluyen temperatura, temperatura del punto de rocío, presión, velocidad del aire, velocidad con respecto al suelo, localización GPS (latitud y longitud), cabeceo y velocidad vertical del aire. El 21 de julio de 1998 fue un muy buen día para el experimento, puesto que hubo 3 casos sembrados y un caso sin sembrar. Se ejemplifican las mediciones en la figura IV.25 y maniobras resultantes durante la primera hora de vuelo en la figura IV.24, tiempo en el que se sembró la tormenta caso número 65 utilizando 12 bengalas. La figura IV.24 muestra el despegue y las maniobras del avión en la tormenta próxima a las coordenadas (-55, 25). La figura IV-25 muestra diagramas de series de tiempo de altitud (cuadro superior), temperatura y razón de mezcla (cuadro medio) y concentración de gotas de nube (cuadro inferior). El diagrama de altitud muestra el ascenso inicial y subsecuente descenso a la base de la nube (temperatura alrededor de 15(C). Las mediciones de gotas de nube fueron hechas en una pequeña nube y ocasionalmente durante las maniobras de sembrado. En este caso no se hicieron mediciones de núcleos de condensación de nube; las que sí se tomaron en el segundo caso (para ese día) de sembrado (NCAR, 1999).

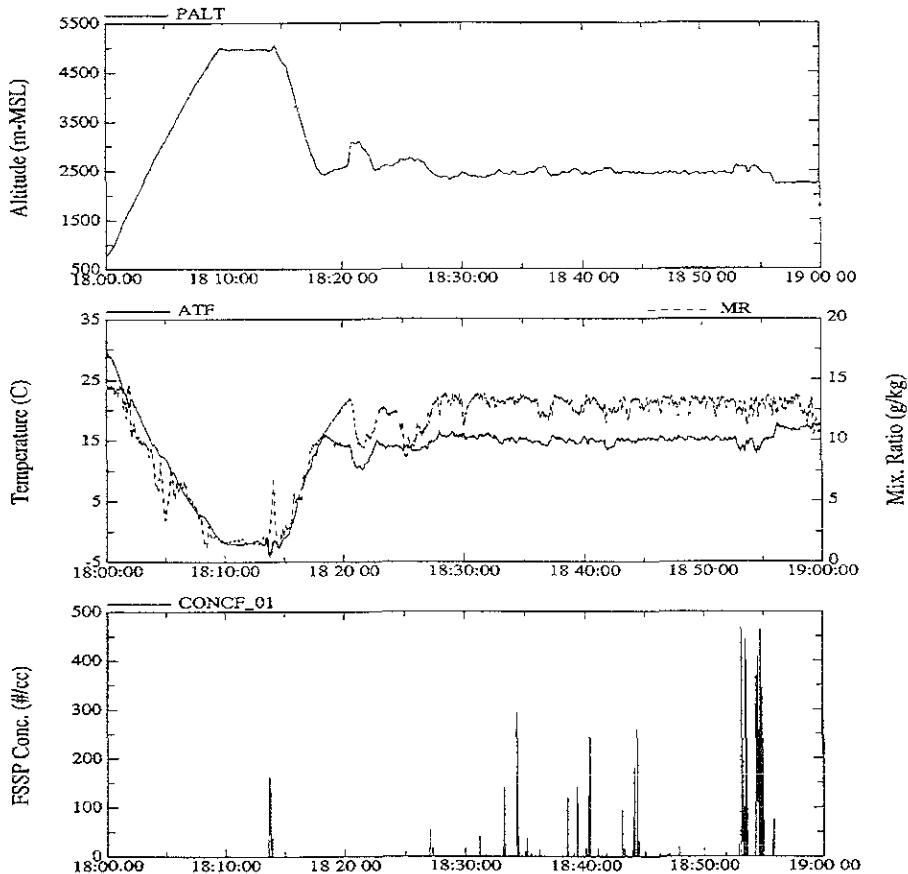
**Figura IV.24.-** Una hora de seguimiento de la aeronave (18:00-19:00) el 21/07/1998. Las distancias están en kilómetros al norte y al este del aeropuerto de Monclova (localización del radar). El seguimiento se marcó cada 15 minutos (NCAR, 1999).



La instrumentación de física de nubes incluye mediciones de gotas de nube con el espectrómetro de gotas de nube (de Particle Measuring System, FSSP), aerosoles (PMS ASASP) (ver sección IV.3.2), núcleos de condensación de nube o CCN (University of Wyoming CCNC-100) (ver sección IV.3.5), y contenido de agua líquida en la nube (PMS "King" prueba del hilo caliente) (ver sección IV.3.4). Con los instrumentos del avión es posible obtener evidencia de respuestas físicas claves de las nubes en relación con el sembrado. Se realizan mediciones antes, durante y después del sembrado.

**Figura IV.25.-** Diagramas de series de tiempo de datos de la aeronave en una hora (18:00-19:00) mostrando altitud (cuadro superior), temperatura (línea sólida) y razón de mezcla (guiones) en el diagrama medio, y concentración de gotas de nube en el diagrama inferior, (NCAR, 1999).

PARC-98 21 July 1998



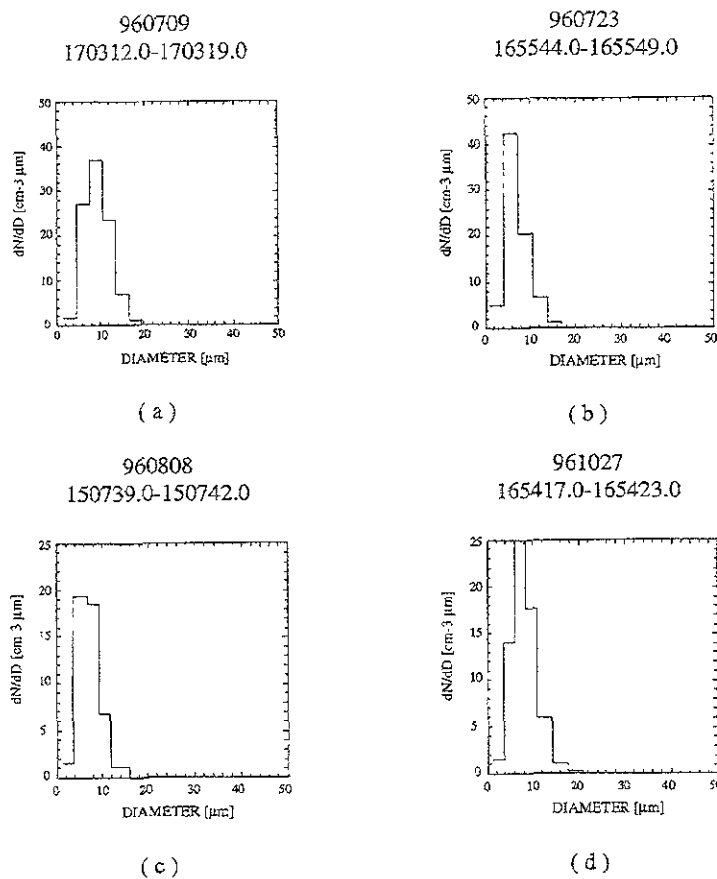
#### IV.5.4.1.- El espectro de gota de nube (FSSP)

Dado que la naturaleza del espectro de gota de nube en la base (de la nube) en gran parte determina la facilidad con que la nube puede desarrollar precipitación a través de la coalescencia (procesos de lluvia cálida) es muy importante definir el espectro de gota de nube natural. Las mediciones de gotas de nube permitieron definir en el PARC que el espectro de gotas de nube es característico de condiciones continentales indicando el potencial para una respuesta positiva al sembrado higroscópico. El espectro de gotas de nube en Coahuila muestra una alta concentración sobre un estrecho rango de tamaños. En estas nubes los procesos de lluvia cálida se desarrollan tan lentamente que la nube se disipa antes de una formación de lluvia importante o esta desarrolla a temperaturas más frías que el punto de congelación y produce precipitación vía la fase de hielo. En las mediciones del verano de 1996 se observa que varía escasamente la concentración de gotas de



nube, alrededor de un factor de 2.5; aproximadamente de  $100-300 \text{ cm}^{-3}$  (indica que hay de 100 a 300 gotas por centímetro cúbico). El rango de tamaños de gota es muy estrecho, típico de condiciones continentales como ya se mencionó, con media de tamaños menor que  $10 \mu\text{m}$  y un máximo tamaño menor que  $20 \mu\text{m}$ . La figura IV-26 muestra ejemplos del espectro de gota de nube para cuatro diferentes días (NCAR, 1997 a).

**Figura IV.26.-** Espectro promedio de gota de nube (tamaño contra concentración) para la base de nube en (a) 9 de julio 1996, (b) 23 de julio de 1996, (c) 8 de agosto de 1996, (d) 27 de octubre de 1996. Note el cambio en la escala de concentración entre (a)-(b) y (c)-(d). (NCAR, 1997).



Para las muestras de 1997, los tamaños medios del espectro de gota (típicamente de  $8$  a  $9 \mu\text{m}$ ) fueron un poco más pequeños que en 1996; probablemente por que las muestras se tomaron más cerca de la base de nube en 1997. La concentración se encuentra entre  $110$  y  $540 \text{ cm}^{-3}$  con valores típicos alrededor de  $350 \text{ cm}^{-3}$ ; con tamaños que no son más grandes que  $20$  micrómetros. Varios días de agosto tuvieron una baja concentración con valores de  $110$  a  $150 \text{ cm}^{-3}$  (NCAR, 1997b).

#### IV.5.4.2.- Núcleos de condensación de nube

El éxito del sembrado higroscópico depende, como ya se ha mencionado, de la modificación inicial del espectro de gotas de nube, el cual es determinado por el espectro de CCN y la fuerza de la corriente ascendente en la nube. Se tuvo como objetivo de las mediciones de CCN en 1997 y 1998 determinar la variabilidad de su espectro natural que puede influenciar la decisión de sembrado.

La instrumentación usada para los años 97 y 98 fue la misma; pero se calibró de diferente manera por lo que las comparaciones de mediciones entre los dos años se deben tomar con reserva, pero las observaciones sobre las variaciones dentro de un mismo año son válidas. En la determinación del espectro de CCN se usaron tres o cuatro valores de supersaturación en el PARC. Después los datos se representan por una relación de la forma  $N = C S^k$ , donde C y k son constantes y N (concentración de CCN) y S (supersaturación) son medidos. La tabla IV-3, muestra valores de C y k, para varios espectros. Hay claras diferencias entre los dos años; pero todos los valores son representativos del espectro de CCN continental (NCAR, 1999).

**Tabla IV.3.- Parámetros del espectro de CCN (de  $N = CS^k$ ), (NCAR, 1999).**

FECHA	C	k
970725	1565	1.166
970726	1561	1.329
970805	2188	1.260
	1981	0.791
970815	1863	0.961
980610	905	0.387
	1054	0.434
980611	679	0.901
980617	919	0.816
980704	379	0.357
	579	0.450
980715	471	0.866
980721	869	0.744
980809	553	0.575
980814	960	0.639
980822	423	0.536
	463	0.619
	643	0.681
980831	494	1.029

#### IV.5.5.- Mediciones al nivel de la superficie

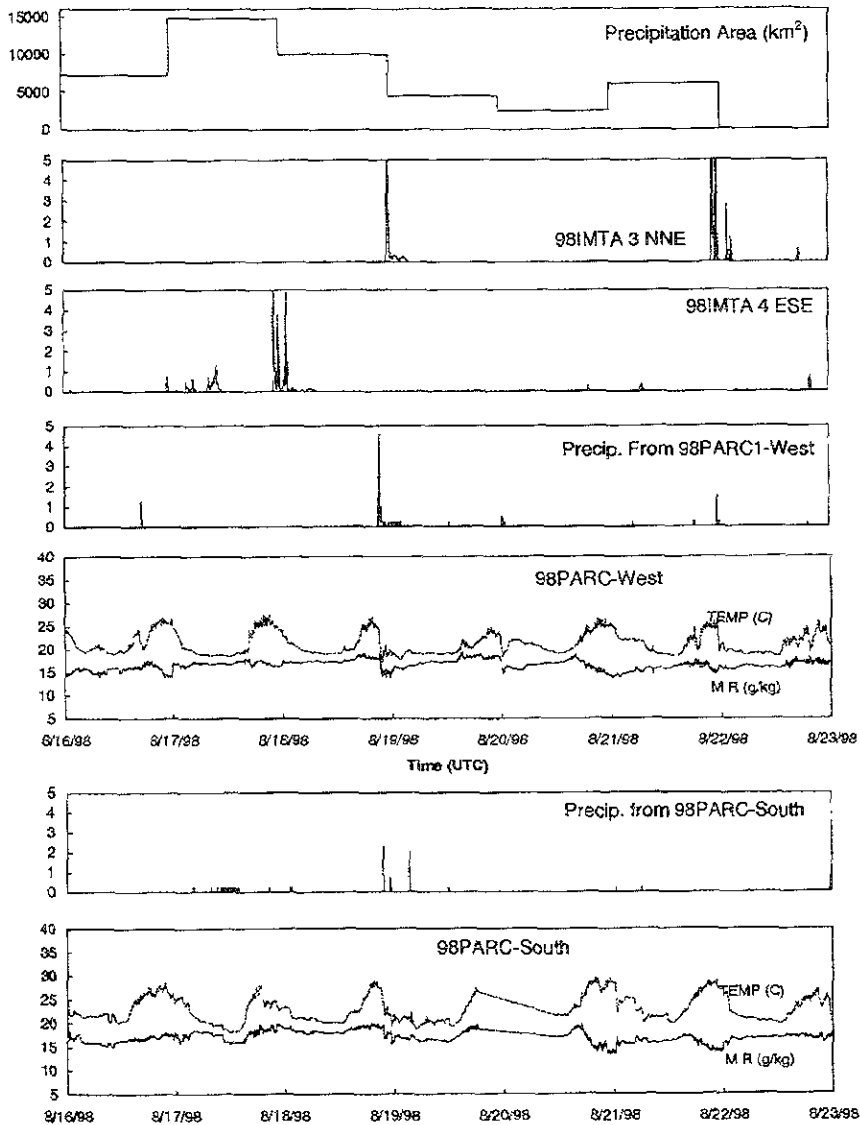
##### *IV.5.5.1.- Estaciones meteorológicas automáticas*

En 1997 el NCAR instaló dos estaciones meteorológicas automáticas Cambell Scientific modelo CM10. En 1998 se instalaron cuatro estaciones meteorológicas automáticas, dos por parte del IMTA y dos por parte del NCAR. Las dos estaciones del NCAR midieron presión, temperatura, humedad, viento y lluvia cada dos minutos bajando los datos por medio de la comunicación por radio. Las dos estaciones del IMTA midiendo los mismos parámetros además de temperatura del suelo y radiación solar. Los datos de las estaciones del IMTA eran grabados cada 10 minutos y recabados por medio de visitas al sitio cada catorce días.

Las estaciones se instalaron en los alrededores de Monclova con el propósito de buscar relaciones con otras variables medidas en el experimento y para definir las mejores condiciones de superficie para la convección (p.e. circulación de mesoescala, flujos de humedad, etc.). Estos estudios son de mucha importancia, puesto que, de encontrarse relaciones que sean útiles entre estos datos de superficie y otros al nivel de las nubes, resulta fácilmente implementable una red de estaciones meteorológicas automáticas. Hasta el momento el NCAR no ha presentado resultados de análisis en el sentido planteado; pero es posible acceder a los datos crudos.

Se elaboró un diagrama semanal de datos de las cuatro estaciones meteorológicas, la figura IV-27 es un ejemplo de estos diagramas. En estos se puede observar como queda representada la actividad de tormenta por los diagramas de precipitación de las cuatro estaciones meteorológicas automáticas y al mismo tiempo comparar con el indicador de actividad de tormenta proporcionado por el radar a través del área de precipitación se puede ver también el comportamiento de la temperatura y de la razón de mezcla en superficie. En los días representados, el 16 de agosto no hubo casos experimentales, el 17 de agosto hubo un caso no sembrado y dos sembrados, el 18 de agosto hubo un caso no sembrado y del 19 al 23 de agosto no hubo casos experimentales.

**Figura IV.27.-** Datos de las estaciones meteorológicas en series de tiempo para una semana, junto con el área de precipitación derivada de los datos de radar (cuadro superior). El segundo cuadro muestra los datos de lluvia de la estación 98IMTA3; el tercer cuadro muestra la lluvia de la estación 98IMTA4; el cuarto panel muestra datos de lluvia para la estación 98PARC1-West, el quinto panel muestra temperatura y razón de mezcla para la estación 98PARC1-West y los últimos dos cuadros son datos para la estación 98PARC2-South (lluvia, temperatura y razón de mezcla) (NCAR, 1999).



#### IV.5.5.2.- Red pluviográfica

La red pluviográfica estuvo compuesta por 5 pluviógrafos digitales de balancín en 1996, 10 pluviógrafos en 1997 y 43 pluviógrafos en 1998. Esta red fue instalada por el IMTA y el autor, estudiante de la DEPMI, UNAM, Campus Morelos.

La instalación de la red pluviográfica tiene su justificación en el hecho de que la interpretación directa de los resultados del PARC, dados en términos de reflectividad, pueden ser utilizados sólo para establecer resultados de efectividad del método de sembrado en términos relativos (en %, por ejemplo) y no en términos absolutos (en incremento de  $m^3$  de agua precipitada). Y si se utiliza la relación de Marshall-Palmer, para la transformación de reflectividad a lluvia, esta pudiera estar subestimando o sobrestimando severamente la intensidad de lluvia y por lo tanto el volumen precipitado de agua. Puesto que se quiere obtener una relación de transformación de reflectividad a intensidad de lluvia que permita obtener la cantidad de lluvia efectivamente precipitada sobre el suelo (sin tener la incertidumbre de estar subestimando o sobrestimando el volumen total precipitado), se requiere implementar la instalación de una red pluviográfica. Con los datos de intensidad de lluvia a nivel del suelo y con los datos de reflectividad medida sobre los pluviógrafos se realiza la calibración hidrológica del radar. Lo anterior permite estimar, aunque sea en orden de magnitud, el costo del metro cúbico de agua obtenido como resultado de la estimulación de lluvia. En el capítulo V, se hace una descripción de la red pluviográfica montada durante el año 98, y dada la importancia de la obtención de los datos y de su procesamiento, en este mismo capítulo se hace una descripción detallada de estos procesos.

## **CAPÍTULO V**

### **La calibración de un radar meteorológico**

- V.1.- Introducción**
- V.2.- La calibración electrónica de un radar meteorológico**
- V.3.- Dependencias de la reflectividad proporcionada por el radar**
- V.4.- Calibración hidrológica de un radar**
- V.5.- La calibración hidrológica del radar en el PARC**
- V.6.- Resultados de la calibración obtenida**

## CAPITULO V

### La calibración de un radar meteorológico

#### V.1.- Introducción

Para que los productos de un radar meteorológico puedan ser usados en aplicaciones hidrológicas se requiere que el radar esté calibrado electrónicamente y que se disponga de la(s) relación(es) de transformación de reflectividad a intensidad de lluvia. Al proceso por el que se obtiene dichas relaciones se le conoce como calibración hidrológica del radar.

A diferencia de la calibración electrónica, la calibración hidrológica es un proceso que requiere de un largo tiempo de observación de las tormentas en cuanto a su comportamiento y características. Dado que dichas características varían en un amplio rango, su descripción necesariamente se hará en términos estadísticos por lo que se requiere de coleccionar y analizar una gran cantidad de datos, lo que origina un costo mayor que la calibración electrónica. Por lo que para obtener una relación de transformación de reflectividad a lluvia hay que conocer a fondo a los fenómenos hidrometeorológicos del área que es cubierta por el radar; el grado de conocimiento de las tormentas se verá reflejado en la efectividad de la(s) relación(es) utilizada(s).

Sin el estudio y caracterización de tormentas completas no es posible planear el aprovechamiento de los hidrometeoros vistos como un recurso a explotar.

#### V.2.- La calibración electrónica de un radar meteorológico

La calibración electrónica del radar es el conjunto de procedimientos que permiten obtener la relación correcta entre la potencia enviada por el radar y la potencia recibida resultado de la reflexión del haz de ondas electromagnéticas por los hidrometeoros. Para un radar dado la mayoría de los parámetros de la ecuación de radar (ver la ec. 4.1 ) tienen un sólo valor el cual únicamente hay que verificar con una única medición. La potencia recibida por el contrario tiene un amplio rango de valores posibles que habrá que calibrar. Por lo que de manera práctica la calibración electrónica consiste en asegurar que la potencia que llega al receptor sea la que quede finalmente registrada, en forma digital, en los productos de radar.

Es muy importante que en un principio se defina la posición en planta del radar y de la información desplegada. El ajuste de la posición en planta se hace con base en la posición del sol. La antena del radar se dirige hacia el sol, por lo que el radar capta las ondas electromagnéticas de éste. Las ondas electromagnéticas del sol vistas en el radar son un camino seguro de orientación sobre los cuatro puntos cardinales. Si las direcciones en que el radar envía el haz de ondas son registradas de manera

incorrecta, las tormentas o sistemas nubosos presentarán un despliegue en pantalla incorrecto y los productos digitales así guardados tendrán una ubicación geográfica errónea. Dada la importancia que en el procesamiento tiene la correcta ubicación de los pluviógrafos con respecto a los píxeles del producto de radar, lo anterior afectaría la calidad de los datos para obtener las relaciones z-R.

La calibración, siendo el proceso con el cual una posición sobre la escala de un instrumento es identificada con la magnitud de la señal actuando en este instrumento, es aplicada para convertir una señal de entrada en una señal diferente de salida. Como tal una calibración deberá contemplar el rango entero de posibles valores de entrada y salida utilizando una función de transferencia (que para este caso es la relación entre señales de entrada y salida). El receptor del radar es usualmente el único componente de un radar que es calibrado.

Para ejecutar la calibración del receptor se utiliza un generador de señales, el cual debe ser capaz de generar señales de potencia en el rango y en la frecuencia requeridos. Éste es conectado al acoplador direccional (directional coupler), es prendido y se espera a que se caliente. La antena del radar debe ser apuntada lejos del suelo y cualquier otra posible fuente de ecos. Si es posible, es mejor hacer la calibración del receptor con el transmisor apagado. La frecuencia del generador de señales debe ser igualada a la del receptor del radar. Además hay que asegurarse de que el receptor está correctamente armonizado para la misma frecuencia que el transmisor.

El generador de señales deberá proporcionar una salida mínima que esté por debajo del poder de detección del receptor y una máxima por arriba del nivel de saturación del receptor. Se requiere tener cuidado con las potencias altas a fin de no introducir tanta potencia en el receptor que pudiera causarle daño. La señal se inyecta en la guía de onda o conducto que dirige los pulsos electromagnéticos del transmisor al foco de la antena y los pulsos recibidos de la antena al receptor. La señal inyectada dentro del receptor puede entonces ser desplegada en pantalla y/o almacenada exactamente de la misma manera como el radar almacena los datos de reflectividad de blancos hidrometeorológicos.

En los radares modernos al usar computadoras para hacer procesamiento de datos y para almacenarlos, la potencia recibida por el receptor es convertida en señal digital en alguna parte dentro del sistema. Esta conversión se realiza en un convertidor A/D (analógico a digital). Éste toma el voltaje (señal analógica) de la salida del receptor y lo convierte en un número o cantidad (señal digital). El rango de los posibles valores de salida depende del convertidor A/D usado. Los convertidores A/D comúnmente producen de  $2^8$  a  $2^{10}$  valores posibles. Para un convertidor A/D de 8 bit, el rango de cantidades posibles es de 0 a 255 ( $2^8 - 1$ ). Si tal convertidor A/D es usado con un receptor de radar que tenga un rango dinámico de 90 dB, éste puede dar una resolución de aproximadamente 0.35 dB por cuenta digital.



La resolución es el incremento más pequeño que es posible hacer en la medida de un parámetro. El rango dinámico de un receptor es la diferencia (usualmente en dB) entre la mínima potencia o señal detectable y la potencia de saturación. La potencia mínima detectable (PMD) es la potencia más pequeña que puede ser detectada por arriba del ruido producido por el mismo sistema.

El receptor del radar está diseñado para operar sobre un rango de potencia. Cuando la potencia que llega al receptor se incrementa, la señal de salida se incrementa. Sin embargo, si la potencia de entrada es incrementada por arriba de cierto nivel, el receptor se ve imposibilitado para incrementar más la señal de salida, y el receptor se dice que está saturado. No importa cuanto se incremente la señal de entrada, la de salida permanece igual.

Para obtener la calibración del receptor se requiere generar un conjunto de cantidades de salida como una función de potencias de entrada, debiendo cubrir el rango de cantidades entre PMD y la potencia de saturación. Este rango de valores se cubre generando señales de manera escalonada eligiendo pasos de 1 dB o quizás hasta de 5 dB. Los datos resultantes de calibración se interpolan con alguna ecuación para llenar los espacios entre los valores de los pasos que fueron usados. Usando la ecuación obtenida puede construirse una tabla de potencias de entrada contra todas las posibles cantidades de salida que puedan ser generadas. El tipo de ecuación que es usada en el ajuste de datos puede ser un polinomio o un ajuste lineal por tramos (Rinehart, 1991).

### **V.3.- Dependencias de la reflectividad proporcionada por el radar (con énfasis en la distribución de los tamaños de gota)**

La reflectividad de un grupo de hidrometeoros depende de factores tales como: el número y distribución del tamaño de las gotas, la forma de los elementos individuales, fase (es decir, sólido o líquido), el aspecto asimétrico de los elementos con respecto al radar y la temperatura del blanco. Por lo general, mientras más intensa sea la precipitación mayor será la reflectividad.

Una característica del radar que se relaciona directamente con la cantidad de energía retrodispersada es su longitud de onda. Un blanco meteorológico puede ser transparente para alguna longitud de onda y totalmente opaco para otra.

Una forma de abordar los factores anteriores es analizando lo que se conoce como la sección transversal retrodispersante ("back - scattering cross - section") de una gota ( $\sigma$ ). La sección transversal retrodispersante para un ensamble de partículas ( $\Sigma\sigma$ ) es definida como la superficie equivalente de un dispersor isotrópico el cual dispersa energía en todas direcciones de intensidad igual a la dispersada directamente de regreso por un determinado blanco (Hiser, 1981).

En el análisis teórico de las capacidades del radar meteorológico se asume la aproximación de Rayleigh para la sección transversal retrodispersante. Esta

simplificación considera que la longitud de onda usada por el radar debe ser más grande que 3 cm y que las partículas de precipitación no deben ser mayores a los 5 mm. Lo anterior se adecúa muy bien al tipo de radar usado en meteorología, ya que longitudes de onda de 5 cm son comunes y además para la precipitación pluvial, gotas más grandes que 5 mm son raras.

En la determinación del valor de la sección transversal retrodispersante  $\sigma$ , la forma de las partículas se asume como esférica de diámetro  $D$ , el cual es pequeño comparado con la longitud de onda  $\lambda$  de la radiación incidente.  $\sigma$  es dependiente principalmente de la constante dieléctrica del material de la partícula y de la longitud de onda  $\lambda$ .

Battan (1973), demuestra que la sección transversal retrodispersante de una única partícula es:

$$\sigma = \pi^5 |K|^2 \frac{D^6}{\lambda^4} \quad \text{ec. (V.1)}$$

donde:

$K = (m^2 - 1)/(m^2 + 2)$  y  $m$  es el índice complejo de refracción (refractive index). Con  $m = n - il$ , donde  $n$  es la parte real del índice de refracción (relacionado con el efecto de dispersión (scattering)),  $l$  es el coeficiente de absorción.

Note que si  $l=0$  entonces  $m$  es real y la partícula no absorberá únicamente dispersará. Por lo que para el propósito de detectar y medir la precipitación por radar,  $\sigma$  es proporcional a  $D^6/\lambda^4$ .

La influencia del estado físico tiene relevancia; por ejemplo entre el agua y la nieve la constante dieléctrica de la última es considerablemente menor, resultando en valores  $\sigma$  únicamente de 1/5 del valor que resulta del agua.

En el volumen explorado por el haz de energía electromagnética del radar se asume que las partículas están aleatoriamente distribuidas y que la radiación total retrodispersada (scattered back) será la suma de la contribución individual de cada partícula. Por lo que la sección transversal retrodispersante ( $\Sigma\sigma$ ) por unidad de volumen es igual a  $\Sigma\sigma = 284 \Sigma D^6/\lambda^4$  para gotas de agua y de  $\Sigma\sigma = 55 \Sigma D^6/\lambda^4$  para partículas esféricas de hielo.

Queda claro que esto es una idealización. La realidad es más compleja porque las partículas en la atmósfera no son esféricas y pueden tener una composición que no es simple. Por ejemplo los cristales de hielo pueden existir en forma de agujas, discos o estructuras más complicadas. Se puede presentar granizo que esté en su primer estado de derretimiento con el núcleo de hielo cubierto con una película de agua o varios cristales de hielo pueden unirse y formar un copo de nieve. Las gotas grandes de agua mientras caen pueden apartarse mucho de la forma esférica; pero para lluvias más intensas donde la proporción de grandes gotas disminuye en extremo el efecto de desviación de la forma esférica es probablemente despreciable.

En resumen la falta de conocimiento de los estados físicos y de las formas reales de los cristales de hielo y los copos de nieve así como de su distribución hacen imposible una estimación cuantitativa firme del eco esperado de ellos. Aunque, si las dimensiones son pequeñas comparadas con la longitud de onda, se puede obtener una buena aproximación considerando los cristales como esferas de la misma masa.

Si se puede hacer una estimación razonable de la distribución de tamaños de gotas y su cantidad entonces es posible obtener una estimación cuantitativa razonable de la potencia del eco recibido de un volumen de partículas de precipitación.

El factor de reflectividad del radar ( $z$ ), es una variable definida como la sumatoria, sobre un volumen unitario, de la sexta potencia de los diámetros de todas las partículas individuales retrodispersivas (reflejantes) que se encuentran dentro de él:

$$z = \sum_i D_i^6 \quad \text{ec. (V.2)}$$

Este factor de reflectividad es una propiedad de la lluvia que está relacionada con otras propiedades de la lluvia como el contenido de agua líquida por unidad de volumen de aire, la intensidad de lluvia, erosividad, atenuación electromagnética, etc. A su vez estas propiedades de la lluvia vienen ligadas a la manera en la que el agua líquida disponible se ha distribuido en forma de gotas de lluvia, unas más grandes y otras más pequeñas. Desde este punto de vista estudiar la lluvia es equivalente a estudiar una población de gotas, y por lo tanto caracterizar la lluvia es en el fondo determinar la fracción de gotas con un tamaño determinado. Para ello se requiere conocer el tamaño o diámetro de cada una de las gotas de la población,  $D_p$ , y establecer la función de distribución o función de densidad de probabilidad (Sempere *et al.*, 1997)

Por lo que el paso lógico siguiente, en el uso cuantitativo del radar en meteorología es encontrar la relación entre  $z$ , factor de reflectividad dado en  $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ , con  $R$  la intensidad de precipitación en milímetros por hora. Si se conoce la distribución de tamaños  $N(D)$  de una lluvia o número de gotas comprendido entre  $D$  y  $D + \Delta D$  por unidad de volumen de aire y de anchura de la clase  $\Delta D$ , entonces es posible expresar cualquier propiedad de la lluvia utilizando dicha información y todavía más se puede llegar a establecer relaciones entre las diversas propiedades de las gotas ya que todas ellas están ligadas entre sí. Se ha observado que las propiedades de la lluvia expresadas como momentos de  $N(D)$  se relacionan entre sí siguiendo leyes potenciales del tipo

$$\Omega_n = a\Omega_p^b \quad \text{ec. (V.3)}$$

donde  $\Omega_n$  y  $\Omega_p$  son los momentos de orden  $n$  y  $p$  respectivamente (Sempere *et al.*, 1997).

Para el caso del volumen de agua líquida por unidad de volumen de aire,  $W$  en  $\text{mm}^3 \text{m}^{-3}$ ,  $D$  en  $\text{cm}$ ,  $N(D)$  en  $\text{cm}^{-4}$ , se puede ver que se trata del momento de orden 3 por lo que (Sempere *et al.*, 1997).

$$W = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 N(D) dD = \frac{\pi}{6} 10^9 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} D^3 N(D) dD \quad \text{ec. (V.4)}$$

donde  $D_{\min}$  y  $D_{\max}$  son respectivamente los diámetros mínimo y máximo del espectro de gotas, usualmente tomados como 0 y  $\infty$ . Para el caso del factor de reflectividad  $z$ , que viene dado por el momento de orden 6 de los diámetros de las partículas precipitantes, se tiene (Sempere *et al.*, 1997).

$$z = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) D^6 dD \quad \text{ec. (V.5)}$$

La intensidad de lluvia, resulta ser el flujo de agua que llega al suelo, y por lo tanto es el flujo de  $W$  a través de una superficie unidad en la unidad de tiempo (en  $\text{mm/h}$ ), por lo que se escribe (Sempere *et al.*, 1997).

$$R = 0.6\pi 10^6 \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} N(D) D^3 V(D) dD \quad \text{ec. (V.6)}$$

donde  $V(D)$ , que es la velocidad terminal de caída (en  $\text{m s}^{-1}$ ) de una gota de diámetro  $D$  (en  $\text{cm}$ ) aparece al tratarse de la expresión de un flujo. Esta velocidad terminal, o de llegada al suelo, es una propiedad del diámetro de la gota (también de las condiciones de presión y temperatura del aire; pero en menor medida) y refleja el equilibrio entre las fuerzas de fricción y gravitatoria en la caída libre de las gotas. Usualmente se utilizan funciones ajustadas sobre datos experimentales de velocidades terminales, entre las que se cita la siguiente (Atlas y Ulbrich, 1977), con  $V(D)$  en  $\text{m/s}$  y  $D$  en  $\text{cm}$ .

$$V(D) = 17.37 D^{0.67} \quad \text{ec. (V.7)}$$

Hasta ahora sólo existen instrumentos que pueden determinar la distribución del tamaño de las gotas (función  $N(D)$ ) en superficies que por su tamaño no dejan de ser consideradas como puntuales al compararse con el volumen de muestreo relativamente grande del radar y con la extensión de las tormentas, lo cual es un problema de escala que también afecta a las mediciones con pluviógrafo. Así lluvias con una distribución de tamaños  $N(D)$  determinada de manera puntual traerá consigo

muchos de los problemas que tienen los datos de intensidad de lluvia obtenidos con pluviógrafo a la hora de ajustarlos puntualmente con la reflectividad  $Z$  proporcionada por el radar. Además del problema de escala se tiene la evaporación de la gota en su caída y el arrastre de las gotas por el viento que causarán ruido en la comparación de la reflectividad con la intensidad de lluvia medida en tierra, ruido que incide directamente en la dispersión de la nube de puntos resultantes de graficar  $Z$  vs  $R$ . Por lo que es recomendable tener cuidado al pensar que únicamente con la utilización de un disdrómetro (o red de disdrómetros); conocido como espectrómetro electromecánico (Joss y Waldvogel, 1967) se pueden resolver los problemas asociados con la determinación de la relación de transformación de reflectividad a lluvia en el uso hidrológico del radar los que tienen que ver con la dispersión de la nube de puntos que forman la base de la calibración (ver sección IV.2.5 y sección V.6.3).

Existen en la actualidad aparatos más sofisticados basados en la detección óptica de las gotas (pluviógrafos ópticos) (Illingworth y Stevens, 1987; Hauser *et al.*, 1984); que incluso permiten medir directamente tanto los diámetros como las velocidades terminales de las gotas. El aparato utiliza un paralelepípedo de luz infrarroja que detecta las gotas de lluvia que lo atraviesan. De una manera simplificada se puede decir que la amplitud de la disminución de la señal recibida, debida a la interceptación de una parte del haz por una gota resulta proporcional al cuadrado de su diámetro equivalente (a su sección eficaz) y el tiempo de residencia en el haz permite calcular su velocidad terminal.

Es clara la importancia teórica de la distribución del tamaño de gotas en relación con características de la lluvia; pero mientras las mediciones sean solo puntuales es muy probable que estas no presenten grandes ventajas ante mediciones de intensidad de lluvia hechas con pluviógrafo para efectos de obtener la relación óptima de transformación de reflectividad a lluvia; más todavía si se toma en cuenta que esta es el resultado de un análisis estadístico al que orilla o conduce la gran variabilidad en espacio y tiempo de las propiedades de la lluvia al interior de una tormenta.

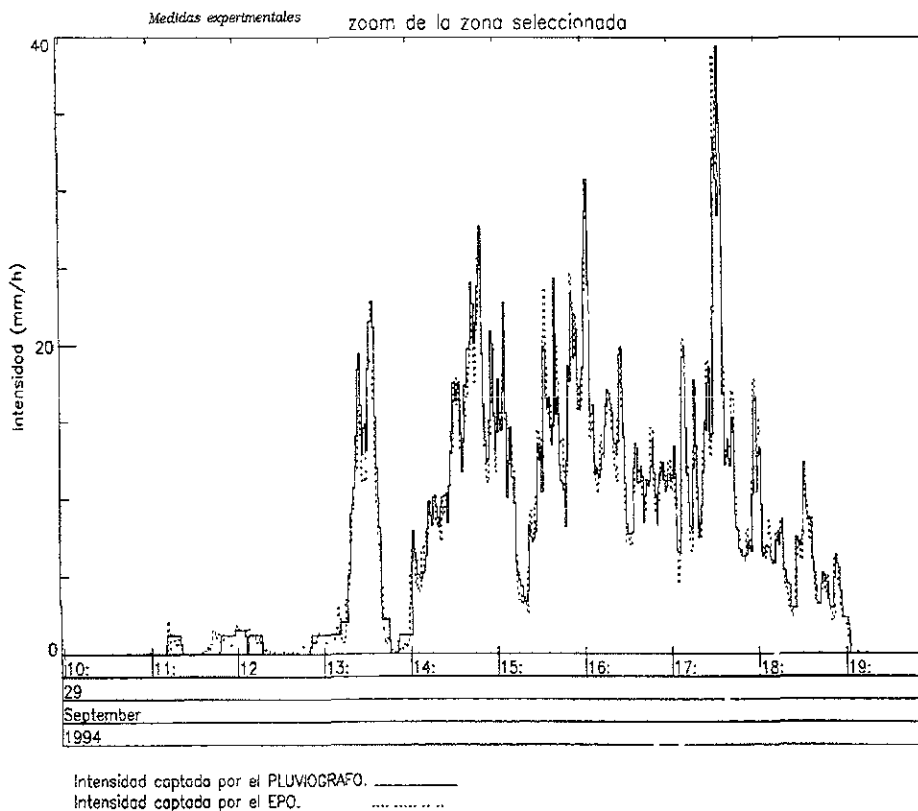
Se reporta (Sempere *et al.*, 1997) la comparación de la medición hecha por un EPO o Espectro Pluviómetro Óptico (el de Hauser *et al.*, 1984) con la medición de intensidad de lluvia realizada con un pluviógrafo de balancín. De la comparación realizada se concluye que en general existe muy buena concordancia entre ambos registros de intensidad de lluvia (ver figura V-1); resultando para este mismo evento una diferencia en la lámina acumulada medida por el pluviógrafo de 0.32 mm con respecto a la acumulada por el EPO, siendo la lámina acumulada medida en el evento por el pluviógrafo de 65 mm (ver figura V-2). El evento corresponde a una lluvia de otoño en la Ciudad de Barcelona. La distancia entre el pluviógrafo y el EPO es de 5 m.

La razón de presentar las figuras V-1 y V-2 es para ilustrar el hecho de que el pluviógrafo no presenta desventajas con respecto al Espectro Pluviómetro Óptico cuando de medir intensidades de lluvia se trata.

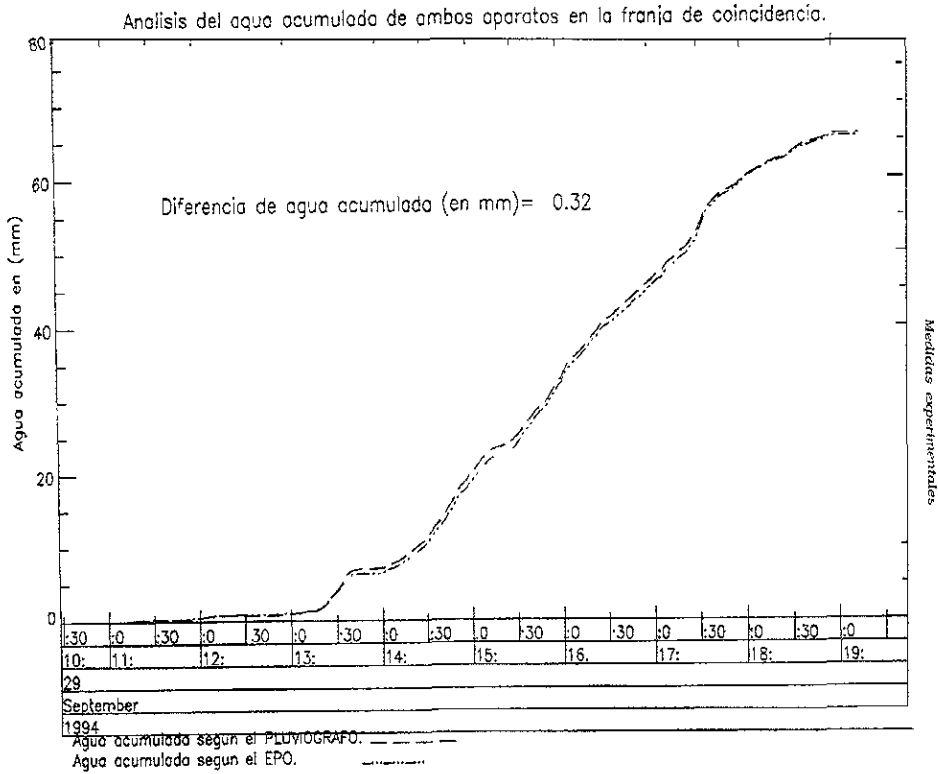
Hace falta generar experiencias en México en la utilización de disdrómetros y/o pluviógrafos ópticos, ya que si bien son del orden de 15 veces más caros que un pluviógrafo de balancín con registrador digital, estos pueden aportar información valiosa en la caracterización de la lluvia que permita caracterizar mejor al tipo de tormentas presentes en México (ver sección IV.2.5).

Rosenfeld (1993), remarca fuertemente que el efecto de la distribución de tamaños de gota ha sido sobre enfatizado con relación a su importancia con respecto a efectos del ancho del haz del radar y la altura a la que mide, para efectos de la relación z-R.

**Figura V.1.-** Comparación de las intensidades en pasos de tiempo de 5 minutos obtenidas con el EPO y el pluviógrafo de balancín para el evento registrado el día 16/09/94, en Barcelona (Sempere et al , 1997).



**Figura V.2.-** Comparación de las curvas de lluvia acumulada obtenidas con el EPO y el pluviógrafo de balancín para el evento registrado el día 16/09/94 (Sempere, et al., 1997).



#### V.4.- Calibración hidrológica de un radar

El radar meteorológico es un instrumento que permite la observación atmosférica a través de la medición de la reflectividad o ecos de los hidrometeoros; por lo que no mide directamente la intensidad de lluvia sino que ésta es obtenida de forma indirecta del valor de reflectividad. Para esto se utiliza una relación de transformación de reflectividad a lluvia (relación z-R); cuya determinación se conoce como calibración hidrológica. Se ha encontrado que la relación tiene la forma funcional siguiente (Stout y Mueller, 1968; Battan, 1973).

$$z = aR^b$$

con

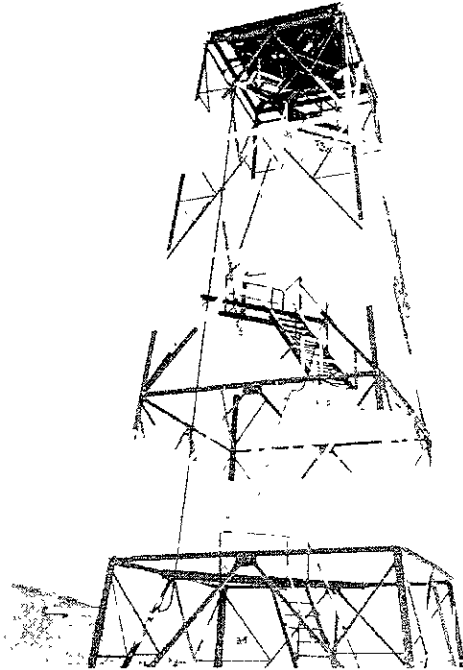
R: intensidad de lluvia en mm/h

z: factor de reflectividad atmosférica en  $mm^6/m^3$

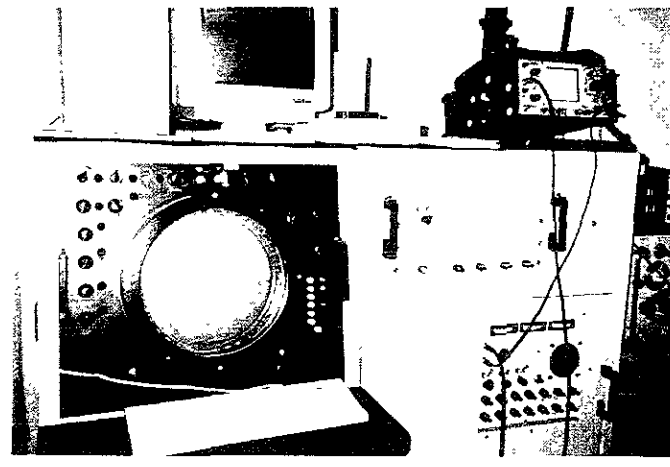
a, b: coeficiente y exponente empíricos

**Figura V.3.-** *El radar Enterprise utilizado en el PARC.*

*a).- Torre*



*b).- Controles*





Debido a la enorme gama de valores que  $z$  puede adquirir (ver tabla V.0), se acostumbra expresarla con  $Z$  (mayúscula) en decibelios (dBZ) siendo  $Z = 10 \log_{10} (z/1 \text{mm}^6/\text{m}^3)$ . Una forma de establecer los valores de  $a$  y  $b$  es mediante mediciones directas de la distribución de tamaños de las gotas para diferentes intensidades de precipitación para caracterizar las propiedades de la lluvia, utilizando para ello disdrómetros y/o pluviógrafos ópticos. La metodología para obtener la relación  $z$ - $R$  se resume en los tres pasos siguientes: 1).- se requiere disponer de las medidas de tamaños de gotas de lluvia para poder caracterizar el espectro de tamaños y sus propiedades; 2).- a continuación mediante una metodología de análisis obtener una estimación de la relación  $z^*$ - $R^*$  para cada episodio de lluvia (ver la diferencia entre  $z$ ,  $z^*$  y  $R$ ,  $R^*$  en el apartado IV.2.1, observar la figura IV.3, esta diferencia se analiza a profundidad en el apartado V.6.3); 3).- finalmente se han de analizar los resultados de los diversos episodios para poder definir si existe una  $z^*$ - $R^*$  óptima (Sempere *et al.*, 1994 y 1997). Establecida la mejor relación  $z^*$ - $R^*$  posible para los episodios de lluvia, de unas ciertas características, es necesaria posteriormente la comparación con la red de pluviógrafos para que se pueda ajustar la medida radar; pero habiendo aislado la contribución debida a la transformación  $z^*$ - $R^*$ .

La otra forma de establecer los valores de  $a$  y  $b$  de la relación  $z$ - $R$  es comparando las mediciones de reflectividad dada por el radar ( $z$ ) con la intensidad de lluvia ( $R$ ) medida en puntos sobre la superficie del terreno con pluviógrafos para obtener una relación estadística directa para la transformación de  $z$  a  $R$ . En este procedimiento las únicas consideraciones que se hacen sobre la naturaleza de la lluvia están relacionadas con la época del año y la región o área geográfica considerada; por lo que la relación no toma en cuenta las fluctuaciones provenientes de las diferencias en las características y propiedades de los eventos de lluvia; aquí valdría la pena estudiar la utilidad de considerar algunos "factores controladores" como dirección del viento, humedad y temperatura a nivel bajo etc.

El autor de este trabajo propone un tercer método que parte de la caracterización de las tormentas y no de la lluvia. Las variables a considerar de la tormenta completa puede ser el área y volumen máximo alcanzados, duración, el área total influida, la altura del tope de tormenta, la reflectividad máxima etc. Mediante un análisis se determina con cuales de estas características se aprecia un cambio en la relación  $z$ - $R$  y se determina la  $z$ - $R$  por estratos. Se espera que con la agrupación de datos basándose en las características de la tormenta se disminuya la dispersión de la nube de puntos de calibración y se obtengan relaciones óptimas para cada clasificación de tormenta. Es posible que se requiera una estratificación basada en la calidad de los productos de radar por fracciones de área de cobertura de radar. La variación de calidad de los productos de radar referida es debida a la diferencia en altura del bloqueo orográfico, que no es la misma para toda el área de cobertura del radar. Hay que notar que esto sólo se puede hacer si el radar opera en barrido volumétrico y se almacena toda la información.

Dependiendo del tamaño de la red pluviográfica y su densidad, del tipo e intensidad de tormentas de la zona, de las horas de operación diarias del radar y del procedimiento empleado para ajustar la relación será el tiempo requerido para reunir

la cantidad de datos pluviográficos necesarios para obtener la relación z-R para cada estrato. Esta recolección pudiera durar varios años por lo que se puede iniciar con la determinación de una relación z-R general (pudiendo ser por épocas del año) utilizando mediciones de intensidad de lluvia con pluviógrafos, apenas se disponga de la cantidad suficiente.

Un método no paramétrico para transformar los valores de reflectividad del radar en intensidad de lluvia, tal que la distribución probable de las estimaciones de lluvias concuerde con la lluvia medida por el pluviógrafo, ha sido desarrollado por Rosenfeld *et al* (1993). Al método se le conoce con el nombre de método de coincidencia de distribuciones de probabilidad. El método es atractivo ya que la única suposición es que la función de distribución de probabilidad (FDP) de la lluvia deducida con radar (incluyendo los casos de ausencia de lluvia) sea idéntica con la FDP de las lluvias medidas con pluviógrafo. El método mejora usando una clasificación objetiva de datos para diferentes regímenes de lluvia (Rosenfeld *et al.*, 1995). El resultado de la aplicación de este método no permite conocer aspectos del error que se relacionan con la estimación instantánea de la intensidad de lluvia y con la comparación simultánea entre reflectividad e intensidad de lluvia medida en sobre el terreno.

Una adecuada calibración hidrológica es importante sobre todo en países como México, que están muy lejos de poder disponer de una densa y extensa red de pluviógrafos que por sí misma proporcione mediciones de lluvia en cantidad y calidad que satisfaga a la mayoría de los usuarios de la información. Para países como Estados Unidos e Inglaterra, es menos apremiante e importante tener radares con calibración hidrológica óptima; puestos que ellos sí cuentan con gran cantidad de puntos de medición de la precipitación.

#### **V.4.1.- Contraste entre diversas relaciones z-R**

En la literatura existen citadas muchas, así llamadas, relaciones z-R desarrolladas desde la segunda guerra mundial, las cuales dan un amplio rango de valores de z para un valor dado de R y viceversa. Una explicación parcial se da por las diferencias geográficas que influyen en los tipos de aguaceros y por la variación de estos tipos de aguaceros y de las condiciones sinópticas en un lugar dado que pueden llevar a diferencias del orden de 150% en la estimación por radar de la lámina media total precipitada en un lugar durante la temporada de lluvia (Stout y Mueller, 1968).

Las características de la lluvia, como el espectro de tamaños de gota, que varían al interior de una tormenta y de tormenta a tormenta, afectan directamente a los coeficientes a y b. Lo anterior ocasiona que aún cuando el radar proporciona medidas de reflectividad que pueden ser consideradas como iguales para volúmenes atmosféricos que contengan una distribución y tamaño de gotas iguales, una relación z-R es más bien probabilística.

Es claro que para la aplicación específica del radar en la estimación de la lámina de agua precipitada se requiere contar con una relación de transformación de reflectividad a lluvia. De otra manera con el radar sólo se puede contestar a preguntas tales como dónde y cuándo se presenta una tormenta y no a la pregunta de cuánto llovió.

En algunos trabajos con radar se opta por utilizar una relación z-R reportada como estándar por la literatura, como es la relación de Marshall-Palmer, que utiliza valores de  $a=200$  y  $b=1.6$ , considerando que en promedio presenta una buena confiabilidad. Experiencias en México han demostrado que la relación z-R de Marshall-Palmer (Marshall y Palmer, 1948) subestima severamente la cantidad de lluvia para tormentas convectivas de verano en la región de Monclova, México (Rosengaus *et al.*, 1999).

G. E. Stout y E.A. Mueller (1968) encontraron que si  $z$  está en  $\text{mm}^6/\text{m}^3$  y  $R$  está en  $\text{mm/h}$ , los valores de  $a$  varían entre 15 y 1100 y los de  $b$  entre 1.2 y 3.2, respectivamente. Ellos también atribuyen responsabilidad sobre la gran variación de los valores de  $a$  y  $b$  a los posibles errores en la metodología para determinar la relación.

Por otro lado Fujiwara (1965), encontró en las relaciones que estudió, que el coeficiente  $a$  varía de 60 a 1100 y el exponente  $b$  de 1 a 2.

Más recientemente Austin (1987) resume el gran número de relaciones z-R reportadas en tres tipos principales:

- 1) Lluvia no celular:  $z=100R^{1.4}$
- 2) Lluvia ordinaria, mezcla de celular y de lluvia más extendida:  $z=230R^{1.4}$
- 3) Celdas convectivas intensas:  $z=400R^{1.3}$

Joss (1970), conjuntó las relaciones z-R basadas en la distribución de tamaños de gota, todas obtenidas en Suiza, para diferentes tipos de lluvia, resultados que en general están próximos a los resultados de Austin,

- 1) Llovizna:  $z=140R^{1.5}$
- 2) Lluvia extendida:  $z=250R^{1.5}$ ; y
- 3) Tormentas eléctricas:  $z=500R^{1.5}$

Basado en estos puntos, Joss (1970) propuso que las características de los ecos pueden ser usadas para identificar los tipos de lluvia. Battan (1973) comenta que "esta información permitiría utilizar la ecuación z-R apropiada. Si esto se hace automáticamente por medio de computadoras sería posible un incremento de precisión en las medidas de precipitación por radar".

El amplio rango de valores obtenido para la intensidad de lluvia a partir de la transformación de una reflectividad aplicando las relaciones z-R reportadas en la literatura obliga a ejecutar los estudios de calibración hidrológica de los radares. El resultado de la calibración es una relación que es específica para una zona determinada, para los mecanismos de generación de lluvia típicos y para diferentes

épocas del año con lo que se podrá usar el radar en la determinación cuantitativa de la lluvia. La variación de la estimación de la intensidad de lluvia a partir de la relación de transformación empleada, queda de manifiesto en la tabla V.0 en la que se utilizan cinco diferentes relaciones z-R para estimar la intensidad de lluvia.

**Tabla V.0.- Estimación de intensidad de lluvia con cinco diferentes relaciones z-R.**

z [mm <sup>6</sup> /m <sup>3</sup> ]	dB Z	a=200, b=1.6	a=100, b=1.4	a=230, b=1.4	a=400, b=1.3	a=500, b=1.5
100.00	20	0.65 mm/h	1.00 mm/h	0.55 mm/h	0.34 mm/h	0.34 mm/h
316.23	25	1.33 mm/h	2.28 mm/h	1.26 mm/h	0.83 mm/h	0.74 mm/h
1000.00	30	2.73 mm/h	5.18 mm/h	2.86 mm/h	2.02 mm/h	1.59 mm/h
3162.28	35	5.62 mm/h	11.79 mm/h	6.50 mm/h	4.91 mm/h	3.42 mm/h
10000.00	40	11.53 mm/h	26.83 mm/h	14.80 mm/h	11.89 mm/h	7.37 mm/h
31622.78	45	23.68 mm/h	61.05 mm/h	33.68 mm/h	28.84 mm/h	15.87 mm/h
100000.00	50	48.62 mm/h	138.95 mm/h	76.64 mm/h	69.91 mm/h	34.20 mm/h
316227.77	55	99.85 mm/h	316.23 mm/h	174.43 mm/h	169.51 mm/h	73.68 mm/h

## V.5. La calibración hidrológica del radar en el PARC

La calibración hidrológica del radar utilizado en el PARC se realizó mediante comparación directa de las mediciones de reflectividad dada por el radar (z) con los datos de intensidad de lluvia (R) obtenidos con una red de pluviógrafos digitales de balancín con lo que se obtuvo la relación para la transformación directa de z a R. La base de datos para la calibración consideró aspectos tales como la localización de la estación, distancia radial de la estación al radar, calidad del producto de radar además del año, mes, día y hora del instante en que se produjo el producto de radar alrededor del cual se calculó la intensidad de lluvia a partir de los datos pluviográficos. En este apartado se describen algunos aspectos de la campaña de medición de lluvia con la red pluviográfica, del procesamiento y control de calidad de los datos y del procesamiento conjunto de datos pluviográficos y de radar hasta llegar a la integración de la base de datos para la calibración hidrológica y la definición de la relación de transformación de reflectividad a lluvia.

### V.5.1.- La red pluviográfica utilizada en el PARC

La red pluviográfica utilizada para la medición de lluvia estuvo compuesta de 4 pluviógrafos digitales para el año 96, de una red de 9 pluviógrafos para 97 y de una red de 42 pluviógrafos para 98 (más un pluviógrafo de exhibición dan en total 5, 10 y 43 pluviógrafos). Los pluviógrafos utilizados son del tipo balancín con el que se genera un balanceo al recibir un determinado volumen de agua captado por un cono de 8 pulgadas de diámetro, el balanceo activa un conmutador magnético que envía una señal por balanceo (evento) a un registrador digital donde se lleva un conteo de

cada evento. El evento es registrado en asociación con la fecha y hora en que ocurrió.

La red de 1998 representa la segunda red instalada y operada más grande de México con 43 pluviógrafos digitales (uno localizado muy próximo al radar usado de exhibición que no aporta datos para la calibración por encontrarse en el zona ciega del radar). Esta red es sólo superada en número por la de la Ciudad de México. Bajo su característica de temporal, se trata de la red más amplia jamás instalada en México (Rosengaus *et al.*, 1999).

#### *V.5.1.1.- Preparación de instrumentos, pruebas de calibración y operación en laboratorio.*

El montar una red eficaz de estaciones pluviográficas, como la montada por el IMTA y el autor en 1998 en el área del PARC, incluye una buena cantidad de trabajo en pruebas y verificación del correcto funcionamiento de los componentes de cada pluviógrafo; así como de calibración en condiciones de laboratorio y simulando condiciones de campo.

La verificación del funcionamiento de los componentes en laboratorio permite identificar fallas ocasionadas por componentes defectuosos en algunos instrumentos y también permite identificar limitaciones atribuibles al diseño mismo que afecta a todos los instrumentos por igual. Las limitaciones de un determinado diseño deben ser verificadas cada vez que se introduce alguna mejora al diseño ya que como se pudo observar en la instrumentación utilizada en 98, que con respecto a la de 96 y 97 se le adaptó una memoria no volátil (en ausencia de energía), derivó en una disminución del tiempo de autonomía de las estaciones ya que la duración de las pilas se redujo de 90 días a 25 días. La implicación inmediata es que las visitas a las estaciones con el propósito de renovar las pilas se tienen que programar cada 3 semanas incrementando los costos de operación.

Los componentes de la estación pluviográfica son revisados primero de forma ocular cuidando que no falte ningún componente y que cada junta esté correctamente pegada o atornillada. De esta manera se revisa las partes del cono, el sistema de soporte del balancín, el registrador, los cables y la base del pluviógrafo.

Se hace un proceso de programación del registrador (con una fecha, hora, número de estación, lugar etc., supuestos), utilizando la PC. Posteriormente se verifica la correcta oscilación del balancín. Se revisa que la terminación del cono de captación efectivamente lleve la totalidad del agua precipitada a la cubeta del balancín correspondiente para diversas intensidades de lluvia simuladas. Se revisa que el conmutador magnético funcione adecuadamente cerrando el circuito momentáneamente al ocurrir cada basculación. Se verifica que las basculaciones queden registradas como eventos de forma correcta en el registrador digital y que estos registros puedan ser accesados y respaldados en una PC.

Especial atención merece la verificación del sellado de las partes que componen a los balancines; ya que si éste no es perfecto parte del agua almacenada en la cubeta se puede fugar hacia la parte central del balancín haciendo inaceptable el funcionamiento de estos.

Los pluviógrafos de balancín utilizados cuentan con dos formas de ajustar que el balanceo ocurre efectivamente para un volumen de agua que corresponde a la lámina deseada multiplicada por el área de captación del cono. Los aparatos están diseñados para operar basculando con láminas de 0.25 mm pero ajustes relativamente amplios alrededor de este valor son posibles. Uno de los mecanismos consiste en tornillos que suben o bajan el punto de apoyo del balancín de cada lado y son independientes para cada dirección de basculación. El otro mecanismo es un pequeño peso al centro del balancín al que se puede cambiar ligeramente el brazo de palanca con respecto al eje de giro o aumentar o disminuir dicho peso por medio de pequeñas roldanas. Este último afecta el balanceo en ambas direcciones. El área de captación nominal del cono en los pluviógrafos es de 324.3 cm<sup>2</sup>. El volumen de agua que se requiere para generar un balanceo se mide utilizando una pipeta graduada de 10 ml y dejando gotear agua a cada una de las cubetas del balancín para comprobar la lámina que produce el balanceo. Si esta se encuentra lejos del valor de 0.25 mm, se ajusta el tornillo correspondiente y se vuelve a verificar, iterando hasta alcanzar un valor suficientemente cercano a 0.25 mm como para que la variabilidad natural (aleatoria) entre un balanceo y otro resulte mayor que la diferencia entre el valor nominal y el valor alcanzado en la última iteración. Esta diferencia remanente es en general menor a 0.025 mm (1/10 de la resolución nominal del aparato).

La resolución alcanzable, en forma realista, de la pipeta graduada es 0.05 ml, es decir del orden de 0.6% del volumen necesario para (nominalmente) producir un balanceo (8.12 ml). Es común que del orificio final del cono de captación se lleguen a almacenar del orden de unas cuatro veces este volumen antes de producirse una gota que caiga a las cubetas por lo que el pluviógrafo no podría resolver desviaciones menores a 0.2 ml alrededor del valor nominal de 8.12 ml. Con esto se cumple razonablemente bien la recomendación de que la calibración de un instrumento debe realizarse con instrumentos con al menos un orden de magnitud mayor en resolución que el instrumento que se calibra. En otras palabras pequeños errores en la lectura del volumen de agua que se permite gotear para producir una basculación, no tienen efecto significativo en la calibración final del instrumento (Rosengaus *et al.*, 1999).

En este tipo de pluviógrafo el umbral de lámina de lluvia que puede ser detectada es algo mayor a 0.25 mm, ya que para que quede registrado el primer evento la lluvia primero mojará la superficie del cono de captación y la malla de protección contra insectos y basura. Este volumen es difícil de evaluar, pero se estima alrededor del volumen necesario para producir un balanceo, nominalmente una lámina de 0.25 mm. En el laboratorio se observó que al encontrarse seca la malla de protección colocada en la parte baja del cono de captación, se produce una acumulación de agua que al llegar a cierto volumen (alrededor de 8 ml) rompe el efecto de tensión

superficial precipitando en forma de chorro sobre las cazoletas; una vez mojada la malla este efecto se reduce drásticamente (alrededor del valor de 0.2 ml).

Si se considera que la vibración del cono producida por el viento y el golpeteo de lluvia sobre la malla (en la medición de lluvia en condiciones reales), facilita el rompimiento de esta tensión superficial entonces el efecto de esta acumulación resulta todavía menos importante.

El objeto de la calibración hecha es el de asegurar que el pluviógrafo registrará la fecha y hora, al segundo, en que el volumen de agua captado (por cualquiera de las cazoletas) a través del cono complete 8.12 ml; ya que (como se precisó en el apartado IV.1) no existe en la actualidad ningún medio de evaluar la precisión del pluviógrafo en su conjunto en condiciones de tormentas reales.

#### V.5.1.2.- Prueba de operación simulando condiciones de campo

En un intento por probar el funcionamiento de los pluviógrafos en condiciones más parecidas a las reales cada pluviógrafo es operado a la intemperie simulando una cierta lluvia sobre ellos. La lluvia se simuló colgando cubetas de plástico, a las que se les habían hecho pequeñas perforaciones en la parte baja y habían sido llenadas con un volumen de agua previamente medido, de una percha metálica que las mantenía exactamente sobre el cono de captación de un número igual de pluviógrafos. Parte de los resultados de la primera prueba se muestran en la tabla V.1.

**Tabla V.1.-** Muestra de los resultados obtenidos simulando condiciones de campo con los pluviógrafos.

<i>Pluviógrafo No.</i>	<i>Volumen vertido (ml)</i>	<i>Volumen Medido (ml)</i>	<i>Error (%)</i>
86	4580	4223	-7.79%
87	1380	1312	-4.92%
88	4600	4681	+1.7%
89	2530	2382	-5.85%
90	1860	1765	-5.10%
91	3400	3178	-6.51%
92	2160	2132	-1.29%
93	1480	1405	-5.01%
94	4850	4748	-2.09%
		Error medio =	-4.1%

Los resultados de la tabla V.1 se calcularon considerando que cada evento es equivalente a una lámina de 0.25 mm y que es producido por un volumen de agua vertido igual a 8.12 ml. El factor de calibración volumétrico de 8.12 ml de agua por evento se aplicó en todos los casos para obtener el volumen de agua que fue registrado en cada pluviógrafo. Hubo una fuerte intensidad de rayos solares durante la prueba, lo que genera evaporación de agua de las cubetas y disminuye el volumen vertido real. Dado que el volumen total es conocido éste debe coincidir razonablemente bien con el obtenido de los registradores correspondientes.

En la primera prueba realizada a 44 pluviógrafos en 5 pluviógrafos se obtuvo un error superior al 10% atribuido a pequeñas interferencias del cable del registrador con el libre balanceo del balancín; dicha interferencia es detectada en el momento de quitar el cono del pluviógrafo para capturar el registro de eventos; se repitió la prueba en estos 5 pluviógrafos realizando un acomodo cuidadoso del cable del registrador y extendiendo dicho cuidado a la operación real en campo del pluviógrafo.

El error medio de 44 pruebas resultó ser de - 4.16% (muy similar al error medio de la muestra de la tabla V.I). Esta característica del error se explica por el volumen de agua que no es contabilizado durante el pequeño lapso de tiempo en que se realiza el balanceo, incrementándose con la intensidad; sólo 5 de los 44 pluviógrafos de la prueba tuvieron un error positivo (el volumen medido por el pluviógrafo resulta mayor al vertido). Al menos un tercio de los pluviógrafos alcanzaron intensidades mayores a los 100 mm/h.

Como ya se mencionó, el factor de calibración utilizado fue el factor de 0.25 mm de lámina equivalente a 8.12 ml para todos los pluviógrafos, que es el valor alrededor del cual se calibra en el laboratorio. Se ha observado que el factor obtenido en laboratorio puede tener variaciones al ser instalado el pluviógrafo (diferente nivelación, polvo, óxido etc.) por lo que se espera que una prueba en la cual se obtenga nuevamente el factor de calibración en el momento de ser instalado para la prueba arroje un error menor. Por falta de tiempo no se obtuvo de nuevo el factor de calibración en las condiciones de la prueba. Pero en condiciones de operación real es recomendable que se obtenga el factor de calibración en el momento de ser instalado y durante cada una de las visitas a la estación pluviográfica.

Una prueba de operación simulando condiciones de campo es recomendable para detectar cualquier anomalía en la operación del pluviógrafo. Calibraciones a una intensidad de lluvia constante y pruebas de operación que cubran un amplio rango de intensidades pueden proporcionar suficiente información para la obtención de una relación de corrección del error en función de la intensidad medida.



### V.5.1.3.- Instalación de la red pluviográfica

El plan de instalación es el resultado de varios análisis previos o trabajo de gabinete que incluye aspectos de definición de la cobertura del radar, delimitación de áreas con base en una calificación de su importancia o prioridad (ya sea por la actividad económica, por la distribución de las tormentas, etc.); pero sobre todo los sitios para la instalación se definen basándose en la facilidad de acceder o llegar a ellos en camioneta.

Aún con 43 pluviógrafos es importante el distribuirlos adecuadamente para obtener la cantidad, calidad y tipo de información que se desea obtener. Por ejemplo, el círculo de 112.5 km de radio (definido por el alcance confiable del radar) tiene un área total de 39,761 km<sup>2</sup>. Una distribución uniforme de los pluviógrafos en esta área implicaría 925 km<sup>2</sup> por cada pluviógrafo, es decir una separación promedio entre pluviógrafos del orden de 30 km. El tamaño típico de las celdas convectivas que producen las lluvias de verano es mucho menor, del orden de tan solo 4 a 10 km de diámetro. Bajo un esquema simplista como el mencionado no se obtendría ninguna información asociada con la distribución espacial de la lluvia que pudiera compararse con aquella que se obtiene del radar. Así pues, aún con 43 pluviógrafos es imposible cubrir la totalidad del área de operaciones con una resolución espacial congruente con la escala del fenómeno que produce la lluvia. Es necesario seleccionar zonas más pequeñas e instrumentarlas con mayor densidad (Rosengaus *et al.*, 1999). Así mismo, como resultado de las observaciones con radar durante 1996 y 1997, fue posible considerar para la red de 1998 aquellas áreas con mayor presencia de tormentas.

Como resultado de las consideraciones hechas se optó por instrumentar zonas cercanas al radar durante 1998, dando como resultado que la red quedara configurada en las localizaciones que se muestran en la figura V.4 a.

En la figura V.4a las ubicaciones de 1998 de los pluviógrafos corresponden a los círculos blancos. En la misma figura V.4a, se muestra las ubicaciones de 1997 de los pluviógrafos que corresponden a los círculos negros. En la red de 1998 la distancia radial del pluviógrafo más alejado del radar es de 73.5 km y la distancia del más cercano es de 13.3 km. La separación más común entre instrumentos es de alrededor de 15 km aunque también se instrumentó una zona con separación entre instrumentos que van de un mínimo de 1.25 km hasta un máximo de 5 km; el objeto de estas separaciones fue el de intentar comparaciones entre pluviógrafos y radar en términos de una tormenta completa (con su distribución espacial) y no solamente en términos de muestras puntuales de dicha tormenta.

Las estaciones son colocadas unas sobre el techo de construcciones (escuelas, casas, etc.) y otras directamente sobre el terreno, elección que es resultado de las consideraciones sobre la seguridad del instrumento durante su operación (ver figura V.4.b). Por ejemplo, el sitio sobre los techos en una población se considera seguro contra vandalismo, robo, daños por el ganado y niños. La colocación del instrumento directamente sobre el suelo se considera menos segura. En la red de 1998 los

instrumentos colocados en el campo directamente sobre el suelo no tuvieron ningún problema; por el contrario uno de los pluviógrafos colocados en el techo de un rancho fue vandalizado. También en otro sitio el comisariado ejidal tuvo que intervenir para evitar que un ejidatario le colocara un bote encima al pluviógrafo al creer que éste interfería con las lluvias. La conclusión es que aún en la instalación de una red temporal es importante considerar un mecanismo por medio del cual se informe a la población sobre el objeto básico de la instrumentación. En la figura V.4b se aprecia la instalación sobre el techo de una escuela de uno de los pluviógrafos y en la V.4c se aprecia otra instalación en medio del desierto.

Cuando el pluviógrafo se instala en el techo de una construcción, se busca que ésta no sobresalga en altura de otras construcciones o vegetación vecina para minimizar efectos de la deformación de las líneas de flujo del viento por la presencia de la construcción en sí. Siempre se verifica que el cono de 45 grados arriba del instrumento se encuentre libre de obstáculos (ramas de árboles, cables, postes, tinacos, bardas, etc.).

Los pluviógrafos van montados sobre tablas de madera esmaltada que se anclan con pijas y concreto a dos bloques de construcción huecos formando una unidad de un peso considerable y suficiente para ser estable ante las fuerzas de empuje de los vientos. La base del pluviógrafo queda nivelada horizontalmente en dos direcciones perpendiculares. El pluviógrafo se monta sobre la tabla utilizando tres tornillos y tres tuercas por tornillo lo que permite su nivelación. El registrador digital se programa con los datos del sitio y fecha, borrando previamente todo lo que tenga en memoria. La hora Z del reloj del registrador es sincronizada al segundo utilizando un GPS. El registrador es colocado en su lugar teniendo mucho cuidado en que el cable no interfiera con el libre movimiento del balancín.

Figura V.4.a- Localización de la red pluviográfica instalada en los alrededores de Monclova en el verano del 98.



**Figura V.4.b.-** *Instalación de un pluviógrafo sobre el techo de una construcción, durante la campaña PARC-98.*



**Figura V.4.c.-** *Instalación de un pluviógrafo directamente sobre el terreno, durante la campaña PARC-98.*



A la colocación del instrumento en condiciones de operación le sigue la verificación de la calibración del instrumento, es decir, se comprueba experimentalmente cual es la lámina de lluvia que produce un balanceo.

El empaque, transporte y la sujeción firme de la base del pluviógrafo a la tabla pueden ocasionar que el factor de calibración obtenido en el laboratorio sufra alguna variación por lo que se requiere verificar dicho factor ya en las condiciones de operación. Esta verificación es similar a la calibración de laboratorio con la excepción de que ahora los tornillos de calibración ya no son ajustados; solo se registran en bitácora los valores obtenidos. Dada la variabilidad natural entre un balanceo y otro y la posibilidad de una cierta asimetría entre los balanceos de un lado y de otro, esta verificación se realiza al menos cuatro veces (dos veces de cada lado). Si las diferencias resultan apreciables entre pares de lecturas se realizan más verificaciones en pares, una por cada lado, hasta que se aprecie una estabilidad en el promedio de todas las verificaciones (muy rara la obtención de más de 10 pares). Lo más común es la obtención de tres pares de verificaciones donde el primer par se elimina de la muestra cuando tiene un valor un poco diferente a los otros dos pares, que por lo común son muy parecidos (ya que el primer par de eventos se ve afectado por el hecho de que se gasta un volumen de agua en mojar la superficie del cono y la malla de protección contra insectos y basura, ver sección V.5.1.1.). El valor de lámina utilizado en el procesamiento de datos obtenidos en la estación pluviográfica es el promedio de estas múltiples verificaciones de la calibración. Observe que, aún cuando se detecte una fuerte asimetría en una dirección de balanceo, la utilización del promedio no introduce errores significativos. El error de sobrestimación (o subestimación) ocurrido en un balanceo es contrarrestado, de inmediato, por un error de subestimación (o sobrestimación) en el siguiente balanceo. Una asimetría fuerte puede deberse a una nivelación defectuosa del aparato.

Antes de dejar la instalación, se verifica que el registrador se encuentre operando, comprobando que efectivamente registró los eventos dados en la verificación del factor de calibración más unos cuantos eventos fantasmas producidos al bascular el balancín manualmente. Las coordenadas son obtenidas vía GPS en cada sitio (con errores estimados en menos de 50 m del sitio correcto). La hora de llegada, la hora de partida y algunas características del sitio son descritas y si ocasionalmente se encuentra lloviendo sobre el sitio, también se anota en bitácora. Si el sitio se encuentra directamente sobre el suelo lejos de poblaciones además se hace un croquis de localización.

Es recomendable que la instalación se realice en cuadrillas de dos personas, donde una de ellas se encargará de anotar la información en bitácora y la otra de manipular los instrumentos; para lo que se seguirá una serie de pasos preestablecidos. Además en áreas desérticas y poco pobladas incluso por razones de seguridad es conveniente dos personas.

#### V.5.1.4.- Operación de la red pluviográfica durante 1998

Las actividades de operación de la red tienen como objeto reducir al mínimo los periodos de mal funcionamiento de los pluviógrafos. La estrategia básica consiste en programar visitas espaciadas en periodos de tiempo lo más cortos que los recursos humanos y financieros destinados para la campaña de medición lo permitan. Ante todo debe considerarse que el tener ya instalado en campo un pluviógrafo es ya una inversión considerable; además de que las fallas en el funcionamiento no corregidas puede disminuir la eficiencia de la recolección de datos por la red a niveles tales que el volumen de información resultante no sea la suficiente para resolver el problema que originó la instalación de la red. Además las visitas frecuentes mejoran la calidad de los datos obtenidos. Desde la instalación y hasta el desmonte de la red al menos una persona permaneció en la zona de operación del PARC atendiendo la correcta operación y recolección de datos (actividad realizada por el autor de este trabajo). Para la operación de la red se contó con un vehículo (camioneta pick-up), una computadora portátil para campo y una PC instalada en el centro de operaciones además de voltímetro, equipo para soldar y refacciones varias para pluviógrafo.

La visita a cada estación pluviográfica implica las siguientes actividades:

- a) Inspección visual del instrumento buscando irregularidades (cambios de posición, vandalismo o intervención en el interior por personas no autorizadas);
- b) Verificación de la nivelación del instrumento;
- c) Obtención de coordenadas latitud y longitud con un GPS;
- d) Nueva verificación de la calibración con al menos cuatro pruebas depositando agua con una pipeta graduada en el cono de captación, todo esto antes de tocar el instrumento de ninguna manera, es decir, bajo las condiciones intactas de operación en dicho momento;
- e) Verificación del número de eventos registrados en la pantalla del registrador;
- f) Verificación de que el registrador estuviera registrando en ese momento generando manualmente algunas basculaciones fantasmas;
- g) Verificación de la fecha hora del registrador en forma simultánea con la fecha hora del GPS de referencia, para poder obtener el atraso o adelanto;
- h) Rescate de los datos registrados;
- i) Sincronización del reloj del registrador;
- j) Observación visual del registro obtenido;
- k) Cambio de pilas al registrador si el voltaje es bajo; si es demasiado bajo se hace antes de la actividad g);
- l) Reinstalación del aparato verificando con eventos fantasma que el registrador los registra adecuadamente. Este paso conviene hacerlo rescatando nuevamente el archivo y visualizándolo en pantalla el registro correcto de los eventos fantasma y no solamente en la pantalla del registrador. Si los eventos fantasmas no están correctamente registrados se borra por completo la memoria del registrador y se vuelve a programar repitiendo el procedimiento de verificación. Si el problema persiste se cambia el registrador y se lleva a chequeo general al laboratorio;

- m) Además se anotaba en bitácora la hora de llegada a la estación y la hora de partida con el propósito de eliminar de manera efectiva datos o eventos que no corresponden a medición de lluvia;
- n) Se anota si durante la visita estaba o no lloviendo.

Cualquier manipulación de la parte mecánica ocasiona que la calibración sea verificada antes de dejar el aparato operando. Todo lo acontecido en las visitas se anota detalladamente en una bitácora de campo. Las anotaciones en esta bitácora son la base para un buen control de calidad y procesamiento posterior de los datos. Para el caso de la red de 98, algunos de los problemas detectados en las visitas programadas fueron: la vandalización de uno de los pluviógrafos; el taponeo de dos conos con insectos a tal grado que impedían el paso del agua al balancín; la descarga de baterías en todos los pluviógrafos en alrededor de 25 días y no en 90 días como se esperaba. Esta disminución en la duración de las pilas no había sido detectada en las pruebas de funcionamiento en laboratorio; se atribuye dicha falla a la inclusión de una memoria no volátil en el registrador. Las pilas se cambiaron en la primera visita a los 30 días de la instalación. En la segunda visita se detectó durante la inspección visual del registro obtenido que varios estaban corrompidos (registros defectuosos con fecha y hora no congruentes) a partir del cambio de pilas en la visita anterior. La necesidad de borrar completamente la memoria del registrador y volver a programarlo, cuando éste ha estado registrando con voltajes bajos (menos de 5.35 volts) no se había detectado en laboratorio; se atribuye este comportamiento a la inclusión de la memoria no volátil en el registrador. Las visitas deben realizarse con mucho cuidado y paciencia revisando todos los aspectos funcionales de las estación pluviográfica para detectar y corregir cualquier anomalía.

La red pluviográfica instalada en el verano de 1998 aportó 2440 días-estación de mediciones; ya después de haber eliminado intervalos dudosos por medio de un control de calidad muy riguroso. La red de 98 quedó totalmente instalada el 27 de junio y desmontada el 3 de septiembre.

## V.5.2.- Procesamiento de datos pluviográficos

### V.5.2.1.- Control de calidad de registros pluviográficos

El control de calidad de los registros pluviográficos crudos (como el de la figura V.5) es una actividad básica del procesamiento de datos. Pretende asegurar sin lugar a dudas que los datos resultantes después de este control corresponden efectivamente a medición de lluvia. La base para un buen control de calidad es la información vertida en la bitácora de campo, con esta información se definen periodos de tiempo al segundo en que el pluviógrafo arroja datos confiables. Para ello se identifican y eliminan los periodos de tiempo que dura la instalación y las visitas dando como resultado automático la eliminación de los eventos falsos o de verificación de la calibración.

La colocación de banderas de inicio y final de operación del instrumento como otro resultado del control de calidad, identificables con los números de evento "0000" y "9999" respectivamente, es una parte muy delicada del proceso pues, ya que los pluviógrafos sólo registran cuando existe lluvia (contra acumulados cada cierto número de minutos aunque sean nulos), el instante en que un pluviógrafo con falla dejó de funcionar no es evidente del registro. Al respecto se utiliza un criterio muy conservador desde el punto de vista de preferir "no saber que ocurrió " en cierto lapso de tiempo sobre "arriesgarse a afirmar que no llovió en ese lapso cuando en realidad no funcionó el aparato". Por supuesto que este criterio elimina algunos intervalos de tiempo en el que el aparato pudo haberse encontrado funcionando bien y simplemente no llovió; este criterio se utiliza cuando en la visita para rescatar datos el registrador ya no se encontraba registrando pudiendo haber sido el momento en que dejó de funcionar cualquiera localizado entre el último registro almacenado en el registrador y la hora de visita; en estas condiciones al realizar el control de calidad se coloca la bandera de final inmediatamente después del último evento registrado en la última tormenta captada.

Cada intervalo continuo y confiable de funcionamiento del pluviógrafo es separado en un archivo con su bandera de inicio y fin y con un encabezado congruente con el lapso al que se refiere, así como con la información de la estación pluviográfica a que corresponden los datos. Cuando por alguna razón se cambia el registrador a una estación se tendrá más de un registro (uno por cada registrador utilizado) de datos crudos, si cada uno de los registros resulta continuo y confiable entonces se integran en uno sólo. Se hace lo mismo para el caso en que en alguna visita se haya tenido que borrar por completo la memoria del registrador e iniciado un nuevo registro. El procesamiento de datos pluviográficos continua a partir de estos archivos, para los cuales es usada la extensión .PVG.



**Figura V.5.-** Ejemplo de archivos pluviográficos crudos y tipo .PVG: el CASTAN19.AGO es tal y como fue capturado del registrador digital del pluviógrafo en operación el 19 de agosto. La parte del CASTAN98 PVG presenta los mismos datos ya con control de calidad.

Archivo: CASTAN19.AGO			CASTAN98.PVG		
Numero Estacion: 92			Numero Estacion: 92		
Nombre Estacion: CASTANOS			Nombre Estacion: CASTANOS		
Fecha Ultima Visita: 19-Jul-98 21:29: 7			Fecha de Inicio: 13-Jun-98 15:00:00		
Fecha Captura Datos: 19-Ago-98 19: 6:20			Fecha de Terminación: 03-Sep-98 20:06:18		
Eventos Registrados: 382			Eventos Registrados: 444		
Eventos Perdidos: 0			Eventos Perdidos: 0		
Total de Eventos: 382			Total de Eventos: 444		
EVENTO	FECHA	HORA	EVENTO	FECHA	HORA
1	13-Jun-98	15:21:44	0000	13-Jun-98	15:00:00
2	13-Jun-98	15:26:06	18	04-Jul-98	00:08:43
. . . (de verificación) . . .			19	04-Jul-98	00:09:44
15	13-Jun-98	16:00:25	20	04-Jul-98	00:11:07
16	13-Jun-98	16:03:31	. . . . .		
17	13-Jun-98	16:03:55	205	05-Ago-98	23:19:57
18	04-Jul-98	00:08:43	206	05-Ago-98	23:20:27
19	04-Jul-98	00:09:44	207	05-Ago-98	23:20:59
20	04-Jul-98	00:11:07	208	05-Ago-98	23:21:42
. . . . .			209	05-Ago-98	23:22:55
205	05-Ago-98	23:19:57	210	05-Ago-98	23:24:51
206	05-Ago-98	23:20:27	. . . . .		
207	05-Ago-98	23:20:59	250	07-Ago-98	02:04:08
208	05-Ago-98	23:21:42	251	07-Ago-98	02:04:52
209	05-Ago-98	23:22:55	252	07-Ago-98	02:05:43
210	05-Ago-98	23:24:51	253	07-Ago-98	02:06:29
. . . . .			254	07-Ago-98	02:07:06
250	07-Ago-98	02:04:08	255	07-Ago-98	02:07:34
251	07-Ago-98	02:04:52	256	07-Ago-98	02:08:01
252	07-Ago-98	02:05:43	257	07-Ago-98	02:08:23
253	07-Ago-98	02:06:29	258	07-Ago-98	02:08:50
254	07-Ago-98	02:07:06	259	07-Ago-98	02:09:15
255	07-Ago-98	02:07:34	260	07-Ago-98	02:09:45
256	07-Ago-98	02:08:01	. . . . .		
257	07-Ago-98	02:08:23	360	09-Ago-98	01:16:02
258	07-Ago-98	02:08:50	361	09-Ago-98	01:16:25
259	07-Ago-98	02:09:15	362	09-Ago-98	01:16:51
260	07-Ago-98	02:09:45	363	09-Ago-98	01:17:21
. . . . .			364	09-Ago-98	01:17:54
360	09-Ago-98	01:16:02	365	09-Ago-98	01:18:18
361	09-Ago-98	01:16:25	366	09-Ago-98	01:18:44
362	09-Ago-98	01:16:51	367	09-Ago-98	01:19:03
363	09-Ago-98	01:17:21	368	09-Ago-98	01:19:27
364	09-Ago-98	01:17:54	369	09-Ago-98	01:19:46
365	09-Ago-98	01:18:18	370	09-Ago-98	01:20:08
366	09-Ago-98	01:18:44	371	09-Ago-98	01:20:32
367	09-Ago-98	01:19:03	372	09-Ago-98	01:21:01
368	09-Ago-98	01:19:27	373	09-Ago-98	01:21:34
369	09-Ago-98	01:19:46	374	09-Ago-98	01:22:17
370	09-Ago-98	01:20:08	375	09-Ago-98	01:23:11
371	09-Ago-98	01:20:32	376	09-Ago-98	01:24:06
372	09-Ago-98	01:21:01	377	09-Ago-98	01:24:58
373	09-Ago-98	01:21:34	378	09-Ago-98	01:26:24
374	09-Ago-98	01:22:17	. . . . .		
375	09-Ago-98	01:23:11	. . . . .		
376	09-Ago-98	01:24:06	. . . . .		
377	09-Ago-98	01:24:58	. . . . .		
378	09-Ago-98	01:26:24	. . . . .		

Nota: en castan19.ago, los registros del 1 al 17 corresponden a la iniciación de operación y a verificación de la calibración.

**Figura V.6.- Ejemplo de archivos pluviográficos tipo .PTC y .PCA provenientes de la estación Castaños.**

CASTAN98.PTC			CASTAN98.PCA		
Numero Estación: 92			Numero Estación: 92		
Nombre Estación: CASTANOS			Nombre Estación: CASTANOS		
Fecha de Inicio: 13-Jun-98 15:00:00			Fecha de Inicio: 13-Jun-98 15:00:00		
Fecha de Terminación: 03-Sep-98 20:08:00			Fecha de Terminación: 03-Sep-98 20:08:00		
Eventos Registrados: 444			Eventos Registrados: 444		
Eventos Perdidos: 0			Eventos Perdidos: 0		
Total de Eventos: 444			Total de Eventos: 444		
----- archivo con base de tiempo corregida			----- archivo con base de tiempo corregida		
-----			y calibración adherida -----		
EVENTO	FECHA	HORA	EVENTO	FECHA	HORA
0000	13/Jun/98	15:00:00	0000	13/Jun/98	15:00:00
18	04/Jul/98	00:10:12	18	04/Jul/98	00:10:12 .2356
19	04/Jul/98	00:11:13	19	04/Jul/98	00:11:12 .2356
20	04/Jul/98	00:12:36	20	04/Jul/98	00:12:35 .2356
. . . . .			. . . . .		
205	05/Ago/98	23:21:08	205	05/Ago/98	23:21:07 .2265
206	05/Ago/98	23:21:38	206	05/Ago/98	23:21:38 .2265
207	05/Ago/98	23:22:10	207	05/Ago/98	23:22:10 .2265
208	05/Ago/98	23:22:53	208	05/Ago/98	23:22:53 .2265
209	05/Ago/98	23:24:06	209	05/Ago/98	23:24:06 .2265
210	05/Ago/98	23:26:02	210	05/Ago/98	23:26:02 .2265
. . . . .			. . . . .		
250	07/Ago/98	02:05:24	250	07/Ago/98	02:05:24 .2272
251	07/Ago/98	02:06:08	251	07/Ago/98	02:06:07 .2272
252	07/Ago/98	02:06:59	252	07/Ago/98	02:06:59 .2272
253	07/Ago/98	02:07:45	253	07/Ago/98	02:07:44 .2272
254	07/Ago/98	02:08:22	254	07/Ago/98	02:08:22 .2272
255	07/Ago/98	02:08:50	255	07/Ago/98	02:08:50 .2272
256	07/Ago/98	02:09:17	256	07/Ago/98	02:09:17 .2272
257	07/Ago/98	02:09:39	257	07/Ago/98	02:09:38 .2272
258	07/Ago/98	02:10:06	258	07/Ago/98	02:10:06 .2272
259	07/Ago/98	02:10:31	259	07/Ago/98	02:10:31 .2272
260	07/Ago/98	02:11:01	260	07/Ago/98	02:11:01 .2272
. . . . .			. . . . .		
360	09/Ago/98	01:17:26	360	09/Ago/98	01:17:25 .2285
361	09/Ago/98	01:17:49	361	09/Ago/98	01:17:48 .2285
362	09/Ago/98	01:18:15	362	09/Ago/98	01:18:14 .2285
363	09/Ago/98	01:18:45	363	09/Ago/98	01:18:44 .2285
364	09/Ago/98	01:19:18	364	09/Ago/98	01:19:18 .2285
365	09/Ago/98	01:19:42	365	09/Ago/98	01:19:42 .2285
366	09/Ago/98	01:20:08	366	09/Ago/98	01:20:07 .2285
367	09/Ago/98	01:20:27	367	09/Ago/98	01:20:26 .2285
368	09/Ago/98	01:20:51	368	09/Ago/98	01:20:50 .2285
369	09/Ago/98	01:21:10	369	09/Ago/98	01:21:09 .2285
370	09/Ago/98	01:21:32	370	09/Ago/98	01:21:31 .2285
371	09/Ago/98	01:21:56	371	09/Ago/98	01:21:55 .2285
372	09/Ago/98	01:22:25	372	09/Ago/98	01:22:24 .2285
373	09/Ago/98	01:22:58	373	09/Ago/98	01:22:58 .2285
374	09/Ago/98	01:23:41	374	09/Ago/98	01:23:40 .2285
375	09/Ago/98	01:24:35	375	09/Ago/98	01:24:34 .2285
376	09/Ago/98	01:25:30	376	09/Ago/98	01:25:29 .2285
377	09/Ago/98	01:26:22	377	09/Ago/98	01:26:21 .2285
378	09/Ago/98	01:27:48	378	09/Ago/98	01:27:48 .2285

Observe que en el archivo crudo mostrado en la figura V.5 aparecen eventos registrados el 19 de agosto que ya no aparecen en el archivo tipo .PVG por corresponder a eventos falsos generados durante la visita del 19 de agosto, de acuerdo a la información de bitácora (ver tabla V.2). También en el encabezado del archivo tipo .PVG aparecen referidos 444 eventos en total y no 382 como en el archivo CASTAN19.AGO, esto se debe a que en el archivo CASTAN98.PVG se incluyen eventos registrados después de la visita del 19 de agosto y hasta la visita para desmontar la estación el 3 de septiembre.

#### V.5.2.2.- *Corrección de la base del tiempo en registros pluviográficos*

En la operación de los pluviógrafos en campo el reloj del registrador tiende a presentar un atraso o un adelanto por lo que es necesario obtener dicha imprecisión. El atraso total (o adelanto) se obtiene al comparar la fecha y hora del GPS con la fecha y hora del registrador en cada visita. En cada visita se sincroniza el reloj del registrador con la hora del GPS después de obtener la diferencia entre ellos. Utilizando un programa de computadora específicamente diseñado para ello, se corrigen las columnas de fecha y hora de los registros tipo .PVG. La corrección se realiza interpolando linealmente entre cero y el retraso (adelanto) detectado con respecto a la fecha hora, ésto corresponde a la hipótesis de que el reloj se atrasa o adelanta de manera proporcional con el tiempo transcurrido de operación. Esta corrección es de gran importancia pues los registros pluviográficos eventualmente son comparados con productos de radar que se renuevan cada aproximadamente 5 minutos. Los retrasos típicos que se han detectado en dichos relojes (de unos cinco minutos por mes) son ya del orden de magnitud del lapso entre productos de radar. Los archivos que corresponden a los registros con la base del tiempo ya corregida tienen la misma estructura y el mismo nombre que los tipo .PVG; pero con la extensión .PTC (Pluviograma con Tiempo Corregido). Las figuras V.6, en su columna izquierda, muestra el mismo archivo tipo .PTC que en el caso de la figura y V.5 pero con la base de tiempo corregida.

V.5.2.3.- Adición de parámetros de calibración a registros pluviográficos.

Durante la operación de los pluviógrafos la cantidad de agua necesaria para producir una basculación puede variar en algunos pluviógrafos. Esta variación es atribuida a acumulación de polvo y sedimentos y a la oxidación del eje de giro principalmente aunque también se llega a presentar interferencia por telarañas e insectos. En cada visita de campo se verifica en los pluviógrafos la calibración, es decir, se obtiene experimentalmente la lámina requerida para producir una basculación. Lo anterior permite obtener la variación total del factor de calibración entre las dos visitas. Esta variación total del factor de calibración se interpola linealmente a lo largo del registro en términos de la fecha hora, para adherir una columna de la lámina (en mm) requerida para la basculación en cada instante presente en el registro pluviográfico. Esta adición del factor de calibración se realiza utilizando un programa de cómputo electrónico.

**Tabla V.2.-** Resumen de información de bitácora de campo de la estación Castaños utilizada para ejecutar el programa de corrección del tiempo y adición del factor de calibración a los pluviogramas.

ESTACION	PIVOTES (aa-mm-dd/hh:mm:ss)	HORA G.P.S.	HORA EN EL REGISTRADOR	$\Delta t$ (Seg)	FACTOR DE CALIBRACIÓN (mm)
CASTAN98.	98-06-13/15:00:00	15-00-00	15-00-00	0	0.2615
	98-07-19/21:18:00	21-18-00	21-15-20	-160	0.2155
	98-08-19/19:13:10	19-13-10	19-11-00	-130	0.2351
	98-09-03/20:08:00	20-08-00	20-06-18	-102	0.2451

El resultado de esta operación es un archivo con estructura similar a la de los archivos .PVG y .PTC, pero con la columna adicional del valor de calibración; en este caso el archivo correspondiente tiene sufijo PCA (Pluviograma con Calibración Adherida).

V.5.3.- Preparación de datos de radar

Los datos de radar para que puedan ser relacionados con mediciones de lluvia deben provenir de productos de reflectividad instantánea de la lluvia. Los archivos de radar que fueron suministrados por el NCAR son productos bidimensionales que no corresponden a la medición de la reflectividad instantánea y que tienen las siguientes características:

- a) Tamaño de la imagen 300 x 300 pixeles.
- b) Formato: texto (6 caracteres por pixel para 96 y 8 caracteres por pixel para 97 y 98, totalizando 540 KB y 720 KB respectivamente por producto).
- c) Cobertura de cada pixel: 750 m x 750 m.
- d) Cobertura de la imagen completa.  $-112.5 \text{ km.} \leq x \leq +112.5 \text{ km.}$ ,  $-112.5 \text{ km.} \leq y \leq +112.5 \text{ km.}$

- e) Variable codificada en la imagen: lámina de lluvia acumulada desde el inicio de operación del radar en el día, obtenida de la máxima reflectividad en la vertical y transformando a intensidad de lluvia con la expresión de Marshall- Palmer.
- f) Incremento de tiempo entre productos: alrededor de 4.8 minutos para 1996 e inicio de 1997, de 4 minutos a partir del 4 de julio de 1997; pero no con absoluta regularidad. Para los productos de 1998 el incremento de tiempo es de 3.71 minutos con muy buena regularidad.
- g) Número de productos de radar para 1996, 3461 (1.8 GB descompactados) y 8717 para 1997 (8.1 GB descompactados); para 1998, 9248 productos de radar (8.7 GB descompactados).

La consecuencia inmediata de haber recibido del NCAR productos de radar diferentes a los de reflectividad instantánea, es que hay que hacer una conversión de estos productos y posteriormente preparar los productos de radar para un procesamiento conjunto con los datos pluviográficos. Esta conversión y preparación de los productos de radar se enumera y describe a continuación.

1).- *Conversión de los productos de radar del NCAR a reflectividad instantánea.*

Para reconstruir los productos de máxima reflectividad instantánea en la vertical es necesario identificar primero los instantes en los que se regresa a cero el acumulado. La hora de reinicialización del radar es irregular. Para ayudar en la identificación de estos instantes se corre un programa en la PC. Con el programa se accede a cada archivo de radar, calcula el valor promedio de los 90,000 píxeles y forma otro archivo con una lista de instantes (año/mes/día/hora:min:seg) con su respectivo valor promedio. Si los instantes se encuentran en orden cronológico, un cambio significativo de este valor de pixel promedio hacia abajo (idealmente hasta cero o cerca de cero) indicará que una reinicialización del acumulado ocurrió.

Mediante un examen visual de los valores promedio por imagen se determina el momento de reinicialización del radar, separando los productos de radar en conjuntos (o segmentos) de productos de radar dentro de los cuales existe un acumulado continuo. Para 1998 se obtuvieron 73 segmentos. Los segmentos formados por menos de 5 productos continuos no se consideraron. A cada uno de los segmentos de radar se le agregó una columna consistente en la coordenada tiempo en días y fracción de días, del tiempo transcurrido desde el 1 de junio del año en cuestión.

Cada conjunto de acumulación continua de productos de radar es procesado por separado para obtener otro conjunto de productos de radar pero ahora de reflectividad (logarítmica) instantánea. Para ahorrar espacio en disco duro, los productos de reflectividad se codifican en un solo byte por pixel suponiendo que cada una de las cuentas digitales (de 0 a 255) corresponde a una reflectividad de 1/2 dBZ, cubriendo de  $Z=-30\text{dBZ}$  (correspondiente a cuenta=0) a  $Z=+97.50$  (correspondiente a cuenta=255).

Las operaciones que realiza el programa para cada pixel en cada producto de radar son:

$$R_{i+1} = (A_{i+1} - A_i) / (t_{i+1} - t_i)$$

$$z_{i+1} = 200(R_{i+1})^{1.6}$$

$$Z_{i+1} = 10 \log_{10} (z_{i+1} / 1 \text{ mm}^6 / \text{mm}^3)$$

$$C_{i+1} = 2(Z_{i+1} + 30)$$

Donde:

- A: Acumulado de lluvia en mm(cantidad original en los productos del NCAR.)
- t: tiempo en horas del producto de radar.
- R: intensidad de lluvia en mm/h
- i: instante previo
- i+1: instante que se procesa.
- z: factor de reflectividad atmosférica en  $\text{mm}^6 / \text{m}^3$
- Z: reflectividad en dBZ
- C: cuenta digital con un byte (de 0 a 255, entero); cantidad plasmada en los productos transformados.

Con el proceso anterior se reduce el almacenamiento de 512 KB a 90KB, muy conveniente para el procesamiento también. Los archivos de productos de radar con reflectividad instantánea tienen la extensión \*.zzz (Rosengaus *et al.*, 1999).

2).- Obtención de la lista de instantes con productos de radar. Esta lista contiene los instantes cronológicamente ordenados en que se registró un producto de radar. La intensidad de lluvia quasi-instantánea de registros pluviográficos en tierra debe ser calculada, lógicamente, para los instantes en los que se cuenta con un producto de radar; cada producto de radar tiene por nombre precisamente la hora minuto y segundo (hhmmss) en que se produce y todos los productos que existen para un día dado han quedado guardados en un subdirectorío que tiene por nombre precisamente el año, mes y día al que pertenecen (zzaammdd). Por lo que del nombre de los productos de radar se obtiene la lista de instantes con existencia de productos de radar. Esta lista es la base para el procesamiento conjunto de datos de radar y pluviográficos.

3).- Una vez que se tienen los productos de radar en forma de reflectividad resulta conveniente darle una revisada ocular al despliegue gráfico de cada producto, para detectar posibles irregularidades en las imágenes. Lo anterior es realmente un control de calidad de cada uno de los productos. Hacer este control de calidad a los 21426 productos de radar consume una cantidad de trabajo considerable del calificador humano. La calificación se hace en función de la calidad de la representación gráfica del fenómeno físico de la precipitación en el producto o imagen. La precipitación de tormentas convectivas típicamente se presenta más intensa en su centro y dicha intensidad decrece al alejarse del centro hasta llegar a cero. La calificación de un producto se realiza en el contexto de la secuencia temporal a la que pertenece. La calificación en este caso se hizo en términos de

producto bueno, regular, malo e inconsecuente (por no haber ninguna tormenta presente o sólo pequeños puntos de ruido).

Para ilustrar lo anterior se observa en la figura V.7a una parte del producto de 300 x 300 pixeles con los valores de reflectividad instantánea en dBZ correspondiente al producto de las 16:55:50 hora Z del día 14 de julio de 1998. Estos datos (11x28) corresponden al área de lluvia más intensa de la tormenta encerrada en el cuadro chico del II cuadrante en la figura V.7b. En la figura V.7b se observa un despliegue completo de la imagen, a la que se le ha sobrepuesto el trazo de anillos concéntricos y la localización de algunos pueblos. En la figura V.7c se presenta en acercamiento del área de la imagen de la figura V.7c delimitada por el cuadro pequeño y además para los cinco productos siguientes.

La calificación de calidad otorgada a cada producto es completamente independiente del valor de calibración que de los productos emergen, por lo que no debe producir ningún sesgo artificial en la nube de puntos de calibración. Los principales problemas detectados son:

- a).- Ecos de relativamente alta intensidad que no forman parte de una estructura típica que represente algún tipo de precipitación.
- b).- Falta de continuidad temporal en los ecos de una imagen con respecto a los anteriores o posteriores en la secuencia.
- c).- Eliminación imperfecta de ecos fijos.
- d).- Falta de continuidad espacial de la intensidad de precipitación en la representación de la tormenta y cambios que no son graduales en la estructura de la tormenta. En la escala de colores con los que se representa a la intensidad se presentan saltos o colores que no quedan representados en el producto.

Las 4 posibles calificaciones representan:

- . **calidad buena**: sin irregularidades evidentes.
- . **calidad regular**: algunos defectos son identificables pero no parecen afectar en forma generalizada a todo el dominio .
- . **calidad mala**: defectos de tipo mencionados fuertemente enfatizados.
- . **calidad inconsecuente**: prácticamente no existen ecos, sólo puntos.

Resultados:

Para 1996 y 1997:

- 26% Buenas
- 22 % regulares
- 13 % malas
- 38% inconsecuente

Para 1998:

- 10% Buenas
- 24 % regulares
- 34 % malas
- 31% inconsecuente

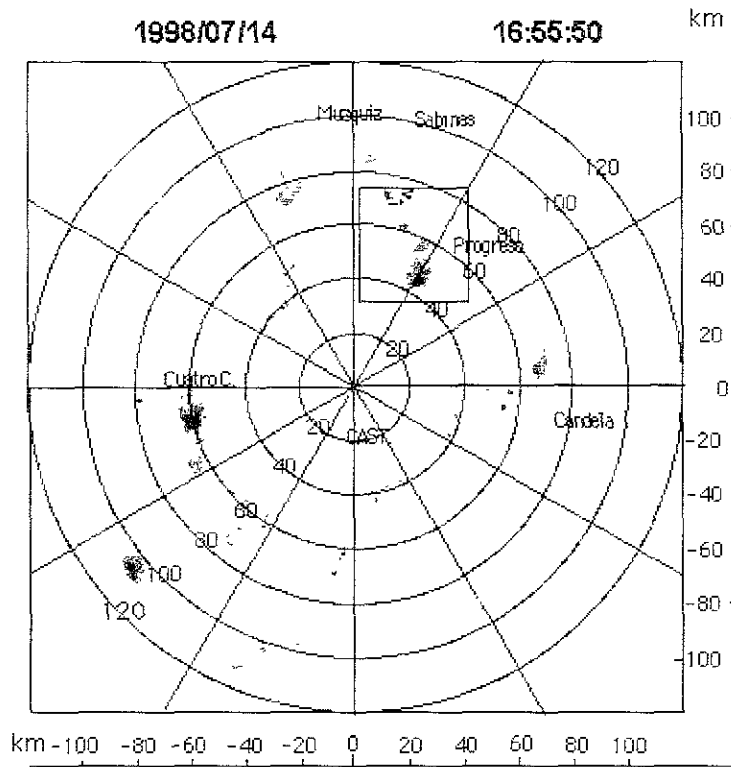
Finalmente esta calificación no tuvo ningún efecto en la relación z-R encontrada; pero la recomendación de realizar dicha calificación sigue siendo válida. Algunos de los problemas detectados siguen sin explicación; sobre todo si se considera que las veces en que se tuvo oportunidad de observar las imágenes de los ecos de hidrometeoros en tiempo real, procesados por el programa TITAN durante el PARC, éstos presentaban un aspecto típico.

**Figura V.7a.-** Fracción de la matriz de 300x300 con datos de reflectividad instantánea en dBZ del producto de radar correspondiente a las 16:55:50 hora Z del día 14 de julio de 1998.

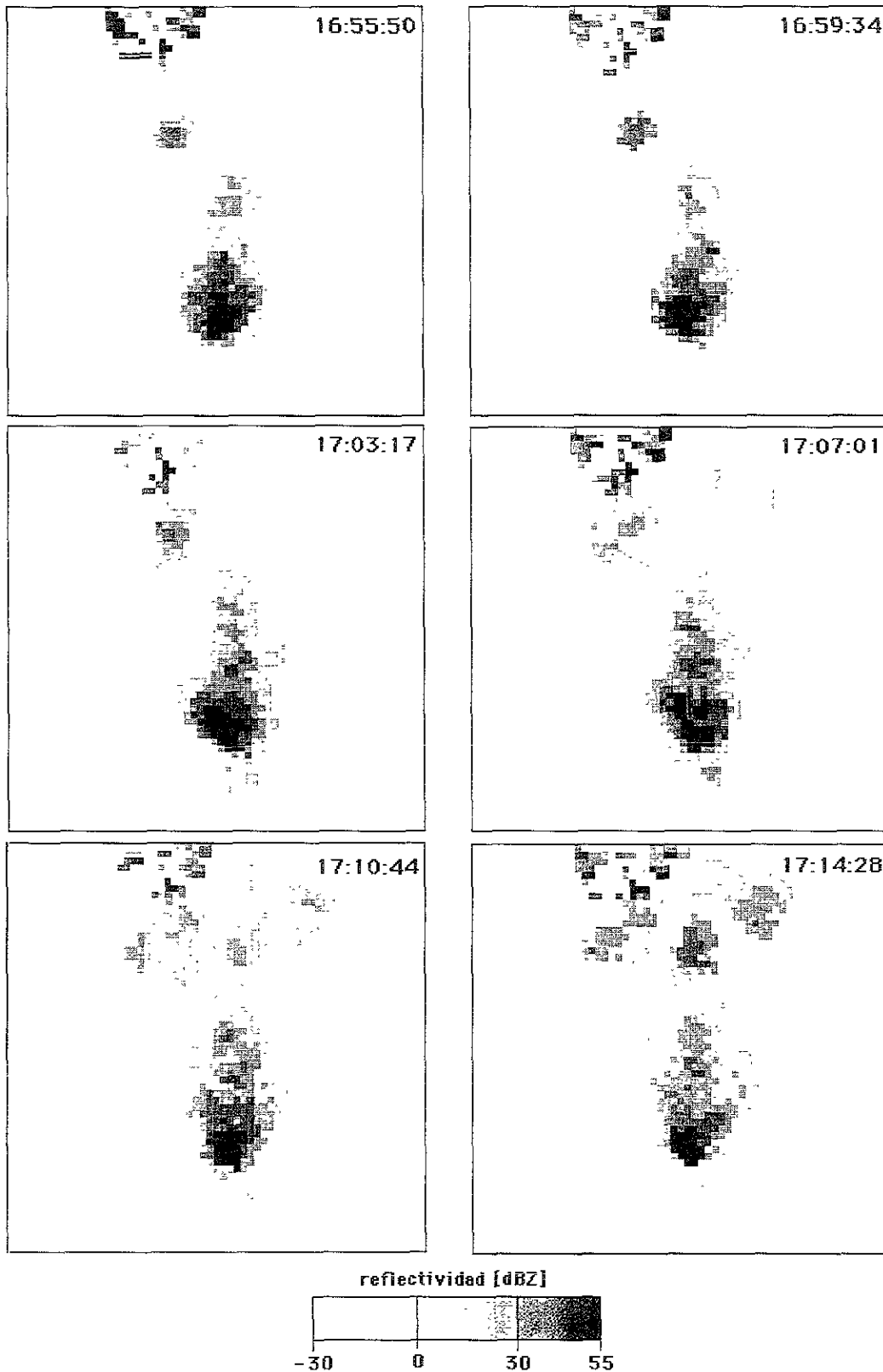
-30.00	-30.00	15.00	24.00	15.00	15.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
-30.00	20.00	20.00	29.00	24.00	24.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
-30.00	-30.00	18.00	27.00	27.00	24.00	15.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
15.00	15.00	25.50	20.00	20.00	25.50	24.00	15.00	-30.00	-30.00	-30.00
-30.00	30.50	30.50	28.00	31.00	24.00	18.00	20.00	-30.00	-30.00	-30.00
15.00	24.00	31.00	32.00	28.50	24.00	24.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
26.50	26.50	27.00	28.50	28.50	15.00	15.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
21.50	24.00	25.00	20.00	15.00	15.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
25.00	24.00	20.00	20.00	10.50	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
23.00	18.00	10.50	15.00	24.00	24.00	20.00	15.00	15.00	-30.00	-30.00
23.00	25.00	23.00	20.00	24.00	29.00	24.00	15.00	-30.00	-30.00	-30.00
32.00	29.50	35.00	18.00	20.00	29.00	23.00	23.00	15.00	-30.00	-30.00
31.00	38.50	38.50	26.50	25.00	18.00	25.00	-30.00	15.00	-30.00	-30.00
32.50	36.00	36.50	36.50	27.00	20.00	10.50	10.50	-30.00	10.50	-30.00
37.50	38.50	39.50	34.50	27.50	24.00	25.00	18.00	15.00	-30.00	-30.00
36.50	36.50	42.00	36.50	33.00	30.00	27.50	25.00	15.00	-30.00	-30.00
38.50	37.50	38.00	33.50	38.50	35.00	30.50	29.00	20.00	-30.00	-30.00
43.00	43.00	42.50	37.50	38.50	35.00	34.00	29.00	-30.00	-30.00	-30.00
41.50	45.00	44.00	41.00	41.00	38.00	33.00	33.00	10.50	-30.00	-30.00
46.50	51.00	44.50	46.50	42.50	41.00	36.50	21.50	10.50	-30.00	-30.00
51.00	51.00	50.50	50.50	45.00	34.50	21.50	18.00	-30.00	-30.00	-30.00
51.00	51.00	51.00	48.00	39.00	39.00	21.50	10.50	-30.00	-30.00	-30.00
50.00	47.50	46.50	45.00	40.00	20.00	10.50	15.00	-30.00	-30.00	-30.00
42.50	42.50	40.50	30.00	18.00	20.00	18.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
29.00	21.50	29.50	29.00	10.50	10.50	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
-30.00	10.50	10.50	18.00	15.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00



**Figura V.7b.-** Despliegue completo de la imagen de reflectividad instantánea en dBZ del producto de radar de las 16:55:50 hora Z del día 14 de julio de 1998. Se le ha sobrepuesto el trazo de anillos concéntricos y la localización de algunos pueblos.



**Figura V.7c.-** Evolución de la tormenta dentro del área delimitada por el cuadro pequeño en la imagen de la figura V.7c mostrada con seis productos consecutivos.



V.5.4.- Extracción de acumulados de registros pluviográficos alrededor de los instantes con producto de radar

Debe recordarse que el objetivo es llegar a comparar los datos pluviográficos con los datos de radar por lo que en esta sección se empieza a introducir información sobre los productos de radar, específicamente el instante en que se obtiene cada uno de los productos. Puesto que los datos pluviográficos originales consisten en una secuencia de fechas/horas y lámina correspondiente a cada evento de basculación es necesario obtener la lámina acumulada de lluvia en un intervalo de tiempo para que se comparen con los datos de reflectividad instantánea. La lámina acumulada en el intervalo de tiempo resulta ser la intensidad de lluvia promedio en el tiempo dado. Puesto que el tiempo que transcurre entre un producto de radar y el siguiente tiene algunas variaciones, sobre todo en productos de diferente año, se optó por utilizar el intervalo de tiempo de acumulación constante e igual a cinco minutos para el cálculo de la intensidad y donde además este intervalo de 5 minutos es centrado en el instante medio en que se produce cada producto de radar (Rosengaus *et al.*, 1999).. Para esta tarea se emplea un programa de computo, el cual utiliza como entrada un registro pluviográfico (formato estándar tipo .PCA) y una lista de archivos de productos de radar de cuyos nombres se puede obtener la fecha y la hora de cada uno. Se calculan las láminas acumuladas de lluvia en el intervalo de tiempo de 5 minutos centrados alrededor de los instantes de tiempo de la lista de entrada. Su salida corresponde a un archivo que contiene los nombres completos (con trayectoria) de los archivos de radar con su lámina acumulada correspondiente en mm, como se ejemplifica en la figura V.8.

**Figura V.8.-** Ejemplo de formato de archivo pluviográfico acumulado en 5 minutos (porción de CASTAN98.A5M).

```
-----
```

1998/07/03/23 56.41	0 0000
1998/07/04/00 00:24	0 0000
1998/07/04/00.04 07	0 0000
1998/07/04/00 07.50	0 2356
1998/07/04/00 11 33	2.5916
1998/07/04/00:15.16	3 7696
.....	.....
1998/08/05/23 20:57	2 7180
1998/08/05/23 24 39	0.9060
.....	.....
1998/08/07/02 00:47	2 4992
1998/08/07/02 04:31	1 8176
1998/08/07/02 08 13	2 0448
1998/08/07/02 11 54	2 7264
.....	.....
1998/08/09/01:17:27	2 9705
1998/08/09/01 21:09	2 5135
1998/08/09/01 24 50	1 3710
1998/08/09/01 28 32	0 4570
.....	.....

```
-----
```

El programa identifica las fechas/horas de inicio y fin del pluviograma de tal manera que los archivos de radar, antes del inicio o después del fin, no son incluidos en el archivo de salida. Un ejemplo del formato de salida (archivo tipo .A5M ) se presenta en la figura V.8.

V.5.5.- Combinación de datos de radar y datos pluviográficos.

V.5.5.1.- *Obtención de datos previa a la combinación*

Puesto que los datos pluviográficos corresponden a mediciones en puntos sobre la superficie del terreno a los cuales les corresponde una determinada posición geográfica y los datos de radar en el PARC corresponden a imágenes o productos con 90000 pixeles cada producto, cada valor de pixel representa un promedio de la reflectividad instantánea para un área de 750 metros por 750 metros. Conocida la posición geográfica del radar, la cual coincide y queda representada por el centro de la imagen o producto de radar, y si las coordenadas físicas de radar en las esquinas del producto son: (-112.5 km, 112.5 km), (112.5 km, 112.5 km), (112.5 km, -112.5 km) y (-112.5 km, -112.5 km) para las esquinas superior izquierda, superior derecha, esquinas inferior derecha e izquierda respectivamente entonces la coordenada (0,0) corresponde a la posición física del radar, lo cual se representa de manera gráfica en la figura V.9. Con lo anterior es fácil obtener la posición de los pluviógrafos en términos de coordenadas físicas de radar para después determinar cual pixel del producto de radar es el que contiene al punto donde se localiza cada uno de los pluviógrafos y de la misma manera se determinan los ocho pixeles vecinos. La numeración de los pixeles es como se muestra también en la figura V.9. Conociendo los nueve pixeles más cercanos a cada pluviógrafo se pueden hacer diferentes combinaciones o comparaciones con los datos pluviográficos respectivos.

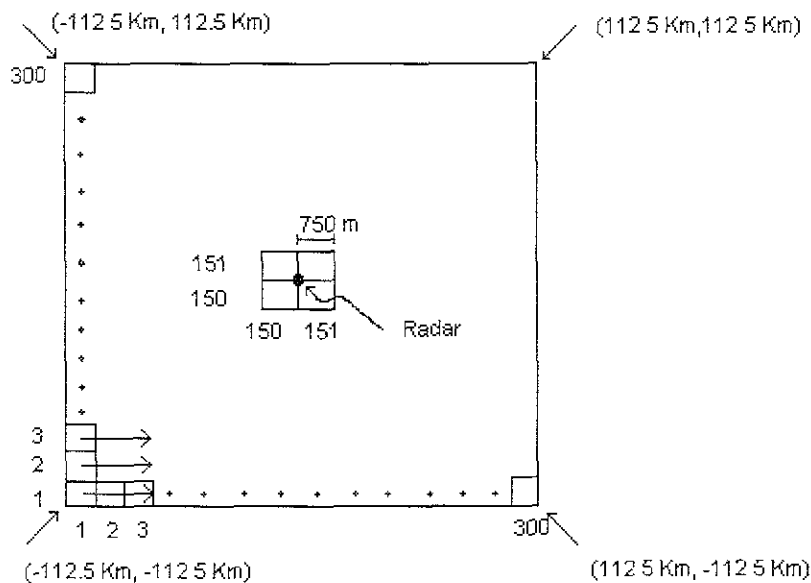
Así primero se determina la distancia del radar a la estación pluviográfica considerando que:

$$1^\circ \text{ Longitud} = 111.111 \text{ Cos (Latitud del radar) km}$$

$$1^\circ \text{ Latitud} = 111.111 \text{ km}$$

Así es posible obtener las proyecciones en "x" y en "y" de la distancia entre el radar y cada estación pluviográfica para posteriormente dividir estas proyecciones entre las dimensiones del pixel que para este caso son 0.75 km (tanto en x como en y) y de esta manera se obtiene el número de pixeles que quedan contenidos en esta proyección y de aquí es fácil obtener el pixel que corresponde a la posición del pluviógrafo con la ayuda de la interpretación de la figura V.9.

Figura V.9.- Conformación del producto de radar de 300 X 300 pixeles.



Por ejemplo; a la estación Castaños98 le corresponden las coordenadas siguientes: Longitud =  $-101.42195^\circ$  y Latitud =  $+26.7966^\circ$  ; así mismo al radar durante 98 le corresponden las siguientes coordenadas: Longitud =  $-101.45930^\circ$  y de Latitud =  $26.95425^\circ$  con lo que:

La proyección en x es:

$$Dx = 111.111(-101.42195^\circ + 101.45930^\circ)\text{Cos}(26.95425^\circ\pi \text{ rad}/180^\circ)$$

$$Dx = +3.699 \text{ km}$$

que equivale a 4.932 veces la dimensión en "x" del pixel

y la proyección en y es:

$$Dy = 111.111(+26.7966^\circ - 26.95425^\circ)$$

$$Dy = -17.5166 \text{ km}$$

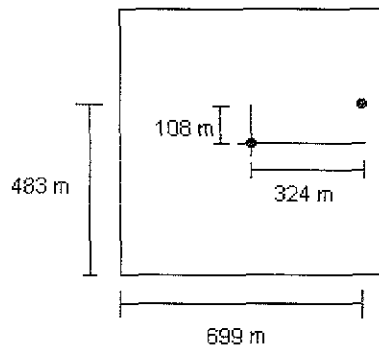
que equivale a -23.35547 veces la dimensión en "y" del pixel con lo que la estación pluviográfica de Castaños durante 98 se localiza en el pixel en "x" número 154.932 y en el pixel en "y" número 126.64453 lo que lleva al pixel (155,127) ya que no hay pixel (0,0).

También se determina la localización del pluviógrafo dentro del pixel en términos de un sistema de coordenadas cuyo origen es el centro del pixel con el propósito de conocer la distancia del centro de los nueve píxeles más cercanos al pluviógrafo y poder calcular un valor ponderado de reflectividad para el punto donde se encuentra el pluviógrafo basándose en dichas distancias.

Así que de la fracción decimal del pixel en "x" No. 154.932 se obtiene que el pluviógrafo se encuentra a 699 m de la frontera izquierda del pixel y de la fracción decimal del pixel en "y" No. 126.64453 se obtiene que el pluviógrafo se encuentra a 483 m de la frontera sur del pixel (155,127) y que por lo tanto la distancia en "x" y en "y" al centro del pixel es 324 m y 108 m respectivamente; lo anterior queda representado en la figura V.10.

El pixel que corresponde a la localización de la estación y su ubicación dentro del pixel se obtienen para todas las estaciones pluviográficas siguiendo el procedimiento descrito.

**Figura V.10.-** Localización de la estación Castaños 98 con respecto al centro del pixel más cercano.



**V.5.5.2.-** Obtención de la reflectividad de los 9 pixeles más cercanos a cada estación pluviográfica

Mediante un programa se obtiene el valor de reflectividad de los 9 pixeles más cercanos a cada estación pluviográfica. Este programa utiliza como entrada un archivo con formato .A5M (acumulados en cinco minutos alrededor de cada producto de radar disponible) con lo que es posible abrir y entrar a cada uno de los productos de radar cuyo nombre viene enlistado en la primera columna del archivo tipo \*.A5M (ver figura V.8.). Con las coordenadas del pixel central como dato de entrada al programa (para la estación Castaños es el (155, 127) ) éste extrae de cada producto de radar el valor de reflectividad del pixel correspondiente al pluviógrafo y el valor de reflectividad de sus ocho vecinos más cercanos. La salida es un archivo similar al de entrada pero con nueve columnas adicionales con dichos valores de reflectividad (después de la columna de la lámina acumulada).

Al archivo de salida se le asigna la extensión .P-R. El programa se corre para cada uno de los archivos tipo .A5M existente. Parte del archivo CASTAN98.P-R se muestra en la figura V.11. La interpretación de las columnas de los archivos tipo \*.P-R es como sigue:

**Figura V.11.-** Ejemplo de formato de archivo combinado tipo .P-R (CASTAN98.P-R).

1998/07/03/23:56:41	0.0000	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
1998/07/04/00:00:24	0.0000	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
1998/07/04/00:04:07	0.0000	-30.00	-30.00	35.50	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
1998/07/04/00:07:50	0.2356	-30.00	35.50	-30.00	-30.00	35.50	35.50	-30.00	-30.00	-30.00
1998/07/04/00:11:33	2.5916	35.50	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00
1998/07/04/00:15:16	3.7696	10.50	10.50	10.50	-30.00	10.50	10.50	-30.00	-30.00	-30.00
1998/08/05/23:20:57	2.7180	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	-30.00	44.50	-30.00	-30.00	-30.00
1998/08/05/23:24:39	0.9060	10.50	21.50	23.00	10.50	10.50	20.00	10.50	10.50	45.00
1998/08/07/02:00:47	2.4992	15.00	45.00	18.00	10.50	45.00	45.00	10.50	10.50	45.00
1998/08/07/02:04:31	1.8176	15.00	20.00	45.00	45.00	15.00	20.00	-30.00	45.00	15.00
1998/08/07/02:08:13	2.0448	15.00	18.00	21.50	15.00	45.00	18.00	45.00	15.00	45.00
1998/08/07/02:11:54	2.7264	15.00	45.50	45.50	45.00	20.00	45.50	15.00	15.00	20.00
1998/08/09/01:17:27	2.9705	18.00	20.00	20.00	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00	43.00
1998/08/09/01:21:09	2.5135	43.00	43.50	43.50	15.00	43.00	43.00	15.00	15.00	15.00
1998/08/09/01:24:50	1.3710	10.50	15.00	15.00	43.00	10.50	43.00	43.00	43.00	10.50
1998/08/09/01:28:32	0.4570	15.00	15.00	15.00	15.00	43.00	15.00	15.00	15.00	43.00

Columna 1: fecha/hora

Columna 2: lámina acumulada de lluvia en el intervalo de 5 minutos centrados alrededor del instante de generación del producto de radar.

Columna 3: reflectividad en dBZ del pixel al NW del pluviógrafo.

Columna 4: reflectividad en dBZ del pixel al N del pluviógrafo.

Columna 5: reflectividad en dBZ del pixel al NE del pluviógrafo.

Columna 6: reflectividad en dBZ del pixel al W del pluviógrafo.

Columna 7: reflectividad en dBZ del pixel sobre el pluviógrafo.

Columna 8: reflectividad en dBZ del pixel al E del pluviógrafo.

Columna 9: reflectividad en dBZ del pixel al SW del pluviógrafo.

Columna 10: reflectividad en dBZ del pixel al S del pluviógrafo.

Columna 11: reflectividad en dBZ del pixel al SE del pluviógrafo.

### V.5.5.3.- Obtención de promedios pesados de reflectividad

La obtención de promedios pesados de reflectividad entre los píxeles más cercanos a la estación pluviográfica se hace con el fin de encontrar aquél valor de reflectividad que se correlaciona mejor con los valores de intensidad de lluvia medida con pluviógrafo por lo que utilizando un programa de cómputo el cual toma como entrada un archivo tipo \*.P-R del que se utilizan la serie de mediciones síncronas de pluviógrafo y reflectividad logarítmica de los nueve píxeles alrededor del radar, como se puede ver en la figura V.11 para obtener un nuevo archivo tipo \*.Z-R (ver figura V.12) que contiene cinco columnas cuya interpretación es:

Columna 1: fecha/hora

Columna 2: Intensidad de lluvia en mm/h representativa de 2.5 minutos  
Antes hasta 2.5 minutos después del instante en cuestión.

Columna 3: reflectividad en dBZ del píxel central de la vecindad del pluviógrafo.

Columna 4: reflectividad promedio pesado en dBZ de los cuatro píxeles más cercanos.

Columna 5: reflectividad promedio pesado en dBZ de los nueve píxeles más cercanos al pluviógrafo.

Como se puede observar en la figura V.12. el archivo tipo .Z-R es básicamente similar al tipo \*.P-R de la figura V.11, pero que substituye a los valores Z de los nueve píxeles por promedios ponderados de los mismos. El promedio ponderado se obtiene con un algoritmo de interpolación basado en el inverso de la distancia del pluviógrafo al centro de cada píxel, pero operando sobre las reflectividades en  $\text{mm}^6/\text{m}^3$  (z minúscula) en concordancia con la interpretación física de reflectividad la que define a z como la sumatoria de los diámetros de todas las gotas elevados a la sexta potencia por lo que no se trabaja sobre las reflectividades en dBZ (Z mayúscula). El archivo final queda, como el original, en términos de Z mayúscula.

El formato del archivo de salida es completamente análogo al de entrada, pero con tres columnas de reflectividades en lugar de las nueve originales; Además, la columna de lámina en mm medida por el pluviógrafo es substituida por la equivalente intensidad de lluvia quasi-instantánea en unidades de mm/h, esto dividiendo entre el lapso de acumulación (expresado en horas).

Al usuario del programa se le solicitan como datos las distancias horizontal y vertical de la estación pluviográfica en cuestión con respecto al centro del píxel central de los nueve que forman la vecindad. Estas distancias deben considerarse positivas si el pluviógrafo se encuentra al Este o al Norte del centro del píxel central (para la estación Castaños fueron 324 m en "x" y 108 metros en "y"). El programa utilizado supone que el tamaño de los píxeles es de 0.75 km x 0.75 km (tamaño del píxel del radar de Monclova en el contexto del proyecto PARC). El usuario también debe proporcionar el lapso de acumulación de la lámina pluviográfica en minutos.



**Figura V.12.- Ejemplo de formato de archivo combinado tipo .Z-R (CASTAN98.Z-R).**

---

1998/07/03/23:56:41	0.0000	-30.00	-30.00	-30.00
1998/07/04/00:00:24	0.0000	-30.00	-30.00	-30.00
1998/07/04/00:04:07	0.0000	-30.00	27.66	25.67
1998/07/04/00:07:50	2.8272	35.50	34.72	32.73
1998/07/04/00:11:33	31.0992	-30.00	-30.00	23.56
1998/07/04/00:15:16	45.2352	10.50	10.50	8.93
.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....
1998/08/05/23:20:57	32.6160	-30.00	39.10	37.11
1998/08/05/23:24:39	10.8720	10.50	19.58	34.32
.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....
1998/08/07/02:00:47	29.9904	45.00	44.22	42.87
1998/08/07/02:04:31	21.8112	15.00	37.21	39.26
1998/08/07/02:08:13	24.5376	45.00	40.71	40.77
1998/08/07/02:11:54	32.7168	20.00	43.49	42.17
.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....
1998/08/09/01:17:27	35.6460	43.00	41.20	41.58
1998/08/09/01:21:09	30.1620	43.00	43.18	41.59
1998/08/09/01:24:50	16.4520	10.50	37.62	39.05
1998/08/09/01:28:32	5.4840	43.00	38.71	38.04
1998/08/09/01:32:14	0.0000	15.00	35.71	33.73
1998/08/09/01:35:56	0.0000	24.00	36.24	36.04
.....	.....	.....	.....	.....
.....	.....	.....	.....	.....

---

### V.5.6.- Integración de la base de datos para la calibración hidrológica del radar

Para formar la base de datos que permite obtener la relación (o relaciones) de transformación de reflectividad a intensidad de lluvia primero se obtiene la información que caracteriza a cada estación pluviográfica. Dicha información contiene los siguientes datos: latitud, longitud, distancia radial al radar y azimut. Utilizando un programa se integran los anteriores datos a cada uno de los registros de los archivos tipo .z-R.

El programa utilizado toma como entrada un archivo tipo .z-R, solicita cierta información del usuario y produce como salida un archivo tipo .CA (base de datos de calibración de radares). Este archivo de salida substituye la columna del alfanumérico de fecha/hora original, por siete columnas que son año, mes, día, hora, minuto, segundo y tiempo transcurrido (en días y fracción decimal de día) desde el primero de junio del año correspondiente. Con base en la información provista por el usuario se adhieren, además, columnas de ubicación (localidad del sitio de medición), identificador de la estación, longitud, latitud, distancia radial al radar y azimut desde el radar.

El mismo proceso elimina todos los registros (renglones) cuya intensidad de lluvia en tierra es nula y cuyas tres reflectividades (Z1, Z4 Y Z9) son todas -30 dBZ. Lo anterior es con el propósito de disminuir la cantidad de registros que integran la base de datos de calibración, por lo que se eliminan los que no aportan nada a la calibración. La calificación de calidad otorgada al producto de radar, lo mismo que cualquier otro dato que pueda ser utilizado como criterio de estratificación, puede ser agregada a los archivos tipo .CA; éstos al completar la información que de acuerdo con el plan de calibración deben contener cambiarán la extensión .CA por .CAL. Al reunir todos los archivos tipo .CAL en un sólo archivo se tiene como resultado la base de datos completa para la obtención de las relaciones z-R o base de datos para calibración de radar. Un ejemplo de como queda la base de datos se presenta en la tabla V.3.

La base de datos para calibración del radar en el PARC quedó integrada por 100,214 registros. Cada registro de datos de calibración corresponde a un instante específico (el del producto de radar) y a una estación pluviográfica específica o ubicación. Pueden existir muchos registros para el mismo instante (uno para cada pluviógrafo) y también pueden existir muchos registros para cada ubicación (uno para cada producto de radar); cuando el radar o el pluviógrafo no operan, no se cuenta con registro alguno.

**Tabla V.3.- Ejemplo de algunos registros de la base de datos de calibración**

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	4	35	51	44	191562	0.00	10.50	10.50	10.50	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	4	39	33	44	194132	0.00	15.00	15.00	15.86	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	4	43	16	44	196713	0.00	10.50	10.50	11.96	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	4	46	58	44	199282	0.00	15.00	15.00	16.69	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	4	50	40	44	201852	0.00	10.50	10.50	10.50	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	4	54	23	44	204433	0.00	15.00	15.00	15.86	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	4	58	5	44	207002	0.00	15.00	15.00	16.69	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	1	47	44	209572	0.00	10.50	10.50	11.96	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	5	30	44	212153	0.00	15.00	15.00	16.69	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	9	12	44	214722	0.00	10.50	10.50	36.21	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	12	54	44	217292	0.00	10.50	10.50	12.56	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	16	37	44	219873	0.00	15.00	15.00	16.16	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	20	19	44	222442	0.00	10.50	10.50	11.96	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	24	2	44	225023	0.00	10.50	10.50	11.05	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	27	44	44	227593	0.00	48.00	45.34	43.45	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	31	26	44	230162	0.00	18.00	16.87	17.43	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	35	9	44	232743	0.00	10.50	10.50	11.05	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	42	34	44	237894	0.00	10.50	10.50	13.17	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	46	16	44	240463	0.00	15.00	15.00	15.59	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	49	59	44	243044	0.00	15.00	15.00	16.87	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	53	41	44	245613	0.00	15.00	15.00	16.96	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	5	57	24	44	248194	0.00	10.50	10.50	12.56	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	6	1	7	44	250775	0.00	15.00	15.00	16.96	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	6	4	49	44	253345	0.00	18.00	18.00	18.38	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	6	8	32	44	255926	0.00	10.50	10.50	14.04	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	6	12	15	44	258507	0.00	15.00	15.00	16.16	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	6	15	57	44	261076	0.00	15.00	15.00	17.33	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	6	23	21	44	266215	0.00	15.00	15.00	16.96	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	6	27	4	44	268796	0.00	10.50	10.50	12.56	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	6	30	46	44	271366	0.00	15.00	15.00	16.47	1
San Blas 9829	101.71854	27.41681	57.452	333.455	1998	7	15	6	34	29	44	273947	0.00	10.50	10.50	13.55	1

En la tabla V.3 cada columna representa:

A = nombre de la estación

B = clave de la estación (primeros dos cifras son año, segundas dos son número consecutivo)

C = coordenada longitud de la estación (grados)

D = coordenada latitud de la estación (grados)

E = distancia radial de la estación al radar (km)

F = azimut de la estación con respecto al radar (grados)

G = año

H = mes

I = día

J = hora

K = minuto

L = segundo

M = tiempo transcurrido (días) desde el 00:00/01/jun/19xx del año en curso

N = R (mm/h)

O =  $Z_1$  (dBZ), reflectividad en dBZ del pixel central de la vecindad del pluviógrafo

P =  $Z_4$  (dBZ); reflectividad promedio pesado en dBZ de los cuatro pixeles más cercanos

Q =  $Z_9$  (dBZ); reflectividad promedio pesado en dBZ de los nueve pixeles más cercanos al pluviógrafo

R = calificación de calidad

#### V.5.7.- Suavización en tiempo y espacio de registros pluviógrafo- radar

Una suavización de las señales de los pluviógrafos en tiempo y las del radar en tiempo y espacio ha demostrado tener un efecto (verificable a simple vista) en la disminución de la dispersión de la nube de puntos para calibración hidrológica del radar al quedar representados gráficamente (Rosengaus *et al.*, 1999). Las diferencias y coincidencias entre las mediciones proporcionadas por pluviógrafos y las proporcionadas por el radar y que afectan la dispersión ya fueron abordadas en apartados anteriores; en estas diferencias destaca lo puntual de las mediciones pluviográficas sobre la superficie del terreno contra el promedio de reflectividad sobre un volumen relativamente grande de la atmósfera a varios cientos de metros sobre la superficie del terreno proporcionado por el radar. Al comparar datos de productos de radar diferentes al volumétrico (como en este caso que se usa el de máxima reflectividad en la vertical) las mediciones comparadas con las puntuales del pluviógrafo siguen siendo sólo pequeñas porciones de una tormenta cuyas características presentan gran variación en el tiempo y en el espacio y donde la forma de llover puede variar también de una tormenta a otra contribuyendo a la dispersión de la nube de puntos; puesto que en ésta están mezclados datos de todas las tormentas muestreadas.

La suavización aplicada debe tomar en cuenta las características físicas del fenómeno estudiado para no perder la verdadera evolución en el tiempo de la tormenta. En la suavización de las intensidades de lluvia del pluviógrafo y en la suavización de las reflectividades del radar (en los datos del PARC) se aplicó un promedio corriente (o deslizante) de tres intervalos de radar (entre 11 y 15 minutos) donde el resultado del promedio sustituye el valor del registro central; siempre y cuando los registros anterior y posterior al de interés se encuentren a intervalos menores o iguales a cinco minutos. Cuando lo anterior no se cumple se mantienen

los valores originales. Así la última secuencia de láminas acumuladas que aparece en la figura V.12 .

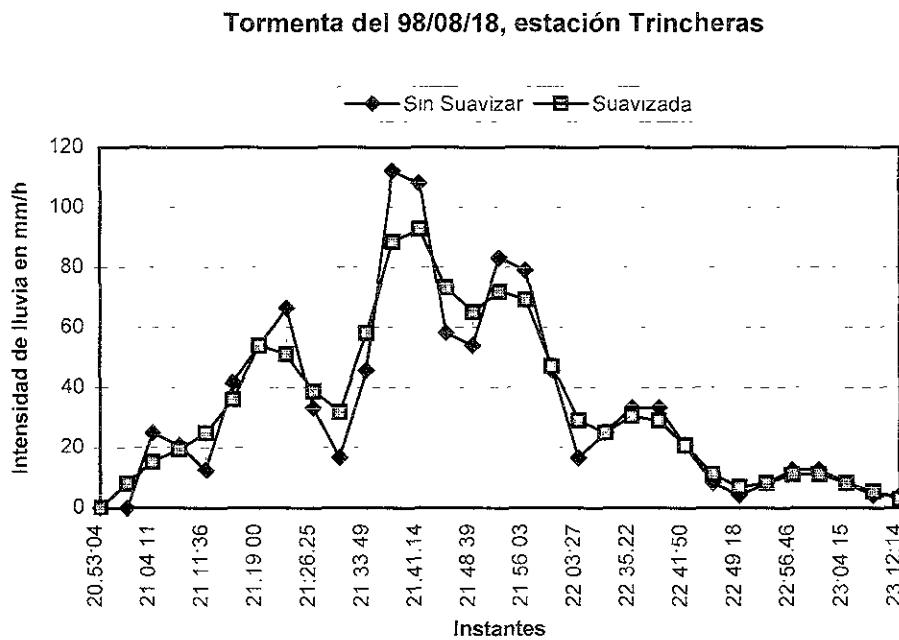
..., 49.36, **35.65**, **30.16**, **16.45**, **05.48**, **0.00**, **0.00**...

implicarían una secuencia de intensidades de lluvia ya suavizada, que es como aparece en la base de datos para calibración del radar, como sigue:

..., 38.39, 27.42, 17.36, 7.31, 1.82, 0.00,...

En las figura V.13 y V.14 se puede apreciar el efecto de la suavización utilizando el promedio deslizante de tres intervalos para intensidad de lluvia y reflectividad, respectivamente.

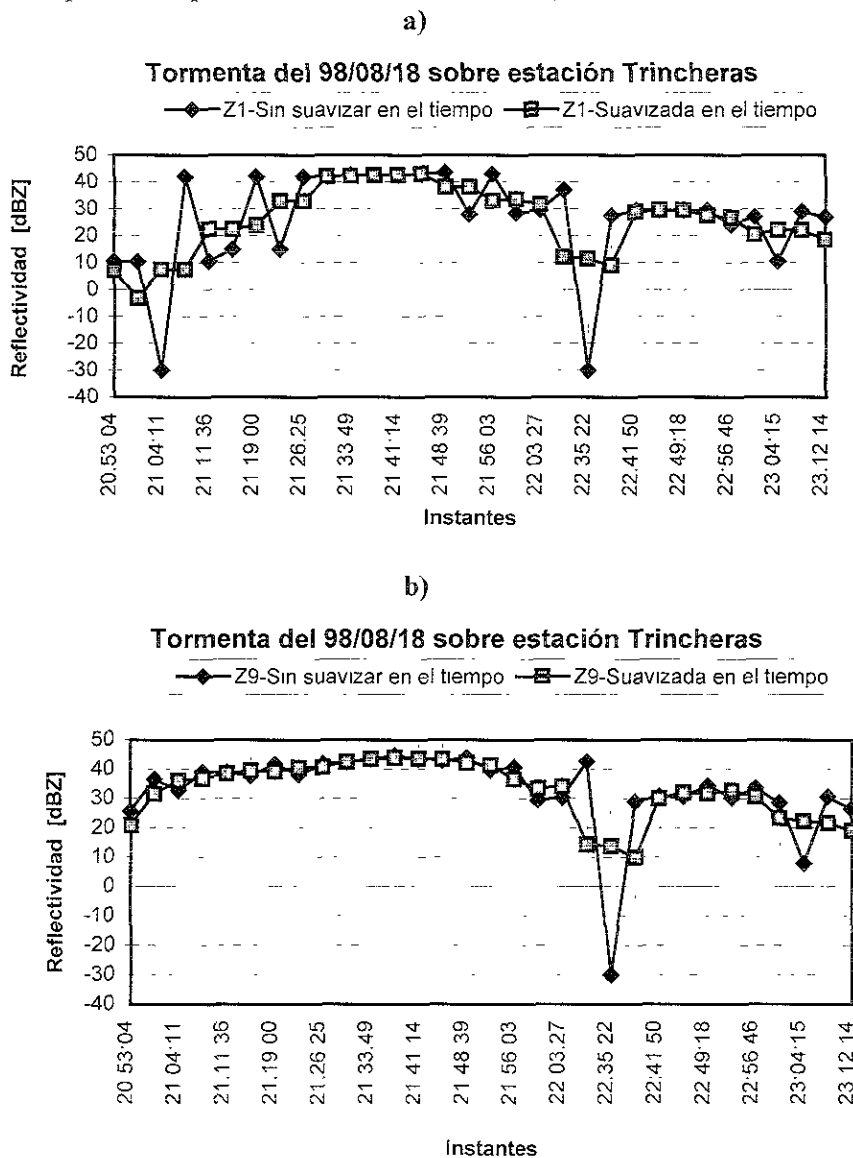
**Figura V.13.-** Gráfica de los registros pluviográficos suavizados con el promedio deslizante y gráfico de los mismos registros sin suavizar



Una suavización en el espacio viene ya de por si contenida en los productos de radar; el valor reportado en cada uno de los pixeles del producto corresponde a un promedio en la superficie de 750 m x 750 m por lo que es de esperar diferencias que resultan de comparar lo medido por un pluviógrafo en algún punto bajo el pixel. De lo anterior resulta la idea de realizar varias comparaciones de los datos pluviográficos: una comparación se realiza con el valor de reflectividad del pixel que cubre al pluviógrafo, otra con el promedio pesado de la reflectividad considerando los cuatro pixeles más cercanos al pluviógrafo y la realizada con el promedio pesado de la reflectividad considerando los nueve pixeles más cercanos al pluviógrafo. Es claro que la suavización en el espacio queda hecha al considerar el promedio pesado de la reflectividad en los cuatro o nueve pixeles.

Se aprecia claramente, en la figura V.13, el efecto de la suavización en el tiempo de las señales del pluviógrafo. En las figuras V.14 a y b, se aprecia claramente el efecto de la suavización en tiempo y espacio de las señales proporcionadas por el radar, sobre todo en los picos de la gráfica. Note que las figuras V.13 y V.14 corresponden a datos para la misma tormenta. La suavización con el promedio deslizando de tres intervalos queda aplicada tanto a los datos pluviográficos como a los de reflectividad de radar, por lo que ninguno lleva ventaja sobre el otro.

**Figura V.14.-** Comportamiento de la reflectividad en dBZ en la tormenta del 98/08/18 sobre la estación Trincheras para: a).- el pixel central (Z1) de la vecindad del pluviógrafo, sin suavizar y suavizada en el tiempo con el promedio deslizando de tres puntos; b).- el promedio pesado de la reflectividad de los 9 pixeles más cercanos al pluviógrafo (Z9) sin suavizar y suavizado en el tiempo con el promedio deslizando de tres puntos.



Del análisis de las señales de otras tormentas se concluye que el efecto de la suavización, se nota más cuando el pluviógrafo está localizado en una orilla con respecto al centroide de la tormenta. La suavización es más notable en los picos de las gráficas de reflectividad, puesto que ésta es reflectividad instantánea mientras que la intensidad obtenida con el pluviógrafo se obtiene a partir del acumulado en 5 minutos. Puesto que el producto de radar utilizado es el de máxima reflectividad en la vertical, ésta reflectividad máxima puede variar mucho en altura de un producto a otro y en ocasiones puede corresponder a granizo y a granizo cubierto con una capa de agua. Lo anterior explica en parte los saltos en el valor de reflectividad y justifica el promedio deslizando aplicado. En realidad la relación de transformación de reflectividad a lluvia obtenida no se ve afectada con el promedio deslizando.

La suavización es aplicada únicamente a los datos utilizados para la calibración hidrológica del radar. Obtenida la relación de transformación de reflectividad a lluvia, ésta se aplica directamente para estimar la intensidad de lluvia con el radar. Ya no se suavizan los pluviogramas.

#### V.5.8.- Utilización de la relación de Marshall-Palmer para la transformación de reflectividad a intensidad de lluvia.

En el PARC la reflectividad en las tormentas caso es analizada para encontrar evidencia o huellas del efecto del sembrado y se considera evidencia física. Esta reflectividad se refiere a una parte del hidrometeoro que se encuentra a una considerable altura sobre el nivel del suelo. En el PARC se utiliza la relación estándar de transformación de reflectividad a intensidad de lluvia de Marshall-Palmer, en la estimación de la lámina de agua precipitada, la cual tiene la forma  $z=aR^b$ , donde R es intensidad de lluvia en mm/h, z es el factor de reflectividad atmosférica en  $\text{mm}^6/\text{m}^3$  y utiliza valores para a y b de 200 y 1.6 respectivamente, las cuales en ocasiones son usadas bajo la suposición de que en promedio es posible obtener una buena confiabilidad. La utilización de la citada relación puede implicar alguna de las siguientes tres situaciones: que se sobrestime, subestime o represente bien la intensidad de lluvia directamente sobre el terreno; ya que para propósitos prácticos lo que realmente importa es la lluvia ocurrida efectivamente sobre el suelo y no tanto la que se da al nivel de las nubes.

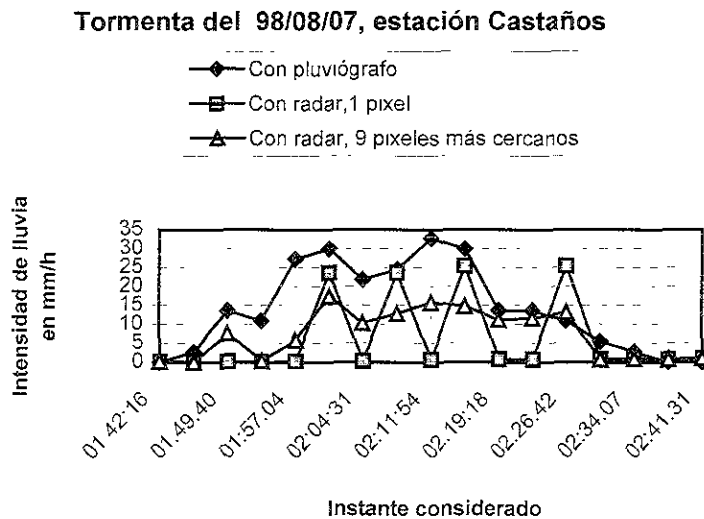
Para ilustrar el comportamiento de la relación de Marshall-Palmer, se analizan gráficas de intensidad de lluvia contra tiempo de tormentas convectivas en los alrededores de Monclova, Coahuila. Las gráficas son obtenidas utilizando datos de pluviógrafo digital y productos de radar de máxima reflectividad en la vertical transformada a intensidad de lluvia con la citada relación z-R. Utilizando esta relación se obtiene una estimación de la intensidad de lluvia con radar (en las nubes), la cual se compara con la obtenida con pluviógrafo (en el suelo) con el propósito de obtener la mayor cantidad de información para decidir sobre la confiabilidad y limitaciones de la relación z-R aplicada por el NCAR (ver las figuras de la V.16 a la V.20 y la sección VII.3).

V.5.8.1.- Análisis de tormentas y resultados

Aunque se compara la intensidad de lluvia puntual contra la obtenida para un volumen de la atmósfera (que es relativamente grande), se espera que si la relación z-R utilizada presenta en promedio buenos resultados; la gráfica de intensidad de lluvia construida con los datos de radar estará algunas veces por encima y otras por debajo de la gráfica construida con los datos pluviográficos. En las 30 tormentas analizadas aquí de las ocurridas en Monclova, Coahuila, de manera consistente se observó que la gráfica correspondiente a la intensidad de lluvia dada por el radar se encontraba por debajo de la obtenida con el pluviógrafo por lo que se concluye que **la relación de Marshall-Palmer subestima** severamente la intensidad para tormentas convectivas de verano.

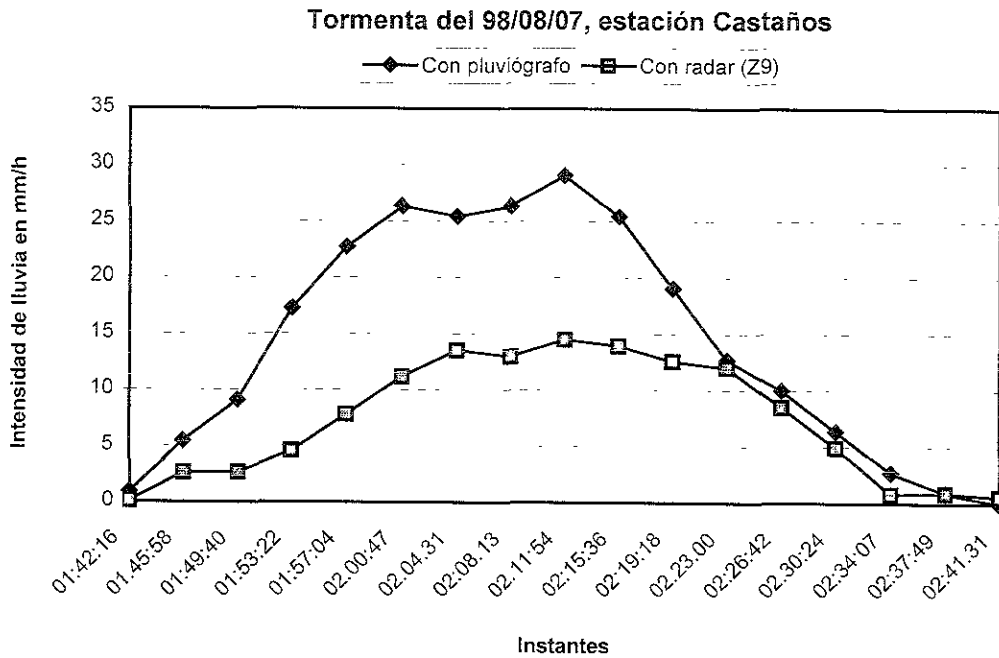
En la comparación de un pluviograma obtenido con radar contra el obtenido de la misma tormenta con pluviógrafo, las señales obtenidas con el radar y/o con el pluviógrafo pueden ser suavizadas con el promedio deslizante de tres señales consecutivas teniendo un efecto muy importante en el aspecto sólo de algunos pluviogramas. En general se recomienda aplicar el promedio deslizante sólo a los datos utilizados para la calibración. El efecto de considerar el promedio pesado de la reflectividad en los pixeles más cercanos a la estación pluviográfica también resulta muy importante a la hora de comparar un pluviograma obtenido con pluviógrafo con uno obtenido con radar sobre el punto donde se localiza el pluviógrafo, lo anterior se aprecia en la figura V.15, para ilustrar que no en todos los casos es importante la suavización en el tiempo, las figuras de la V.16 a la V.19, se grafican sin considerar la suavización en el tiempo, pero si se considera el promedio pesado de la reflectividad de los 9 pixeles más cercanos al punto donde se localiza el pluviógrafo.

**Figura V.15a.-** Comparación de pluviogramas obtenido con pluviógrafo y obtenido con radar utilizando la relación de transformación de Marshall- Palmer utilizando los datos de radar y pluviográficos sin el promedio de tres intervalos (suavización).



Una suavización de los pluviogramas en el tiempo utilizando el promedio deslizante de tres señales consecutivas genera un cambio importante en las tormentas con intensidades de lluvia bajas, debido a que las tormentas de baja intensidad presentan relativamente mayor variación de la reflectividad en el tiempo y espacio (ver figuras V.15).

**Figura V.15b.-** Comparación de pluviogramas obtenido con pluviógrafo y obtenido con radar utilizando la relación de transformación de Marshall- Palmer y el promedio deslizante de tres intervalos de los datos de radar y pluviográficos (suavizados).

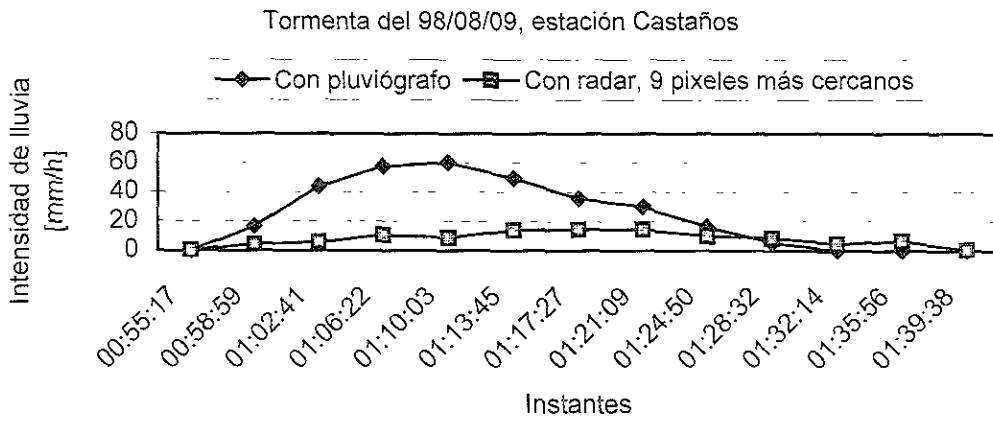


Enseguida se grafica la intensidad de lluvia obtenida del valor de reflectividad promedio pesado de los nueve pixeles más cercanos al pluviógrafo ( $z_9$ ) transformado a intensidad de lluvia mediante la utilización de la relación z-R de Marshall-Palmer, presentándose en las figuras de la V.16 , V.17, V.18, V.19 y V.20 junto con la gráfica de intensidad de lluvia medida con pluviógrafo.

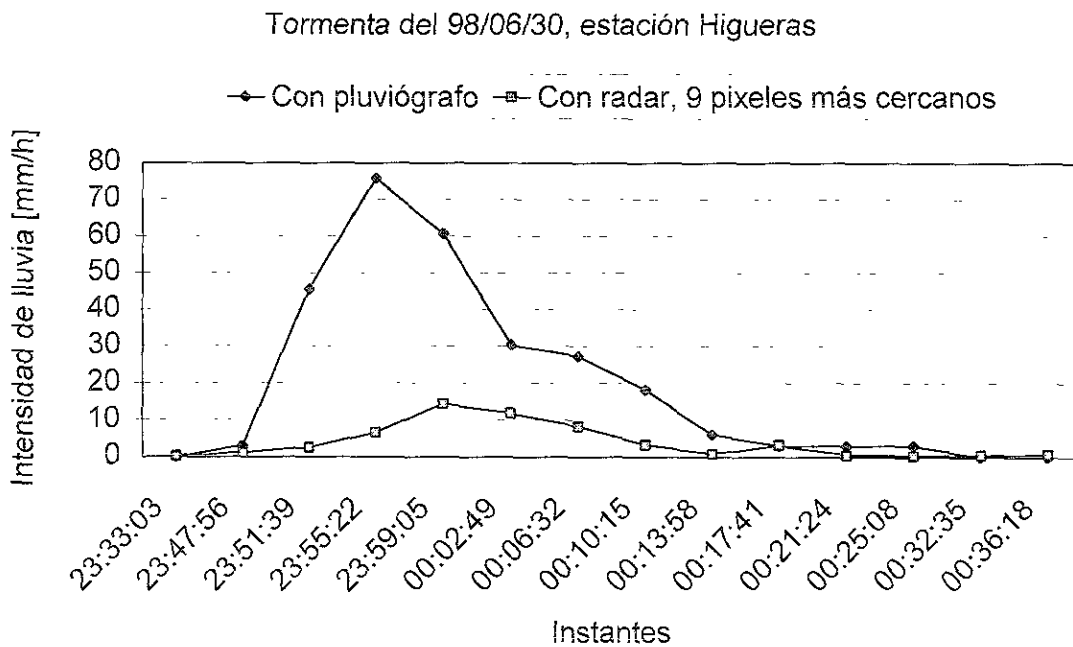
Se observa que la intensidad de lluvia obtenida con el valor de reflectividad  $z_9$ , en general presenta menos variaciones bruscas que la intensidad de lluvia obtenida con el valor de reflectividad del pixel localizado directamente sobre el pluviógrafo ( $z_1$ ), pareciéndose más a la forma de la gráfica del pluviógrafo, pero en varios casos inició su despegue antes. Debe recordarse que se están comparando intensidades de lluvia que para el caso del pluviógrafo es representativa de un área de  $0.0324 \text{ m}^2$  (área de captación del pluviógrafo) y para el caso del radar un valor ponderado de reflectividad en 9 áreas de  $750 \times 750 \text{ m}^2$  por lo que hay que considerar esto en el análisis de su comparación.



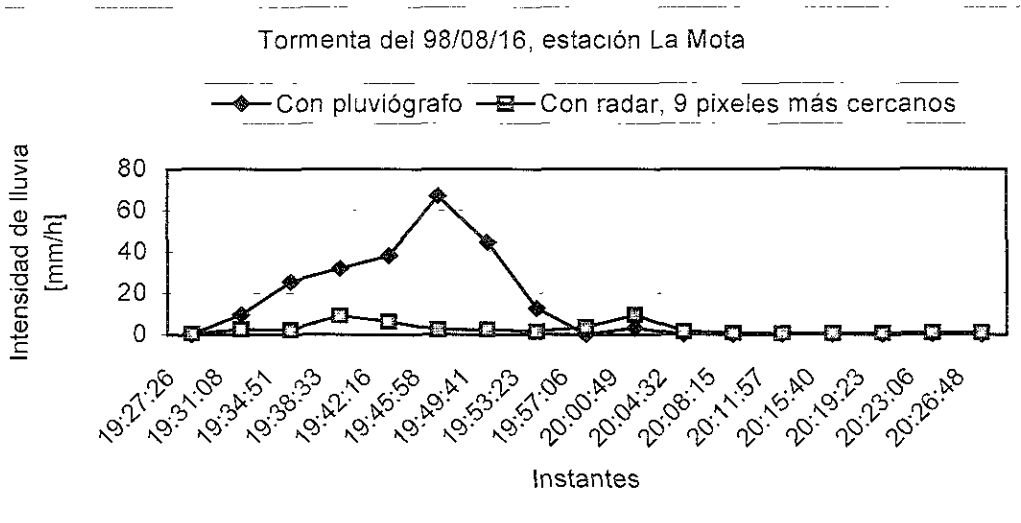
**Figura V.16.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshall-Palmer, sin suavizar en el tiempo.



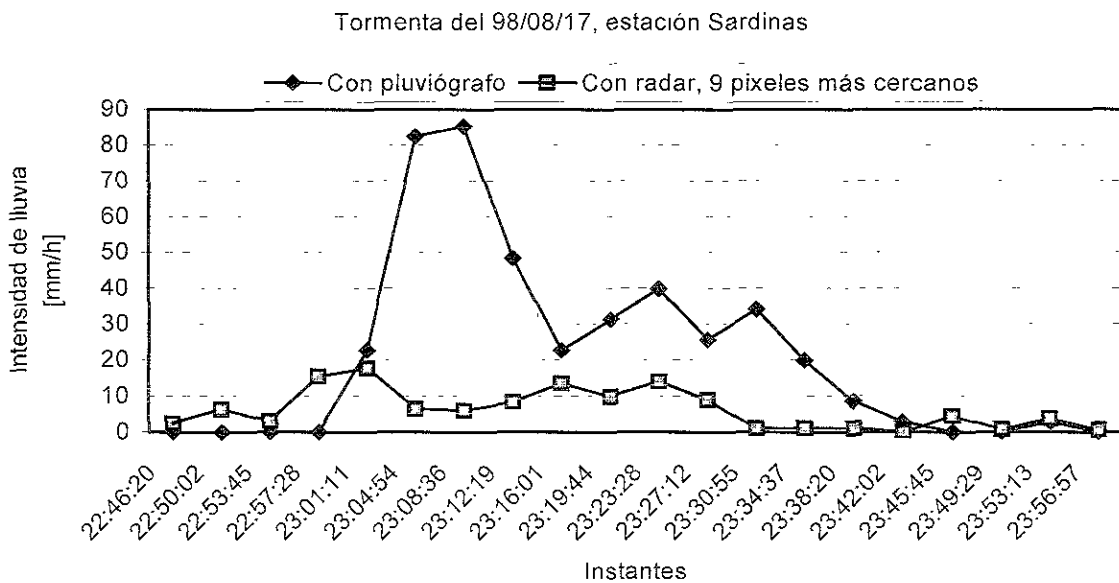
**Figura V.17.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshall-Palmer, sin suavizar en el tiempo.



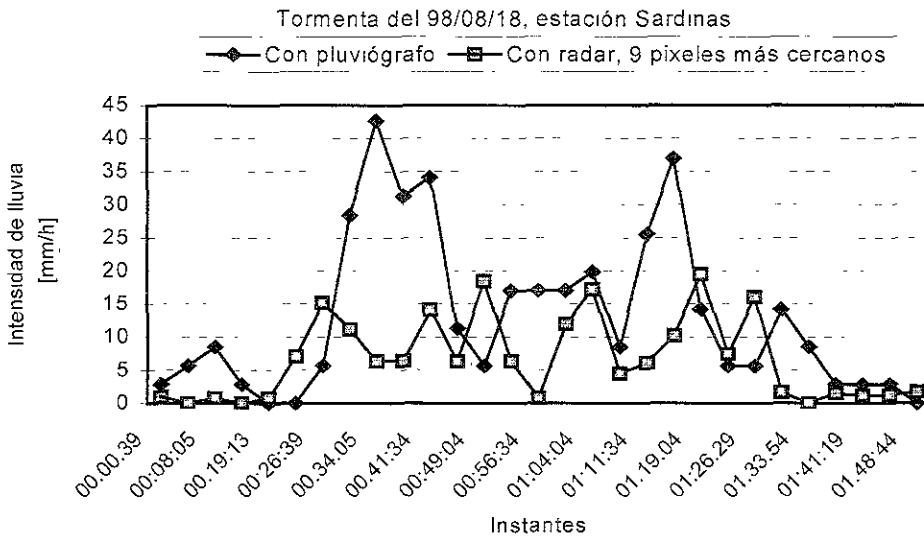
**Figura V.18-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshall-Palmer, sin suavizar en el tiempo.



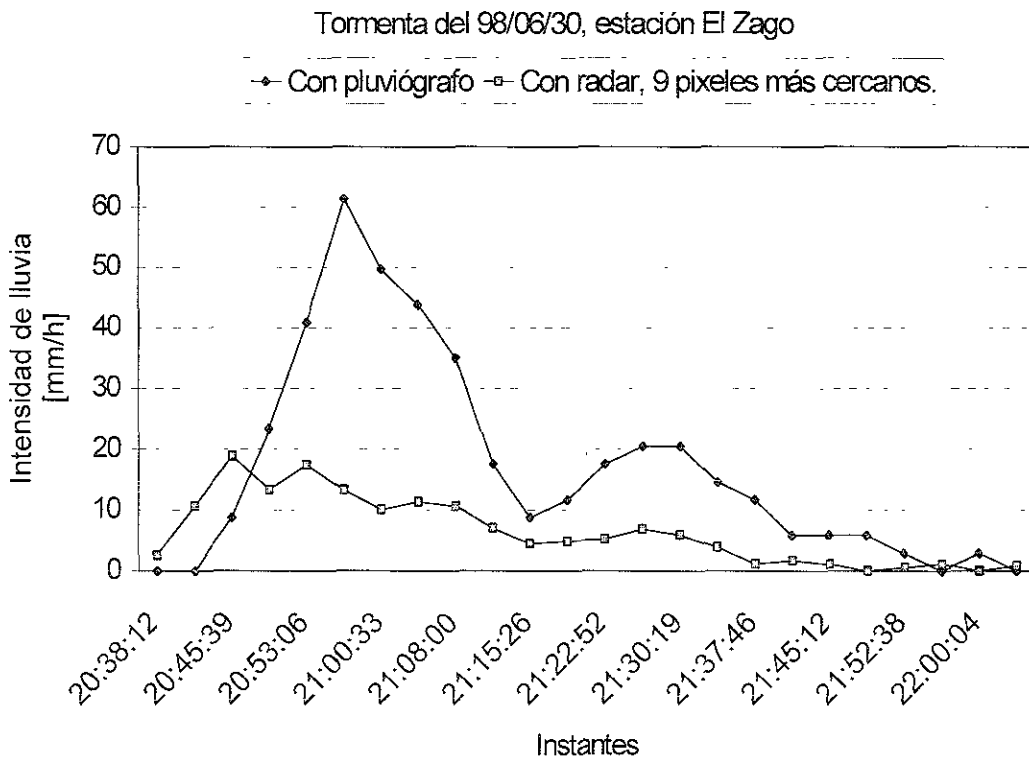
**Figura V.19.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshall-Palmer, sin suavizar en el tiempo.



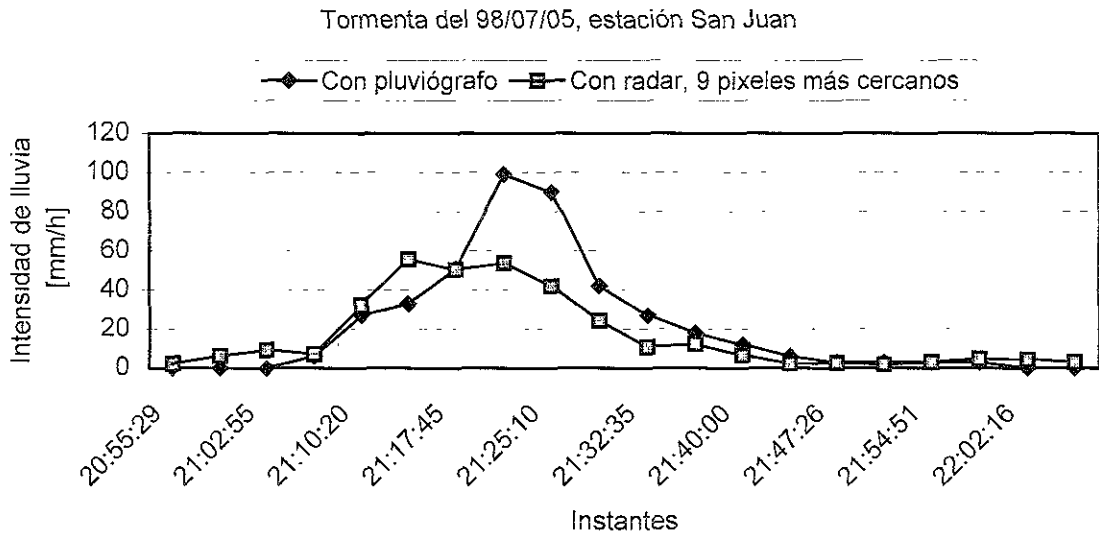
**Figura V.20a.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshall-Palmer, sin suavizar en el tiempo.



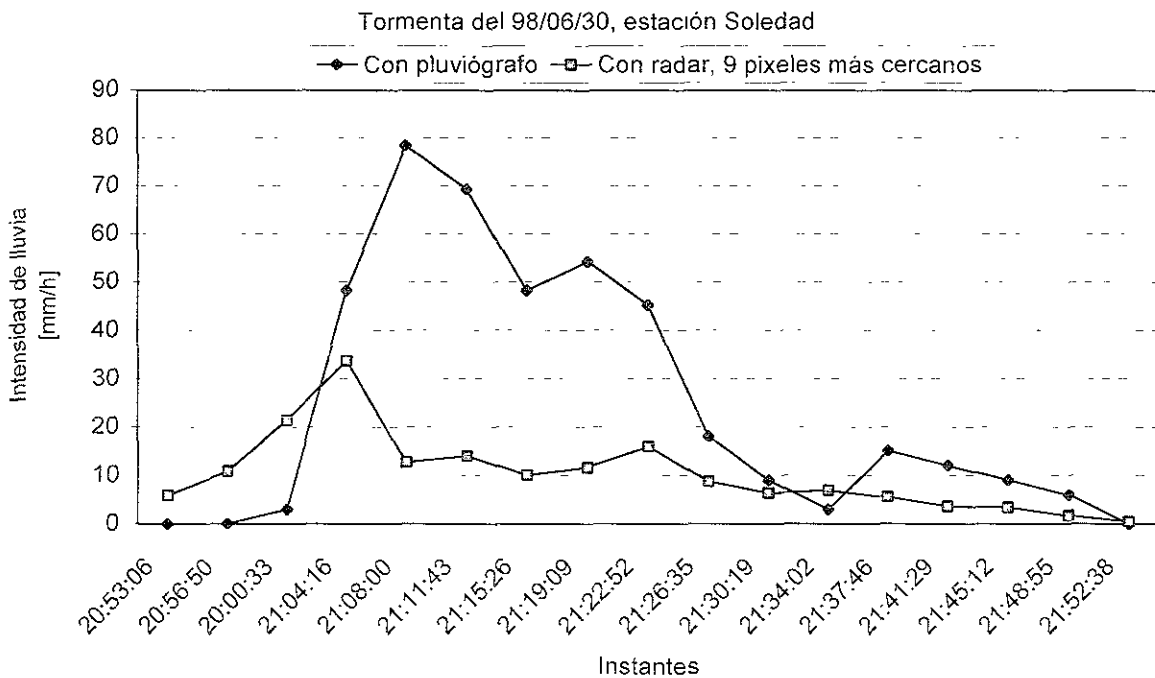
**Figura V.20b.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshall-Palmer, sin suavizar en el tiempo.



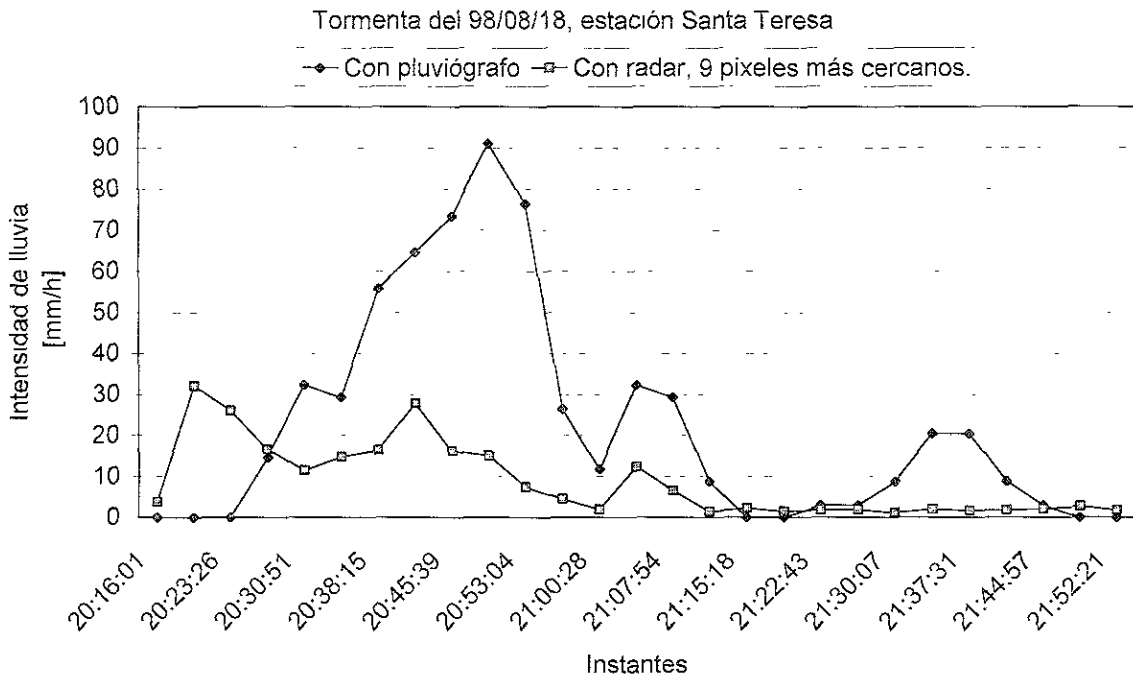
**Figura V.20c.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshall-Palmer, sin suavizar en el tiempo.



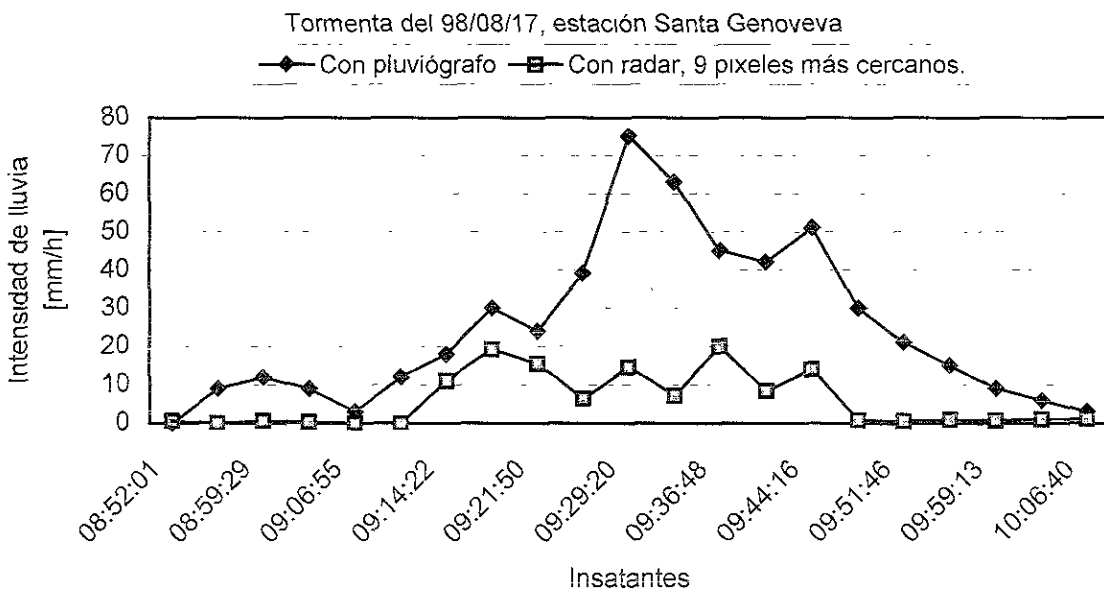
**Figura V.20d.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshall-Palmer, sin suavizar en el tiempo.



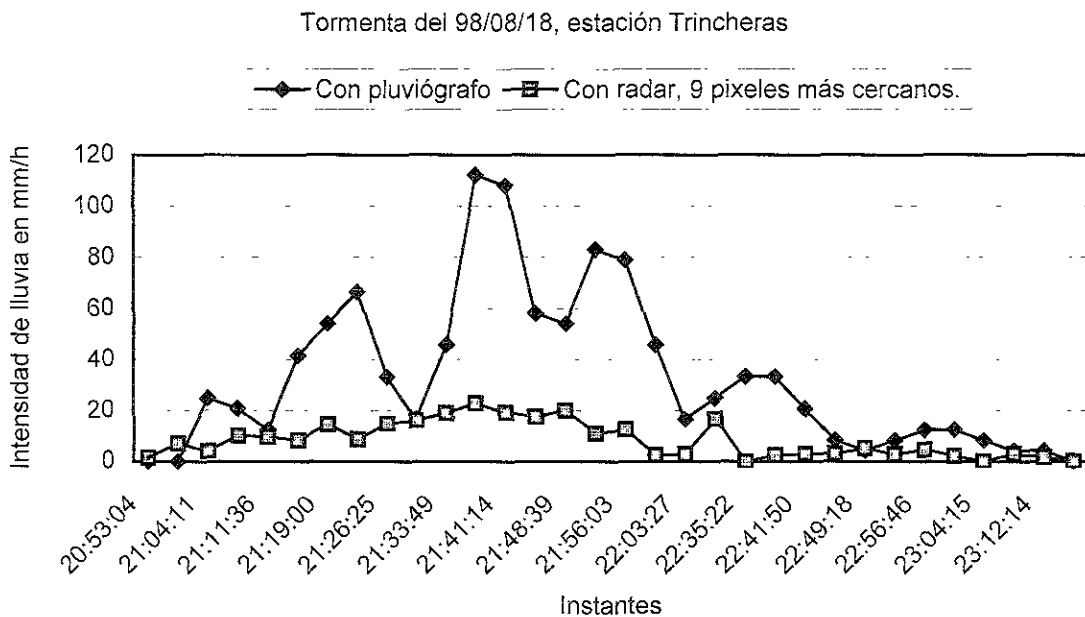
**Figura V.20e.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshall-Palmer, sin suavizar en el tiempo.



**Figura V.20f.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshall-Palmer, sin suavizar en el tiempo.



**Figura V.20g.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de Marshall-Palmer, sin suavizar en el tiempo.



Las comparaciones gráficas entre la intensidad de lluvia medida con pluviógrafo y la estimada con radar son especialmente útiles cuando la relación usada no fue obtenida para el lugar y tipo de tormenta analizada. Permite obtener evidencia de si la cantidad de lluvia en el suelo está siendo sobre o subestimada, de si la sobre o subestimación se da tanto en lluvias intensas como en las de baja intensidad y permite visualizar la forma que deberá tener la relación z-R cuando se realice la calibración hidrológica (Calderón y Rosengaus, 1999).

### V.6. Resultados de la calibración obtenida

La obtención de una relación z-R para las tormentas convectivas de verano en Monclova, Coahuila está plenamente justificada por la severa subestimación que se hace del volumen de lluvia precipitado al aplicar la relación de transformación de reflectividad a lluvia de Marshall-Palmer como se demuestra en el apartado anterior.

Al analizar la base de datos para calibración hidrológica del radar es claro que la calibración resultante del procesamiento de esta base contendrá consideraciones sobre la naturaleza de la lluvia relacionadas con la época del año y la región o área geográfica considerada. La base de datos permite investigar posibles diferencias vinculadas con aspectos como la distancia radial del radar al pluviógrafo, a una estación o grupo de estaciones pluviográficas en particular o con la calificación de calidad dada a cada producto de radar. El resultado de la calibración obtenida, para

este caso, no toma en cuenta las fuentes de fluctuación provenientes de las diferencias en las características y propiedades de los eventos de lluvia (principalmente distribución de tamaños de gota) o a una escala mayor las características y propiedades de la tormenta. Por lo que la relación de transformación de reflectividad a lluvia sobre el suelo que se obtiene aquí es aplicable de manera general a las tormentas convectivas de verano en la región de Monclova, Coahuila.

#### V.6.1.- Trabajo sobre la base de datos de calibración

A partir de que se tiene integrada la base de datos para calibración hidrológica del radar, el trabajo faltante para llegar a la definición de la relación  $z$ - $R$  se realiza exclusivamente sobre esta base de datos. Estos datos se encuentran ordenados ya en la base de datos de acuerdo con ubicaciones e instantes comunes siendo el resultado del procesamiento de datos descrito anteriormente. Se muestra una pequeña porción de la base de datos en la tabla V.3. Los datos fueron obtenidos en la región de Monclova, Coahuila durante los veranos de 1996, 1997 y 1998.

Con una base de datos con las características que tiene la mostrada en la tabla V. 3 resulta más conveniente utilizar el campo correspondiente a  $Z_9$  vs  $R$ , para cada registro de la base de datos (Rosengaus y colaboradores, 1999), el resultado gráfico se puede observar en la figura V.21, lo que implica que la relación a obtener es aplicable para estimar la lluvia promedio efectivamente ocurrida sobre el terreno utilizando el radar en un área aproximada de 2.25 km x 2.25 km que representa algo más de 5 km<sup>2</sup>.

En la figura V.21 se puede observar la gráfica de todos los puntos de calibración en un marco  $Z_9$  vs  $R$  (en términos de un eje de las abscisas  $R$  logarítmico); además de los datos originales se representa también en esta lámina el ajuste por mínimos cuadrados a una recta del tipo de la de Marshall-Palmer a los puntos que representan las modas de las distribuciones de frecuencia por bandas o intervalos de clase definidos sobre  $R$ . Las bandas o intervalos utilizados para obtener las modas se presentan en la tabla V.4. Los círculos grises grandes en la figura V.21 representan precisamente a la  $Z_{moda}$  para cada una de las bandas.

En la figura V.21 los agrupamientos que se observan en bandas alrededor de  $R=1$  mm/h, 2 mm/h, 3 mm/h, etc. provienen de la característica discreta de los datos de lluvia a nivel del suelo proporcionados por el pluviógrafo: en cada intervalo de 5 minutos puede registrar un número entero de balanceos; así para un balanceo registrado en 5 minutos se tiene una intensidad de lluvia de 3 mm/h que además al suavizar dicha señal con el promedio deslizante de tres intervalos si los otros dos tienen un valor para  $R=0$  mm/h, el promedio dará 1 mm/h. Si dos de ellos tiene  $R=3$  mm/h y el otro  $R=0$  mm/h, el promedio será de 2 mm/h (Rosengaus y Colaboradores, 1999 b). Estas bandas son casi imperceptibles para intensidades mas altas que 8 mm/h.

En el cálculo de estadísticos por bandas se consideran sólo aquellos pares (R,Z) que aportan información relevante, no se consideran aquellos pares con R menor que 0.5 mm/h y con las reflectividades  $Z_1$ ,  $Z_4$  y  $Z_9$  con valor igual a  $-30\text{dBZ}$ . Por lo anterior se reduce el número de registros de 100,214 a 6,802 registros.

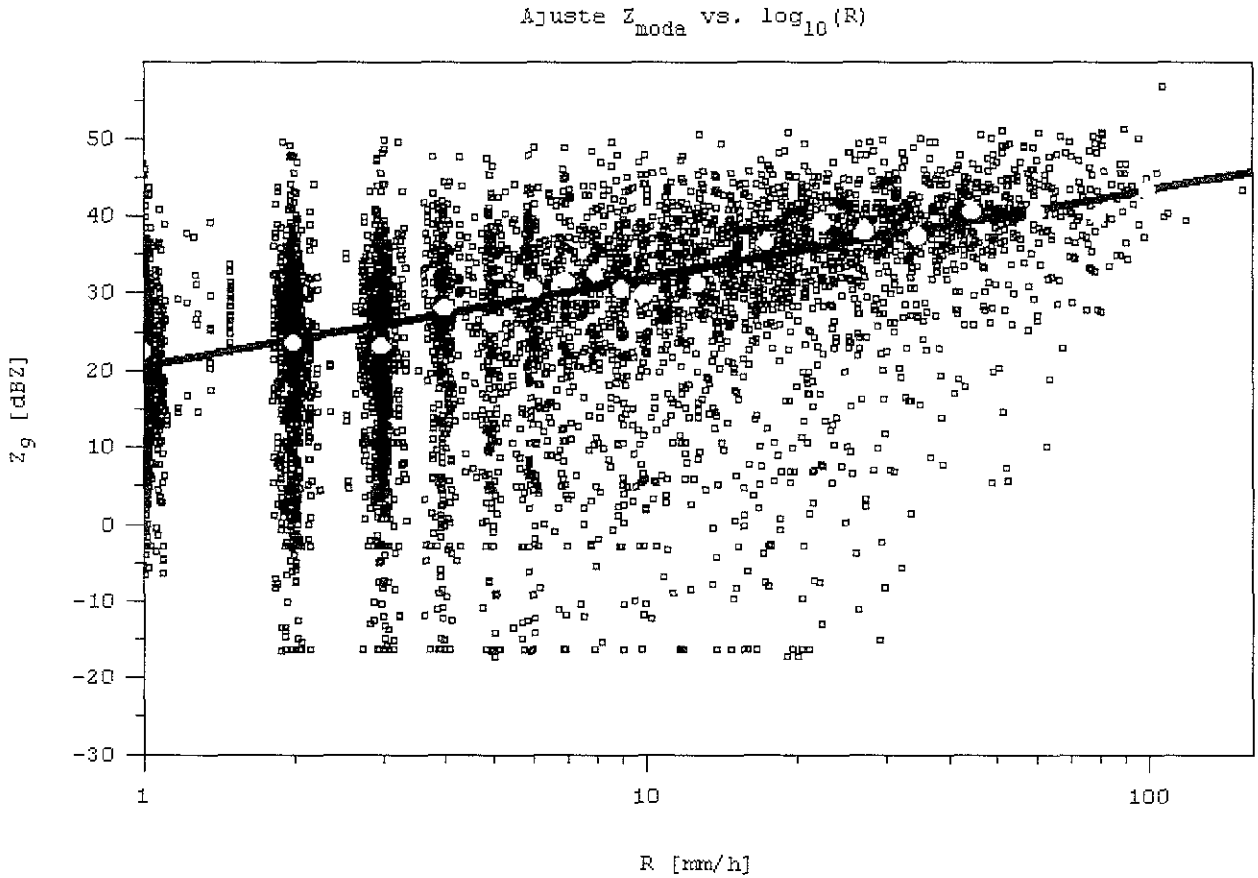
**Tabla V.4.-** Bandas utilizadas para el cálculo de estadísticos, número de pares (R,Z) y modas resultantes (6802 pares).

Bandas utilizadas	R representativa [mm/h]	Número de pares (R,Z)	$Z_{\text{moda}}$
$0.5 \leq R < 1.5$	1.0	1710	22.5
$1.5 \leq R < 2.5$	2.0	1078	23.5
$2.5 \leq R < 3.5$	3.0	903	23.0
$3.5 \leq R < 4.5$	4.0	381	28.0
$4.5 \leq R < 5.5$	5.0	260	26.0
$5.5 \leq R < 6.5$	6.0	272	30.5
$6.5 \leq R < 7.5$	7.0	145	31.5
$7.5 \leq R < 8.5$	8.0	132	32.5
$8.5 \leq R < 9.5$	9.0	161	30.5
$9.5 \leq R < 10.5$	10.0	109	29.75
$10.5 \leq R < 15$	12.75	400	31.25
$15 \leq R < 20$	17.5	325	36.50
$20 \leq R < 25$	22.5	212	39.00
$25 \leq R < 30$	27.5	155	38.00
$30 \leq R < 40$	35.0	207	37.40
$40 \leq R < 50$	45.0	140	40.50
$50 \leq R < 70$	60.0	131	40.33
$70 \leq R < 90$	80.0	60	40.00
$90 \leq R$	100.0	20	43.30

Parte de la razón de recurrir a la estadística por bandas y no simplemente a aplicar mínimos cuadrados, se puede visualizar en la figura V.21; en esta figura se aprecia que la nube de puntos muestra una dispersión que es mayor y cargada hacia los valores de reflectividad bajos y muchos más pares de valores o puntos en las primeras bandas. La lógica indica que la curva que mejor resultados tendrá en la transformación de la reflectividad a lluvia debe pasar por la región central de la nube de puntos más densa. La dispersión cargada hacia los valores de reflectividad bajos y el gran peso de las primeras bandas hace que una recta ajustada con el método de mínimos cuadrados, quede cargada hacia estos mismos valores bajos saliéndose fuera del centro de la mancha de puntos más densa. Por el contrario, al considerar una recta ajustada a la moda de cada una de las bandas (círculos grises grandes de la figura V.21) ésta pasa claramente por el centro de la mancha de puntos de calibración. Estos aspectos se retoman de nuevo al analizar la dispersión de la nube de puntos para calibración de manera gráfica, en la sección V.6.3.



Figura V.21.- Datos originales y ajuste a modas de las distribuciones de frecuencia por bandas



De la misma manera puede obtenerse el ajuste por mínimos cuadrados de una recta a los puntos integrados por la  $Z_{\text{mediana}}$  o  $Z_{\text{media}}$ ; pero se recomienda el uso de la relación z-R más probable que es la que corresponde al ajuste de las modas por lo que sólo esta es la presentada aquí.

V.6.2.- La relación de transformación recomendada

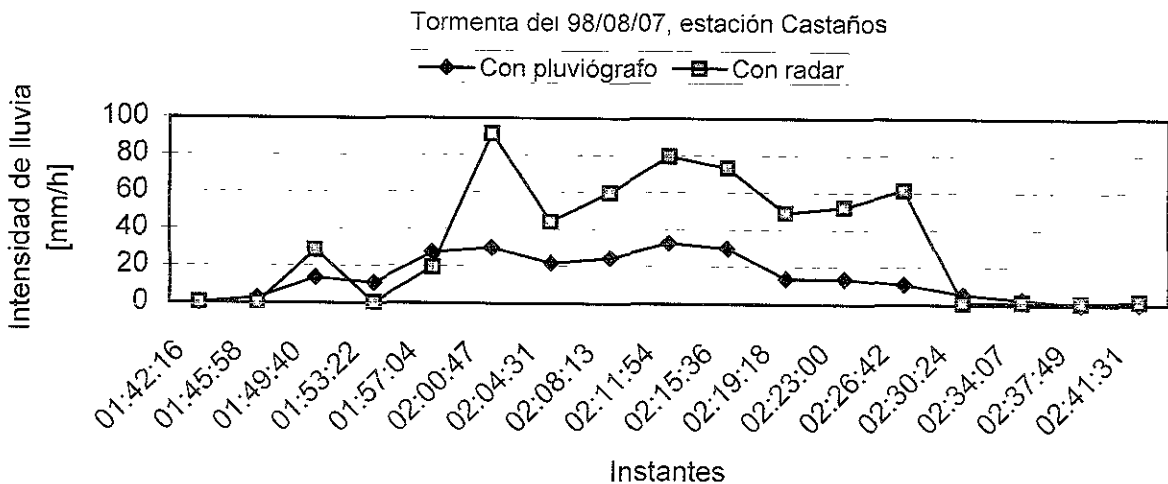
Por lo que para transformar la reflectividad del radar a intensidad de lluvia, en la zona de Monclova, Coahuila, para tormentas de verano, se recomienda la relación que surge del ajuste de las modas:

$$z=113.24 R^{1.138}$$

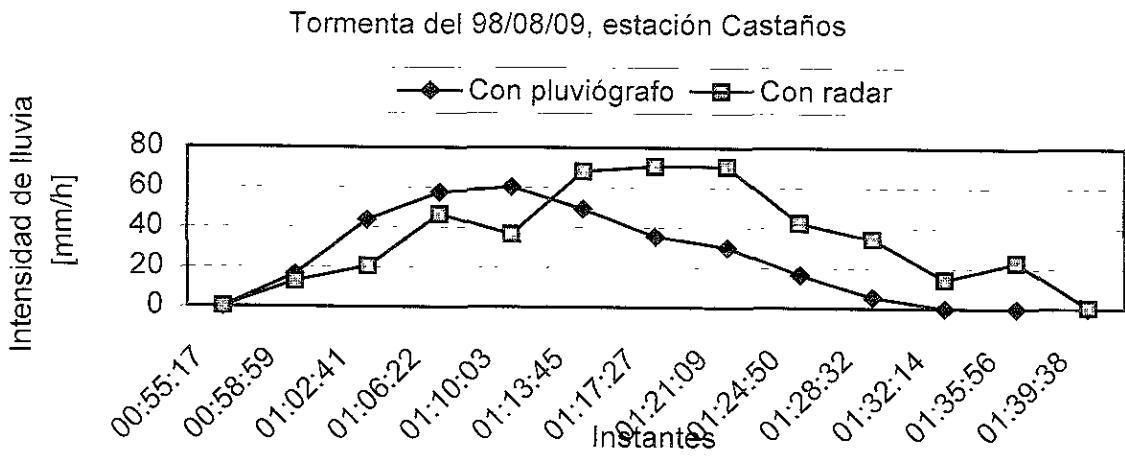
que es la recta que aparece en la figura V.21

Utilizando esta relación para comparar como percibe la intensidad de lluvia la estación pluviográfica, y como la percibe el radar considerando para ello el promedio pesado de los nueve pixeles más cercanos, se presentan los pluviogramas de 12 tormentas en las figuras V.22. Estos ejemplos corresponden a las mismas tormentas presentadas en las figuras V.15 a la V.20, pero ahora transformada la reflectividad con la relación  $z=113.24 R^{1.138}$ . La reflectividad de radar transformada a intensidad de lluvia es la resultante de ponderar el valor de reflectividad de los 9 pixeles más cercanos cada 3.7 minutos aproximadamente. Los pluviogramas resultantes no están suavizados en el tiempo. Recuérdese que se están comparando mediciones que tienen una escala diferente. Una comparación justa implicaría que la intensidad de lluvia obtenida con radar se comparara con la intensidad de lluvia promedio obtenida a nivel del suelo para un área aproximada de 2.25 km x 2.25 km.

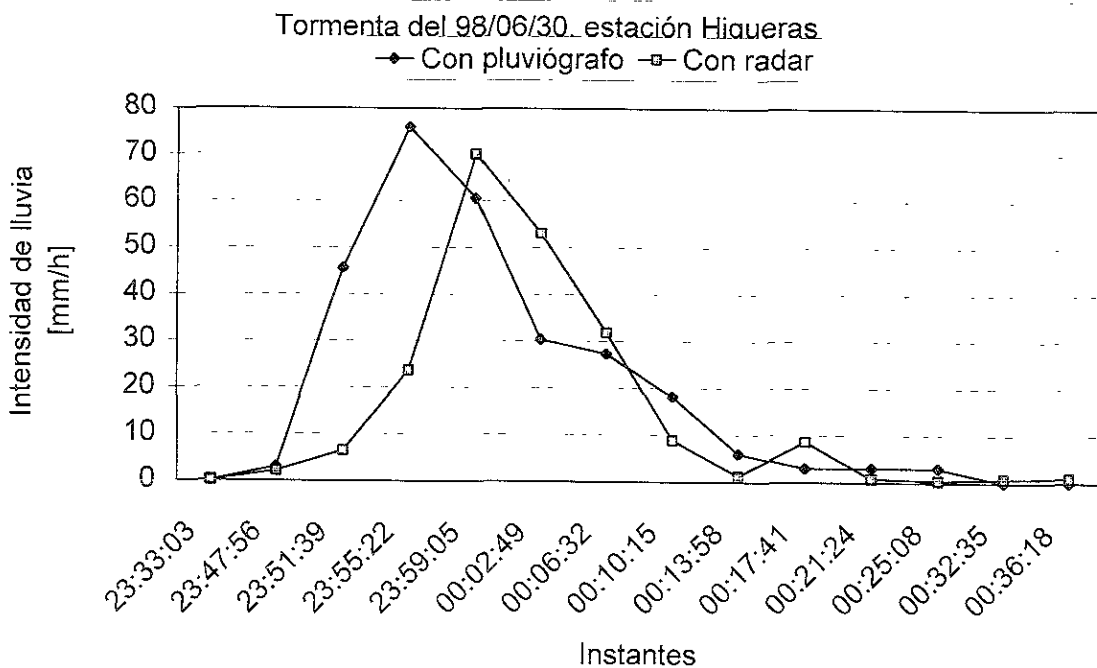
**Figura V.22a.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia  $z=113.24 R^{1.138}$ .



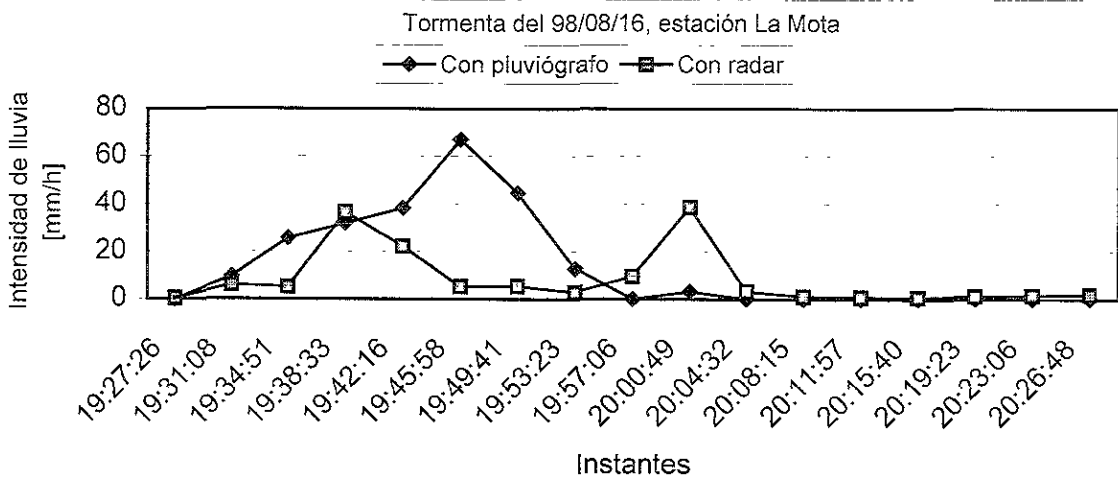
**Figura V.22b.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia  $z=113.24 R^{1.138}$ .



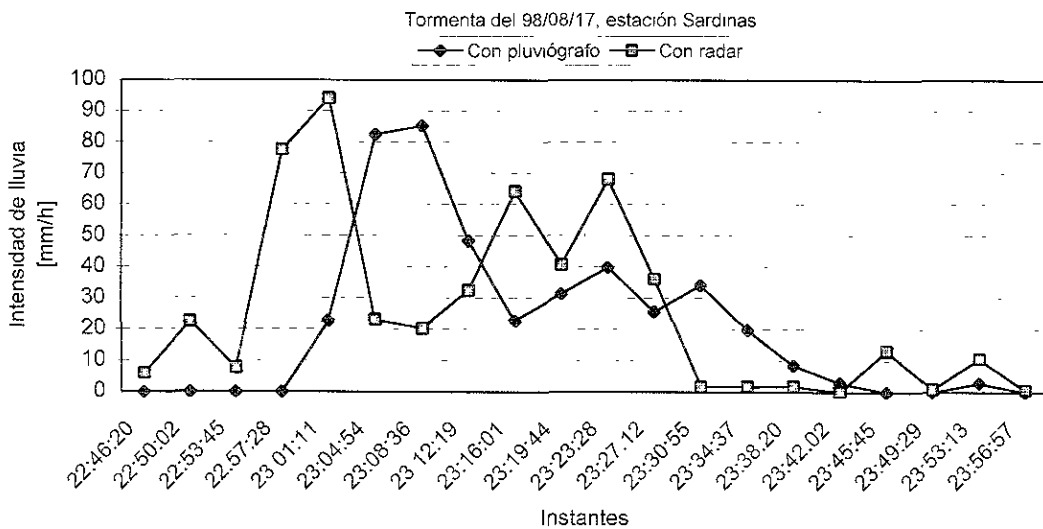
**Figura V.22c.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia  $z=113.24 R^{1.138}$ .



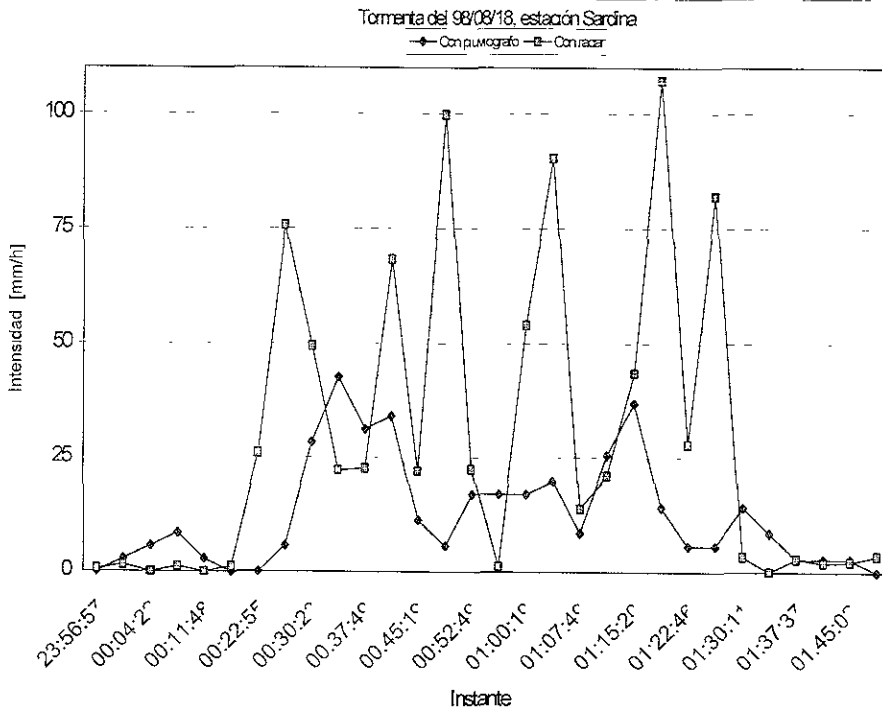
**Figura V.22d.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia  $z=113.24 R^{1.138}$ .



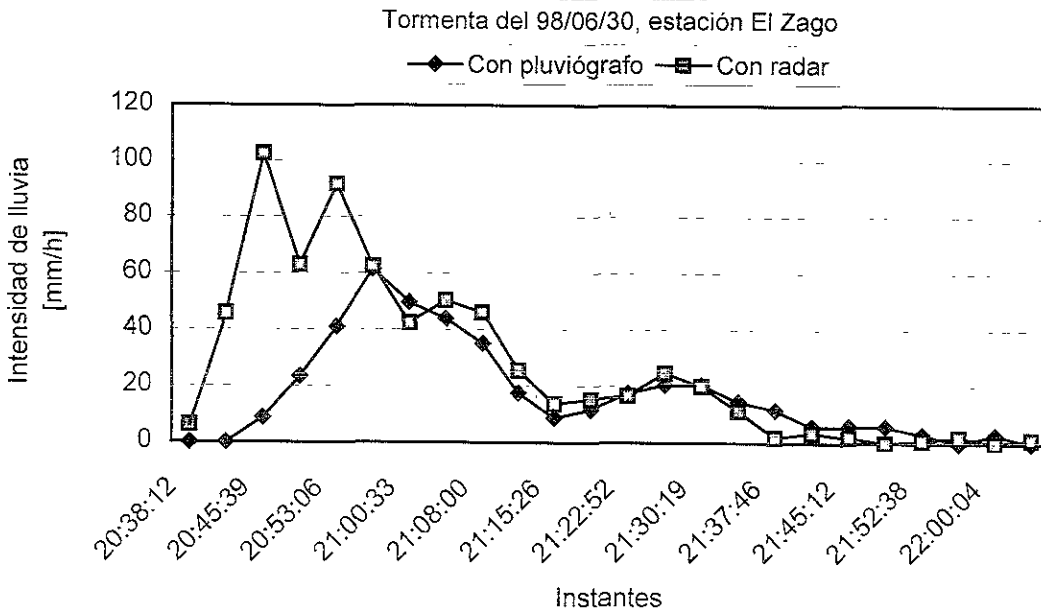
**Figura V.22e.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia  $z=113.24 R^{1.138}$ .



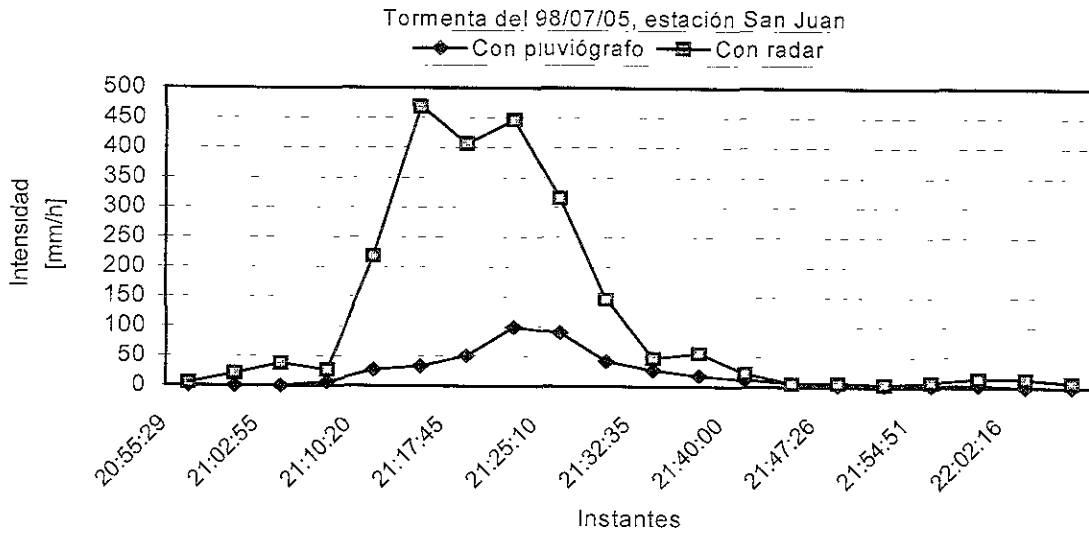
**Figura V.22f.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia  $z=113.24 R^{1.138}$ .



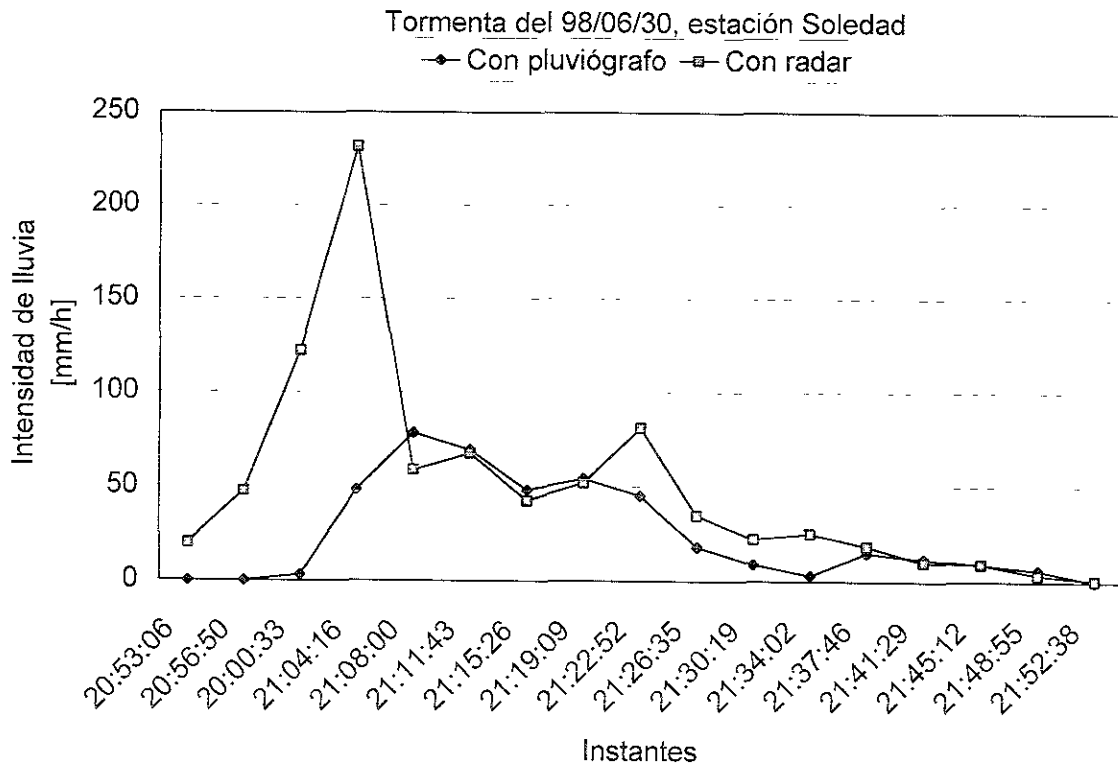
**Figura V.22g.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia  $z=113.24 R^{1.138}$ .



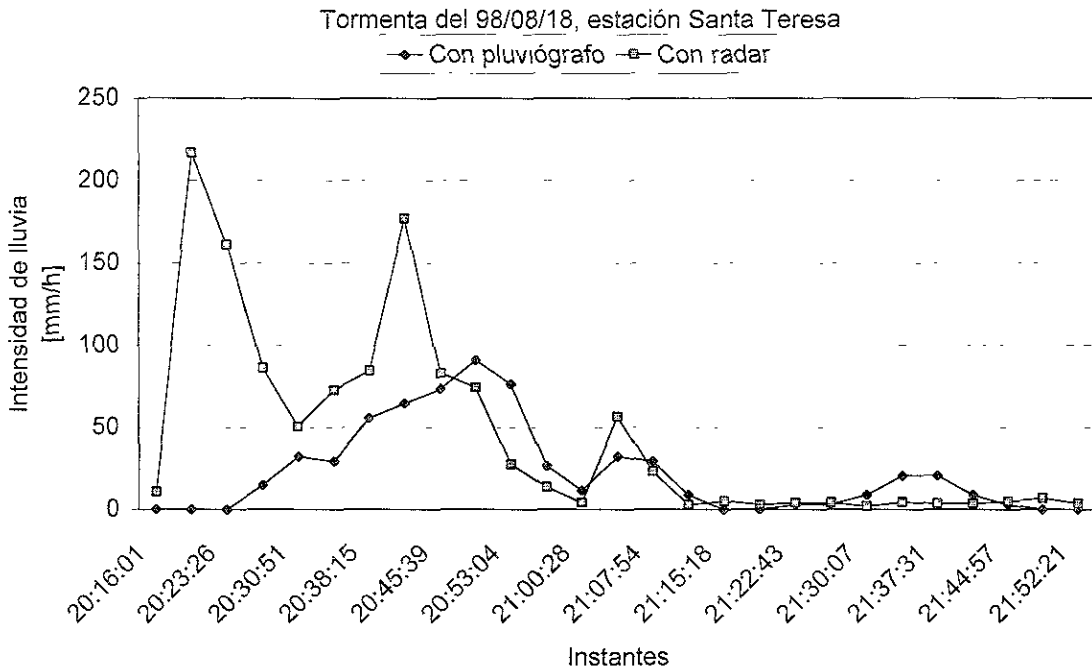
**Figura V.22h.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia  $z=113.24 R^{1.138}$ .



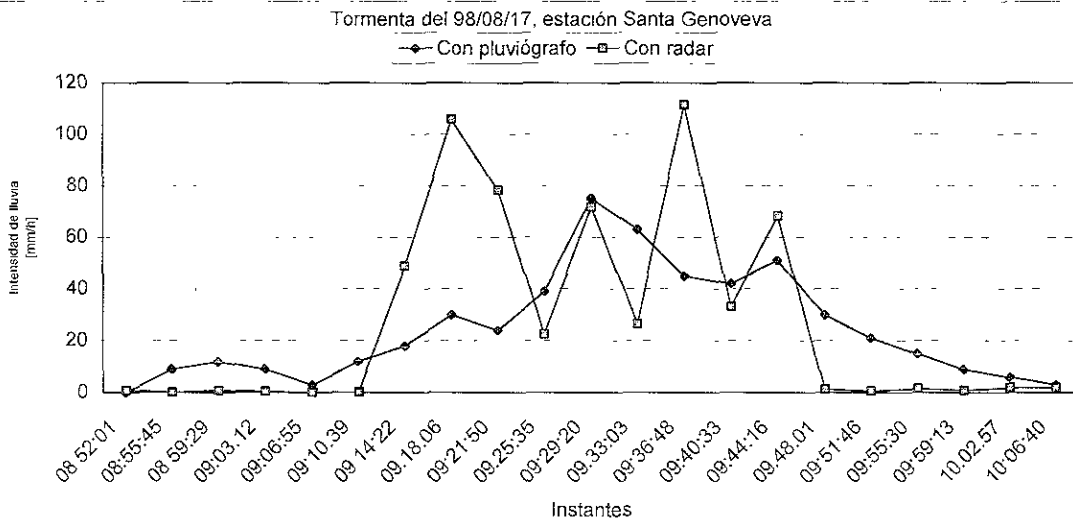
**Figura V.22i.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia  $z=113.24 R^{1.138}$ .



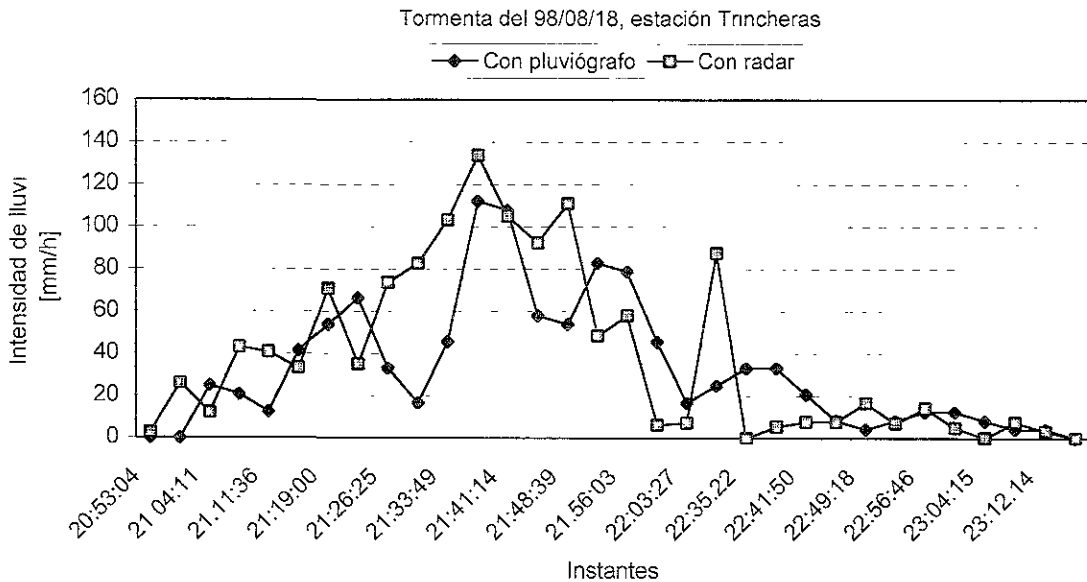
**Figura V.22j.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia  $z=113.24 R^{1.138}$ .



**Figura V.22k.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia  $z=113.24 R^{1.138}$ .



**Figura V.22L.-** Pluviograma medido con pluviógrafo y estimado con radar utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia  $z=113.24 R^{1.138}$ .



De la observación de estos 12 pluviogramas parece que ahora se estuviera sobrestimando (en lugar de la relación de Marshall-Palmer que subestima) lo que implica que en todo caso "la realidad" está en algún lugar entre "Marshall-Palmer y  $z=113.24R^{1.138}$ ", (ver la conclusión 20 en el capítulo VIII).

**V.6.3.- La dispersión de la nube de puntos para calibración hidrológica**

La base de datos utilizada en este trabajo para la calibración hidrológica está compuesta por valores de reflectividad  $z$  en  $mm^6/m^3$  y de valores de intensidad de lluvia en  $mm/h$  calculada para los instantes en que se producen los productos de radar, cada par de valores queda representado en la nube de puntos para calibración hidrológica (ver figura V-21). En este caso los valores de reflectividad corresponden a la máxima reflectividad en la vertical y la intensidad de lluvia se midió con pluviógrafo digital de los llamados de balancín.

La figura V.21, se forma a partir de la base de datos para calibración hidrológica de la cual la tabla V-3 constituye una muestra. Esta base de datos puede enriquecerse con las características de la tormenta siendo posible presentar en forma gráfica y por separado los puntos correspondientes a cada característica y hacer el análisis para identificar diferencias y a su vez tratar de explicarlas. Inmediatamente destaca la gran dispersión de la nube de puntos para calibración hidrológica en el figura V.21.



Enseguida se analizará de donde proviene la dispersión de la nube de puntos. Para esto considérese la figura IV.3. En esta figura se representan 2 intensidades de lluvia  $R$  y  $R^*$  y dos reflectividades  $z$  y  $z^*$ . La intensidad de lluvia y la reflectividad marcadas con un asterisco,  $R^*$  y  $z^*$ , representan propiedades de la población de gotas que queda dentro del volumen atmosférico definido por el haz del radar, muchos metros arriba de la superficie terrestre, siendo totalmente dependiente una propiedad de la otra (como se vio en la sección V.3 ecuaciones 5 y 6) y donde las propiedades de esta población de gotas presentan variaciones con el tiempo. Así mismo la intensidad de lluvia y la reflectividad " $R$ " y " $z$ " representan las mediciones hechas por un pluviógrafo sobre la superficie del terreno y la reflectividad medida y reportada por el radar, respectivamente. La nube de puntos para calibración hidrológica, mostrada en la figura V.21, comprende parejas de valores  $(R, z)$  con  $z$  en dBZ, lo que en el contexto de la calibración del radar usado en el PARC tiene las siguientes implicaciones que contribuyen a la dispersión observada de los puntos:

- Puesto que  $R$  son mediciones puntuales de la intensidad de lluvia y  $z$  son mediciones de reflectividad media sobre un volumen relativamente grande de la atmósfera a una altura sobre el suelo que fácilmente puede ser mayor al kilómetro resalta inmediatamente la diferencia de escalas entre ambas mediciones generándose el primer problema.
- Lógicamente las características de la población de gotas presentan diferencias, dependiendo de la altura a la que se encuentre ubicada esta población en la columna de atmósfera sobre el pluviógrafo, debido a la evaporación de las gotas al caer y por el arrastre que vientos fuertes pueden hacer de ellas. Todavía más, dentro de cada voxel (pixel volumétrico) reportado en el producto de radar hay una variación grande de las propiedades de las gotas y no se sabe cuál de los valores puntuales es el que realmente el pluviógrafo está muestreando.
- Las mediciones puntuales de los pluviógrafos sobre la superficie del terreno se ven influenciadas en su calidad por la presencia de vientos fuertes (ver redes pluviográficas en el capítulo IV) ocasionando subestimaciones de la intensidad de lluvia  $R$ .
- El hecho de que la gráfica V.21 incluye a todas las tormentas que fueron captadas por la red y por el radar simultáneamente, cuando algunas de ellas pudieran tener diferencias en su forma de llover y en la forma como el radar capta a estas tormentas. Lo adecuado sería llegar a un número muy grande de tormentas que permitiera estratificarlas con base en la detección de estas diferencias (ver sección IV.2.5).
- El valor de reflectividad reportado para cada pixel tiene una incertidumbre o error sobre el instante de tiempo real en que se produce esta reflectividad que tiene un valor máximo que es igual al intervalo de tiempo transcurrido entre el producto de radar en cuestión y el producto previo (aproximadamente 4 minutos) lo que definitivamente es una fuente de dispersión. La importancia de estos desfases en el tiempo radica en el hecho de que el fenómeno medido presenta variaciones en

el tiempo y en el espacio. Este hecho es la motivación principal de representar, en la figura IV.3, de diferente manera la reflectividad  $z$  proporcionada por el radar en un instante dado y la reflectividad  $z^*$  del volumen atmosférico muestreado por el radar. Aclarando que esta incertidumbre es introducida por el método empleado aquí para calibrar el radar y que es posible obtener con mucha precisión el instante de tiempo al que corresponde el valor de reflectividad reportado en un pixel por el radar, pero aquí no se hizo porque para ello se requiere contar con los productos volumétricos de radar y no se disponía de éstos para la calibración.

- Los pares de valores  $(R, z)$  no coinciden de manera exacta en el tiempo puesto que pueden existir pequeños desajustes en el reloj, principalmente el de los pluviógrafos, que pudiera no producirse de manera proporcional al tiempo que llevan de operación y que por lo tanto no es posible corregir adecuadamente (ver sección V.5.2.2).

La contribución real de cada uno de los aspectos anteriores en la dispersión de la nube de puntos de calibración hidrológica es muy difícil de evaluar. Por lo que se puede concluir que la dispersión que se ha obtenido constituye, por un lado, una representación de la variabilidad en tiempo y espacio de las características de la lluvia y de las tormentas y por otro lado, una consecuencia del mismo método empleado para hacer la calibración. Se destaca como uno de los principales aportadores de dispersión la diferencia de escala entre las mediciones de radar y las pluviográficas. Finalmente esta dispersión viene siendo, la representación gráfica de la gran variabilidad natural de las características de las nubes, de las tormentas y de la precipitación y representa otra prueba de lo limitada que resulta la representación de la lluvia a partir de las mediciones puntuales de su intensidad. Además esta misma dispersión indica también la baja probabilidad de que se registren dos tormentas iguales. Hasta ahora, esta situación no resultaba clara para los conocedores mexicanos del radar meteorológico y hasta cierto punto resultó inesperada. Debe tenerse en cuenta que la lluvia medida en un punto (como lo hace un pluviógrafo) no tiene sentido hidrológico, por lo que finalmente es de este hecho de donde se derivan los problemas de comparación señalados. Hidrológicamente lo que tiene sentido es la determinación de la lluvia sobre la superficie terrestre cubierta por la tormenta completa y en este ámbito el radar meteorológico calibrado hidrológicamente no tiene competidor.

Por otro lado, la cantidad de datos obtenidos y procesados en este trabajo permite caracterizar la dispersión de la nube de puntos para calibración hidrológica del radar y concluir que la comparación de intensidad de lluvia medida con pluviógrafo (en un punto) resulta ser probabilística (no determinística) al ser comparada con la intensidad de lluvia estimada con radar calibrado hidrológicamente, lo anterior debido a los aspectos numerados en los párrafos anteriores. Se presenta de manera gráfica en la figura V.23 a, b y c, la distribución de la reflectividad para cada una de las bandas definidas en la tabla V.4. Observe que la gráfica de la figura V.23a tiene valores en el eje de las ordenadas cinco veces mayores que los de las gráficas de las figuras V.23b y c.

En las figuras V.23 pueden apreciarse algunas características, por bandas, de la dispersión de la nube de puntos para calibración. Destaca el alto número de puntos de calibración en las intensidades bajas (menores a 3.5 mm/h), el bajo número de puntos de calibración para intensidades mayores a 90 mm/h. Observe como en las bandas de intensidades menores a 10.5 mm/h se presenta más ruido que para las bandas de intensidades mayores, y sin embargo presentan una tendencia definida (la moda). El ruido en las mediciones queda representado por la prolongación de las colas de la distribución de frecuencia absoluta de reflectividad, observándose que la cola izquierda se prolonga mucho más que la derecha. El comportamiento de la cola izquierda, sobre todo para las bajas intensidades, se relaciona con la característica discreta de los datos de lluvia a nivel del suelo (abordada en la sección V.6.1) la cual resulta menos importante conforme la intensidad de lluvia aumenta.

**Figura V.23 a, b, c.-** Distribución de la reflectividad para las bandas de precipitación definidas en la tabla V.4. (estadísticas por bandas), donde  $n$  representa el número de puntos considerados en la banda y  $Z_{moda}$  es la moda de la reflectividad en la banda.

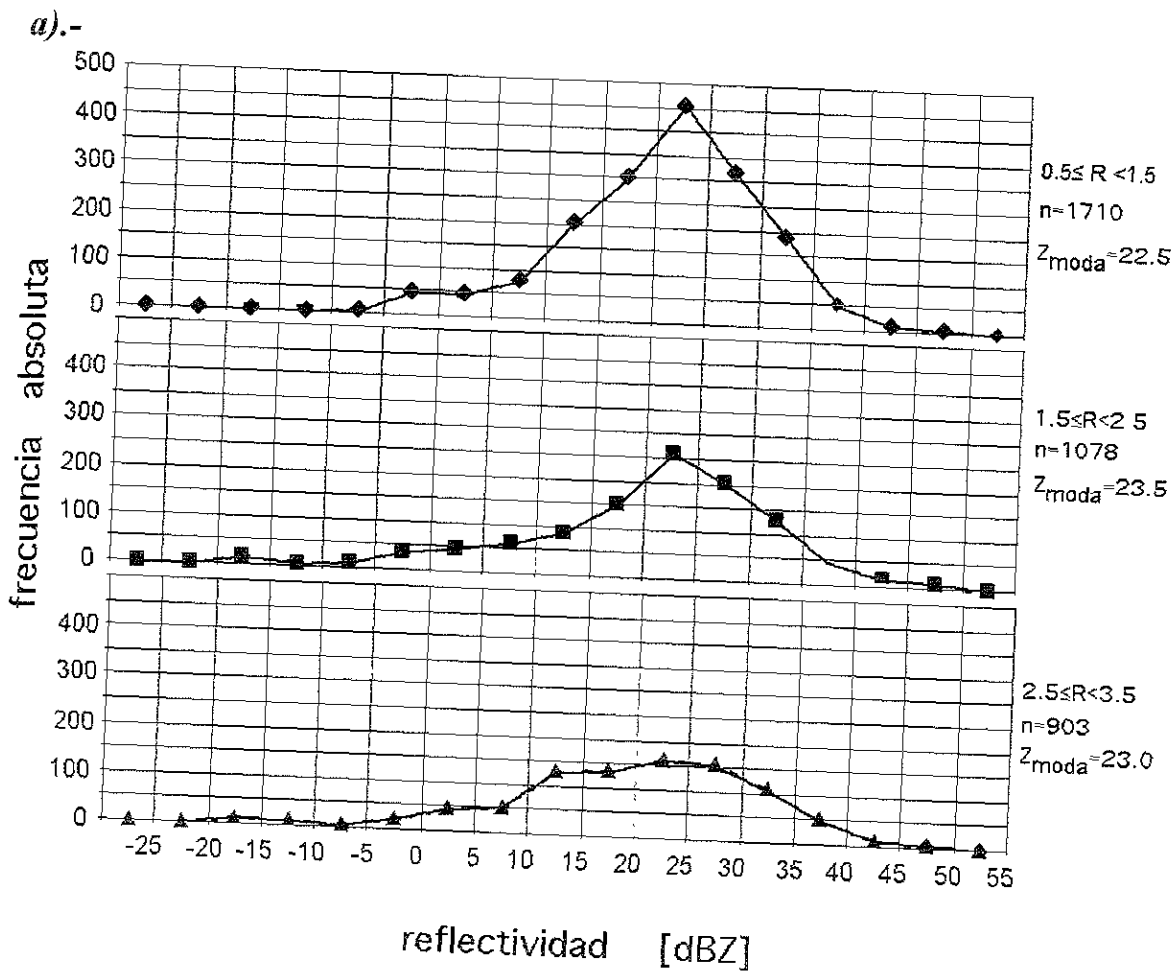


Figura V.23 b.- (continuación)...

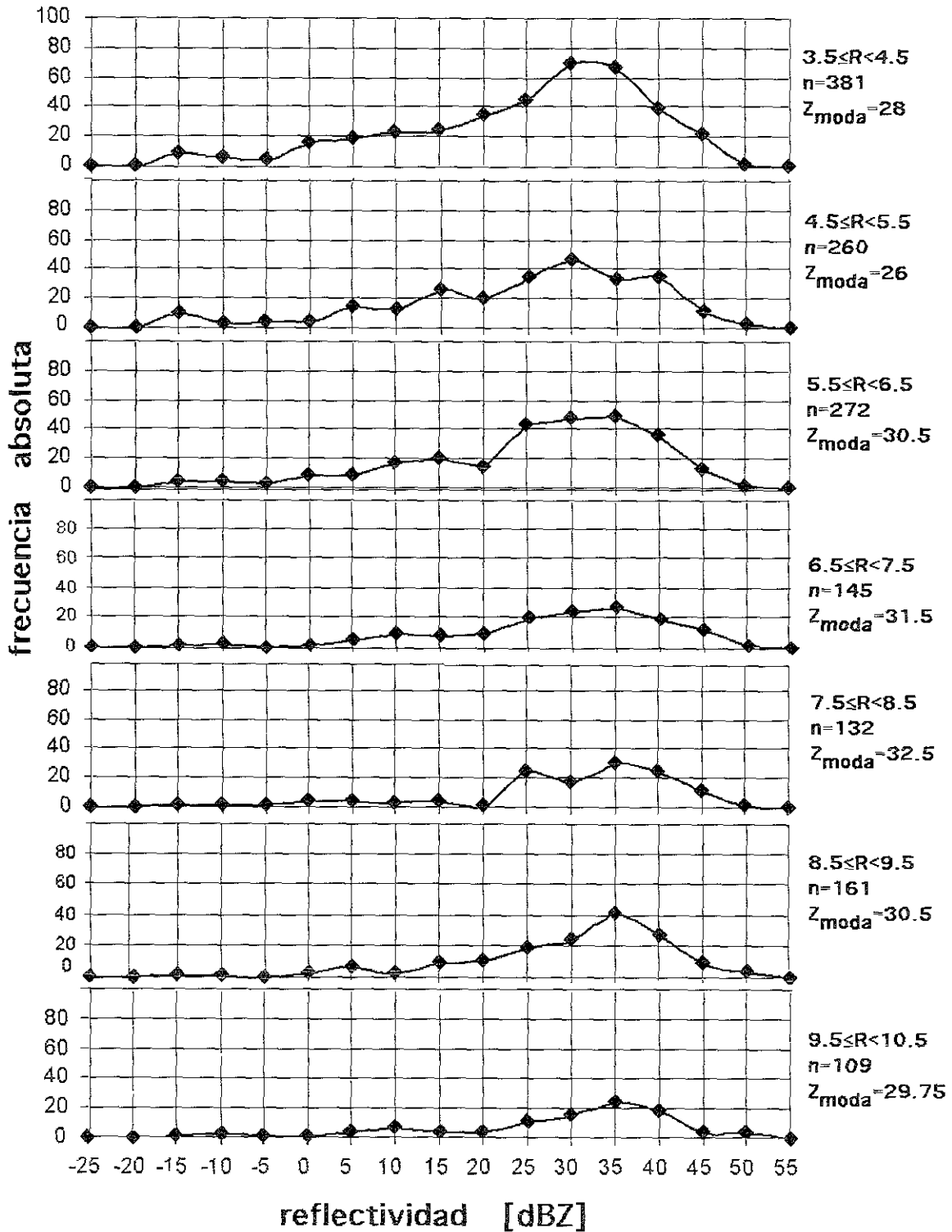
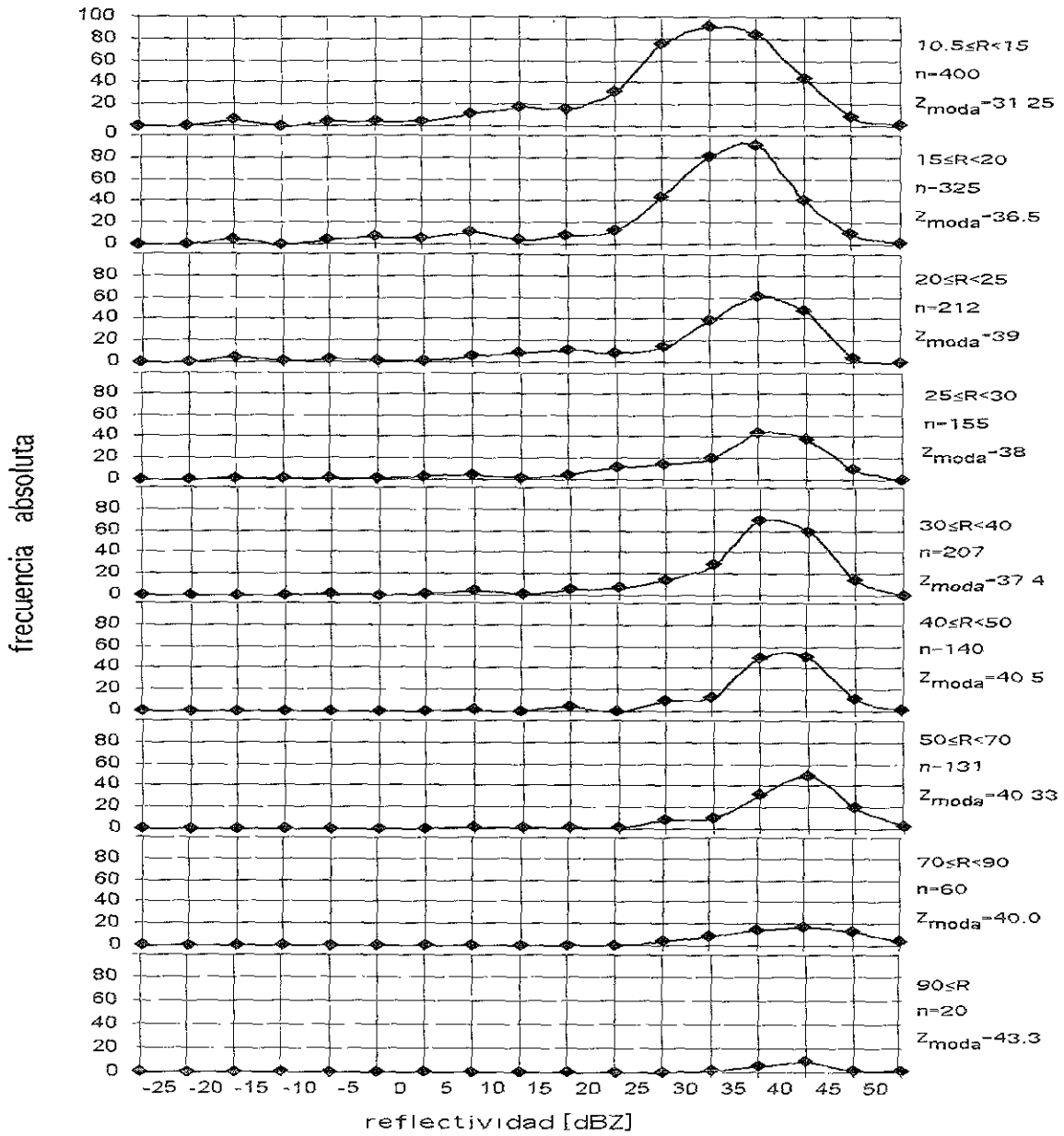


Figura V.23 c.- (continuación)...



#### V.6.4.- Comentarios finales

Los resultados del PARC, los cuales están en términos de reflectividad y de reflectividad transformada a lluvia con la relación de Marshall-Palmer, pueden ser utilizados sólo para establecer resultados de efectividad del método de sembrado en términos relativos (en %, por ejemplo) y no en términos absolutos (en incremento de  $m^3$  de agua precipitada); dado que ha quedado demostrado que por utilizar la relación de Marshall-Palmer para la transformación de reflectividad a lluvia, se está subestimando severamente la intensidad de lluvia y por lo tanto el volumen precipitado de agua.

Para una evaluación absoluta es indispensable la calibración hidrológica del radar, hecha esta es posible reinterpretar los resultados en términos de reflectividad del radar para obtener el incremento en  $m^3$  de agua precipitada y con este dato obtener una estimación en orden de magnitud del costo del  $m^3$  de agua obtenido por estimulación de lluvia.

Se recomienda utilizar en la reinterpretación y evaluación absoluta la relación obtenida, la cual es:

$$z=113.24 R^{1.138}$$

Las tormentas a considerar son las tormentas de verano presentes en el área de Monclova Coahuila. Esta relación también lleva implícita la suposición de que el incremento en reflectividad y por lo tanto de precipitación es debido a un incremento del número de gotas en toda la distribución de tamaños y que la distribución de tamaños de gotas tiene un comportamiento similar tanto en las tormentas sembradas como en las no sembradas.

## **CAPITULO VI**

### **Resultados del PARC en términos de reflectividad y duración de las tormentas**

**VI.1.- Introducción**

**VI.2.- Técnica de análisis**

**VI.3.- Los resultados estadísticos del análisis de las series de tiempo de las variables de respuesta obtenidos por el NCAR.**

**VI.4.- Resultados del análisis estadístico obtenidos por el NCAR de otras variables de respuesta.**

## CAPITULO VI

### Resultados del PARC en términos de reflectividad y duración de las tormentas

#### VI.1.- Introducción

Durante 1997 y 1998 se seleccionaron un total de 99 casos; de éstos, 48 fueron sembrados y 51 no fueron sembrados. Como resultado del examen inicial 5 tormentas fueron sacadas de la muestra al no cumplir con los requisitos preestablecidos para la unidad experimental, quedando finalmente 43 tormentas sembradas y 51 tormentas no sembradas por lo que resulta un total de 94 casos (NCAR, 1999). El diseño de este experimento y análisis de resultados fue realizado por el NCAR tomando como base las experiencias resultantes del experimento de sembrado de nubes con sales higroscópicas en Sudáfrica (Mather y Terblanche, 1997).

#### VI.2.- Técnica de análisis

Para la mejor comprensión de lo presentado en esta sección es recomendable leer la sección III.6.1 y III.6.2 referente a la definición de la unidad experimental y a las variables de respuesta e hipótesis, respectivamente.

Las series de tiempo de las variables de respuesta fueron evaluadas usando los primeros tres cuartiles (que corresponden al percentil 25, 50 y 75) de la distribución de los valores de las variables para casos sembrados y no sembrados. El primer cuartil es el valor de la variable de respuesta para el cual el 25% de las tormentas tienen valores más pequeños. Similarmente 50% de las tormentas tienen valores más grandes y 50% de las tormentas valores más pequeños que el segundo cuartil, y 75% tienen valores más pequeños que el tercer cuartil. Con lo anterior se tiene una representación de la distribución de la variable de respuesta, y por ello provee de un indicador sobre toda diferencia entre las muestras de tormentas sembradas y no sembradas (NCAR, 1999).

La técnica de análisis por cuartiles es más útil para describir el comportamiento de variables cuyo valor se encuentra comprendido entre un amplio rango de valores, como es el caso de las variables de respuesta analizadas en el PARC. Si se quiere caracterizar el comportamiento y la dispersión de este tipo de variables con parámetros como la media, ésta se ve fuertemente influenciada por valores extremos de la variable, lo que no ocurriría si los valores se agruparan alrededor de la media.



La técnica estadística llamada “re-aleatorización” (Scheffé, 1943; Siegel, 1978) fue usada por el NCAR para comprobar la significancia estadística de las diferencias en los cuartiles 1º, 2º y 3º de las series de tiempo de las variables de respuesta para los casos sembrados y no sembrados independientemente para cada uno de los instantes de medición especificados. La técnica de análisis de re-aleatorización es una técnica de la estadística no paramétrica que sirve para examinar la significación de la diferencia entre dos muestras independientes. Estas pruebas fueron de una cola a un nivel de 0.05, probando la hipótesis alternativa de incremento en las variables de respuesta de las tormentas sembradas. Se utiliza el mismo procedimiento de re-aleatorización que el usado para evaluar los resultados del experimento sudafricano (Mather *et al.*, 1997). El procedimiento de re-aleatorización calcula el llamado factor P, el cual es la probabilidad (en porcentaje) de que la diferencia entre los valores de la siembra y no siembra sea un resultado del azar (NCAR, 1999).

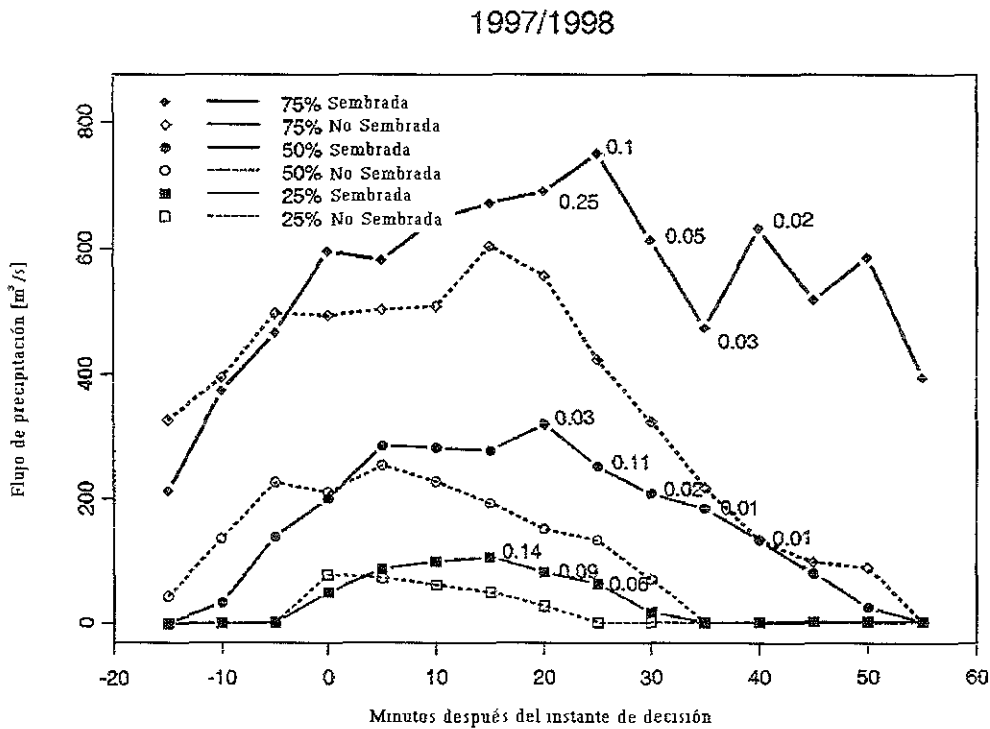
### **VI.3.- Los resultados estadísticos del análisis de las series de tiempo de las variables de respuesta obtenidos por el NCAR**

Para la interpretación de las curvas que representan a cada cuartil, recuérdese que el tiempo  $t=0$  es el instante de decisión; el cual corresponde al momento en que las características de una tormenta son juzgadas como adecuadas para ser considerada como unidad experimental, procediendo a continuación al sorteo para ver si se aplica el tratamiento de sembrado o no es aplicado. Observe en la figura VI.1 como el instante de decisión se da cuando existen ya varios productos de radar que detectan a la tormenta (la curva despega antes de  $t=0$ ) y que le permite a TITAN realizar el pronóstico a corto plazo del comportamiento de las variables de tormenta. El pronóstico de TITAN es de primordial importancia para juzgar el potencial de cada tormenta a candidata.

#### **VI.3.1. Flujo de precipitación**

La figura VI.1 muestra el resultado del análisis por cuartiles para el flujo de precipitación (que es la integral sobre el área de la intensidad de lluvia). En la relación de transformación se utiliza el producto de radar de máxima reflectividad en la vertical, en el cual la reflectividad puede corresponder a cualquier altura dentro del volumen atmosférico definido por TITAN como tormenta. Se muestran tres pares de curvas, una por cada cuartil. En la figura VI.1 se aprecia claramente la diferencia entre los cuartiles de cada par de curvas denotando el efecto del sembrado.

En la misma figura VI.1, sobre las curvas se anota el nivel de significancia de las diferencias resultante de la prueba de re-aleatorización. Las diferencias son estadísticamente significantes después de los 30 minutos, especialmente para el 2° y 3er cuartiles. En muchos momentos las tormentas sembradas tienen flujos de precipitación, por encima de un factor de dos, mayores que las tormentas no sembradas.

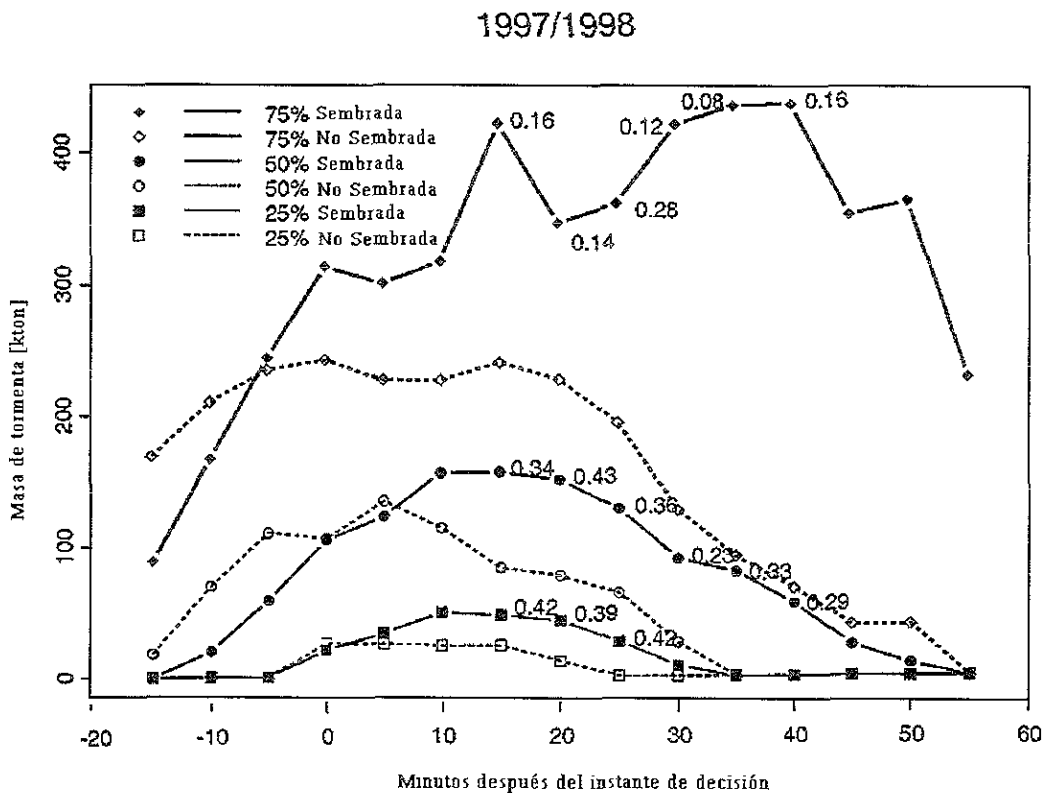


**Figura VI.1.-** Valores de cuartiles de flujo de precipitación ( $m^3 s^{-1}$ ) contra tiempo transcurrido desde el momento de decisión para casos sembrados y no sembrados. Los números sobre las curvas indican la significancia estadística de las diferencias entre las tormentas sembradas y las no sembradas para cada cuartil como lo determinó la prueba de re-aleatorización (NCAR, 1999).

### VI.3.2. Masa total de la tormenta

La masa total de la tormenta dada (en kilotoneladas) se refiere a la cantidad de agua líquida en forma de gotas de lluvia y no incluye a las gotitas de agua que forman a la nube las cuales son de un tamaño tal que no logran precipitar y que resultan prácticamente transparentes para el radar. En otras palabras una nube que no está precipitando aunque sea visible al ojo humano es invisible para el tipo de radar utilizado en el experimento.

La figura VI.2. muestra las series de tiempo para la masa total de la tormenta (en kilotoneladas). La masa de la tormenta es calculada usando la relación  $M = 20300z^{1.67}$  donde  $M$  (masa de agua) está en  $gm^{-3}$  y  $z$  es el factor de reflectividad en  $mm^6 m^{-3}$  (NCAR, 1997). Nuevamente las series están divididas en tres diferentes cuartiles. En la figura VI.2 se aprecia claramente como los cuartiles que corresponden a las tormentas sembradas exhiben una masa de la tormenta mayor que las tormentas no sembradas. Obsérvese que las diferencias no resultan estadísticamente significativas, de acuerdo con el número que está sobre las curvas correspondientes a las series de tiempo de las tormentas sembradas el cual fue determinado con la prueba de re-aleatorización (NCAR, 1999).

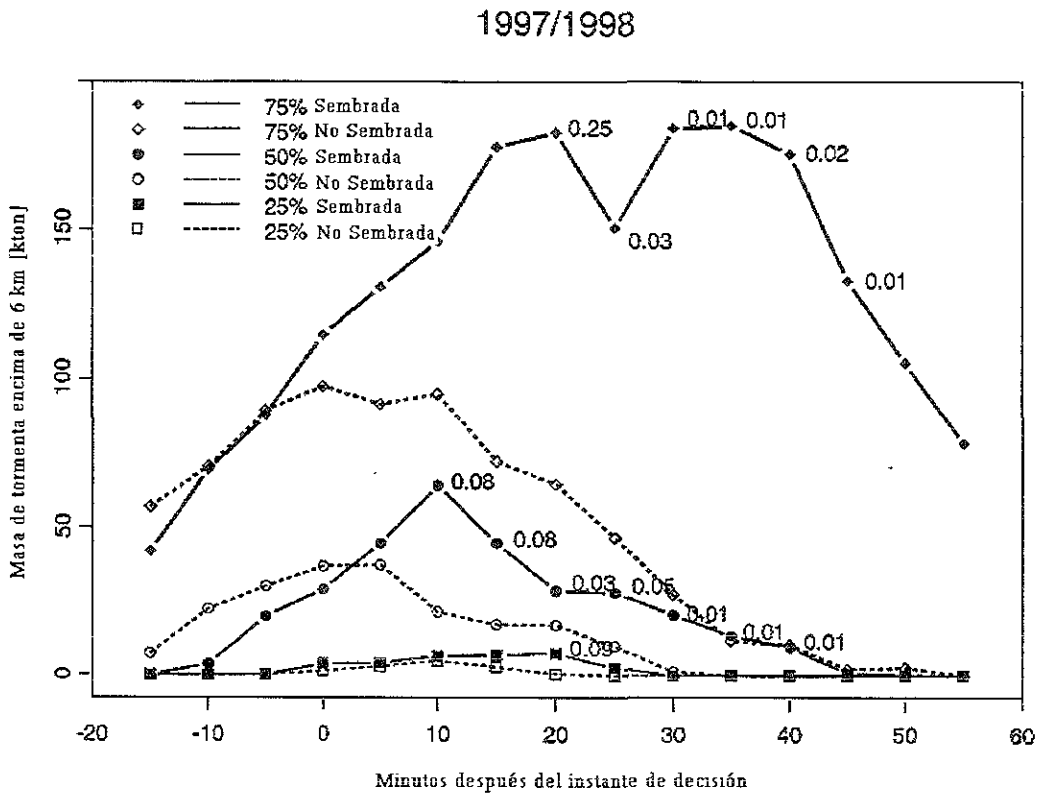


**Figura VI.2.-** Valores de cuartiles de masa total de tormenta (kilotoneladas) contra el tiempo transcurrido desde el “instante de decisión” para casos sembrados y no sembrados. Los números sobre las curva indican la significancia estadística de las diferencias entre las tormentas sembradas y las no sembradas para cada cuartil como lo determinó la prueba de re-aleatorización (NCAR, 1999).

### VI.3.3.- Masa total de la tormenta (kton) por arriba de los 6- km s.n.m.

La masa total de la tormenta (kilotoneladas) se calcula como se explicó en el apartado anterior; solo que aquí el cálculo incluye únicamente los datos de reflectividad que corresponden al volumen atmosférico ocupado por la tormenta por arriba de una altura de 6 km sobre el nivel del mar. La masa total de la tormenta por arriba de los 6 km se considera como una variable importante ya que en este nivel se espera ver los primeros efectos de sembrado de acuerdo con la experiencia reportada en el experimento de Sudáfrica. Un aumento en la masa total de la tormenta por arriba de los 6 km, también puede relacionarse con un aumento en la altura del tope de la tormenta, que a su vez se relaciona con un aumento en la intensidad de las corrientes ascendentes o efecto dinámico del sembrado. Aunque TITAN también calcula la altura del tope de la tormenta, en el informe del NCAR (NCAR, 1999) no se reportan resultados del análisis del comportamiento de dicha altura en tormentas sembradas y no sembradas.

En la figura VI.3 se aprecia una clara diferencia ya a los quince minutos después del arranque del sembrado, entre los cuartiles que corresponden a tormentas sembradas y los que corresponden a las no sembradas haciéndose más grandes las diferencias en las etapas siguientes. Los números sobre las curvas representan otra vez los valores de la significancia estadística de las diferencias entre las muestras, resultado de la prueba de re-aleatorización. Para el segundo y el tercer cuartiles a partir de los 20 minutos después del sembrado, las diferencias entre las tormentas sembradas y las no sembradas son estadísticamente significativas permaneciendo a la alza hasta los 50 minutos después del sembrado. Estas diferencias indican que en las tormentas sembradas se desarrolla la precipitación mucho más rápido y en más grandes cantidades que en las tormentas no sembradas. Las diferencias para los primeros cuartiles (los del percentil 25) no resultan tan grandes como para los segundos y terceros cuartiles. Esto es porque muchas de las nubes pequeñas apenas alcanzan el nivel de los 6 km. Los efectos más grandes del sembrado son evidentes en las nubes más grandes (NCAR, 1999).

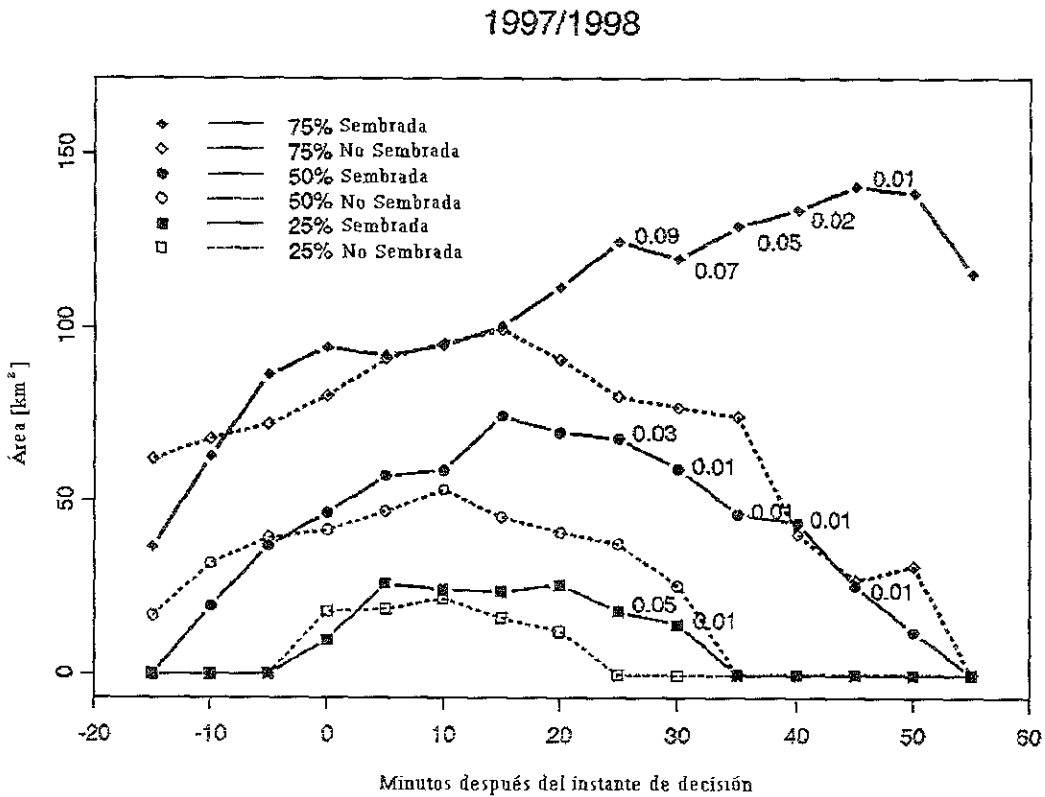


**Figura VI.3.-** Valores de cuartiles de masa total de tormenta (kilotoneladas) por encima de los 6 km de altura contra el tiempo transcurrido desde el “instante de decisión” para casos sembrados y no sembrados. Los números sobre las curva indican la significancia estadística de las diferencias entre las tormentas sembradas y las no sembradas para cada cuartil como lo determinó la prueba de re-aleatorización (NCAR, 1999).

Llama la atención como las diferencias para la masa total de la tormenta mostradas en la figura VI.2, no llegan a ser estadísticamente significativas y como las diferencias entre las tormentas sembradas y no sembradas para la masa de la tormenta por arriba de los 6 Km de a.s.n.m. son estadísticamente significativas desde los 20 minutos después del sembrado. La explicación de lo anterior está en el hecho de que la capacidad de detección de las tormentas por el radar está influenciada por las numerosas montañas que se encuentran dentro del área de estudio por lo que una tormenta detrás de una montaña estará siendo detectada por el radar de una forma “menos completa” que si esta misma tormenta se encontrara delante de dicho obstáculo orográfico. El efecto inmediato de lo anterior es que para alcanzar la significancia estadística de las diferencias de algunas variables, entre las tormentas sembradas y no sembradas, se requieren muestras de mayor tamaño.

VI.3.4.- Area de precipitación

La figura VI.4. muestra las series de tiempo del análisis de cuartiles para el área de tormenta (área de precipitación en km<sup>2</sup>) para tormentas sembradas y tormentas no sembradas. De la figura VI.4 resulta evidente que el área de precipitación es también significativamente más grande para las tormentas sembradas que para las no sembradas para los tres cuartiles 15 minutos después del instante de decisión y continua siendo así durante todo el periodo de análisis. Las diferencias son estadísticamente significativas después de los 25 minutos con algunos valores que resultan en diferencias mayores a un 100% en las tormentas sembradas en comparación con las tormentas no sembradas. Esto significa que además de una intensidad de lluvia mayor en las tormentas sembradas, también la lluvia precipita sobre un área más grande (NCAR, 1999).

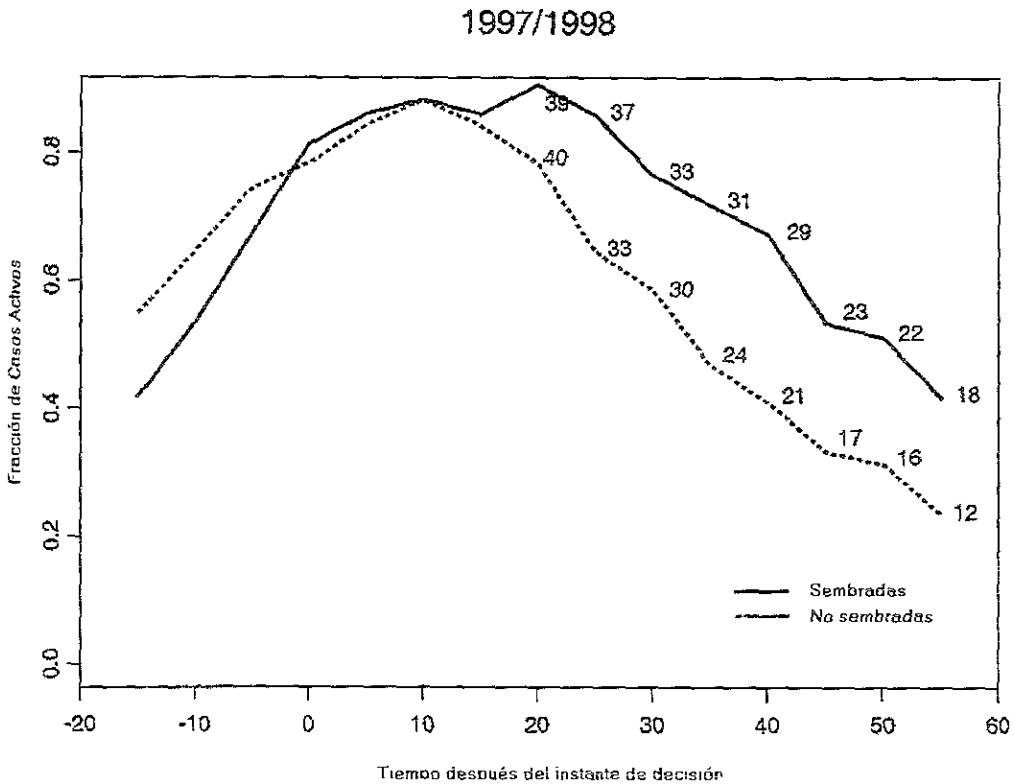


**Figura VI.4.-** Valores de cuartiles de área de tormenta (en km<sup>2</sup>) contra el tiempo transcurrido desde el “instante de decisión” para casos sembrados y no sembrados. Los números sobre las curva indican la significancia estadística de las diferencias entre las tormentas sembradas y las no sembradas para cada cuartil de acuerdo al resultado de la prueba de re-aleatorización (NCAR, 1999).

**VI.4.- Resultados del análisis estadístico obtenidos por el NCAR de otras variables de respuesta.**

**VI.4.1. Tiempo de vida de la tormenta**

Para estudiar el tiempo de vida de las tormentas se analiza el comportamiento de los casos activos. Un caso activo se define así porque existe como tormenta en el rastreo de TITAN para el instante en cuestión; es decir existe un volumen atmosférico que a la resolución del radar presenta una reflectividad mayor a los 30 dBZ en el instante de interés. El porcentaje de casos activos es el número de casos con rastro de tormenta de TITAN en el instante específico dividido entre el número total de tormentas sembradas o no sembradas según corresponda. La figura VI.5 muestra el porcentaje de casos activos, donde se aprecia que después de los 20 minutos más casos sembrados que casos no sembrados siguen como tormentas detectadas en TITAN y el porcentaje de tormentas activas permanece más grande para los casos sembrados que para los casos no sembrados. La figura VI.5 también indica que las tormentas sembradas tienden a vivir más que las tormentas no sembradas (NCAR, 1999). Los números sobre las líneas indican cuántas de las tormentas que conforman la muestra, de sembradas y no sembradas, permanecen activas en ese instante después del momento de decisión (eje horizontal).



**Figura VI.5.-** Porcentaje de casos activos contra tiempo después del instante de decisión para tormentas sembradas y no sembradas (NCAR, 1999).

VI.4.2.- Integral tiempo área (ITA) de precipitación en km<sup>2</sup>h

La ITA en km<sup>2</sup>h es definida como la integral del área de la tormenta sobre el tiempo, calculada usando datos discretos cada 5 minutos provenientes de los datos de barrido volumétrico del radar. Es claro que las tormentas sembradas producen lluvia sobre un área casi del doble de grande que las tormentas no sembradas siendo así en los tres cuartiles. Los valores de los cuartiles de la integral tiempo área (ITA), para la muestra completa de tormentas desde el instante de decisión hasta 60 minutos después del instante de decisión, se muestran en la tabla VI.1.

**Tabla VI.1.-** Valores de los cuartiles de la integral tiempo área (ITA) en km<sup>2</sup>h para casos sembrados y casos no sembrados, para todas las tormentas, (NCAR, 1999).

Cuartil	No Sembrados	Sembrados	Diferencia
1º	7.47023	17.1884	9.71817
2º	27.0402	49.3423	22.3021
3º	67.3505	124.617	57.2665

VI.4.3.- Precipitación total

En la tabla VI.2 se muestran los valores de los cuartiles para la precipitación total, para la muestra completa de tormentas. Esta tabla indica que las tormentas sembradas tuvieron una cantidad más grande de precipitación total que las tormentas no sembradas para los tres cuartiles. El porcentaje de incremento en la precipitación total es de 138% en el tercer cuartil, 67% en el segundo cuartil y 57% en el primer cuartil. De acuerdo con el análisis anterior el incremento en lluvia es acompañado con un incremento en el área de precipitación como lo evidencian la figura VI.4 y tabla VI.1 (NCAR, 1999).

**Tabla VI.2.-** Valores de los cuartiles de precipitación total(miles de m<sup>3</sup>) para casos sembrados y casos no sembrados (NCAR, 1999).

Cuartil	No Sembrados	Sembrados	Diferencia
1º	111.226	264.599	153.373
2º	375.811	626.127	250.316
3º	1126.31	1779.0	652.69



## **CAPITULO VII**

### **Análisis de resultados a la luz de la calibración hidrológica del radar**

- VII.1.- La reinterpretación**
- VII.2.- Reinterpretación del flujo de precipitación**
- VII.3.- Diferencias en el volumen total precipitado utilizando  $z=200R^{1.6}$  y  $z=113.24R^{1.138}$**
- VII.4.- El volumen de precipitación atribuible al incremento de área y tiempo de vida de las tormentas sembradas**
- VII.5.- El costo del  $m^3$  de agua adicional obtenido aplicando la técnica de estimulación de lluvia probada en el PARC.**
- VII.6.- Comparación de los resultados del PARC con otros Experimentos en México**

## CAPITULO VII

### Análisis de resultados a la luz de la calibración hidrológica del radar.

#### Introducción

En este capítulo se hace una reinterpretación, de los resultados oficiales del PARC obtenidos por el NCAR, a la luz de la calibración hidrológica del radar; puesto que ha quedado demostrado (en el capítulo V) que la utilización, por parte del NCAR, de la relación  $z=200R^{1.6}$  de Marshall-Palmer subestima severamente la intensidad de lluvia en las tormentas convectivas de verano presentes en la región de Monclova Coahuila. La subestimación de la intensidad de lluvia en el PARC trae como consecuencia que los resultados del experimento aleatorio presentados en términos de variables como: flujo de precipitación, precipitación total y masa de lluvia también presenten severas subestimaciones en sus valores. La subestimación de la intensidad de lluvia hace que sea necesaria una reinterpretación de las variables subestimadas utilizando la relación de transformación de reflectividad a intensidad de lluvia que resultó de la calibración hidrológica del radar empleado en el PARC (ver capítulo V). Las variables: área de lluvia, el tiempo de vida de la tormenta y la integral tiempo área no se ven afectados por la relación de transformación de reflectividad a intensidad de lluvia utilizada; siempre y cuando se conserve el umbral de los 30 dBZ para definir a la tormenta.

#### VII.1.- La reinterpretación

La reflectividad es una propiedad de la población de gotas que forman la lluvia, que está directamente relacionada con otra propiedad de la lluvia que es su intensidad (ver ecs. de la V.1 a la V.7). Las diferencias encontradas en los valores de reflectividad de radar de tormentas sembradas y no sembradas, al ser una propiedad de la lluvia que se relaciona con su intensidad, son por si mismas evidencia física o huellas del efecto del sembrado. Aprovechando la relación entre reflectividad e intensidad de lluvia se prefiere utilizar variables que implican una transformación de la reflectividad a intensidad de lluvia (mm/h) y de aquí calcular otras, como el flujo de precipitación ( $m^3/s$ ) y el volumen total precipitado por ejemplo, las cuales son variables más conocidas y más fáciles de interpretar.

Al existir una gran cantidad de relaciones de transformación de reflectividad a lluvia reportadas en la literatura que además presentan grandes contrastes dificulta una elección (Fujiwara, 1965; Austin, 1987; Joss, 1970; Battan 1973). La elección del NCAR de utilizar la relación de Marshall-Palmer para transformar la reflectividad a intensidad de lluvia genera una subestimación severa del volumen total de lluvia por lo que los resultados oficiales del NCAR, no pueden interpretarse en términos

absolutos por ejemplo de incremento en unidades de volumen de agua en tormentas sembradas, sino en términos relativos es decir en un porcentaje de incremento de agua en relación con la tormenta no sembrada.

Para una evaluación absoluta de la efectividad del sembrado es indispensable utilizar una relación de transformación de reflectividad a intensidad de lluvia, obtenida del proceso de calibración hidrológica del radar utilizado, para la temporada y región de interés. Dado que dentro de las posibilidades de este trabajo no se encuentra el reprocesar todos los productos de radar utilizando la relación de transformación obtenida de la calibración hidrológica, solo se reinterpretarán las series de tiempo correspondientes al 1º., 2º. y 3er. cuartiles de la muestra de tormentas sembradas y no sembradas para las variables de flujo de precipitación y volumen total de precipitación.

## VII.2.- Reinterpretación del flujo de precipitación

Para la reinterpretación del flujo de precipitación se parte de la información proporcionada en la figuras VI.1 y VI.4 que muestran los valores de flujo de precipitación (en  $m^3/s$ ) y área de tormenta (en  $km^2$ ) respectivamente y con los valores obtenidos de estas gráficas (cada cinco minutos) se divide el flujo de precipitación entre el área de tormenta obteniendo la intensidad de la tormenta (el hablar de tormenta necesariamente implica promedios), para tormentas sembradas y no sembradas en los tres cuartiles. Si bien es cierto que la tormenta correspondiente a un cuartil en la variable área no necesariamente corresponderá al mismo cuartil en la variable de flujo de precipitación dichos tormentas serán muy parecidas. La intensidad de la tormenta así obtenida es un valor que implica un promedio de los valores de intensidad de lluvia que resulta de la transformación de la reflectividad máxima en la vertical en cada pixel comprendido dentro del área de precipitación de la tormenta aplicando la relación de Marshall-Palmer, los valores de intensidad así obtenidos se muestran en la tabla VII.1. Es necesario poner atención a los valores que aparecen en esta tabla en la que todas las intensidades de tormenta son menores a los 25 mm/h.

El NCAR asignó a la unidad experimental una duración de 60 minutos a partir del instante de decisión, seguramente porque se esperaba un efecto menor del sembrado en la duración de las tormentas, como se puede observar en las figuras VI.1 y VI.4. Esta duración de 60 minutos no alcanza a cubrir el tiempo de vida completo de la tormenta correspondiente al 3er. cuartil de las tormentas sembradas y por lo tanto no es posible obtener a partir de las figuras VI.1 y VI.4 el volumen total de lluvia aportado por esta tormenta, ni la duración total de la misma tormenta. Por lo anterior resulta necesario hacer la siguiente suposición: en la tabla VII.1 se ha supuesto que la tormenta sembrada correspondiente al 3er. cuartil decrece, a partir de los 55 minutos después del instante de decisión, de la misma forma que la tormenta no sembrada correspondiente al mismo 3er. cuartil, para las variables de flujo de precipitación y área de tormenta. Éstos valores supuestos se marcan en gris

claro en la tabla. La primera columna representa el tiempo transcurrido en minutos a partir del instante decisión representado por  $t=0$ , las demás columnas presentan los valores de la intensidad de lluvia en las tormentas sembradas y no sembradas correspondientes al 1º, 2º y al 3er. cuartiles, las que resultaron de dividir el flujo de precipitación entre el área de tormenta. El área y el flujo de precipitación de las tormentas se pueden revisar en las tablas VII.11 y VII.12.

**Tabla VII.1.- Intensidad de la tormenta en mm/h con Marshal-Palmer**

t (min)	1er Cuartil		2º Cuartil		3er. Cuartil	
	Semb.	No semb.	Semb.	No Semb.	Semb.	No Semb.
-15	0	0	0	9.11	21.30	18.87
-10	0	0	6.06	14.96	21.31	21.22
-5	0	0	13.52	20.34	19.28	24.95
0	18	16.20	15.73	18.70	22.79	22.10
5	12.53	14.21	18.06	19.46	22.91	20.04
10	15.15	10.97	17.27	15.49	24.48	19.21
15	16.20	11.48	13.30	15.36	23.92	22.00
20	11.49	8.03	16.46	13.08	22.21	21.96
25	12.80	0	13.45	12.98	21.57	19.17
30	3.84	0	12.39	9.55	18.24	14.77
35	0	0	13.79	0	12.83	10.22
40	0	0	10.80	0	16.72	11.59
45	0	0	10.94	0	12.98	12.34
50	0	0	7.20	0	15.05	9.56
55	0	0	0	0	12.07	0
60	0	0	0	0	11.77	0
65	0	0	0	0	10.22	0
70	0	0	0	0	11.59	0
75	0	0	0	0	11.31	0
80	0	0	0	0	11.56	0
85	0	0	0	0	0	0

Con la intensidad de la tormenta en mm/h utilizando la relación de transformación de Marshall-Palmer  $z=200R^{1.6}$  se obtiene la reflectividad  $z$  promedio en la tormenta en  $mm^6/m^3$ , la cual se muestra en la tabla VII.2.

A partir de la reflectividad  $z$  (en  $mm^6/m^3$ ) obtenida para las tormentas sembradas y no sembradas de cada cuartil se obtiene una nueva intensidad de la tormenta en mm/h utilizando la relación de transformación de reflectividad a intensidad de lluvia obtenida y recomendada en la sección V.6. que es  $z=113.24R^{1.138}$ , las que se muestran en la tabla VII.3.

**Tabla VII.2.- Reflectividad de tormenta z en  $mm^6/m^3$  para las tormentas sembradas y no sembradas correspondiente a los cuartiles 1º, 2º y 3º.**

t (min)	1er Cuartil		2o Cuartil		3er. Cuartil	
	Semb.	No semb.	Semb.	No Semb.	Semb.	No Semb.
-15	0	0	0	6854	26695	21994
-10	0	0	3576	15172	26724	26543
-5	0	0	12907	24797	22767	34383
0	20392	17229	16437	21680	29740	28307
5	11419	13970	20507	23094	29987	24214
10	15477	9235	19081	16031	33353	22634
15	17229	9923	12560	15822	32133	28113
20	9947	5606	17668	12239	28545	28023
25	11819	0	12789	12084	27241	22554
30	1722	0	11214	7401	20829	14859
35	0	0	13311	0	11868	8249
40	0	0	9006	0	18122	10083
45	0	0	9191	0	12086	11151
50	0	0	4707	0	15310	7412
55	0	0	0	0	10762	0
60	0	0	0	0	8250	0
65	0	0	0	0	8250	0
70	0	0	0	0	1085	0
75	0	0	0	0	1085	0
80	0	0	0	0	1085	0
85	0	0	0	0	0	0

Aquí podemos comparar ya los valores de intensidad de tormenta de la tabla VII.1 con los valores de intensidad de tormenta de la tabla VII.3; apreciando una considerable diferencia que se verá reflejada en el flujo de precipitación y en el volumen total de lluvia producido por la tormenta.

Con los valores de la intensidad de la tormenta en mm/h de la tabla VII.3 y con el área de tormenta en  $km^2$  (ver tabla VII.11) obtenida de la figura VI.4 para cada instante considerado, se obtiene nuevamente el flujo de precipitación en  $m^3/s$  que se muestra en la tabla VII.4.

**Tabla VII.3.-** Intensidad de tormenta en mm/h, con  $z=113.24R^{1.138}$

t (min)	1er Cuartil		2o Cuartil		3er. Cuartil	
	Semb.	No semb.	Semb.	No Semb.	Semb.	No Semb.
-15	0	0	0	36.80	121.55	102.52
-10	0	0	20.77	73.98	121.66	120.94
-5	0	0	64.18	113.91	105.68	151.82
0	95.93	82.72	79.37	101.24	133.65	127.97
5	57.63	68.80	96.40	107.01	134.62	111.56
10	75.28	47.83	90.49	77.65	147.81	105.14
15	82.72	50.94	62.66	76.76	143.05	127.20
20	51.05	30.84	84.57	61.25	128.92	126.84
25	59.40	0	63.66	60.57	123.73	104.81
30	10.93	0	56.72	39.37	97.73	72.64
35	0	0	65.94	0	59.62	43.31
40	0	0	46.78	0	86.48	51.66
45	0	0	47.62	0	60.58	56.44
50	0	0	26.45	0	74.57	39.42
55	0	0	0	0	54.71	0
60	0	0	0	0	72.66	0
65	0	0	0	0	57.33	0
70	0	0	0	0	81.66	0
75	0	0	0	0	50.44	0
80	0	0	0	0	39.42	0
85	0	0	0	0	0	0
Promedio (mm/h)	54.12	46.86	60.06	65.48	83.83	80.58
Duración (min)	35	25	55	35	85	55

**Tabla VII.4.-** Flujo de precipitación en m<sup>3</sup>/s utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia resultante de la calibración hidrológica del radar:  $z=113.24R^{1.138}$ , para las tormentas sembradas y no sembradas correspondientes a los cuartiles indicados en la tabla.

t (min)	1er Cuartil		2o Cuartil		3er. Cuartil	
	Semb.	No semb.	Semb.	No Semb.	Semb.	No Semb.
-15	0	0	0	173.78	1215.46	1765.62
-10	0	0	109.64	657.58	2129.07	2250.75
-5	0	0	659.62	1265.73	2553.91	3036.33
0	266.47	413.61	1014.18	1152.95	3489.63	2843.84
5	400.23	363.13	1526.39	1397.09	3402.93	2789.00
10	501.89	278.98	1483.02	1143.15	3900.57	2774.50
15	551.48	226.40	1305.44	959.44	4013.42	3497.99
20	368.68	111.37	1644.50	697.61	4010.72	3206.30
25	297.00	0	1202.55	639.35	4296.10	2329.14
30	45.54	0	929.56	284.35	3257.78	1573.81
35	0	0	860.88	0	2169.46	902.26
40	0	0	571.73	0	3242.98	588.36
45	0	0	343.95	0	2389.51	438.97
50	0	0	95.52	0	2879.19	350.41
55	0	0	0	0	1762.80	0
60	0	0	0	0	1573.81	0
65	0	0	0	0	902.26	0
70	0	0	0	0	588.36	0
75	0	0	0	0	438.97	0
80	0	0	0	0	350.41	0
85	0	0	0	0	0	0

Para visualizar mejor las diferencias entre el flujo de precipitación obtenido con la relación de Marshall-Palmer y el flujo de precipitación obtenido utilizando la relación resultante de la calibración hidrológica se presenta a continuación las figuras VII.1, VII.2 y VII.3 para la comparación con cada cuartil.

Figura VII.1.- Comparación entre las series de tiempo de flujo de precipitación (en m<sup>3</sup>/s) calculado con  $z=200R^{1.6}$  y con  $z=113.24R^{1.138}$  para tormentas sembradas y no sembradas correspondientes al 1er. cuartil.

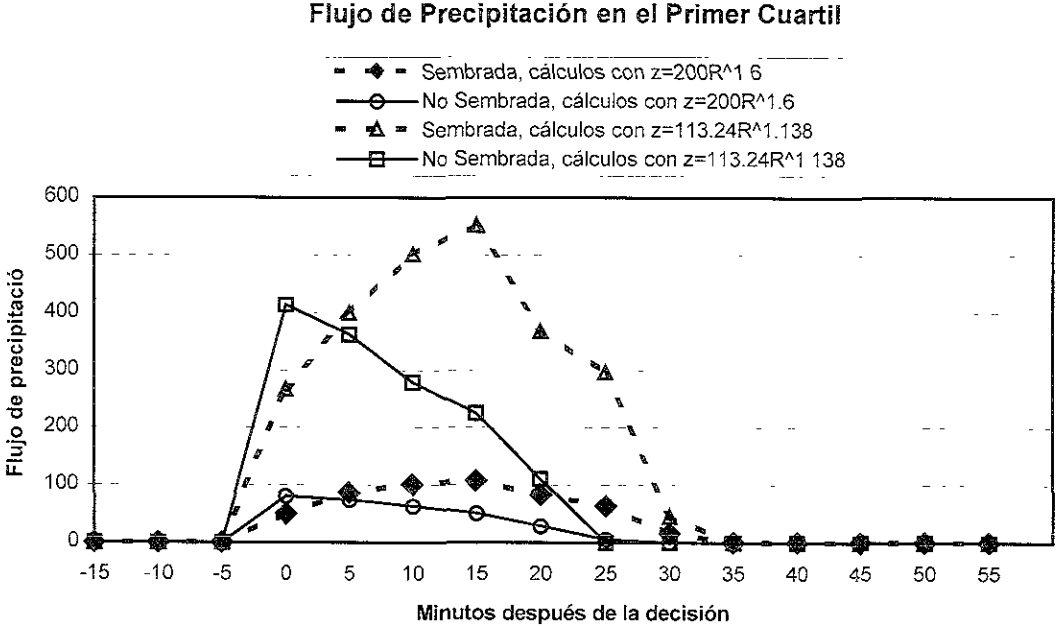
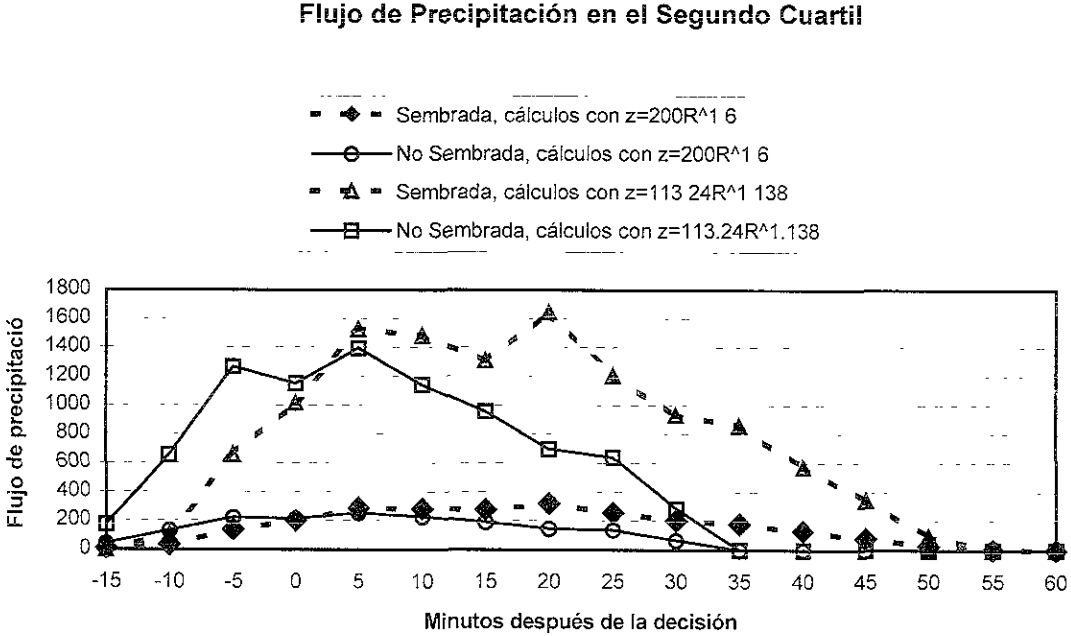
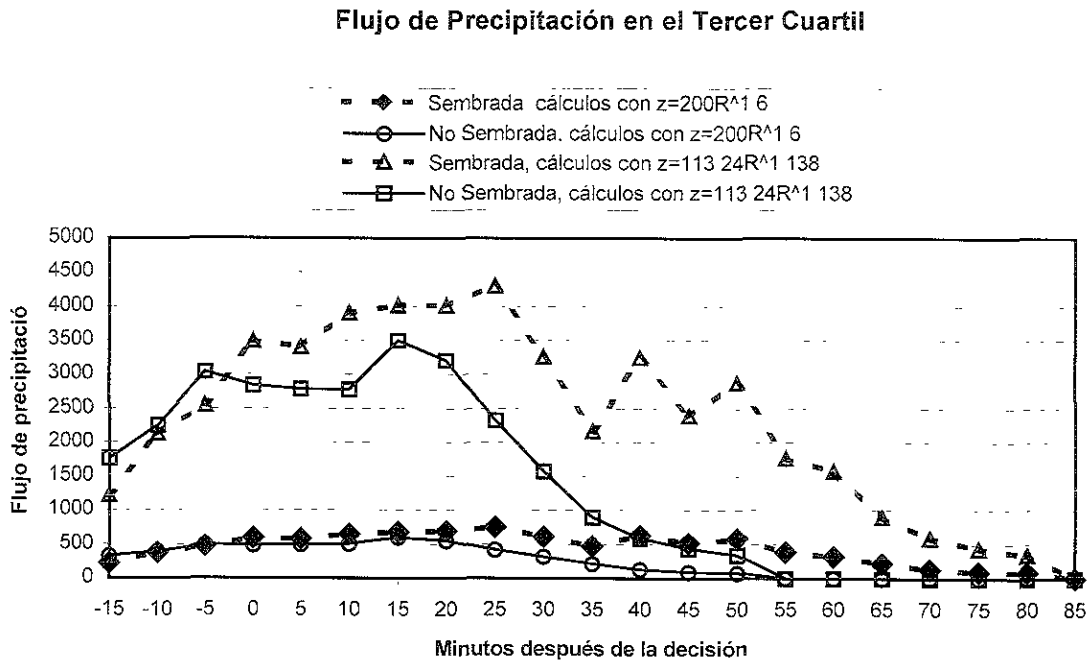


Figura VII.2.- Comparación entre las series de tiempo de flujo de precipitación (en m<sup>3</sup>/s) calculado con  $z=200R^{1.6}$  y con  $z=113.24R^{1.138}$  para tormentas sembradas y no sembradas correspondientes al 2º cuartil.





**Figura VII.3.-** Comparación entre las series de tiempo de flujo de precipitación (en  $m^3/s$ ) calculado con  $z=200R^{1.6}$  y con  $z=113.24R^{1.138}$  para tormentas sembradas y no sembradas correspondientes al 3er. cuartil.



En las figuras de la VII.1 a la VII.3 se observa que la diferencia entre el flujo de precipitación de las tormentas es apreciable cuando éste se calcula usando la relación de Marshall-Palmer y se compara con el flujo de precipitación calculado con la relación  $z=113.24R^{1.138}$  que resultó de la calibración hidrológica del radar. Dado que para este trabajo no se dispone de las series de tiempo individuales de cada tormenta que conforma la muestra de sembradas y no sembradas no es posible recalculer el nivel de significancia de las diferencias encontradas. Algo que sí se puede obtener son las diferencias entre el volumen total precipitado entre las tormentas sembradas y no sembradas para las tormentas de los tres cuartiles presentados aquí.

**VII.3.- Diferencias en el volumen total precipitado utilizando  $z=200R^{1.6}$  y  $z=113.24R^{1.138}$**

Integrando el flujo de precipitación para tormentas sembradas y no sembradas correspondientes a los tres cuartiles analizados se obtiene el volumen total de precipitación y con éste se calculan las diferencias absolutas y relativas que resultan de la comparación entre tormentas sembradas y no sembradas. Los resultados se muestran en la tabla VII.5 y VII.6.

**Tabla VII.5.- Diferencias en el volumen total de lluvia precipitada (en  $m^3$ ) en tormentas sembradas y no sembradas correspondientes a los cuartiles 1°, 2°, y 3°, para  $z=113.24R^{1.138}$ , considerando desde el instante de decisión  $t=0$  hasta  $t=55$  min.**

Cuartil	No sembrada	Sembrada	Diferencia Absoluta ( $m^3$ )	Diferencia Relativa (%)
1°	355,800	689,849	334,049	93.9
2°	1,709,242	3,141,187	1,431,945	83.7
3°	5,961,799	11,357,156	5,395,357	90.5

Los datos que se muestran en la tabla VII.5 se derivan de los valores de las series de tiempo para el flujo de precipitación. Los valores utilizados para el cálculo de la precipitación total se muestran en la tabla VII.4. De acuerdo con la secuencia de cálculo los valores de la tabla VII.5 implican un calculo de la intensidad de lluvia utilizando la relación  $z=113.24R^{1.138}$ . Resulta conveniente remarcar que se está considerando desde el instante de decisión  $t=0$  hasta  $t=55$  minutos para la integración del flujo de precipitación en el tiempo, pero ya sabemos que las tormentas grandes duran más y por lo tanto la diferencia en estas tormentas puede ser mayor (ver figuras de la VI.1 a la VI.5).

Los valores utilizados en el cálculo de la precipitación total, y de dónde se deriva la tabla VII.6, pueden consultarse en la tabla VII.12.

**Tabla VII.6.- Diferencias en el volumen total de lluvia precipitada (en  $m^3$ ) en tormentas sembradas y no sembradas correspondientes a los cuartiles 1°, 2°, y 3°, para  $z=200R^{1.6}$ , considerando desde el instante de decisión  $t=0$  hasta  $t=55$  min.**

Cuartil	No sembrada	Sembrada	Diferencia Absoluta ( $m^3$ )	Diferencia Relativa (%)
1°	79,650	145,200	65,550	82.3
2°	340,650	642,150	301,500	88.5
3°	1,105,650	2,093,250	987,600	89.3

Los datos que se muestran en la tabla VII.6 se obtienen integrando las series de tiempo reportadas por el NCAR (figura VI.1) para flujo de precipitación en  $m^3/s$ , la cual en este caso lleva implícita la aplicación de la relación  $z=200R^{1.6}$  con la que se calcula el volumen total de lluvia para el intervalo de tiempo que va del instante de decisión  $t=0$  hasta  $t=55$  min.

Obsérvese el gran contraste entre la diferencia absoluta de la tabla VII.5 con la reportada en la tabla VII.6 y observe el mínimo contraste entre las diferencias relativas. Teóricamente se esperaba que las diferencias relativas en las tablas VII.5 y VII.6 fueran iguales, no así las diferencias absolutas de las que ya se esperaba diferencia. La existencia de un pequeño contraste en las diferencias relativas (sobre todo en el 1º y 2º cuartiles), se debe a que no necesariamente la tormenta que corresponde al primer cuartil en la variable área de la tormenta, es la misma tormenta en el 1er. cuartil en la variable flujo de precipitación y recuérdese que para calcular la intensidad de tormenta se supuso que las tormentas eran la misma.

Destaca también que las diferencias relativas para el tercer cuartil, hablando del volumen total precipitado, sean prácticamente iguales lo que valida de alguna manera la reinterpretación realizada aquí. El hecho de que las diferencias relativas aplicando  $z=200R^{1.6}$  y la relación  $z=113.24R^{1.138}$  resultaran como se explicó arriba llevan a intuir que el nivel de significancia calculado por el NCAR para las diferencias entre tormentas sembradas y no sembradas seguirá invariables al rehacer su cálculo con la relación  $z=113.24R^{1.138}$ .

**Tabla VII.7.-** Subestimación de las diferencias en el volumen total de precipitación por la aplicación de  $z=200R^{1.6}$  en la obtención del flujo de precipitación de las tormentas sembradas y no sembradas correspondientes a los cuartiles 1º, 2º y 3º, considerando del instante  $t=0$  hasta  $t=55$  min.

Cuartil	Diferencias absolutas entre las tormentas sembradas y no sembradas utilizando $z=200R^{1.6}$	Diferencias absolutas entre las tormentas sembradas y no sembradas utilizando $z=113.24R^{1.138}$	Subestimación Absoluta ( $m^3$ )	Subestimación Relativa (%)
1º	65,550	334,049	268,499	409
2º	301,500	1,431,945	1,130,445	375
3º	987,600	5,395,357	4,407,757	446

Como se observa en la tabla VII.7 se tiene una subestimación de las diferencias entre tormentas sembradas y no sembradas que corresponden al 3er cuartil que es de 446 por ciento del volumen total de precipitación. Lo anterior por la aplicación de  $z=200R^{1.6}$ . En las tormentas del 2º cuartil la subestimación resulta ser de 375 por ciento. Observe el impacto tan grande que tiene en el costo por  $m^3$  de agua adicional precipitado utilizar una relación, de transformación de reflectividad a intensidad de lluvia, que subestime a esta última.

**VII.4.- El volumen de precipitación atribuible al incremento de área y tiempo de vida de las tormentas sembradas**

Como se puede observar en la figura VI.5 un 18 tormentas sembradas y 12 de las no sembradas presentan un tiempo de vida que sobrepasa de los 60 minutos después del instante de decisión. Como se puede observar en las figuras de la VI.1 a la VI.5 por diseño del experimento sólo se reportan las series de tiempo hasta los 60 minutos después del instante de decisión. De las figuras VI.1 a la VI.4 sólo es posible obtener datos hasta los 55 minutos después del instante de decisión. Lo anterior afecta fuertemente al 3er cuartil de las tormentas sembradas por lo que para obtener el volumen de precipitación atribuible al incremento en el tiempo de vida de las tormentas sembradas, es necesario suponer la forma como decrece la tormenta de este 3er cuartil de la muestra de tormentas sembradas a partir de los 60 minutos. Claro que al disponer de los barridos volumétricos (en manos del NCAR) del radar la serie de tiempo puede completarse; pero hasta la realización de este trabajo, no se cuenta con estos barridos volumétricos.

El supuesto de que la tormenta sembrada correspondiente al 3er cuartil decrece hasta desaparecer a la misma tasa que la tormenta no sembrada del mismo 3er cuartil es razonable y quizás conservador. Lo anterior permite asignarle una duración a la tormenta del 3er cuartil de la muestra de tormentas sembradas, necesaria para realizar el cálculo del volumen de precipitación que puede atribuirse al aumento de área de tormenta y de vida de la tormenta suponiendo que el sembrado no tiene un efecto de incremento en la intensidad de lluvia. Lo anterior hace posible obtener un indicador del aumento del volumen total precipitado en la tormenta sembrada por efecto del aumento en el tiempo de vida y área de la tormenta sembrada, como se describe a continuación en las tablas VII.8, VII.9 y VII.10. El cálculo de la intensidad promedio y de la duración de la tormenta se presentó en la tabla VII.3. El cálculo del área promedio se presenta en la tabla VII.11.

**Tabla VII.8.-** *Volumen total precipitado por las tormentas sembradas calculado con su duración (D) y área promedio (A) reales y considerando que no hubo incremento en la intensidad promedio, para lo que se utiliza la intensidad promedio de las tormentas no sembradas correspondientes a los cuartiles 1°, 2° y 3°, considerando desde el instante  $t=0$  para valores correspondientes a cada 5 minutos, con  $z=113.24R^{1.138}$ . La duración (D) está en minutos, la intensidad en mm/h, el área (A) en  $km^2$  y el volumen precipitado en  $m^3$ .*

Cuartil	Duración (D) de la tormenta Sembrada (min)	Intensidad Promedio tormenta No sembrada (mm/h)	Área (A) promedio Tormenta Sembrada ( $km^2$ )	Volumen precipitado considerando Sólo el incremento de A y D ( $m^3$ )
1°	35	46.86	17.75	485,196.1
2°	55	65.48	47.00	2,821,095.8
3°	85	80.58	91.94	10,495,407.8

**Tabla VII.9.-** Porcentaje del volumen total precipitado que se puede atribuir al incremento de intensidad de lluvia (mm/h) de la tormenta sembrada correspondiente a los cuartiles indicados, considerando del instante  $t=0$  hasta  $t=85$  minutos en la tormenta del tercer cuartil y utilizando  $z=113.24R^{1/38}$ .

Cuartil	Volumen precipitado considerando Sólo el incremento de A y D ( $m^3$ )	Volumen Total precipitado ( $m^3$ )	Volumen Atribuible al Incremento de Intensidad (Diferencia) ( $m^3$ )	Porcentaje De volumen total precipitado atribuible al incremento de Intensidad de lluvia (%)
1°	485,196.1	689,849	204,653	29.67
2°	2,821,095.8	3,141,187	320,091	11.19
3°	10,495,407.8	12,277,229	1,781,821	14.51
				Media = 18.5

Utilizando la diferencia absoluta en el volumen total de lluvia precipitada (en  $m^3$ ) entre tormentas sembradas y no sembradas correspondientes a los cuartiles 1°, 2° y 3° presentadas en la tabla VII.5 y el volumen atribuible al incremento de intensidad de lluvia en las tormentas sembradas de la tabla VII.9 se obtiene el porcentaje del volumen total incrementado por el aumento de intensidad de lluvia, el cual se presenta en la tabla VII.10

**Tabla VII.10.-** Porcentaje del volumen total incrementado de precipitación (como efecto del sembrado) que se puede atribuir al incremento de intensidad de lluvia (mm/h) en las tormentas correspondientes a los cuartiles indicados utilizando  $z=113.24R^{1/38}$ .

Cuartil	Diferencia absoluta en el volumen precipitado entre tormentas sembradas y no sembradas ( $m^3$ )	Volumen Atribuible al Incremento de Intensidad ( $m^3$ )	Porcentaje del volumen total incrementado atribuible al incremento de Intensidad de lluvia por la siembra (%)
1°	334,049	204,653	61.26
2°	1,431,945	320,091	22.35
3°	6,265,430	1,781,821	28.44
			Media = 37.35

Los resultados de la tabla VII.10, indican que en promedio un 62.65 por ciento del incremento en el volumen total precipitado en las tormentas sembradas puede atribuirse al incremento en área y duración de las tormentas y por lo tanto sólo el 37.35 por ciento en promedio parece deberse al incremento en intensidad de la lluvia. El hecho de que sea el aumento de área y duración de las tormentas sembradas lo que aporta más al incremento de precipitación por el sembrado de nubes es bueno, debido a que la capacidad de la lluvia para causar erosión se relaciona directamente con su intensidad.

**Tabla VII.11.-** Area de tormenta en km<sup>2</sup> y promedio de los valores de la misma considerados cada 5 minutos a partir del instante de decisión  $t=0$ , provenientes de la figura VI.4.

T	1er Cuartil		2o Cuartil		3er Cuartil	
	Semb.	No Semb.	Semb.	No Semb.	Semb.	No Semb.
-15	0	0	0	17	36	62
-10	0	0	19	32	63	67
-5	0	0	37	40	87	72
0	10	18	46	41	94	80
5	25	19	57	47	91	90
10	24	21	59	53	95	95
15	24	16	75	45	101	99
20	26	13	70	41	112	91
25	18	0	68	38	125	80
30	15	0	59	26	120	78
35	0	0	47	0	131	75
40	0	0	44	0	135	41
45	0	0	26	0	142	28
50	0	0	13	0	139	32
55	0	0	0	0	116	0
60	0	0	0	0	78	0
65	0	0	0	0	75	0
70	0	0	0	0	41	0
75	0	0	0	0	28	0
80	0	0	0	0	32	0
85	0	0	0	0	0	0
Promedio	17.75	14.50	47.00	36.38	91.94	65.75

La relación  $z=113.24R^{1.138}$  utilizada en los cálculos anteriores, lleva implícita la suposición de que el incremento en reflectividad y por lo tanto de precipitación se debe a un incremento del número de gotas en toda la distribución de tamaños y que la distribución de tamaños de gotas tiene un comportamiento similar tanto en las tormentas sembradas como en las no sembradas. Lo anterior arroja la duda de que el aumento en reflectividad que se registra en las tormentas sembradas se pueda deber sólo a un cambio en la distribución de tamaños de gota que se traduzca en un falso aumento de la intensidad de lluvia. Al respecto recuérdese que en condiciones de humedad como las que se presentan en la nube el efecto físico de las sales higroscópicas al propiciar la condensación difícilmente persistirá más allá de unos minutos y sin embargo el efecto del sembrado se refleja en términos de decenas de minutos después de finalizado el sembrado (como se aprecia por ejemplo en las tormentas del 3er. cuartil). Por lo anterior los efectos favorables del sembrado son más bien de tipo dinámico, es decir, propicia un mejor acomodo entre las corrientes convectivas de ascenso y las corrientes descendentes contribuyendo al crecimiento y la duración de la tormenta. Ahora si la duda persiste con los resultados de las tablas VII.9 y VII.10, solo quedaría en duda el 37.35% del aumento total de lluvia atribuible al incremento en intensidad de lluvia atribuible a la estimulación de lluvia. El incremento de lluvia atribuible al aumento de área de precipitación y al aumento en la duración de las tormentas tratadas, no se pone en duda.

**Tabla VII.12.-** Flujo de precipitación en  $m^3/s$  considerado a cada 5 minutos a partir del instante de decisión  $t=0$ , provenientes de la figura VI.1.

T	1er Cuartil		2o Cuartil		3er Cuartil	
	Semb.	No Semb.	Semb.	No Semb.	Semb.	No Semb.
-15	0	0	7	43	213	325
-10	0	0	32	133	373	395
-5	0	0	139	226	466	499
0	50	81	201	213	595	491
5	87	75	286	254	579	501
10	101	64	283	228	646	507
15	108	51	277	192	671	605
20	83	29	320	149	691	555
25	64	6	254	137	749	426
30	16	0	203	69	608	320
35	0	0	180	0	467	213
40	0	0	132	0	627	132
45	0	0	79	0	512	96
50	0	0	26	0	581	85
55	0	0	0	0	389	0

### VII.5.- El costo del $m^3$ de agua adicional obtenido (aplicando la técnica de estimulación de lluvia que usa sales higroscópicas).

En la sección I.1 se abordaron las controversias alrededor del tema de la estimulación de lluvia, concluyéndose que cuando no existe una evaluación objetiva de la efectividad de una tecnología de estimulación de lluvia, resulta imposible sustentar cualquier resultado en términos de beneficios atribuibles al efecto del sembrado (un volumen adicional de agua obtenido), por lo que finalmente en el pasado resultó un acto de fe el aplicar la tecnología de sembrado y de aquí se deriva la principal crítica a la estimulación de lluvia.

Conforme se presenten resultados objetivos en torno al tema de la estimulación de lluvia, los cuales permitan evaluar los resultados en términos de índices financieros y económicos, y al mismo tiempo compararlos con los índices de otros proyectos, la estimulación de lluvia irá ganando terreno en las preferencias de inversión destinadas a aumentar el bienestar de la población localizada en las regiones áridas.

En un programa de estimulación de lluvia operativo los costos resultan ser los más fáciles de estimar. El costo mayor lo constituye el uso de la aeronave a la cual, para efectos de la estimación de la relación beneficio/costo del sembrado higroscópico, puede asignarse un costo de \$6,000.00 (seis mil pesos) por hora, más \$4,000.00 (cuatro mil pesos) por hora invertidos en la operación del radar, administración y trabajos relacionados con algún mecanismo de verificación de resultados, lo que da un total de \$10,000.00 (diez mil pesos) por hora de vuelo. Si se supone que aplicar el tratamiento a una tormenta consumiría una hora de vuelo de avión (suposición que

se encuentra del lado conservador) y utilizando los datos que se presentan en la tabla VII.5, el cual contiene las diferencias en el volumen total de lluvia precipitada (en  $m^3$ ) entre tormentas sembradas y no sembradas correspondientes a los cuartiles 1º, 2º, y 3º para  $z=113.24R^{1/38}$ , considerando desde el instante de decisión  $t=0$  hasta  $t=55$  minutos, el costo de  $1 m^3$  de agua producido por sembrado higroscópico resulta ser:

$$\text{para tormentas grandes} \Rightarrow \frac{\$10,000.00}{5,395,357m^3} = \$1.9 \text{ por millar de } m^3$$

$$\text{para tormentas medianas} \Rightarrow \frac{\$10,000.00}{1,431,945m^3} = \$7.0 \text{ por millar de } m^3$$

$$\text{para tormentas chicas} \Rightarrow \frac{\$10,000.00}{334,049m^3} = \$30.0 \text{ por millar de } m^3$$

De lo que se desprende que es conveniente la estimulación aún de las tormentas más pequeñas. Claro que de presentarse el caso de elegir, siempre será preferible sembrar las tormentas grandes. Observe que aunque los precios por hora de vuelo se incrementen al doble o al triple o más, el costo por millar de  $m^3$  producido vía estimulación sigue siendo bajo.

El potencial de producción de lluvia para la región de Monclova, Coahuila puede visualizarse del censo de recurso de nubes resumido en los datos contenidos en la tabla IV.2 (los que fueron obtenidos por el NCAR durante 96) la cual contiene el resultado de analizar 1085 de las tormentas captadas por el radar utilizado en el experimento PARC durante 1996 y que por lo menos duraron 20 minutos, debe recordarse que, en los datos de esta tabla, se utiliza la relación de transformación de reflectividad a lluvia de Marshall-Palmer y que por lo tanto el volumen de lluvia reportado en esta tabla está subestimado. Con el mismo cuidado obsérvese también la figura IV.23. La obtención del potencial de producción de lluvia, con base en el censo de recursos de nube, en un programa operativo no entra dentro del objetivo de este trabajo.

Los resultados de un programa operativo de estimulación de lluvia dependen finalmente del número de tormentas que se presenten y este número puede variar mucho de un año a otro. También dependerá de la cantidad de aeronaves disponibles para realizar la siembra. El estudio del número óptimo de aeronaves que se requiere para sembrar las tormentas en la región de Monclova se encuentra fuera de los objetivos de este trabajo, pero es claramente realizable.

La determinación de cuánta del agua que se precipita se evapora, escurre, se infiltra o se almacena en los tanques o bordos (como el mostrado en la figura II.5) o se aprovecha directamente por la vegetación, se encuentra también fuera de los



alcances de este trabajo. No obstante puede asegurarse que la precipitación en los ecosistemas naturales y productivos de las zonas áridas, como es el caso de las lluvias en la región del PARC, se caracterizan por una muy alta eficiencia en el aprovechamiento de las escasas lluvias que se presentan durante el año. Por ejemplo, la vegetación reacciona rápidamente a la humedad del suelo absorbiéndola de éste y almacenándola en sus tallos y hojas para sobrevivir a los largos periodos de estiaje. El agua que no se infiltra es conducida por el hombre, por una extensa red de canales hasta los tanques o bordos de almacenamiento y usada para abrevadero y para consumo humano. El efecto del agua infiltrada hasta el nivel freático es detectado por la presencia y ascenso del agua en los pozos o norias localizadas en los ranchos. Además hay que considerar que el volumen adicional producido por la estimulación de lluvia tiene más posibilidades de alcanzar los almacenamientos y el nivel freático. Una tormenta natural (no sembrada) genera escurrimiento cuando es rebasada la capacidad de infiltración del suelo, el volumen adicional producido en una tormenta sembrada se verá reflejado de inmediato en un gran incremento del escurrimiento en comparación con la tormenta natural. Dicho de otra manera, el porcentaje de aumento en escurrimiento de la tormenta sembrada será mucho mayor al porcentaje de aumento en el volumen total precipitado de la tormenta sembrada. Por lo anterior cualitativamente resulta muy notorio el beneficio de los volúmenes adicionales de lluvias sobre estas áridas regiones.

Por ejemplo, si se considera que sólo el 10% del agua obtenida por estimulación tiene un efecto directo en el aumento de bienestar de la población (impacto económico y de salud), el costo por  $m^3$  asciende: para las tormentas grandes a \$19 por millar de  $m^3$ , para las tormentas medianas \$70 por millar de  $m^3$  y para las tormentas chicas a \$300  $\$/m^3$ . Los anteriores datos son ya comparables con los precios de venta del agua de los diferentes usos, el cual varía de una región a otra.

## **VII.6.- Comparación de los resultados del PARC con otros experimentos en México**

La diferencia básica de los resultados obtenidos en el PARC contra los obtenidos en otros experimentos realizados en México (ver capítulo III) es que los resultados del PARC muestran mucha más objetividad, lo que los hace mucho más confiables también. Por ejemplo, en la definición de la unidad experimental es claro que en el PARC es totalmente objetiva gracias al uso del radar meteorológico enlazado al programa TITAN. También es claro que en el PARC se asegura que los químicos estimulantes actúan en la parte de la nube que ha sido definida como la más adecuada por el modelo conceptual de sembrado y que su aplicación se hace también en el momento adecuado, mientras que en los otros experimentos no se tiene la seguridad de que los químicos llegan a estar en contacto con la parte de la nube más adecuada y en el momento propicio, sobre todo en los experimentos que usaron generadores en tierra. El seguimiento del comportamiento de la unidad experimental desde que "nace" hasta que "muere" no tiene igual en experimentos anteriores. La cantidad de variables de respuesta analizadas en el PARC como lo son: flujo de precipitación ( $m^3/s$ ), masa total de la tormenta (kton), masa de la

tormenta por arriba de los 6 km de altura (kton), área de precipitación (km<sup>2</sup>) y tiempo de vida de las tormentas (minutos) supera ampliamente al número de variables analizadas en experimentos anteriores en los que típicamente se analiza volumen de agua escurrido o lluvia acumulada medida por pluviómetros o pluviógrafos colocados en extensas áreas con grandes separaciones entre sí. Los resultados del análisis estadístico de las variables de respuesta en el PARC se constituyen en evidencia objetiva que indica un efecto positivo del sembrado, evidencia obtenida gracias al producto de radar que es resultado de un barrido volumétrico.

Un aspecto de suma importancia es que los resultados del PARC se convierten en una replica de los resultados obtenidos en un experimento en Sudáfrica (Mather *et al.*, 1997) resultando solo diferente el tiempo de vida de las tormentas, ya que en Sudáfrica estas tienen un tiempo de vida más grande que las tormentas de Coahuila. En experimentos del pasado una técnica de estimulación de lluvia con resultados aparentemente buenos en un lugar, mostraba resultados diferentes en otra localidad. Se remarca como un hecho de suma importancia que los buenos resultados del experimento de Sudáfrica en general hayan tenido una replica (en otro lugar) en los resultados del experimento de Coahuila siendo la primera vez en la historia de la modificación del tiempo que esto ocurre (NCAR, 1999).

La prueba de re-aleatorización indica que la mayoría de las diferencias observadas son estadísticamente significativas a un nivel de confianza de 95%. Sin embargo en algunos momentos la confianza estadística fijada por el diseño experimental no fue alcanzada dando lugar a que exista una pequeña posibilidad de que los efectos atribuidos al sembrado puedan ser resultado del azar pero, por encima de todo, los resultados son muy alentadores (NCAR, 1999). En los experimentos del pasado en México ninguno alcanzó, en los resultados del análisis estadístico, un nivel de significancia similar al obtenido en el PARC debido a lo burdo de los mecanismos de verificación utilizados con los cuales resulta imposible la obtención de resultados creíbles. A pesar de los resultados tan alentadores en el PARC, el NCAR recomienda buscar contar con un mayor número de casos a los 94 casos analizados aquí por lo que sería ideal la realización del cuarto año del experimento.

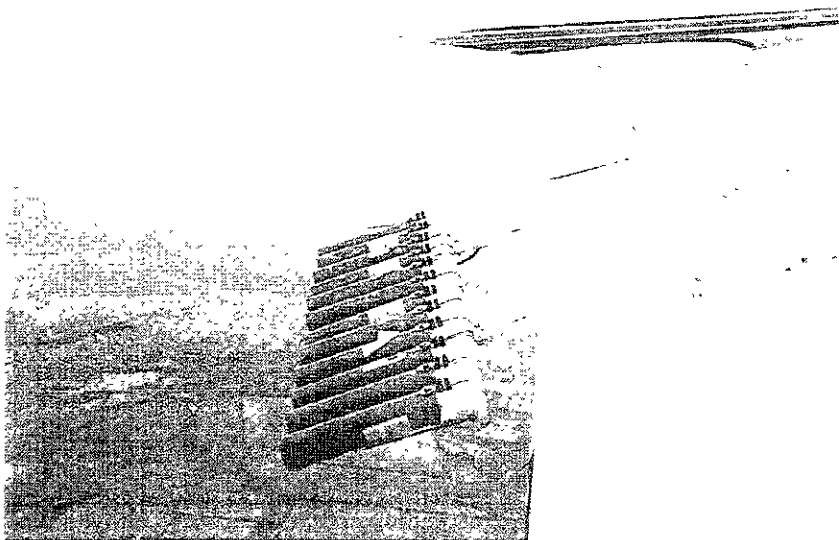
En lo que se refiere a estudios de microfísica de nubes en México los experimentos anteriores no contaron con el tipo de evaluación usada en el PARC. Al respecto hay que decir que con las mediciones microfísicas hechas no se ha logrado explicar físicamente el aumento de lluvia obtenido, debido principalmente a que estas mediciones se hacen sobre una pequeña porción de las nubes obteniendo variaciones grandes en las mediciones, sin embargo los resultados estadísticos son muy impresionantes después de un período muy corto de experimentación y de un número muy pequeño de casos (NCAR, 1999).

## CAPITULO VIII

### Conclusiones y recomendaciones

En cada uno de los temas desarrollados se han presentado conclusiones y se han hecho recomendaciones. En este capítulo se resumen algunas de dichas conclusiones y recomendaciones con el propósito de hacer su generalización hasta donde sea posible.

**Figura VIII.1.-** *Bengalas colocadas en las alas del avión, listas para ser encendidas en el momento adecuado y soltar las sales higroscópicas en la base de la nube.*



1.- El tema de la estimulación de lluvia seguirá siendo un tema polémico a causa principalmente de su complejidad; complejidad debida al amplio rango de escala en que se desarrolla el fenómeno y a la dificultad que encierra la verificación de sus resultados, al tener que comparar lo que ocurrió cuando se siembran las nubes con lo que hubiera ocurrido si no se hubiesen sembrado. Esta complejidad seguirá limitando al número de programas de investigación y operativos serios que se ejecuten en nuestro país. Al mismo tiempo obliga a que el tema se aborde de manera interdisciplinaria y pone a los centros de investigación como las entidades más adecuadas para desarrollar las tecnologías de sembrado y la aplicación de éstas en programas operativos de estimulación de lluvias en México. Además, mientras exista un insuficiente entendimiento de la física de los procesos (dinámicos

contra microfísicos y sinópticos contra los de mesoescala), no es conveniente liberar la o las tecnologías de sembrado a empresas privadas que aplicarían estas tecnologías como recetas (ver sección II.1). Por la misma causa no es recomendable la implementación de campañas puramente operativas (ver sección II.7).

2.- La estimulación de lluvia es un instrumento que ayuda en la mitigación de los efectos de una sequía. La relación beneficio costo para los programas de estimulación de lluvia variarán fuertemente con el grado de severidad de la sequía, al mismo tiempo que variará también la productividad marginal del agua, aumentando ésta con la severidad de la sequía. Un programa de estimulación de lluvia maximizará sus beneficios, sólo si es parte de otro programa más general de manejo integral del recurso agua que permita utilizar a la estimulación como una herramienta que provee de agua adicional durante los temporales buenos y que puede ser almacenada en presas o en los acuíferos para mitigar los efectos negativos de los temporales malos. Por lo que de establecerse un programa de estimulación de lluvia, éste debe ser permanente (para la mejor época del año), debiendo cuidar mucho el no comprometer el volumen adicional obtenido, manejar dicho volumen como un mitigador de eventual escasez de precipitación y para disminuir la vulnerabilidad de los sistemas productivos y de los ecosistemas naturales (ver secciones II.10 y II.11).

3.- Las tormentas convectivas del tipo recomendado para aplicarles el sembrado con sales higroscópicas, se caracterizan por su alta intensidad y corta duración, siendo esta característica precisamente lo que las hace más interesantes a los ojos del ingeniero hidráulico. Estimular tipos de lluvia de baja intensidad que proporcionan láminas medias anuales menores a 300 mm en varios eventos, resulta menos atractivo que estimular la precipitación en tormentas convectivas que proporcionan una lámina media anual de 200 mm con dos o tres eventos (ver tabla VII.3). Lo anterior se explica debido a que con lluvias de baja intensidad y lámina total, el escurrimiento superficial generado es mínimo y difícilmente humedecerá la totalidad del perfil de suelo seco para llegar a aportar agua al acuífero. Por el contrario los volúmenes adicionales obtenidos en una tormenta convectiva sembrada irán directamente a incrementar el escurrimiento, cuyo volumen puede ser almacenado para su posterior uso (ver sección II.11.5).

4.- El proyecto para el aumento de lluvia en Coahuila (PARC) es el experimento de estimulación de lluvia más completo, con relación a verificación objetiva, que se ha ejecutado en México. Sin embargo, la instrumentación empleada en el PARC es sólo la mínima requerida para evaluar este tipo de metodología (ver sección IV.5).

5.- En el ámbito de la estimulación de lluvia en tormentas convectivas aisladas, una instrumentación para verificación objetiva basada en redes pluviográficas únicamente, nunca podrá arrojar resultados concluyentes sobre una tecnología de estimulación de lluvia, por más sofisticadas que estas estaciones sean (ver sección IV.1).

6.- Los productos y la información que se obtienen a partir del radar permiten comprender la razón por la que éste se constituye hoy en día como el instrumento más importante en la evaluación objetiva de los efectos del sembrado de nubes (ver sección IV.2). Con la utilización del radar meteorológico, la hidrología puede evolucionar hasta llegar a caracterizar verdaderamente a las tormentas completas y de esta manera ligar a cada tormenta con los procesos de escurrimiento e infiltración con mayor certeza (ver sección IV.2.5) en lugar de sólo caracterizar a la lluvia a partir de mediciones puntuales. Es esta caracterización de la tormenta completa a partir de los productos de radar lo que permite evaluar los resultados en el PARC.

7.- A pesar de todos los avances científicos y tecnológicos resulta imposible seguir, por medio de mediciones en la nube, toda la cadena de eventos asociada con la precipitación. De hecho, sólo es posible medir algunos enlaces o puntos clave que ayudan a establecer relaciones causa-efecto (ver sección IV.3), además de proporcionar información que da idea del potencial de las tormentas de una región para ser estimuladas con una determinada técnica.

8.- El sistema formado por el radar enlazado a un programa que procesa de manera automática sus datos, como el programa TITAN utilizado en el PARC (ver sección IV.5.3.), permite caracterizar la estructura y evolución en el tiempo y en el espacio de las nubes sembradas y de las no sembradas seleccionadas como casos de estudio, lo que permite emplear técnicas estadísticas para el análisis de las diferencias entre las muestras. En lo anterior radica la esencia de la evaluación de los resultados en el PARC, pero si el radar no está calibrado hidrológicamente sus datos pueden ser utilizados sólo para establecer resultados de efectividad de la tecnología de sembrado en términos relativos (en % por ejemplo) y no en términos absolutos (en incremento de  $m^3$  de agua precipitada) que es de sumo interés para un ingeniero hidráulico.

9.- Aunque la calibración hidrológica del radar, no es lo más importante en este trabajo, el desarrollo de ese tema permitió aclarar varios aspectos que para los usuarios mexicanos del radar no eran claros. Por ejemplo, hablando de la dispersión de la nube de puntos para calibración hidrológica se puede afirmar que gran parte de ésta, no es atribuible a los instrumentos de medición, sino al fenómeno medido o muestreado. Esta dispersión viene siendo la representación gráfica de la gran variabilidad natural de las características de las nubes, de las tormentas y de la precipitación y representa otra prueba de lo limitada que resulta la representación de la lluvia a partir de las mediciones puntuales de su intensidad. Por las razones expuestas se puede concluir que la dispersión que se ha obtenido constituye, por un lado, una representación de la variabilidad en tiempo y espacio de las características de la lluvia y de las tormentas, y por otro lado, una consecuencia del mismo método empleado para hacer la calibración, principalmente al comparar datos de lluvia puntuales con datos de reflectividad que caracterizan un volumen de la atmósfera (a lo que se le podría denominar un problema de escalas) (ver sección V.6.3.)

10.- Como muchos de los problemas que presenta la comparación de datos de reflectividad con datos pluviográficos persisten al comparar datos de reflectividad con datos obtenidos de disdrómetros, se puede concluir que usar disdrómetros (o pluviógrafos ópticos) no mejora la relación de transformación de reflectividad a lluvia obtenidas (ver sección V.3).

11.- La cantidad de datos obtenidos y procesados en este trabajo permite caracterizar la dispersión de la nube de puntos para calibración hidrológica del radar y concluir que la estimación de la intensidad de lluvia medida en un punto (como si se estuviera midiendo con pluviógrafo) con radar resulta ser probabilística (no determinística), lo anterior debido a los aspectos mencionados en los párrafos anteriores. Hasta ahora, esta situación no resultaba clara en el contexto mexicano del radar meteorológico y hasta cierto punto resultó inesperada. Debe tenerse en cuenta lo limitadas que resultan las mediciones de lluvia en un punto (como lo hace un pluviógrafo) en la caracterización de las tormentas por la escala en que se desarrollan.

12.- Hidrológicamente lo que tiene sentido es la determinación de la lluvia sobre la superficie terrestre cubierta por la tormenta completa y en este ámbito el radar meteorológico calibrado hidrológicamente no tiene competidor.

13.- Ha quedado demostrado que por utilizar la relación de Marshall-Palmer para la transformación de reflectividad a lluvia se está subestimando severamente la intensidad de lluvia en las tormentas convectivas de verano en la región de Monclova, Coahuila (ver sección V.5.8.).

14.- Para realizar la evaluación en términos absolutos de los resultados del PARC fue indispensable la calibración hidrológica del radar. Con esto es posible reinterpretar los resultados en términos de reflectividad del radar para obtener el incremento en  $m^3$  de agua precipitada y así obtener una estimación en orden de magnitud del costo del  $m^3$  de agua obtenido por estimulación de lluvia (ver sección V.6). Se recomienda utilizar en la reinterpretación y evaluación absoluta la relación obtenida, la cual es:

$$z=113.24 R^{1.138}$$

15.- Utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia obtenida del proceso de calibración hidrológica del radar utilizado en el PARC, se reinterpretaron los resultados y se encontró que al utilizar el NCAR la relación z-R de Marshall-Palmer para estimar el volumen de lluvia que es atribuible al sembrado, se produjo una subestimación de  $266,499 m^3$  para la tormenta correspondiente al primer cuartil y de  $4,407,757 m^3$  para la tormenta correspondiente al tercer cuartil (ver tabla VII.7).

16.- Utilizando la relación de transformación de reflectividad a lluvia obtenida del proceso de calibración hidrológica del radar utilizado en el PARC para hacer la reinterpretación de los datos del PARC y obtener el volumen de lluvia precipitada efectivamente sobre el suelo atribuible al sembrado, se llegó a definir que la diferencia absoluta entre tormentas sembradas y no sembradas es de 334,049 m<sup>3</sup> para las tormentas del primer cuartil, de 1,431,945 m<sup>3</sup> para la tormenta del segundo cuartil y de 5,395,357 m<sup>3</sup> para la tormenta del tercer cuartil (ver tabla VII.5).

17.- Así mismo, se determinó que un 63% del aumento en el volumen total precipitado en las tormentas sembradas puede atribuirse al incremento en área y duración de las tormentas y por lo tanto sólo el 37% parece deberse al incremento en intensidad de la lluvia (ver tabla VII.10 en la sección VII.4.). El hecho de que sea el área y la duración de las tormentas sembradas lo que se incrementa más resulta adecuado, debido a que la capacidad de la lluvia para causar erosión se relaciona directamente con su intensidad.

18.- La estimación de la lluvia con radar para una tormenta completa necesariamente presenta menos error que la estimación de lluvia para un punto; puesto que en una tormenta pequeña de por ejemplo 100 km<sup>2</sup> de área que dure 40 minutos, se estará transformando (con la relación obtenida de la calibración hidrológica) la reflectividad de aproximadamente 1900 pixeles, cuyo valor al quedar promediado para dar el volumen total precipitado y la intensidad de la tormenta, necesariamente se verá disminuido el error. Para comprobar lo anterior experimentalmente se requiere de una red de pluviógrafos que estuvieran colocados a distancias muy cortas entre sí y cubrieran un área considerable. Como quiera que sea el error que persista afectará de igual manera, tanto a la tormenta sembrada como a la no sembrada para efecto del análisis estadístico.

19.- De los pluviogramas presentados en la figura V.22 utilizando  $z=113.24R^{1.138}$ , pareciera que ahora se estuviera sobrestimando la intensidad de lluvia, a diferencia de la relación de Marshall-Palmer, la que claramente subestima la lluvia. Para no entrar en controversias se puede afirmar que, en todo caso, la "realidad" está en algún lugar entre "Marshall-Palmer" y  $z=113.24R^{1.138}$  por lo que utilizando los datos que se presentan en las tablas VI.2 y VII.5, las que contienen las diferencias en el volumen total de lluvia precipitada (en m<sup>3</sup>), entre tormentas sembradas y no sembradas correspondientes a los cuartiles 1º, 2º, y 3º para  $z=200R^{1.6}$  y para  $z=113.24R^{1.138}$  y con las mismas consideraciones que se hacen en la sección VII.5, el costo del millar de m<sup>3</sup> de agua producido por sembrado higroscópico resulta ser:

para tormentas grandes ⇒	entre \$2 y \$15 por millar de m <sup>3</sup>
para tormentas medianas ⇒	entre \$7 y \$40 por millar de m <sup>3</sup>
para tormentas chicas ⇒	entre \$30 y \$65 por millar de m <sup>3</sup>

De lo que se desprende que es conveniente la estimulación aún de las tormentas más pequeñas. Claro que de presentarse el caso de elegir, siempre será preferible sembrar las tormentas grandes. Si se considera, por ejemplo, que sólo el 10% del agua obtenida por estimulación tiene un efecto directo en el aumento de bienestar de la población (impacto económico y de salud), bastará multiplicar por 10 las cantidades para obtener un costo bajo esta (ver sección VII.5).

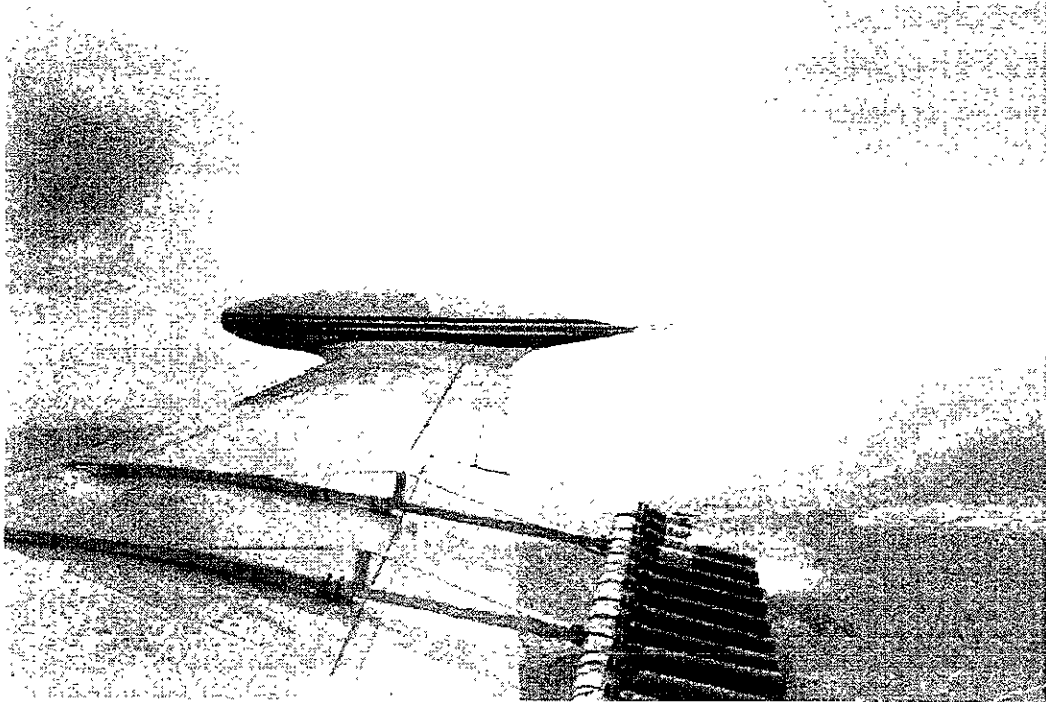
20.- La diferencia básica de los resultados obtenidos en el PARC contra los obtenidos en otros experimentos realizados en México (ver capítulo III y la sección VII.6) es que los resultados del PARC muestran mucha más objetividad, lo que los hace mucho más confiables también. Por ejemplo, en la definición de la unidad experimental es claro que en el PARC es totalmente objetiva gracias al uso del radar meteorológico enlazado al programa TITAN. También es claro que en el PARC se asegura que los químicos estimulantes actúan en la parte de la nube que ha sido definida como la más adecuada por el modelo conceptual de sembrado y que su aplicación se hace también en el momento adecuado, mientras que en los otros experimentos no se tiene la seguridad de que los químicos llegan a estar en contacto con la parte de la nube más adecuada y en el momento propicio, sobre todo en los experimentos del pasado que usaron generadores en tierra.

21.- Los resultados del análisis estadístico de las variables de repuesta en el PARC, se constituyen en evidencia objetiva que indican una respuesta positiva del efecto del sembrado, evidencia obtenida gracias al producto de radar que es resultado de un barrido volumétrico (ver sección VI.3 y capítulo VII). Se hace eco en la recomendación hecha por el NCAR, en el sentido de completar el cuarto año de experimento del PARC, como era el plan original para aumentar la confianza en los resultados.

22.- Debido a la importancia económica del agua y a los resultados tan alentadores presentados y analizados en este trabajo, vale la pena apoyar la investigación más afondo de las tecnologías de sembrado y la formación de recursos humanos en esta área, así como la capacitación de pilotos que aprendan a identificar las nubes con potencial para ser sembradas, ya que hasta el momento no se ha capacitado ningún piloto mexicano.



**Figura VIII.2.-** *Bengalas colocadas en las alas del avión en el proceso de liberación de sales higroscópicas en la base de la nube.*



---

## Referencias

- Atlas, D. y Ulbrich, C.W., 1977: Path- and area-integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band. *J. Appl. Meteor.*, 16: 1322-1331.
- Austín, P.M., 1987: Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall, *Monthly Weather Review*, 115, 1053-1070.
- Battan, L.J., 1973: *Radar Observation of the Atmosphere*. Chicago, University of Chicago Press, 324 pp.
- Bergeron, T., 1935: On the physics of clouds and precipitation, proceedings, 5<sup>th</sup> Assembly U.G.G.I., Lisbon, 2, 156.
- Bruintjes, R.T., 1999: A review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects, *Bulletin of the American Meteorological Society Vol.80*, No.5, May, 16 pags.
- Calderón G. J.J. y M. Rosengaus, 1999: "Las implicaciones en el uso de una relación estándar de transformación de reflectividad a lluvia", IX Congreso Nacional de Meteorología, Universidad de Guadalajara, Guadalajara Jalisco, México.
- Campos A. D. F., 1992: "*Procesos del Ciclo Hidrológico*". Universidad Autónoma de San Luis Potosí, segunda reimpresión, San Luis Potosí, S.L.P., México.
- Changnon, S.A., y W.H. Lambright, 1990: Experimentation involving controversial scientific and technological issues: Weather modification as a case illustration. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 71, 334-344.r
- Compañía de Luz y Fuerza del Centro, S.A., 1969: 19 años de operaciones de estimulación de lluvias en las cuencas de Necaxa y Lerma, informe 1949-1968, Compañía de Luz y Fuerza del Centro S.A., México D.F.
- CONACYT, 1973: Informe de las actividades del grupo de trabajo de estimulación de lluvia y su aplicación práctica en el Valle de México, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México D. F.
- Cooper W.A., Bruintjes R.T. y Mather G.K., 1997: Calculations pertaining to hygroscopic seeding with flares. *American Meteorological Society* pags. 1449-1469, noviembre.

- Cotton W.R.,1986:"Testing, implementation, and evolution of seeding concepts –a review. Rainfall Enhancement- A Scientific Challenge, *Meteor. Monogr., No.43, Amer. Meteor. Soc.*, 139-149.
- Dixon, M.J. y G. Weiner, 1993; TITAN – Thunderstorm identification, tracking, analysis and nowcasting – a radar-based methodology, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol.10, pags.785-797.
- Dye, J.E. y Baumgardner, D. W.,1984: Evaluación of the Forward Scattering Spectrometer Probe. Part I: Electronic and optical studies. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 1, 329-344.
- Findeisen, W., 1942: Ergebnisse von Wolken – und Niederschlags – beobachtungen bei Wetter Kundunges Flugen uber See, Reichsamt F. Wetterdienst Forsch, u. Erfahrungsberichte, B. No.8, 3-12.
- Fujiwara, M., 1965: Raindrop-size distribution from individual storms. *J. Atmos. Sci.*, 22, 585-591.
- Gagin A. y Neumann J., 1981: The second Israeli randomized cloud seeding experiment. *J. Appl. Meteor.*, vol.20, 1301-1311.
- García G. F. y Montañez R.A., 1994: "Evaluación de un Espectrómetro de Gotas para Estudios de Microfísica de Nubes". Centro de Ciencias de la Atmósfera UNAM. México D.F.
- Gómez-Pompa, A., 1975: "Recursos Bióticos para el Desarrollo de las zonas Áridas", *Ciencia y Desarrollo* 1(1):18-20.
- Haggerty J. A. y Baumgardner D.,1997: RAF Sensor Summaries June 1996. NCAR Technical Note, Boulder, Colorado.
- Hare, F. Kenneth, 1985: "*Sequía, Variación Climática y Desertificación*". Organización Meteorológica Mundial- No. 653, 35 pags.
- Hauser, D., Amayenc, P., Nutten, B. y Waldteufel, P., 1984: A new optical instrument for simultaneous measurement of raindrop diameter and fall speed distributions. *J. Atmos. Ocean. Tech.*, 1: 256-269.
- Hiser, H.W., 1981: "*Radar Meteorology*". Remote Sensing Laboratory, School of Engineering and Architecture University of Miami, Coral Gables, Florida 33124, fourth Edition.
- Howard Daniel, 1980: "*El hombre y la variabilidad climática*". OMM - No. 543. Secretaria de la Organización Meteorológica Mundial. Ginebra.

- Hudson, J.G., 1983: Effects of CCN concentrations on stratus clouds. *J. Atmos. Sci.*, 40, 480 - 485.
- Huff, F.A. y Changnon S.A., 1986: Potential urban effects on precipitation in the winter and transition season at Saint Louis, Missouri. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 1887-1907.
- Illingworth, A.J. y Stevens, C.J., 1987: An optical disdrometer for the measurement of raindrop size spectra in windy conditions. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 4: 411-421.
- INSISA, 1976: Informe final del programa experimental de estimulación de lluvia en Ensenada ,B.C.N. y sus alrededores, INSISA ConsultoresS.A., México D.F.
- Joss, J. y Waldvogel A., 1967: Ein spectrograph für Niederschlag atropfen mit automatischer auswertung (A spectrograph for automatic measurement of rainfalls.). *Geofis. Pura Appl.*, 68: 240-246.
- Joss, J. y Waldvogel, A., 1990: "Precipitation Measurement and Hydrology", Radar in Meteorology: Battan memorial and 40<sup>th</sup> Anniversary of Radar Meteorology Conf., de. D. Atlas, AMS, pp. 577-606.
- Joss, J., K. Schran, J.C. Thams, y A. Waldvogel, 1970: On the quantitative determination of precipitation by radar. *Wissenschaftliche Mitfeilung Nr.63*, Eidgenossischen Komnission Zum Stidium der Hagelgilbung und der Hagelawhar, 38 pp.
- Kessler Edwin, 1973:On the artificial increase of precipitation, *Weather*, Vol.28 No.5, pages 188-198.
- Knollenberg, R.G., 1976: Three new instruments for cloud physics measurements: The 2-D Spectrometer, the Forward Scattering Spectrometer Probe, and the Active Scattering Aerosol Spectrometer. Prepr. INT. Cloud Phys. Conf., July 26-30, Boulder, Colo. Amer. Meteor. Soc., 554-561.
- Knollenberg, R.G., 1981: Techniques for probing clouds microstructure. *Clouds: Their Formation , Optical Properties, and Effects*, P.V. Hobbs and A. Deepak (Eds.), Academic Press, 15-91.
- Maldonado, A.L., 1985: Sistemas de producción forestal de zonas áridas, boletín divulgativo no.72, SARH, México D.F. pags. 55.
- Marshall J.S. y W.M. Palmer, 1948: "Relation of Raindrop Size to Intensity", *Journal of Meteorology*, vol.5, págs. 165-166.

Mather G.K., 1991: "Coalescence Enhancement in Large Multicell Storms Caused by the Emissions from a Kraft Paper Mill", *Journal of Applied Meteorology*, vol.30, pags.1134-1146.

Mather, G.K., D.E. Terblanche, F.E. Steffens y L. Fletcher, 1997; Results of the South African cloud-seeding experiments using hygroscopic flares, *Journal of Applied Meteorology*, vol. 36, pags. 1433-1447.

Maybank J., 1977: The scientific planning and organization of precipitation enhancement experiments, with particular attention to agricultural needs, Technical Note No. 154, WMO-No.478, Organización Mundial de Meteorología, Ginebra, Suiza, 88 pags.

McDonald, J.E., 1958: The physics of cloud modification. *Advances in Geophysics*, vol. 5, pp. 223-303, Academic Press Inc., New York.

McEachern, W.A., 1998: "*Microeconomía, una introducción contemporánea*" Thomson Editores, México D.F.482 pags.

NCAR, 1997: Report on first year of activities of PARC, Research Applications Program, National Center of Atmospheric Research, 37 pags.,

NCAR, diciembre 1999: Report on third year of activities of PARC, Research Applications Program, National Center of Atmospheric Research, 67 pags.,

Pruppacherm H.R., y Klett, J.D., 1978: *Microphysics of Clouds and Precipitation*. D.Reidel, 714 pags.

Ramos, G. V., 1987. Tesis de Maestría en Ciencias (Geofísica) "La Estimulación de Lluvia en México", Facultad de Ciencias, UNAM.

Quintas, I., 1999: "Extractor rápido de información climatológica ERIC-II. Manuel de usuario", Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Colección Proyectos IMTA, Serie Programas, Jiutepec, Morelos, México.

Rinehart, Ronald E., 1991: "*Radar for Meteorologists* ". Center for Aerospace Sciences University of North Dakota, 329 pp.

Rodda, J.C., 1971: "The Precipitation Measurement Paradox - The Instrument Accuracy Problem". Report No. 16 on WMO/IHD Projects. Secretariat of the World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.

Rogers, R.R., 1977: *Física de la Nubes*, Ed. Reverté, S.A., Barcelona España, 241 pags.

- Rogers, R.R., Yau M.K., 1989: "A Short Course in Cloud Physics". Third Edition, Pergamon Press, 293 pp.
- Rosenfeld, D., y Wolff, D.B. y Atlas, D., 1993: "General probability-matched relations between radar reflectivity and rain rate ", J. Appl. Meteor., 32, pp. 50-72
- Rosenfeld, D., Wolff, D.B. y Amitai, E., 1995: "Classification of rain regimes by three dimensional properties of reflectivity fields", J. Appl. Meteor., 33, pp. 682-693.
- Rosengaus M.M., 1995 (a): Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos clásicos, Ingeniería Hidráulica en México, vol. X, no.1, pags 55-74, enero-abril.
- Rosengaus M.M., 1995 (b) Fundamentos de radares meteorológicos : aspectos modernos, Ingeniería Hidráulica en México, vol. X, no.2, pags.59-78, mayo-agosto.
- Rosengaus, M. M., 1998: Ponencia: "Verificación pluviográfica de campañas de estimulación de lluvias", dentro del Taller de Trabajo sobre Estudios Hidrometeorológicos y Sustentabilidad del Recurso Agua para el Estado de Coahuila, Universidad Autónoma de Coahuila, Saltillo, Coahuila, 28-29 de agosto de 1998.
- Rosengaus M.M. y Reza A.G., 1997: Informe final del proyecto HG-9622: Verificación de campañas de estimulación de lluvia, Subcoordinación de Hidrometeorología, Coordinación de Tecnología Hidrológica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Morelos, abril.
- Rosengaus M., J.J. Calderón y F. García, abril 1999: "PARC: una campaña de estimulación de lluvia con mecanismos objetivos de verificación", 4º Congreso de Meteorología, Comisión Federal de Electricidad, México, D.F.
- Rosengaus M., J.J. Calderón y F. García, J.A. Mundo y G. Reza, marzo 1999: Participación en la campaña de estimulación de lluvia 96-99 (durante 98), Monclova, Coahuila, IMTA, 126 págs., Jiutepec Morelos.
- Rosengaus M., junio 1999: "Sobre el error en la estimación de lluvia utilizando radar meteorológico", Ingeniería del Agua, vol.6, no.2, pags.185-197, Valencia, España.
- Rosengaus M. y J.J. Calderón, 2000: Informe final de los proyectos TH-9082 y TH-9083: Participación en la campaña de estimulación de lluvia, IMTA, 47 págs., Jiutepec, Morelos.
- Scheffé, H., 1943: Statistical inference in the non-parametric case. *Annals Math. Stat.*, 14, 305-332.

Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1974: "Programa experimental de estimulación de lluvia en Ensenada y la cuenca del río Tijuana, B.C.", México D.F.

Sempere Torres D. y Porrà J.M. y Creutin J.D. 1994: A general formulation for rain Drop Size Distribution. *J. App. Meteor.*, 33. 1494-1502

Sempere Torres D., Porrà J.M. y Creutin J.D., 1997: "Characterization of Rainfall Properties Using the Drop Size Distribution. Application to Autumn Storms in Barcelona". INM/WMO International Symposium on Cyclones and Hazardous Weather in the Mediterranean. Palma de Mallorca. 14-17 april.

Siegel, S., 1978: *Estadística no paramétrica aplicada a las ciencias de la conducta*, Ed. Trillas, México.

Silverman, B.A., R. Rasmussen, R.T. Brintjes, W. Sukarnjanasat, P. Sudhikoses y N. Tantipubthong, 1999; The Thailand warm cloud seeding experiment, Proceedings of the 7th WMO Conference on Weather Modification, Chiang Mai, Tailandia.

Squires, P., 1958: The microstructure and colloidal stability of warm clouds. *Tellus*, 10, 256-271.

Stout, G.E. y Mueller, E.A., 1968: Survey of Relationships between Rainfall Rate and Radar Reflectivity in the Measurement of Precipitation , *J. Appl. Meteorol.* 7: 465-474.

Universidad Nacional Autónoma de México y Droplet Measurement Technologies Inc., 1999: Notas del curso "A short Course in Weather Modification by Cloud Seeding".

Universidad de Nuevo León, 1970: "Experimento de Estimulación de lluvia en Monterrey, Informes 1968, 1969, y 1970", Monterrey N.L.

Wilson J.W., Brondes E.A., 1979: "Radar Measurement of Rainfall a Summary, *American Meteorological Society*, vol. 60, No. 9.

World Meteorological Organization, 1983: "Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation". Fifth edition. WMO - No. 8. Secretariat of the World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization, 2000: "Report of the WMO International Workshop on Hygroscopic Seeding: Experimental Results, Physical Processes, and Research Needs", Mazatlán, México, 30 November to 4 December 1999. WMP Report No. 35. G. Brant Foote and Roelof T. Brintjes, Editors. WMO/TD No. 1006.