

INHOMOGENEIDADES ESPACIALES EN LA ESTRUCTURA MICROFISICA DE NIEBLA

F. GARCÍA-GARCÍA Y R. A. MONTAÑEZ

Centro de Ciencias de la Atmósfera
Universidad Nacional Autónoma de México
Circuito Exterior, Ciudad Universitaria
04510. México, D.F.

INTRODUCCION

La observación *in situ* de la estructura microfísica de las nubes ha sido de primordial importancia para entender los procesos físicos que ocurren durante la transformación y evolución del agua de la nube en precipitación. Además, dichos estudios son imprescindibles en aspectos tales como la validación de las teorías y modelos de formación de lluvia, la calibración de radares y otros sistemas de percepción remota, y la evaluación de proyectos de modificación artificial del tiempo. En particular, la distribución y variabilidad espacial de los parámetros microfísicos han sido recientemente objeto de interés debido a la importancia que revisten para entender los fenómenos de entrada de aire seco del ambiente y su mezcla con la nube. Por otra parte, en estudios de un posible cambio climático global, basados en la respuesta de modelos de circulación general a variaciones pre-establecidas de parámetros climáticos, se requiere de un conocimiento más detallado de las características microfísicas de las nubes y su relación con las propiedades ópticas de las mismas.

El objetivo del presente reporte es analizar inhomogeneidades espaciales en la estructura microfísica de niebla a escalas de aproximadamente 15 m, así como señalar las implicaciones que éstas tienen en la descripción del desarrollo de la nube y en la sensibilidad de modelos climáticos para la detección de cambio global. Para ello se presenta el caso de un evento de niebla ocurrido en la Sierra Madre Oriental, que fue monitoreado haciendo uso de un vehículo instrumentado. Cabe señalar que un análisis de la evolución y desarrollo microfísicos de dicho evento, en el que se consideraron inhomogeneidades temporales y espaciales de la nube a escalas de 30 min y de entre 100 y 1000 m, respectivamente, ha sido reportado anteriormente (García y Montañez 1992).

DATOS Y RESULTADOS

El caso de estudio aquí analizado ocurrió el día 13 de enero de 1991, en un trayecto localizado en la Carretera Estatal de Puebla que comunica a las poblaciones de Zaragoza y Zacapoaxtla. Las condiciones sinópticas imperantes correspondieron a la típica situación de "norte" que ocurre comúnmente durante el invierno en las costas del Golfo de México. Aproximadamente a las 1500 Hora Local (HL) el sitio fue cubierto por una nube proveniente del norte, acarreada por el viento a una velocidad de 8 km/h. La visibilidad a nivel de suelo disminuyó a menos de 400 m y la niebla persistió durante una hora y media, disipándose por completo aproximadamente a las 1745 HL. Para su caracterización microfísica, se hicieron varias penetraciones en la nube con una camioneta instrumentada (Montañez y García 1992) en cada una de las cuales se cubrió una distancia de 4.5 km. Los datos presentados corresponden a un Espectrómetro de Gotas de Dispersión Frontal (FSSP) capaz de detectar partículas con diámetros de entre 2.5 y 70 μm , con una resolución nominal de 3 μm . Los errores estadísticos de muestreo para la concentración varían entre el 10 y el 20% para promedios en intervalos de entre 100 y 1000 m, mientras que se estima que el error instrumental en la determinación del tamaño de las gotas puede ser de hasta 30%. Para mayores detalles acerca de la operación y funcionamiento del equipo, así como del sitio y la metodología de muestreo y del análisis de datos, el lector puede referirse a García y Montañez (1989, 1991).

En las Figuras 1 y 2 se muestran las variaciones espaciales de la concentración de gotitas de nube, del contenido de agua líquida (W_l) y del diámetro volumétrico medio (DVM) obtenidas para dos penetraciones en la nube, a las 1517 HL y a las 1547 HL, respectivamente. Tanto W_l como DVM, relacionados con el tercer momento de la distribución, fueron derivados a

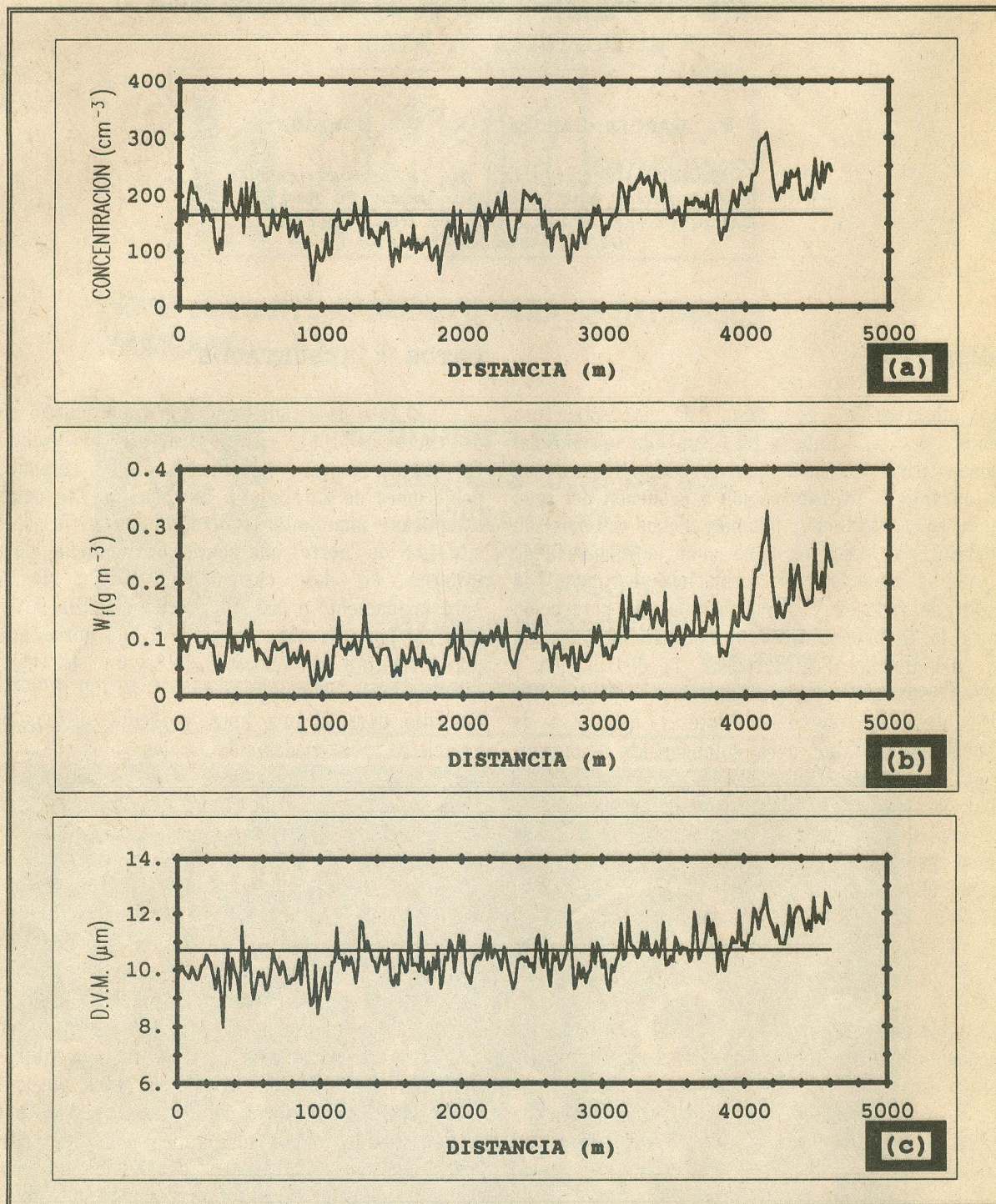


Figura 1. Concentración de gotitas (a), contenido de agua líquida (b) y diámetro volumétrico medio (c) como funciones de la posición en la nube, para una penetración a las 1517 HL. Las líneas horizontales continuas corresponden a los valores promedio para el trayecto total de 4.5 km.

partir de los datos de concentración. Cada punto en las gráficas corresponde al número total de partículas acumuladas por el FSSP con una frecuencia de 1 Hz, y representa el valor promedio en un intervalo de 16.5 m

a la velocidad de muestreo típica del vehículo. Como puede apreciarse, las variaciones en la concentración total observadas entre un punto y otro de la nube pueden ser de hasta un factor de 6, correspondiendo a

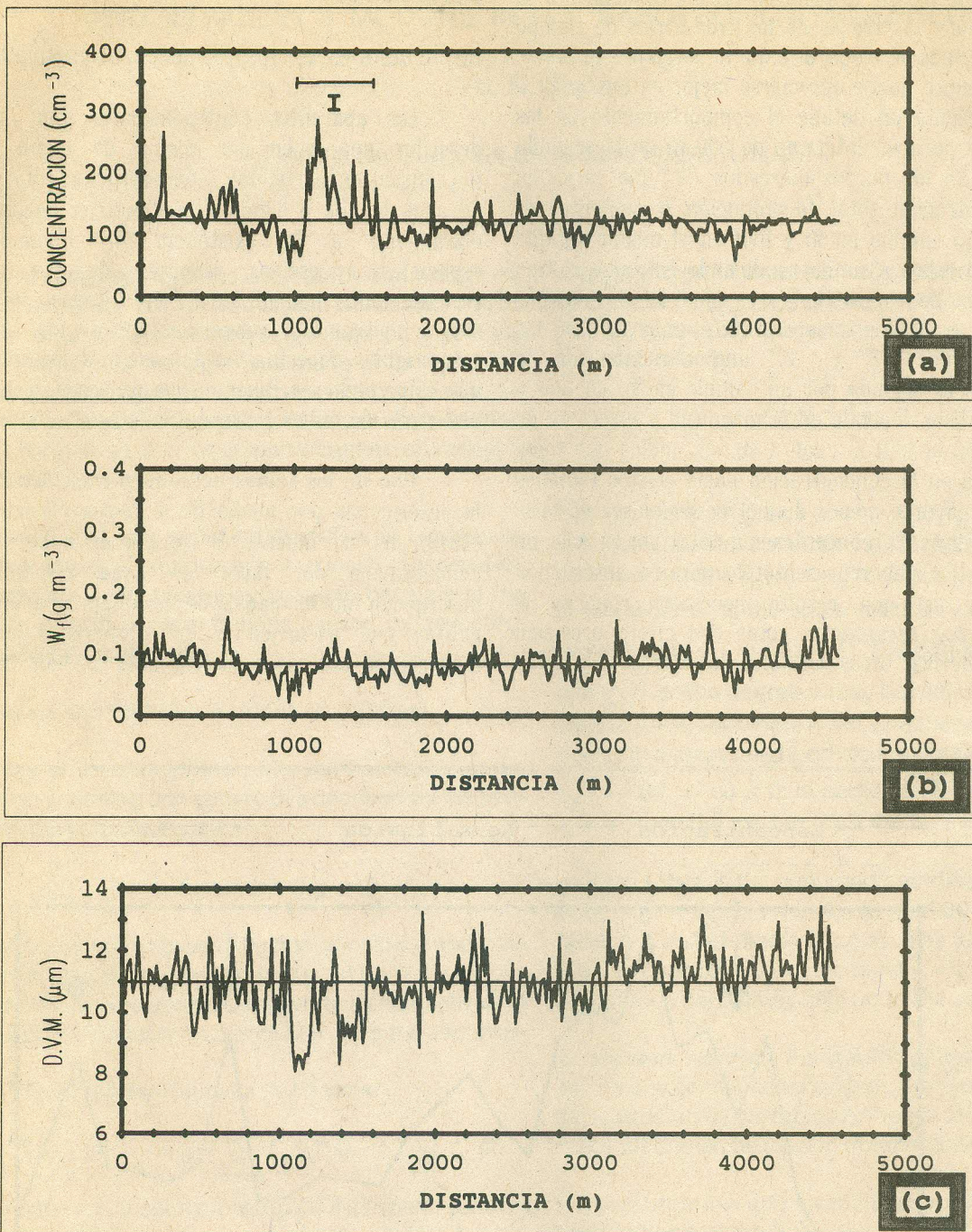


Figura 2. Como la Figura 1, pero para una penetración en la nube a las 1547 HL.

valores que oscilan desde el 30 hasta el 230% con respecto al valor promedio para la penetración. Más aún, los datos indican que es común observar inhomogeneidades espaciales de esta magnitud a distancias de 200 m. Por otra parte, hay una diferencia de gran importancia que señalar entre las dos penetraciones mostradas: mientras que en la primera

(Figura 1) los comportamientos de la concentración, W_f y DVM son cualitativamente similares e indican que las inhomogeneidades ocurren a escalas mayores que 16.5 m, éste no es el caso en la segunda (Figura 2) donde el comportamiento de W_f con la distancia es mucho menos variable (casi constante dentro del intervalo de error) que los de la concentración total y DVM. En otras

palabras, de no existir inhomogeneidades espaciales a la escala estudiada, las trazas de las tres series de tiempo se seguirían unas a otras a todo lo largo de la nube. Este último punto puede apreciarse mejor en la *Figura 3*, donde se presenta en detalle el comportamiento de las tres variables para un intervalo de 500 m de la segunda penetración. En los puntos marcados "A", una variación en la concentración total (disminución o aumento) es seguida por un cambio en W_f y DVM en el mismo sentido con magnitud relativa similar, indicando ésto que el tipo de inhomogeneidades existentes es igual al de aquellas encontradas a escalas mayores. Sin embargo, en los puntos marcados "B" y "C", una variación en la concentración es seguida por un cambio en W_f , en uno u otro sentido. Esto depende de la magnitud y dirección de la variación en el DVM la cual, a su vez, indica que hubo una tendencia en la concentración hacia ciertos tamaños de gotas de mayor o menor diámetro, según sea el caso. En otras palabras, la concentración total por sí sola no es el parámetro más representativo para la descripción de la nube, así que resulta necesario conocer la *distribución por tamaños* de gotas con cierta precisión para de ella derivar otras variables de interés.

DISCUSION

Implicaciones en los procesos microfísicos.

Las aparentes contradicciones que resultan de describir una nube por medio de algún parámetro microfísico en particular (concentración total, contenido de agua líquida o diámetro volumétrico medio) apuntan claramente a la existencia de inhomogeneidades espaciales a escalas menores de las que hasta recientemente habían sido consideradas. Pero además surgen preguntas concernientes a los mecanismos responsables de estas variaciones y a las implicaciones que éstos pudieran tener en los procesos de formación y desarrollo de nubes y precipitación.

Uno de los temas actualmente en debate es el de la descripción, por medio de la teoría clásica de Howell (1949), del crecimiento de gotitas de nube mediante la condensación del vapor de agua disponible. Dicha descripción no es capaz de producir distribuciones de gotitas que asemejen a las observadas en la gran mayoría de los casos. Varios autores han hecho notar

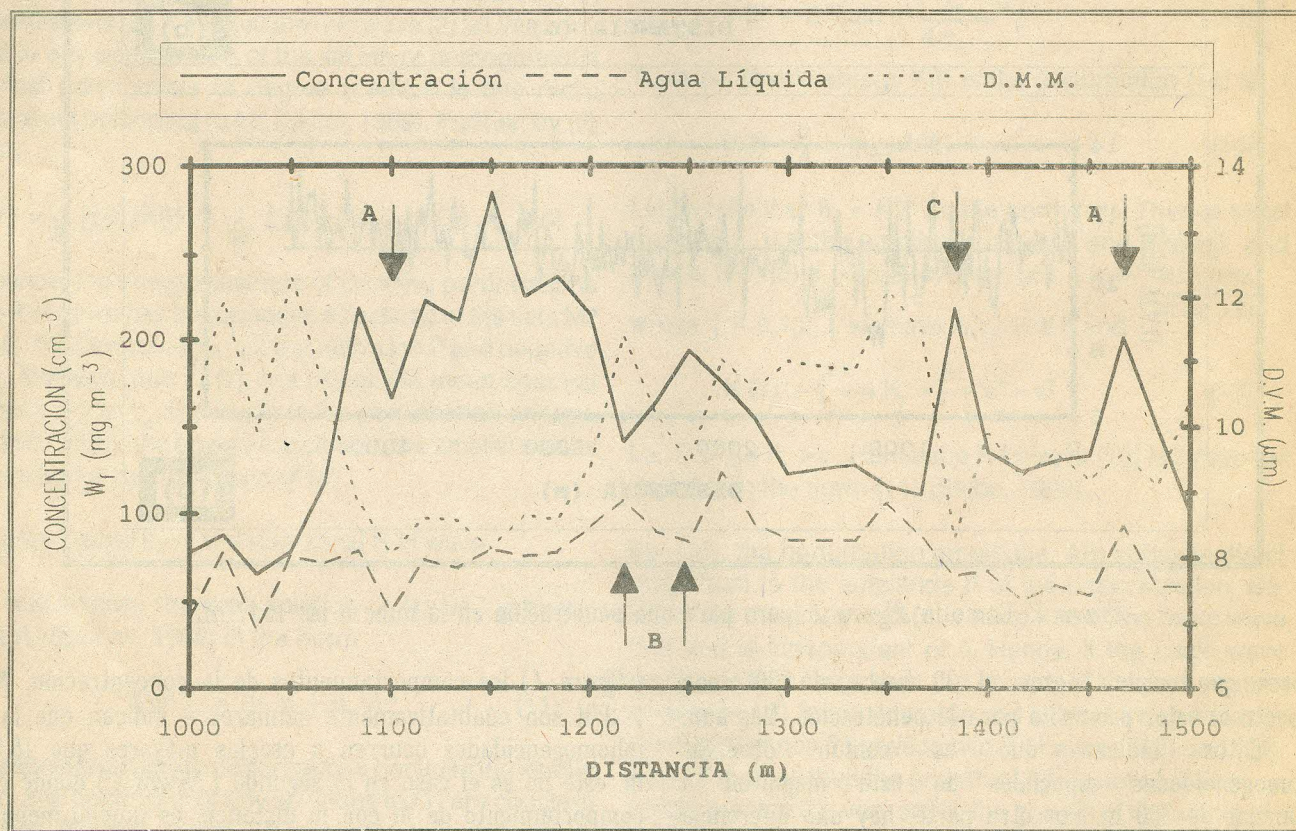


Figura 3. Detalle correspondiente al trayecto marcado "I" en la *Figura 2*.

que el problema radica en que la ecuación de difusión de vapor queda descrita en términos de la sobresaturación en un volumen grande de aire (sobresaturación del ambiente o macroscópica), y no en el de la vecindad de la gotita (sobresaturación microscópica) que es la relevante para la descripción de la velocidad de crecimiento. Recientemente, Srivastava (1989) desarrolló una modificación a la teoría en la que se consideran campos de sobresaturación microscópica, los cuales pueden variar notablemente de una gotita a otra debido a la aleatoriedad espacial de las mismas y son, en general, lo suficientemente diferentes a los valores macroscópicos como para que valga la pena que sean incorporados en la teoría.

Por otra parte, Cooper (1989) propuso una descripción de la sobresaturación microscópica utilizando argumentos de teoría estocástica, y la aplicó al caso de mezcla de parcelas de nube de diferente origen. El análisis de Cooper aporta nuevos elementos para entender los mecanismos mediante los cuales el espectro de gotas puede ampliarse, acelerando así el crecimiento de un ensamble de gotitas por condensación y el inicio de los procesos de colisión-coalescencia que dan lugar a la formación de lluvia caliente.

Los dos casos presentados arriba son un ejemplo de las posibles implicaciones que la presencia de inhomogeneidades espaciales en la nube tiene en el desarrollo de los procesos microfísicos. Pero más importante aún es la conclusión de que es necesario determinar *in situ* el comportamiento de estas inhomogeneidades espaciales no sólo a escalas de metros, sino inclusive de centímetros, si se desea describir los procesos de crecimiento por condensación adecuadamente y validar las nuevas teorías existentes.

Implicaciones en Modelos de Cambio Global.

A últimas fechas se han sugerido varios mecanismos mediante los cuales las nubes podrían tomar parte y aún iniciar un cambio climático. Estos incluyen variaciones en el tamaño de las gotitas, la cubierta y el espesor de las nubes. En un artículo reciente, Slingo (1990) reportó un análisis de la sensibilidad de la radiación terrestre respecto a dichas variaciones, usando para ello un modelo tridimensional de circulación general (GCM) con la hipótesis de la duplicación en la concentración de bióxido de carbono en la atmósfera. Slingo concluyó que se requiere de una

precisión del orden de 5% tanto para modelar como para medir los parámetros microfísicos de la nube si se desea determinar su contribución al cambio global. Esta restricción es especialmente importante en el caso de nubes bajas, como la niebla. En lo que sigue, se analiza la factibilidad de llevar a cabo mediciones de tales características en el caso que aquí nos ocupa.

El albedo de las nubes es determinado por la profundidad óptica, τ , que a su vez es proporcional al cociente del camino de agua líquida (LWP) y el radio efectivo (r_e). Estos se definen a partir del segundo y tercer momentos de la distribución de gotas, como sigue:

$$LWP = \frac{4}{3} \pi \rho_w \int_0^{\Delta z} \int_0^{\infty} n(r) r^3 dr dz \quad (1)$$

$$r_e = \frac{\int_0^{\infty} n(r) r^3 dr}{\int_0^{\infty} n(r) r^2 dr} \quad (2)$$

donde r y $n(r)$ son, respectivamente, el radio y la concentración de las gotitas, ρ_w la densidad del agua y Δz el espesor de la nube. En términos de parámetros medibles, estas expresiones pueden escribirse como:

$$LWP = \int_0^{\Delta z} W_f(z) dz \quad (3)$$

$$r_e = \frac{3 W_f}{\pi \rho_w \sum_{i=1}^k n_i D_i^2 \Delta D_i} \quad (4)$$

donde D_i y n_i son, respectivamente, el diámetro y la concentración de las gotitas en cada uno de los k intervalos de tamaño ΔD_i . Ahora bien, el orden de magnitud de los errores instrumentales y de muestreo involucrados en la medición de la concentración y del diámetro de las gotas implican un error de entre el 30 y el 50% (y quizás aún mayor) en la determinación del contenido de agua líquida. Por tanto, los errores involucrados en la determinación del camino de agua líquida y del radio efectivo, según se puede apreciar de las Ecuaciones 3 y 4, serán por lo menos de este mismo

orden de magnitud. (Aún cuando es posible determinar W_i independientemente con otros instrumentos, el orden de magnitud del error es similar). Por otra parte, la validación de las mediciones con sistemas desde satélites requiere de la comparación y calibración contra instrumentación *in situ* como la aquí descrita, lo cual imposibilita mejorar la precisión del monitoreo. Además, a las consideraciones de instrumentación presentadas, hay que agregar la variabilidad natural de los sistemas nubosos con inhomogeneidades espaciales en todos los órdenes de magnitud y lo que esto implica en términos de la parametrización utilizada en los modelos.

La pregunta que surge es: ¿Es posible en este momento detectar una señal confiable de cambio climático con un GCM (o cualquier otro modelo) que considere el efecto de las nubes? Con los sistemas actuales de caracterización de nubes, y dados los esquemas de modelación existentes, las perspectivas de una respuesta positiva no son muy optimistas.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha discutido la importancia de las inhomogeneidades espaciales en la estructura microfísica de las nubes. Sus implicaciones en la descripción de los procesos que dan lugar al desarrollo de nubes y precipitación, así como en la sensibilidad de modelos numéricos de simulación climática, han sido ejemplificadas con un caso de estudio.

En lo referente a los procesos microfísicos, se concluye que es necesario el monitoreo de las nubes a todas las escalas, inclusive a la de centímetros. Aunque algunos estudios teóricos sugieren diferentes mecanismos físicos para explicar el origen de las fluctuaciones espaciales aquí señaladas, es necesario validar dichas teorías mediante el desarrollo de nuevas técnicas. En este renglón, pueden señalarse avances como el de Baumgardner (1986) para el caso de aviones instrumentados, o el del mismo vehículo terrestre instrumentado utilizado en el estudio aquí reportado, que permiten la caracterización de los parámetros microfísicos a las escalas espaciales requeridas.

Con respecto a modelos de simulación climática, los problemas actuales en el monitoreo y la parametrización de las nubes requieren de importantes avances en instrumentación y en esquemas capaces de tomar en cuenta las variaciones espaciales. El reto, por otra parte, está en el desarrollo de modelos físicos que puedan acomodar esquemas menos restrictivos en

cuanto a las necesidades de precisión de los datos y de los métodos numéricos.

Agradecimientos. Los autores agradecen el apoyo técnico prestado por los Ings. J. Escalante, A. Rodríguez y V. Zarraluqui del Laboratorio de Instrumentación Meteorológica del Centro de Ciencias de la Atmósfera. Una de las rutinas para la lectura de datos del FSSP fue implementada por los Ings. J. Alvarez y J. Torreblanca. El presente trabajo fue realizado con apoyo del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua de la Comisión Nacional del Agua y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

REFERENCIAS

- Baumgardner, D., 1986: A new technique for the study of cloud microstructure. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **3**, 340-343.
- Cooper, W.A., 1989: Effects of variable droplet growth histories on droplet size distributions. Part I: Theory. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 1301-1311.
- García-García, F., y R.A. Montañez, 1989: Evaluación de un espectrómetro de gotas para estudios de microfísica de nubes. *Geos (Boletín Unión Geofísica Mexicana) Epoca II*, **9 (4)**, 25-31.
- García-García, F., y R.A. Montañez, 1991: Warm fog in eastern Mexico: A case study. *Atmósfera*, **4**, 53-64.
- García-García, F., y R.A. Montañez, 1992: Espectros de gotas de niebla en la Sierra Madre Oriental. *Geos (Boletín Unión Geofísica Mexicana) Epoca II*, **12 (3)**, 2-4.
- Howell, W.E., 1949: The growth of cloud drops in uniformly cooled air. *J. Meteor.*, **6**, 134-149.
- Montañez, R.A., y F. García-García, 1992: Vehículo instrumentado para estudios de microfísica de nubes y precipitación. *Geos (Boletín Unión Geofísica Mexicana) Epoca II*, **12 (2)**, 2-5.
- Slingo, A., 1990: Sensitivity of the Earth's radiation budget to changes in low clouds. *Nature*, **343**, 49-51.
- Srivastava, R.C., 1989: Growth of cloud drops by condensation: A criticism of currently accepted theory and a new approach. *J. Atmos. Sci.*, **46**, 869-887.

ATLAS NACIONAL DE MEXICO

Obra en tres tomos que presenta la UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO, donde la labor de más de 300 especialistas quedará reunida en una colección de 160 cartas (alrededor de 600 mapas) editados a todo color por el Instituto de Geografía.

Volumen I

I. Mapas Generales

- 1.- Mapas generales
- 2.- Desarrollo histórico de la expresión cartográfica.
- 3.- Desarrollo histórico del levantamiento cartográfico.

II. Historia

- 1.- Epoca prehispánica,
- 2.- Epoca colonial
- 3.- Siglo XIX
- 4.- Movimientos armados
- 5.- Historia de las divisiones político-administrativas

III. Sociedad

- 1.- Distribución de las poblaciones y características demográficas
- 2.- Migraciones
- 3.- Sistema urbano
- 4.- Vivienda
- 5.- Educación
- 6.- Cultura
- 7.- Salud
- 8.- Tipología sociodemográfica

Volumen II

IV. Naturaleza

- 1.- Geología
- 2.- Tectónica
- 3.- Relieve
- 4.- Clima
- 5.- Agroclimatología
- 6.- Hidrogeografía
- 7.- Edafología
- 8.- Biogeografía
- 9.- Oceanografía
- 10.- Regionalización física

V. Medio ambiente

- 1.- Influencia del hombre en el medio ambiente
- 2.- Estado de los componentes naturales del medio ambiente
- 3.- La población y el medio ambiente
- 4.- Evaluación del patrimonio natural y cultural
- 5.- Síntesis del medio ambiente

Volumen III

VI. Economía

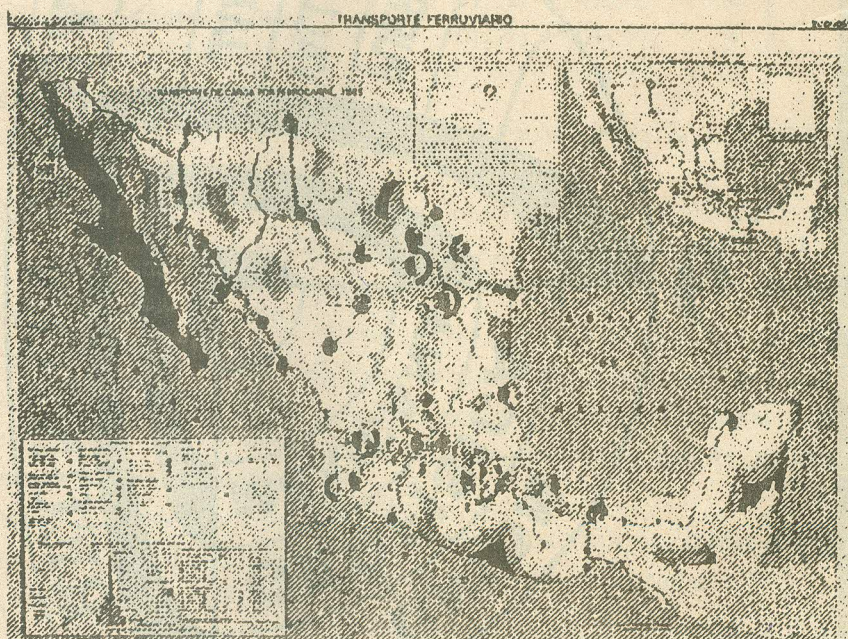
- 1.- Energía, agua y suelo, bases de la actividad económica
- 2.- Agricultura
- 3.- ganadería
- 4.- Actividad forestal
- 5.- Pesca
- 6.- Energía Eléctrica
- 7.- Economía petrolera
- 8.- Minería
- 9.- Industria
- 10.- Transporte y comunicación
- 11.- Turismo
- 12.- Comercio y servicios
- 13.- Asimilación económica del territorio
- 14.- Regionalización económica

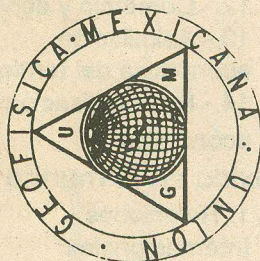
VII México en el mundo

1. Relaciones Internacionales
- 2.- Comercio Internacional
- 3.- México en el mundo

Informes y ventas:

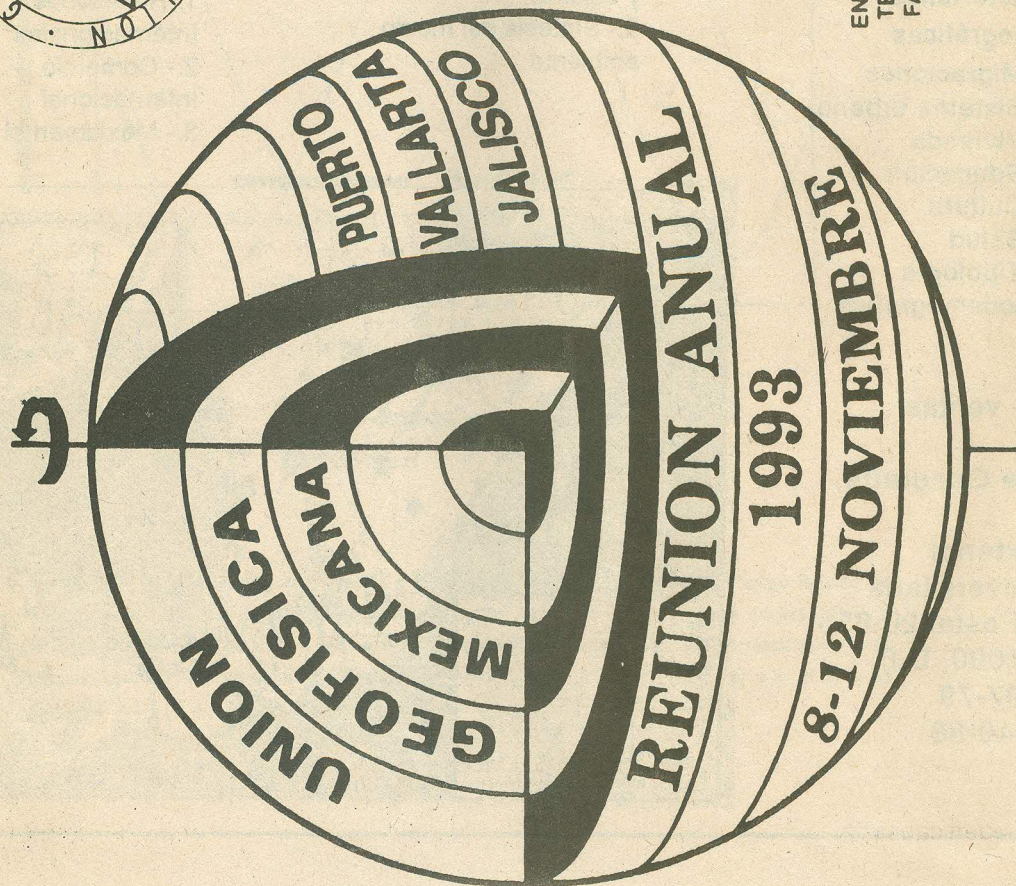
Instituto de Geografía,
UNAM
Circuito Exterior
Ciudad Universitaria
Apartado Postal 20-850
México, 01000, D.F.
Tel.: 548-97-79
Fax.: 548-40-86





UNION GEOFISICA MEXICANA REUNION 1993

8-12 NOVIEMBRE PUERTO VALLARTA, JALISCO



TEMAS A TRATAR

SISMOLOGIA	GEOL. ESTRUCTURAL	CONTAMINACION ATMOSFERICA
GEOQUIMICA	GEOMAGNETISMO	C. ESPACIALES Y PLANETOLOGIA
VULCANOLOGIA	FIS. Y QUIM. INTERIOR DE LA TIERRA	CAMBIO GLOBAL
TECTONICA	EXPL. GEOFISICA	OCEANOGRAFIA Y DINAMICA OCEANICA
GEOHIDROLOGIA	MATEMATICAS APLICADAS A LA GEOFISICA	CLIMATOLOGIA
PETROLOGIA		

INFORMES

F. MEDINA
IGF-UNAM
A. POSTAL 2681
ENSENADA 22800 B C
TEL. 91 (617) 4-46-02
FAX 91(617) 4-46-03

C. DE LA ATMOSFERA UNAM
CD. UNIVERSITARIA
MEXICO 04510 D.F.
FAX 9155489781

C. GAY
E. GOMEZ T.
CICESE
A. POSTAL 2732
ENSENADA B. C.
TEL. 91 (617) 4-45-01 AL 08
EXT. 555
FAX. 91 (617) 4-49-33

HOTEL SEDE
CONTINENTAL PLAZA VALLARTA
PUERTO VALLARTA, JALISCO

RECEPCION DE RESUMENES HASTA SEPTIEMBRE 10