

El monzón del suroeste de Norteamérica (TRAVASON/SWAMP)

SERGIO REYES

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, CICESE, Ensenada, México

MICHAEL W. DOUGLAS y ROBERT A. MADDOX

National Severe Storms Laboratory, NSSL/NOAA, Norman, OK., USA

Manuscript received Oct. 9, 1992; accepted in final form Jan 14, 1993

RESUMEN

Durante el verano del Hemisferio Norte de 1990, se efectuó un experimento científico para investigar la circulación atmosférica, las tormentas convectivas de mesoescala y la precipitación asociadas al monzón del suroeste de Norteamérica. Durante el mismo participaron distintas instituciones de investigación y universidades de ambos países. La fase operativa se desarrolló en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Chihuahua, Durango, Coahuila y Arizona. Se utilizó un gran equipo de instrumentación: imágenes de satélite, radar Doppler, sensores meteorológicos, globos piloto, avión de investigación y la red de superficie y altura operativa del noroeste de México y del suroeste de EUA. El banco de datos fue procesado y computarizado por el 'National Severe Storms Laboratory' (NSSL/NOAA) y por el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), con apoyo de la Comisión Nacional del Agua (CNA) y del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON); con este banco de datos se están investigando los procesos de formación de nubes cumulus convectivas y el transporte horizontal de vapor de agua que controlan el campo de precipitación. Los resultados preliminares, hasta ahora obtenidos, identifican a la Sierra Madre Occidental, particularmente pródiga en la formación de sistemas convectivos de mesoescala y en la generación de lluvia durante el verano, como un centro de convergencia de las masas de aire húmedo originadas en los trópicos de México y el Caribe. La vertiente del Pacífico y del Golfo de California muestran una mayor precipitación sobre la Sierra Madre Occidental en comparación con la precipitación observada en la vertiente hacia Chihuahua y el Golfo de México, sugiriendo que la circulación monzónica sobre el noroeste de México tiene un mayor aporte de humedad del Pacífico que del Atlántico.

ABSTRACT

A scientific experiment to investigate the atmospheric circulations, the mesoscale convective systems and the precipitation associated with the monsoon over northwestern Mexico and southwestern United States was carried out during the northern summer of 1990. A number of institutions and universities participated in the experiment. Special observations were made over the Mexican States of Baja California, Baja California Sur, Sonora, Sinaloa, Durango, Coahuila, Chihuahua and in the United States, Arizona. A wide variety of meteorological observations were made, including special pilot balloon and radiosonde soundings, research aircraft flights (including use of airborne Doppler radar), special surface observations, as well as more routine satellite, surface and upper-air observations over the region. The observations have been processed and compiled by the National Severe Storms Laboratory (NSSL) and the Center for Scientific Study and Higher Education of Ensenada (CICESE), in a data bank with the cooperation of National Water Commission (CNA) and the Sonora Institute of Technology (ITSON). Different atmospheric phenomena are being investigated, including the horizontal transport of water vapor and the formation and characteristics of cumulus convective systems and associated precipitation processes. Preliminary studies to date using the 1990 data identify the 'Sierra Madre Occidental', particularly important to the formation of mesoscale convective systems and the generation of summer precipitation, as a region where moist air masses from the tropical Americas converge. The Mexican watersheds from the Pacific and the Gulf of California show higher precipitation over the Sierra Madre, as compared with the watersheds from Chihuahua and the Gulf of Mexico, suggesting the Pacific ocean as the main source of moisture for the monsoon circulation over northwestern Mexico.

1. Introducción

El proyecto conjunto 'Transporte atmosférico de vapor de agua y su relación con el campo de precipitación de verano en el desierto sonorense' (TRAVASON) y el 'South west area monsoon project' (SWAMP) se propuso formalmente durante la Primera Reunión Regional México – Estados Unidos Sobre Estudios del Balance de Agua, celebrada en Ensenada, Baja California del 14 al 18 de octubre de 1989 (Reyes y Maddox, 1990). La fase operativa fue fijada para ejecutarse en los meses de julio y agosto de 1990, en la que se invitó a participar a todas las instituciones de investigación de la región.

En los meses de verano (julio, agosto y septiembre) el desierto sonorense, que comprende la Península de Baja California, Sonora y Arizona (Schmidt, 1989), está caracterizado por un gran calentamiento y una baja presión atmosférica superficial (Peixoto y Oort, 1992), los cuales favorecen la convergencia de masas de aire húmedo y caliente originadas en el océano Atlántico (Tang y Reiter, 1984) y en el Pacífico tropical (Reyes y Cadet, 1988), limitado al noroeste por aire relativamente frío y seco originado en el océano Pacífico del norte (Namias, 1983).

El monzón de Arizona (Bryson y Lowry, 1955; Adang y Gall, 1989), el monzón de verano del suroeste de Estados Unidos (Hales, 1974), el monzón del suroeste de Norteamérica (Reyes y Cadet, 1988) o el monzón mexicano (Douglas, 1982; Douglas *et al.*, 1993) se relaciona con el inicio de las lluvias de verano, con el flujo de humedad del sur sobre el Golfo de California y con la formación de un centro de baja presión centrado en Sonora y Arizona, el cual está a su vez asociado a una gran convergencia y vorticidad ciclónica sobre la Sierra Madre Occidental y la vertiente del Pacífico mexicano (Reyes *et al.*, 1985).

Las características y efectos de esta circulación monzónica sobre el clima de la región han sido estudiados y discutidos por distintos investigadores: Bryson y Lowry (1955) estudian los aspectos sinópticos de la precipitación de verano en Arizona; Reitan (1957) analiza datos de radiosondeo y observa que el mayor porcentaje de la humedad está contenida en la baja troposfera; Sellers y Hill (1974) se refieren al clima del suroeste de Estados Unidos y asocian los máximos de precipitación de verano al monzón de Arizona; Hales (1972, 1974) muestra evidencia soportando la idea de que durante el verano un considerable porcentaje de humedad en el noroeste de México y Arizona tiene su origen en las perturbaciones tropicales y huracanes del Pacífico oriental, que son canalizadas a lo largo del Golfo de California.

Actualmente, se tiene una aceptable descripción del patrón espacial y temporal del campo de lluvia (Pyke, 1972; Mosiño y García, 1974), sin embargo, aún no se tiene una idea completa sobre los mecanismos del transporte de humedad (Douglas *et al.*, 1992), ni sobre la variabilidad interanual de la precipitación de verano en el noroeste de México (Reyes y Rojo, 1985; Salinas *et al.*, 1990) ni en el suroeste de Estados Unidos (Carleton *et al.*, 1990; Díaz *et al.*, 1985), ni sobre la influencia de los huracanes (Latorre y Penilla, 1988) por lo que es necesario continuar investigando los mecanismos de transporte de humedad.

En la Sección 2 se presentan los objetivos del proyecto TRAVASON/SWAMP; en la sección 3 se resume el proyecto en su fase operativa; en la sección 4 se describen los bancos de datos formados de meteorología y climatología; en la sección 5 se discuten los resultados científicos del experimento, se presenta un resumen del conocimiento que se tiene hoy en día de los fenómenos meteorológicos y climatológicos, y se discute la variabilidad interanual del campo de precipitación en el noroeste de México. Finalmente, en la sección 6, se enlistan las principales incógnitas que aún se tienen y se presentan los planes futuros sobre los Estudios del Balance de Agua en la región del noroeste de México.

2. Motivación y objetivos

Distintas actividades humanas, tales como la agricultura, las pesquerías, las comunicaciones y el turismo, son fuertemente afectadas por los fenómenos meteorológicos y climatológicos, como la circulación monzónica, las tormentas tropicales y huracanes, inundaciones y sequías, y el fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur. El noroeste de México (desde la Sierra Madre Occidental) y el suroeste de Estados Unidos (California y Arizona) se han caracterizado en los últimos años por un gran crecimiento poblacional, en consecuencia los principales centros urbanos (Los Angeles, Phoenix, Tucson, Tijuana, Mexicali y Hermosillo), así como las comunidades agrícolas, ganaderas e industriales entre otras, han incrementado drásticamente su demanda en recursos naturales, agua, alimento y energía.

Comprender mejor el fenómeno de las lluvias es en consecuencia, un requisito indispensable si se quiere tener una mejor planeación de crecimiento y una mayor eficiencia en las distintas actividades socioeconómicas y políticas de ambos países en esta región. Sólo con proyectos conjuntos, multiinstitucionales e interdisciplinarios se podrá realmente entender la problemática del agua en esta región del mundo.

El proyecto TRAVASON es la componente atmosférica del Programa de Estudios del Balance de Agua en el noroeste de México. TRAVASON/SWAMP es el producto de la colaboración entre la comunidad meteorológica y climatológica de México y de Estados Unidos. El principal objetivo de este proyecto conjunto es avanzar en el conocimiento sobre los mecanismos que controlan el campo de precipitación en el noroeste de México y el suroeste de Estados Unidos.

Los objetivos científicos son: 1) estudiar los mecanismos de escala sinóptica que controlan el flujo de humedad sobre el noroeste de México y suroeste de Estados Unidos durante el verano; 2) estudiar los sistemas convectivos de mesoescala en la Sierra Madre Occidental y el Desierto Sonorense y 3) estudiar los sistemas de tormentas convectivas en la región central de Arizona.

3. Plan operativo

Los objetivos operativos del proyecto TRAVASON/ SWAMP fueron:

- 1) coordinar la participación de las distintas instituciones que colaboraron en el experimento;
- 2) complementar la red de altura con los equipos de globos piloto, con observaciones especiales de radiosondeo y del avión científico;
- 3) optimizar las observaciones rutinarias de superficie de la red mexicana del noroeste; y
- 4) implementar un centro de operaciones en Phoenix, Arizona y un centro de acopio de datos en Hermosillo, Sonora.

A. Organigrama

Participaron en el proyecto las siguientes instituciones de México: Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Universidad Autónoma de Baja California Sur (UABCS), Universidad de Sonora (UNISON), Centro de Investigaciones Biológicas (CIB), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Servicio Meteorológico y Geográfico de Chihuahua (SMG), Comisión Nacional del Agua (CNA), e instituciones de los Estados Unidos de América: "National Weather Service" (NWS), "National Environmental Satellite Data and Information Systems" (NESDIS), "Aircraft Operations Center" (AOC/NOAA), "National Severe Storms Laboratory" (NSSL), "Cooperative Institute for Research in the Environmental Sciences" (CIRES) de la Universidad de Colorado, la Universidad de Arizona (UA), la Univer-

idad Estatal de Arizona (ASU) y el "Salt River Project" (SRP) de Arizona. El proyecto fue financiado por la NOAA, la CNA, el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y el SRP (Fig. 1).

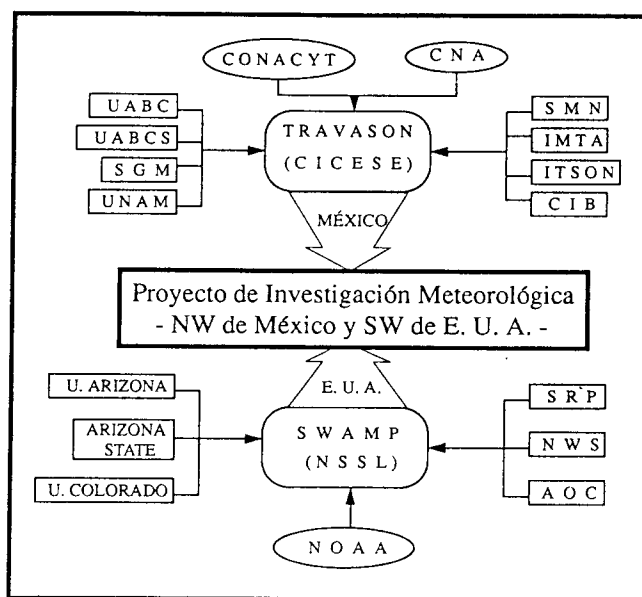


Fig. 1. Organigrama de las instituciones participantes en el Proyecto TRAVASON/SWAMP (ver texto para los acrónimos).

B. Red especial de observación

Dada la extensión del área de estudio y la complejidad de los objetivos científicos, se requirieron observaciones continuas y sistemáticas, lo más confiables posible, de los principales parámetros que controlan la circulación atmosférica. Los esfuerzos para la colección de datos se concentraron en la operación de una red especial de observación que consistió en (Reyes *et al.*, 1990a; Maddox, 1990):

- 1) *Globos Piloto PIBALS* (Fig. 2). La red se diseñó estratégicamente, para dar una mayor cobertura en el noroeste de México. Estas observaciones se hicieron para documentar la circulación de los vientos de la troposfera baja en una región que tradicionalmente no ha tenido datos.
- 2) *Radiosondeo* (Fig. 2). La red de altura del norte de México tiene relativamente pocos sitios de observación para la gran área de cobertura. Con estas observaciones se documentó el perfil vertical de viento, temperatura y humedad, haciéndose observaciones a las 06 y 18 GMT en días especiales, tratando de tener una mejor resolución temporal. Con estas observaciones y los PIBALS se podrá investigar la frontera de aire húmedo (asociada al monzón) y aire seco (asociado al anticiclón semipermanente del Pacífico norte) y estudiar la importancia relativa entre la humedad proveniente de las tres fuentes principales: el Pacífico tropical, el Atlántico y el Golfo de California.

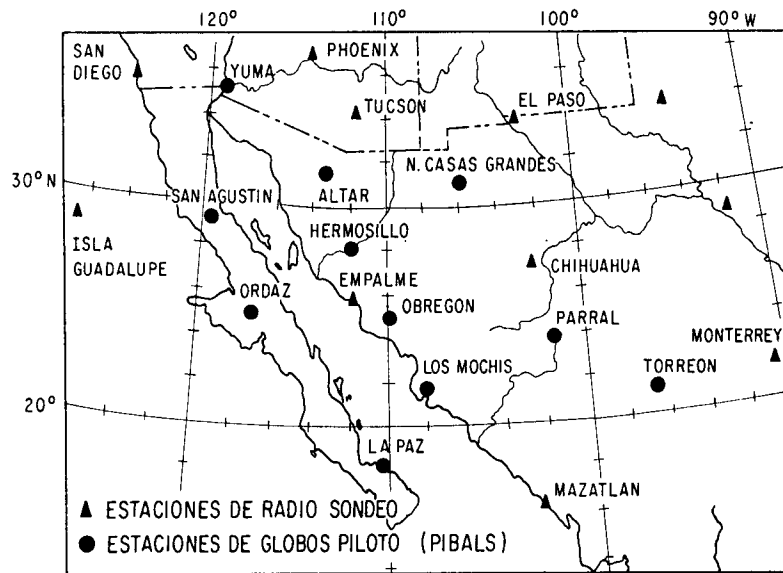


Fig. 2. Red especial de observación de altura implementada durante el verano de 1990 con globos piloto y mediciones de radiosondeo.

3) *Laboratorio móvil MCLASS* (Fig. 3). Dos unidades móviles de radiosondeo se instalaron en la región central de Arizona. Con estas observaciones se documentaron las características tridimensionales de la isla de calor sobre Phoenix, Arizona.



Fig. 3. Unidad móvil para observaciones meteorológicas de altura y superficie (sistema móvil MCLASS).

- 4) *Avión NOAA P-3* (Fig. 4). Se hicieron observaciones de la media y baja troposfera sobre el Golfo de California y de los sistemas convectivos de mesoescala en Sonora, Sinaloa y Arizona, mediante el avión de investigación científica. Se efectuaron 13 misiones, para un total de 85 horas de vuelo. 8 misiones se hicieron sobre México y 5 sobre Arizona. Hay 2 radares en el P-3: uno de banda C de barrido horizontal, montado en la parte inferior del fuselaje, y otro de banda X, montado en la parte posterior del avión. El radar de banda X tiene capacidad Doppler para medir la velocidad de las gotas de lluvia. Además de los parámetros meteorológicos básicos, el avión tiene un sistema Knollenberg de medición de partículas para detectar gotas de nubes en el rango de 0.5 a 45 μm , cada 2 seg.

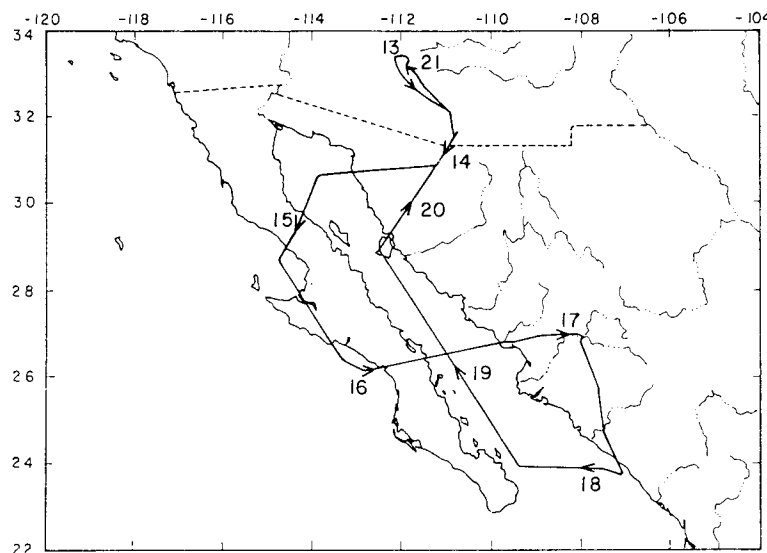


Fig. 4. Trayectoria seguida por el avión P-3 sobre México y Arizona durante el Proyecto TRAVASON/SWAMP. La gráfica corresponde al vuelo de la misión No. 7 del día sábado, julio 21, 1990. Los números corresponden a la hora local.

- 5) *Sondas de Caída*. Se lanzaron un total de 17 sondas sobre México durante las 13 misiones del avión P-3. Con estas mediciones se puede documentar el perfil vertical de la atmósfera en varios sitios selectos, casi instantáneamente, pues el avión recorrer grandes distancias en poco tiempo.

C. Red de superficie de la red mexicana del noroeste

La región de estudio tiene una red de observación que incluye: estaciones climatológicas, con los parámetros básicos (precipitación, temperatura máxima, mínima y ambiente), con mediciones diarias; y observatorios meteorológicos (lluvia, temperatura, viento, estado del tiempo, radiación, evaporación), con mediciones horarias. Durante el experimento esta red se complementó con pluviógrafos analógicos y digitales en las zonas de máxima convectividad esperada al sur de Sonora y en la región montañosa (Fig. 5).

D. Centro de operaciones

Durante la fase intensiva se instaló un Centro de Operaciones en la oficina para Pronóstico del tiempo del NWS en el aeropuerto de Phoenix. Se coordinaron las operaciones de vuelo del

avión P-3; la recepción de datos PIBAL, las observaciones especiales de radiosondeo, MCLASS; y se elaboraron los pronósticos del tiempo diariamente. Se operó cada día durante el periodo total del 9 de julio al 7 de agosto de 1990.

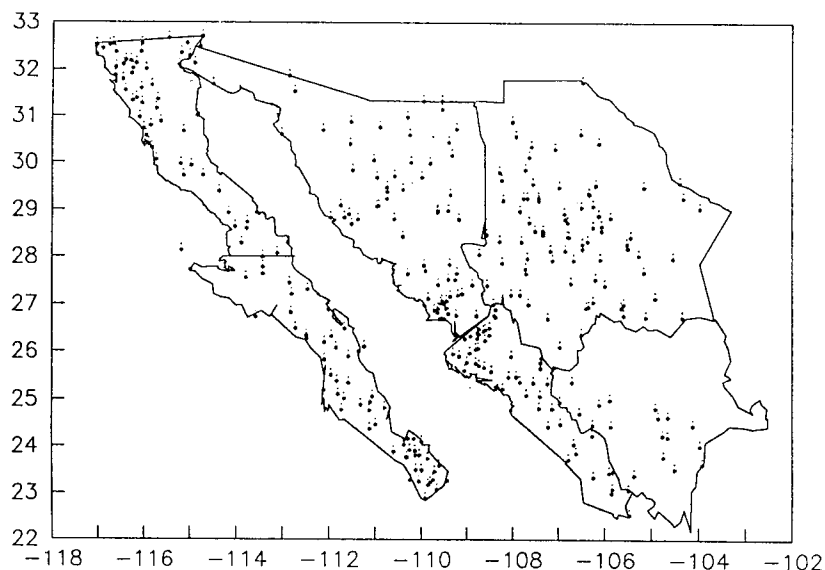


Fig. 5. Red de observaciones de superficie (precipitación y temperatura) durante TRAVASON/SWAMP en el noroeste de México.

4. Bancos de datos

Con el proyecto TRAVASON/SWAMP se ha formado, a la fecha, el banco de datos más completo de las características meteorológicas y climatológicas en el noroeste de México. Los bancos consisten en los siguientes datos (Reyes *et al.*, 1990b y 1991); Miranda *et al.*, 1991; Meitín, 1991):

A. Precipitación

Se han recopilado los *datos mensuales* para los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora y Sinaloa. Con un total de 60, 58, 65 y 54 estaciones climatológicas, respectivamente; con una antigüedad de más de 30 años (1950 a la fecha) de información para la mayoría, aunque no todas tienen un registro continuo y confiable. Durante TRAVASON/SWAMP se tienen *datos diarios* para el periodo de mayo, junio, julio y agosto de 1990, para la red del noroeste de México (BCS, BC, Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango) con un total de 253 estaciones. También se tienen datos de precipitación *continua* para 6 estaciones localizadas en el sur de Sonora.

B. Temperatura del aire

Se tienen *datos mensuales* de temperatura mínima, máxima y ambiente para un total de 228 estaciones en los estados de Baja California (78), Baja California Sur (58), Sinaloa (33), Sonora (59), con un rango de 5 a 40 años de datos. Durante TRAVASON/SWAMP se registraron *datos diarios* de temperatura ambiente, mínima y máxima, en los estados de BC, BCS, Sonora y Sinaloa para un total de 253 estaciones.

C. Datos de altura

Este banco incluye observaciones con *globos piloto* en 10 sitios localizados en el norte de México registrándose el viento en los niveles inferior y medio de la troposfera (aproximadamente hasta los 500 mb) con 3 observaciones diarias a las 00, 12 y 18 Z para el periodo de julio 5 a agosto 15 de 1990. Las observaciones de *radiosondeo* de la red de altura fueron tomadas a las 00 y 12 Z con algunas observaciones especiales a las 06 y 18 Z (San Diego, Winslow, Tucson, El Paso, Isla Guadalupe, Mazatlán, Empalme y Chihuahua). Se hicieron observaciones intensivas de radiosondeo (sistema MCLASS) en varios sitios de interés alrededor de Phoenix, para los estudios de isla de calor y de los sistemas de tormentas convectivas en la región central de Arizona.

D. Imágenes de satélite

Durante el proyecto se registraron datos digitales de imágenes de algunos satélites en visible, en infrarrojo y en microondas, lográndose una cobertura completa de México y de EUA. Se tienen datos horarios en infrarrojo del sistema GOES (con una resolución de 8 km) y en visible (resolución de 16 km); el área cubre desde el sur de Canada hasta los 20 N. Se tienen datos de señales de microondas del 'Special Sensor Microwave Imager (SSMI)' montado en el 'Defense Meteorological Satellite Program (DMSP)', con una resolución de 12.5 km, de órbita polar. También se tiene información hemisférica de visible e infrarrojo, pero a una menor resolución de 16 km y para cada 3 hs. Se tiene un paquete especial de imágenes en visible para la región del noroeste de México y Arizona en intervalos de 30 minutos y para una resolución de 2 km.

E. Parámetros meteorológicos del P-8

Hay 4 tipos de datos de este sistema; las observaciones de los parámetros básicos temperatura, humedad, presión, viento, con frecuencia de 1 seg; el sistema de datos de radar; el sistema de datos de sondas de caída y el sistema de datos de física de nubes. Los sensores de los parámetros básicos muestrean a razón de 40 Hz y luego son promediados para dar datos cada un segundo. Los datos de viento se calculan filtrando los movimientos y ruidos generados por el avión. El NSSL pondrá una estación de trabajo, disponible en Norman, OK, a los investigadores que estén interesados en analizar estos datos.

F. Datos de modelos de asimilación

El 'National Meteorological Center (NMC)' genera mallas de los parámetros de altura geopotencial, temperatura del aire, viento y humedad relativa en los niveles estándar (superficie, 1000, 850, 700, 500, 400, 300, 250, 200, 150 y 100 mb) cada 2.5 grados latitud/longitud, para cada 12 horas. Se tienen disponibles los meses de junio, julio, agosto y septiembre de 1990.

Los bancos de datos pueden ser solicitados a los responsables:

Mr. José Meitín, NSSL/SSD/R/E/NS1 325 Broadway, Boulder, CO 80303. Tel (303) 497-6341, Fax: (303) 497-6930, Meitin@ESGC.FSL.NOAA.GOV.

Oc. Fernando Miranda, Grupo de Meteorología, CICESE. Carretera Tij-Ens, Km 103, Ensenada, B. C., Tel: (667) 450-50, Fax: (667) 451-54, Fermir@cicese.mx (e-mail).

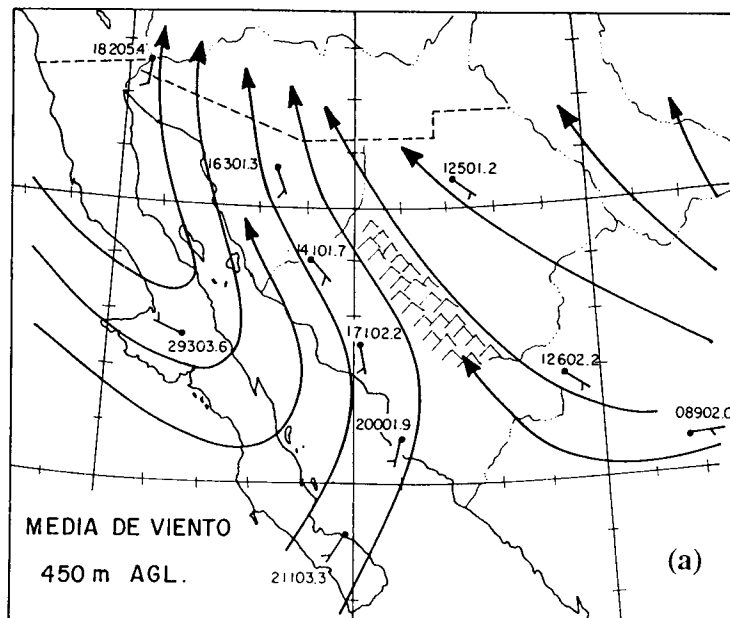
5. Resultados y discusión

A. Circulación atmosférica

Las primeras explicaciones sobre la fuente de origen de las lluvias en el noroeste de México y el suroeste de los Estados Unidos se asociaron al flujo horizontal del aire proveniente del Golfo de México, característico de los meses de verano. Esta idea ha ido perdiendo fuerza conforme mejores y más bancos de datos de la región de estudio se han logrado. La mayor parte de los estudios del transporte horizontal de vapor de agua sobre México han sido hechos en la vertiente del Atlántico y Golfo de México. Algunos investigadores (Benton y Estoque, 1954; Hastenrath, 1966; Rasmusson, 1967; Tang y Reiter, 1984) han mostrado la importancia de la advección de humedad del Mar Caribe y océano Atlántico hacia México y el sur de Estados Unidos. Los trabajos de Hales (1972); Chen (1985); Hasimoto y Reyes (1988) y Reyes y Janowiak (1986) han sugerido que gran parte de la humedad de verano en el desierto sonorense tiene su origen en el océano Pacífico tropical.

Aunque es ampliamente aceptado que la humedad sobre el noroeste de México y Arizona tiene su origen en los trópicos, no se ha logrado cuantificar el aporte de cada fuente. Esto se debe principalmente a la escasez de observaciones y a la gran variabilidad de los mecanismos que controlan el clima. En general se cree que la humedad en la alta troposfera proviene del Golfo de México y el Atlántico (Rasmusson, 1967; Tang y Reiter, 1984); mientras que la humedad observada en los niveles medios y bajos de la troposfera tiene su origen en el océano Pacífico tropical (Reyes y Cadet, 1988) y el Golfo de California (Douglas, 1992).

Con TRAVASON/SWAMP se está identificando mejor la circulación atmosférica de la región. Los campos del viento medio en los niveles troposféricos bajos muestran las mayores diferencias con la climatología conocida: los niveles superficiales, en los que la atmósfera es relativamente más baroclínica e inestable, dan un mayor detalle alrededor del desierto sonorense a 450 m sobre el suelo (Fig. 6a) se detecta la circulación monzónica con flujos atmosféricos del Este prove-



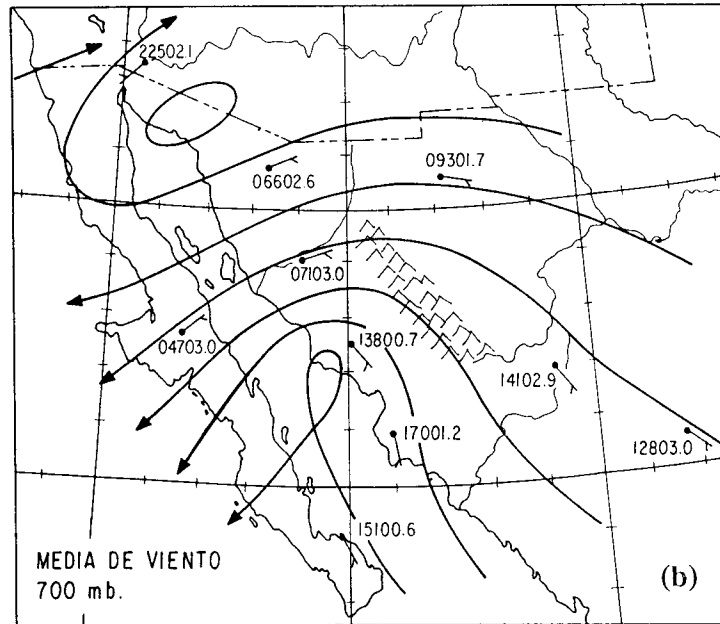


Fig. 6. Circulación atmosférica promedio, derivada de los globos piloto a niveles inferiores, durante toda la duración del proyecto TRAVASON/SWAMP (de 12 Z, julio 10 a 12 Z agosto 15 1990); a) nivel de 450 ms sobre el nivel del suelo; b) nivel de 700 mb. Los números cercanos a los sitios de observación indican la dirección y magnitud del viento, por ejemplo en Cd. Obregón el valor de 17102.2 significa 171 grados y 2.2 m/s.

nientes del Golfo de México, y vientos del suroeste, provenientes del Pacífico tropical oriental, convergiendo sobre la Sierra Madre Occidental y el desierto sonorense; indicando que en los niveles superficiales, el Pacífico tropical es una importante fuente de humedad para la precipitación de verano en el oeste mexicano.

En niveles intermedios (700 mb) la circulación del Este y sureste domina la región occidental de México, observándose una circulación ciclónica centrada en el sur del Golfo de California y Sonora (Fig. 6b). Los niveles superiores (> 500 mb) muestran sólo componente del Este, indicando que en estos niveles el viento del Golfo de México y el Atlántico es el principal medio de transporte de humedad hacia el noroeste; aunque con humedades relativamente bajas (Miranda y Reyes, 1992) (Fig. 7).

Se ha logrado identificar las 'surgencias' de humedad con vientos del sur a lo largo del Golfo de California, que posiblemente están relacionadas con la lluvia en Arizona. Hales (1972, 1974); Jáuregui y Cruz (1981) dan ejemplos de surgencias de humedad, originadas en el Pacífico oriental, que transportan una considerable cantidad de humedad hacia el suroeste de Norteamérica. Por otro lado, algunos estudios regionales sobre la vertiente del Pacífico (Roden, 1958; Reyes *et al.*, 1985; Badan *et al.*, 1991) documentan la existencia de un *jet* de bajo-nivel de vapor de agua penetrando del Pacífico tropical y Golfo de California al noroeste de México y Arizona.

Usando los datos de TRAVASON/SWAMP se puede observar un *jet* en las capas superficiales con vientos del sur que en algunas ocasiones es muy intenso (Fig. 8), lo cual puede tener un efecto neto en los procesos de intercambio de energía, calor y masa en la zona de interacción mar/aire sobre el Golfo de California. Algunos resultados fortalecen la idea de que un considerable porcentaje de humedad proviene de procesos convectivos de transporte vertical sobre el Golfo de California. Aún no es claro cuánta humedad proviene de la evaporación del Golfo de California y cuánta es transportada desde el Pacífico tropical.

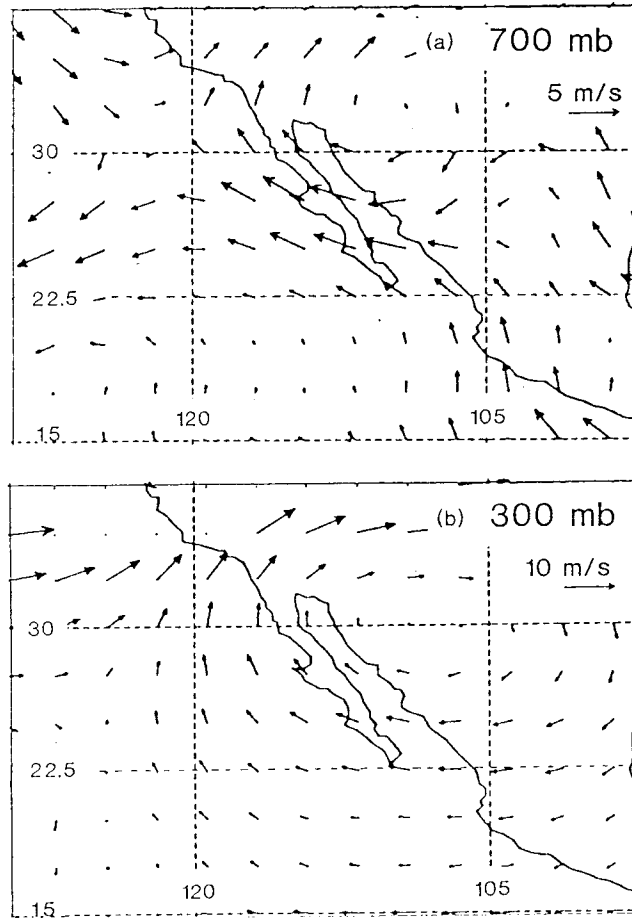


Fig. 7. Circulación atmosférica derivada de datos del NMC, para niveles superiores durante julio de 1990: a) nivel de 700 mb; b) nivel de 300 mb.

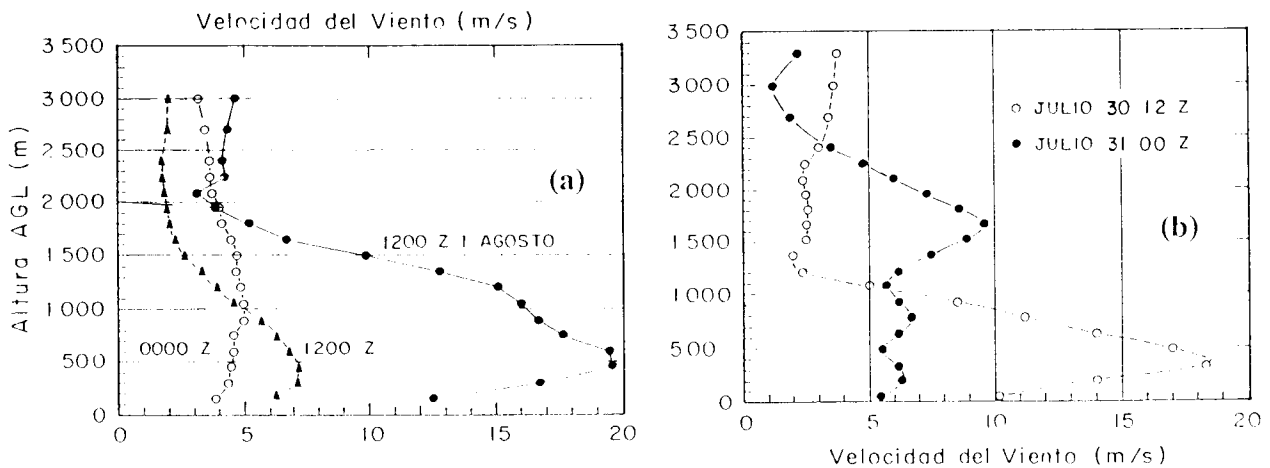


Fig. 8. Perfiles verticales de viento derivados de globos piloto sobre yuma; a) promedios para los sondeos de las 00 Z, 12 Z (promedios para el periodo de 12 Z, julio 9 a 12 Z, agosto 6 de 1990) y la observación durante el 1° de agosto de 1990, en que se detectó un fuerte *jet* de bajo nivel; b) variabilidad diurna observada en casos de fuerte *jet* de bajo nivel desarrollado durante la mañana (12 Z, julio 30) y 12 horas después en la tarde, en que el perfil vertical de viento es casi constante en la altura (00 Z, 31 de julio).

B. Sistemas convectivos de mesoescala

Las imágenes de satélite han evidenciado detalles de la cobertura de nubes en distintas escalas temporales y espaciales (e.g. Klitch *et al.*, 1985; Gibson y Vonder Haar, 1990). En particular, algunos estudios climatológicos sobre Norteamérica muestran grandes concentraciones de nubes convectivas sobre la sierras de Sonora, Chihuahua, Sinaloa y Durango, las cuales producen considerable cantidad de precipitación durante los meses de julio y agosto (Maddox y Howard, 1988). Actualmente la comunidad científica está dedicando grandes esfuerzos a la investigación mediante percepción remota y observación por satélite a la cobertura de nubes. En particular para documentar la evolución y características de los sistemas convectivos en el noroeste de México se requiere de información de imágenes de satélite de alta resolución en tiempo y espacio, así como una red de radares.

Durante la tarde y noche de los meses de julio y agosto, la Sierra Madre Occidental se caracteriza por un gran desarrollo de sistemas convectivos con intensidades de precipitación mayores de 200 mm/mes (Fig. 9). Se puede ver que los máximos se localizan a lo largo del costado oeste de la cordillera entre los 500 y 2,000 ms de altura. Es interesante notar que las principales regiones con intensas lluvias se localizan en la región montañosa mexicana; mientras que sólo en la parte sur de Arizona y de Nuevo México se observan pequeñas zonas con lluvias intensas.

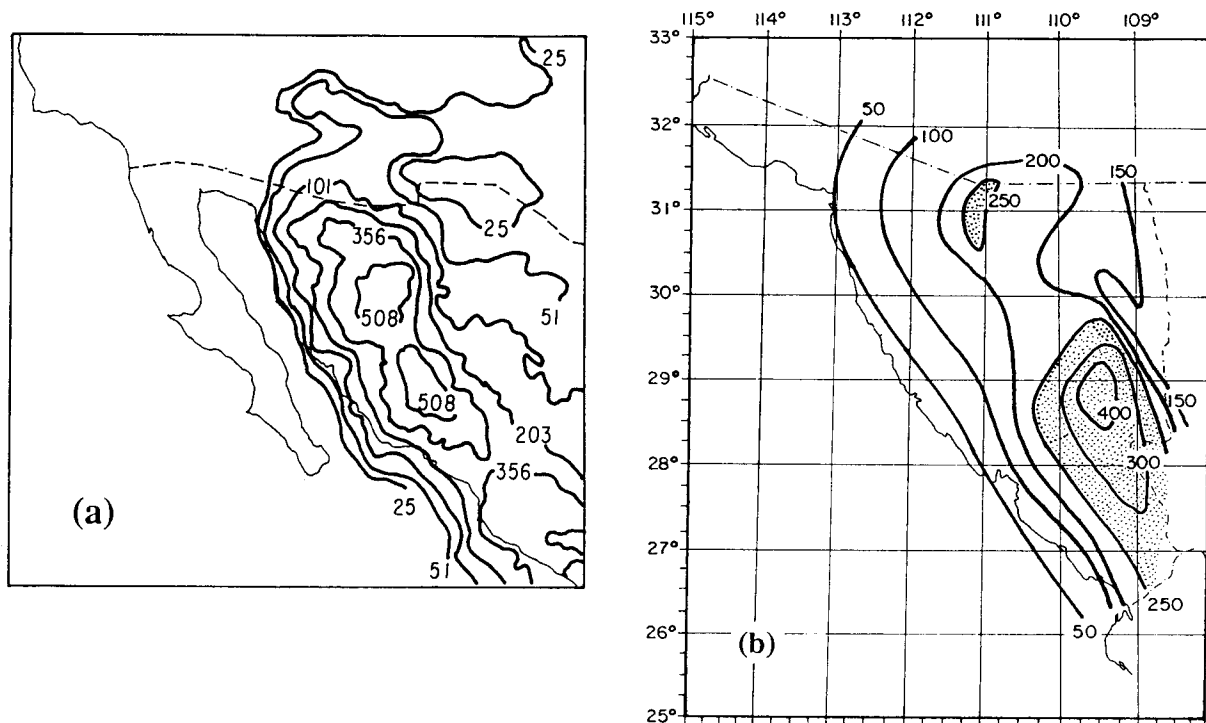


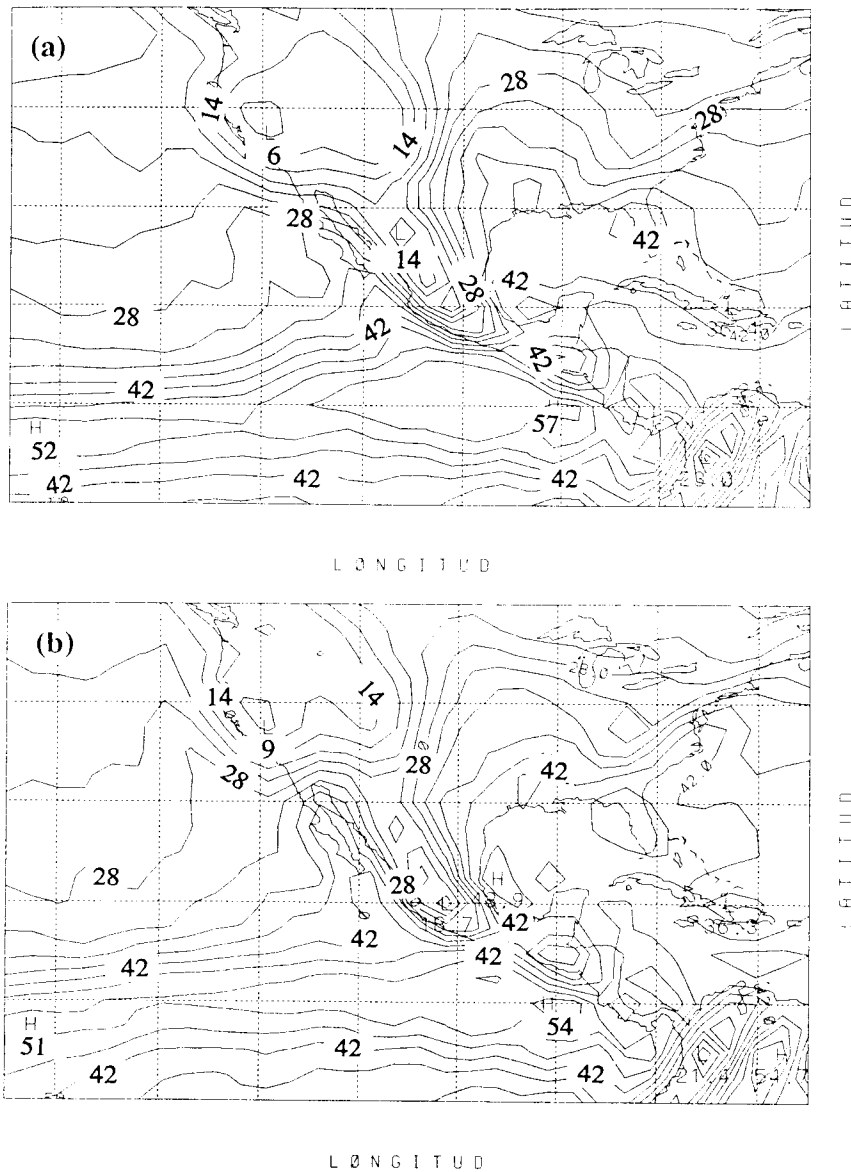
Fig. 9. Datos de intensidad de lluvia (mm/mes) estimados para el mes de julio: a) a partir de los datos de IR de las imágenes de alta resolución del satélite GOES (modificado de Maddox *et al.*, 1992); b) campo de precipitación derivado de la red de pluviómetros del noroeste de México.

C. Precipitación

Las precipitaciones en el noroeste de México son las más variables del país, las lluvias de verano en esta región representan del 60 al 80% del total anual, aproximadamente. El inicio de la precipitación durante el mes de julio, está en contraste dramático con la sequía de junio.

Esto está reflejado en el campo de agua precipitable sobre América tropical y el desarrollo de 'lengüetas' de humedad desde el Golfo de México y el Pacífico. En los primeros estudios de Namias (1940); Reitan (1957); Tuller (1968) se muestra la evolución del campo mensual de agua precipitable en la atmósfera y el desarrollo de una lengüeta de humedad que penetra desde el Pacífico tropical hasta los estados del noroeste de México y suroeste de Estados Unidos (Fig. 10).

En trabajos recientes se estudia la evolución diaria del campo de agua precipitable (Reyes y Cadet, 1986); el flujo horizontal de vapor de agua (Tang y Reiter, 1984; Hasimoto y Reyes, 1988); el balance de vapor de agua atmosférico y su relación con el campo de precipitación de verano (Reyes y Cadet, 1988). Mostrando que durante junio el oeste mexicano está dominado por una circulación divergente (evaporación excede a la precipitación); mientras que durante julio y agosto se tiene una clara convergencia (precipitación excede a la evaporación).



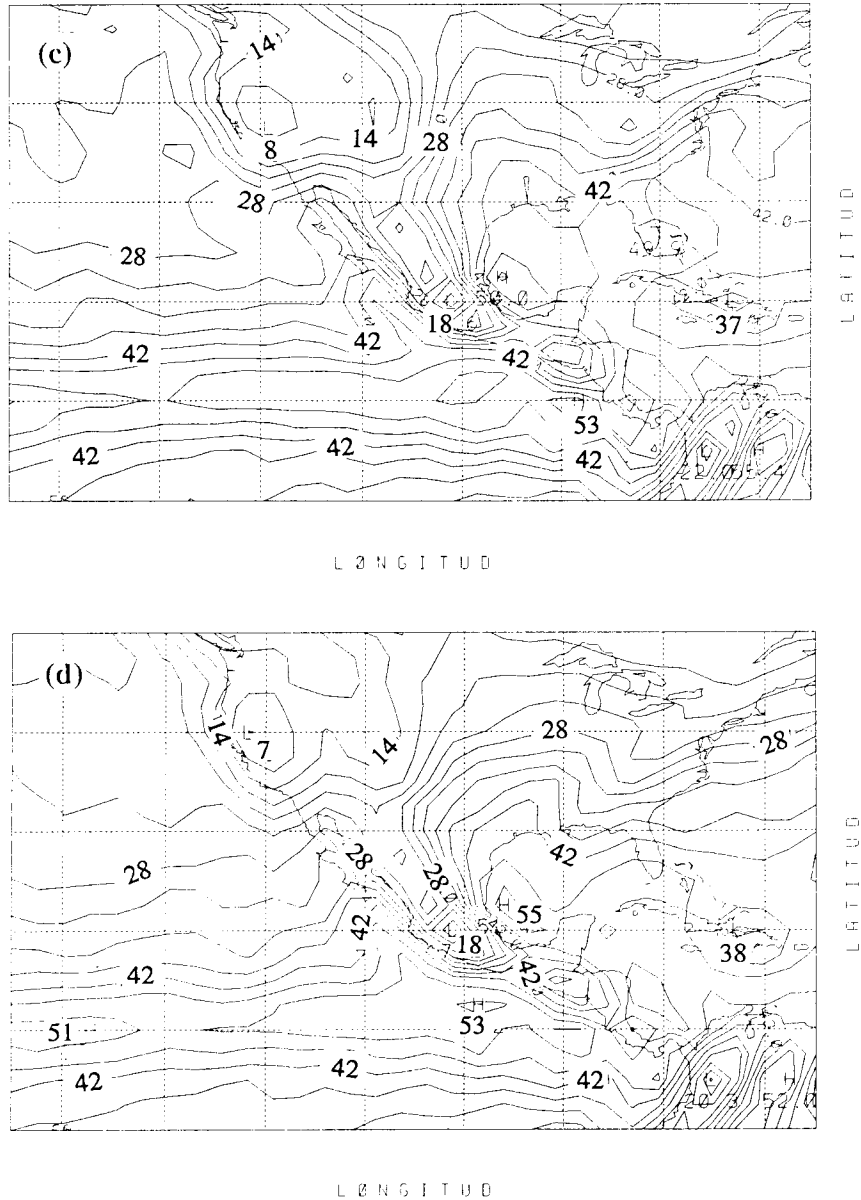


Fig. 10. Evolución del campo mensual de agua precipitable (mm) integrada de la superficie a los 300 mb, derivada de los datos de NMC: a) junio, b) julio, c) agosto y d) septiembre de 1990.

Durante el verano, la temperatura superficial del Golfo de California se eleva considerablemente, generando un gradiente vertical de temperatura en la troposfera baja (Fig. 11), haciéndola muy inestable y favoreciendo un flujo neto de calor y humedad hacia la atmósfera, generando convección y formación de sistemas conglomerados de nubes, los cuales son transportados, por efecto de las circulaciones locales (brisas y de montaña), hacia las regiones montañosas de la Sierra Madre, de Arizona y de Baja California.

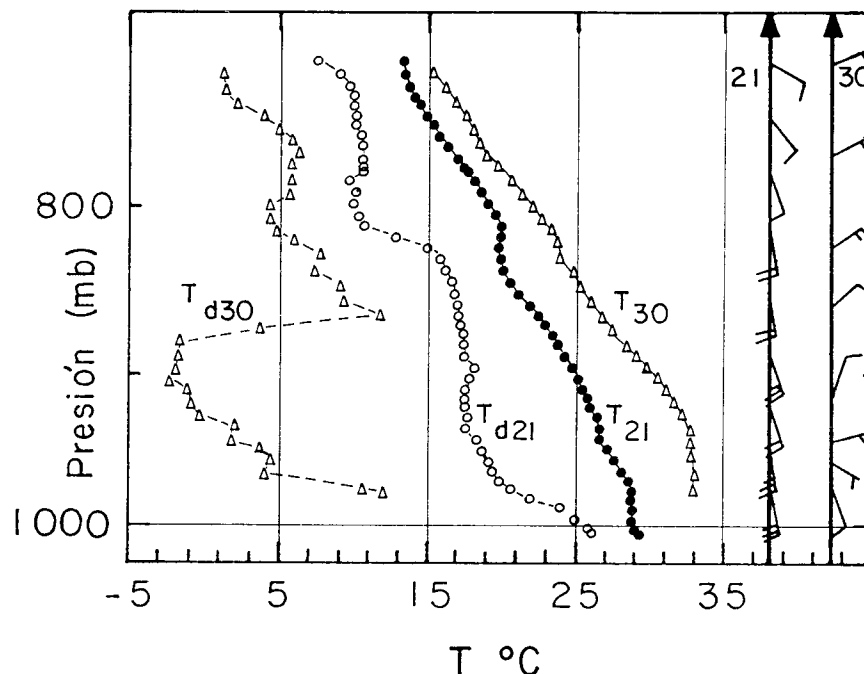


Fig. 11. Perfiles verticales de temperatura (T) y punto de rocío (Td) del aire, derivados de las observaciones del avión P-3, en julio 21 y julio 30 de 1990, sobre el norte del Golfo de California. El perfil del viento se presenta en el margen derecho.

El campo de precipitación diaria tiene una variabilidad espacial y temporal muy grande, y no es posible generalizar sobre la circulación atmosférica que domina en los eventos de lluvia de verano; sin embargo, a primera aproximación se observa que el promedio de lluvia total diaria tiene una variación periódica para cada uno de los estados de la región del noroeste de México (Sonora, Sinaloa, Durango, Chihuahua) (Fig. 12); un análisis espectral de este comportamiento indica que Chihuahua tiene una periodicidad distinta a las de Sonora, Sinaloa y Durango, sugiriendo

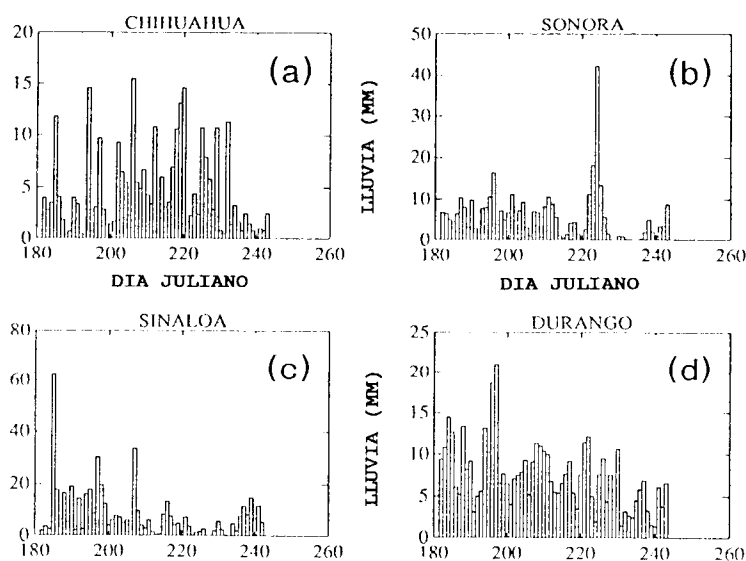


Fig. 12. Series de tiempo de la lluvia total diaria normalizada para todas las estaciones de superficie en el noroeste de México (Chihuahua (a), Sonora (b), Sinaloa (c) y Durango (d)). El periodo de datos incluidos es del día 182 (julio 1) al día 242 (31 de agosto) de 1990.

que el origen de esta lluvia tiene otras fuentes (Fig. 13). Es interesante notar que el periodo de 3 días observado en Chihuahua es cercano al de las ondas tropicales del Este en el Atlántico, con periodos del orden de 4 días (Reed, 1978). Sugiriendo que la precipitación en Chihuahua tiene su principal origen en el Golfo de México y el océano Atlántico; mientras que por el contrario, los picos espectrales de mayor intensidad en Sonora, Sinaloa y Durango están en las bajas frecuencias (6 y 12 días), sugiriendo un origen distinto y no del Golfo de México.

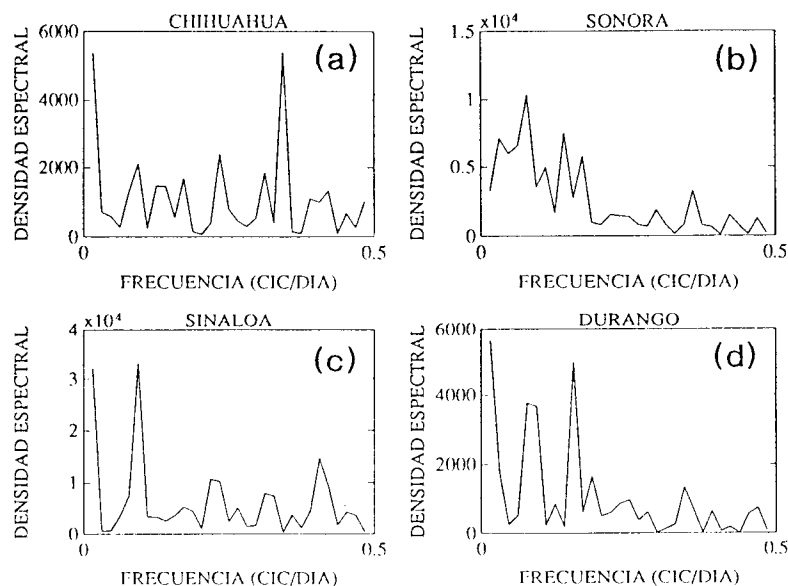


Fig. 13. Densidad espectral de las series de lluvia diaria de la Figura 12. Para Chihuahua se observa un pico espectral centrado en 3 días (0.34 cic/día); Sonora, Sinaloa y Durango muestran picos espectrales a bajas frecuencias; del orden de 6 y 12 días (0.17 y 0.075 cic/ día).

D. Variabilidad interanual de la precipitación

Ciertamente existe una variabilidad interanual en las distintas regiones lluviosas. El patrón climatológico de lluvias muestra considerables diferencias año con año; quizás los aspectos más interesantes se relacionen con los fenómenos de mayor escala que controlan la circulación oceánica y atmosférica.

La variabilidad interanual de la precipitación depende fuertemente de la presencia de fenómenos diversos tales como la circulación monzónica, los sistemas convectivos de mesoescala (SCM) y los ciclones tropicales. La relación entre estos fenómenos aún no está completamente entendida. Douglas *et al.* (1987) estudiando el periodo 1982-1985 notan que los SCM sobre el noroeste de México tienden a ser más frecuentes durante los veranos secos (e.g. 1982); mientras que durante veranos húmedos (e.g. 1984) los SCM son relativamente raros.

Por otro lado, Reyes y Janowiak (1986), analizando los flujos horizontales de vapor de agua con los datos del NMC observan que la entrada de humedad por las vertientes del Pacífico y del Golfo de México muestran una alta variabilidad interanual. Recientemente se ha asociado la variabilidad interanual de las lluvias de verano en Arizona al fenómeno de El Niño y la Oscilación del Sur y al impacto de las tormentas tropicales y huracanes (Webb y Betancourt, 1990).

En el Figura 14a, b, se muestran los valores de anomalía de precipitación anual para dos conjuntos de estaciones a ambos lados de la sierra de Chihuahua, y el Índice de Oscilación del

Sur (IOS). Primeramente se observa una tendencia positiva para las dos vertientes, sugiriendo que la precipitación ha aumentado en el periodo de los últimos 30 años. También se puede ver que los periodos de intensificación de lluvia no coinciden para ambas vertientes, sugiriendo que la lluvia es controlada por mecanismos independientes; en particular, la precipitación en la vertiente del Pacífico muestra una mayor cantidad que en la vertiente del Atlántico (Fig. 14c).

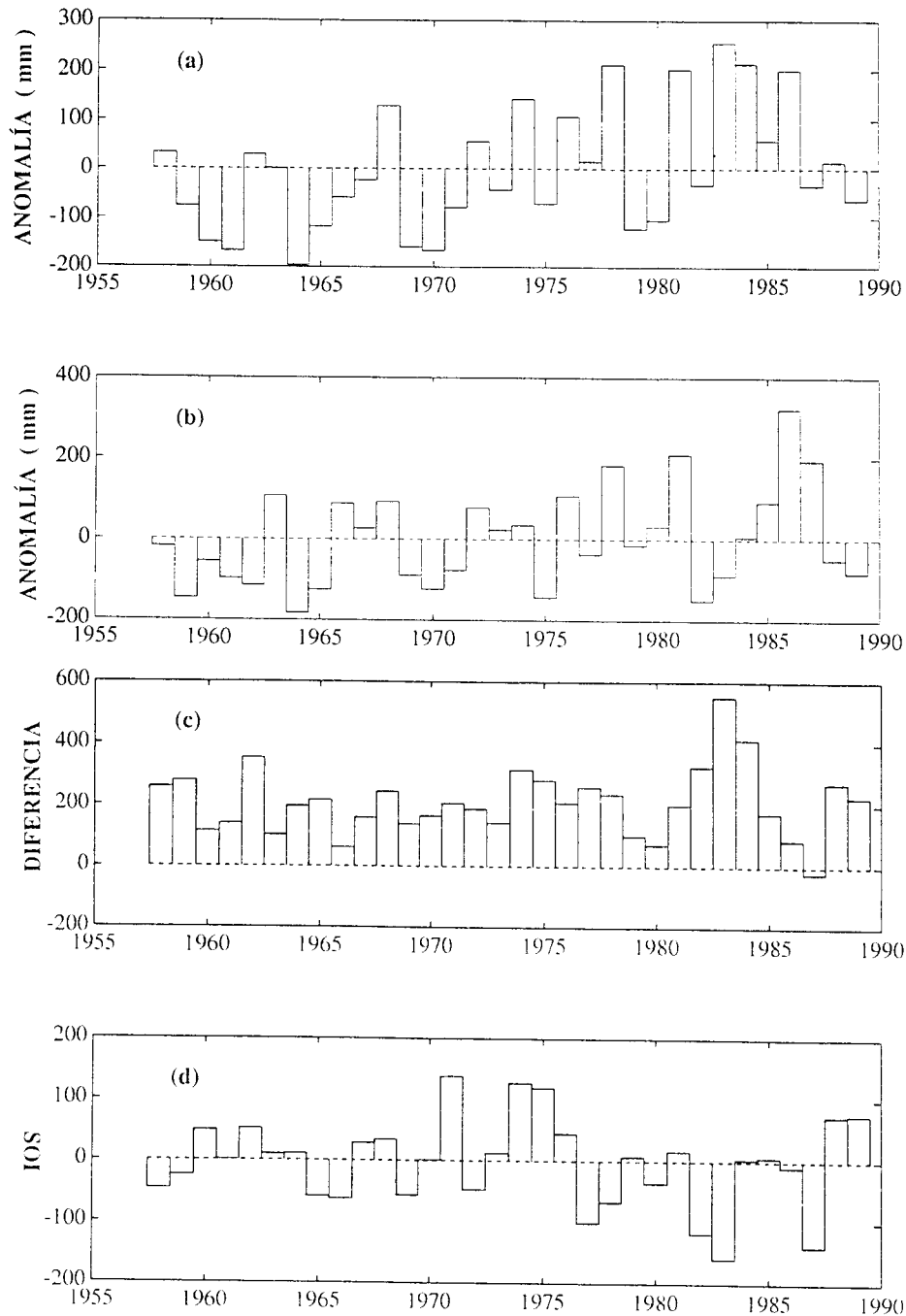


Fig. 14. Variaciones interanuales de la anomalía de precipitación anual (mm) para 10 estaciones promediadas sobre la Sierra Madre Oriental; a) vertiente occidental hacia Sonora; b) vertiente oriental hacia Chihuahua; c) diferencia entre la precipitación total anual de la vertiente occidental menos la precipitación de la vertiente oriental; d) Índice de Oscilación del Sur.

Algunos estudios indican una buena correlación entre la precipitación y el evento de El Niño y la Oscilación del Sur (ENOS). Durante el verano pre-ENOS se observa una precipitación por arriba del normal en la vertiente del Golfo de México, pues la circulación tropical sobre el Atlántico se intensifica; mientras que la del Pacífico se debilita, ocasionando una menor precipitación en la región alrededor del Golfo de California. Por el contrario, durante el verano post-ENOS, la circulación del Pacífico oriental se activa, pues hay un mayor contenido de calor y energía, y las masas de aire húmedo y caliente de origen tropical penetran más fácilmente hacia la vertiente del Pacífico observándose una precipitación por arriba del normal. En la vertiente del Atlántico, la circulación atmosférica se debilita, reduciendo la advección de aire húmedo del Golfo de México hacia el noroeste de México.

6. Conclusiones e investigaciones futuras

El experimento TRAVASON/SWAMP desarrollado en el verano de 1990 ha demostrado nuevamente la importancia de conjuntar esfuerzos entre los países de México y de Estados Unidos para la investigación de los fenómenos naturales en la región fronteriza.

Estos resultados han determinado la necesidad de un segundo esfuerzo para resolver algunas preguntas que no han sido completamente entendidas: 1) cuáles son los mecanismos dinámicos y termodinámicos que controlan el campo de precipitación en el noroeste de México; 2) qué proporción en aporte de humedad hacia el noroeste de México se tiene de las 3 principales fuentes: el Golfo de México; el océano Pacífico tropical y el Golfo de California; 3) qué importancia relativa en la precipitación se tiene entre la circulación monzónica (i.e. el flujo medio advectivo); los sistemas convectivos de mesoescala y las tormentas tropicales y los huracanes; 4) cómo afecta la variabilidad interanual (fenómeno ENOS) a los mecanismos que generan la lluvia y 6) qué resolución espacial y temporal se requiere en la red de información para generar pronósticos confiables y acertados de uso práctico para desarrollar las distintas actividades socioeconómicas de la región.

Por otro lado, se sabe que el noroeste de México recibió grandes cantidades de lluvia de 1977 a 1985 y que por el contrario ha sufrido severa sequía de 1986 a 1989. Durante este último periodo, la demanda del preciado líquido se incrementó considerablemente y los estragos provocados por la falta de lluvia fueron muy marcados en algunas regiones del noroeste de Baja California y Sonora. En los últimos años (1990 a 1992), coincidente con el evento ENOS del 91-92, las precipitaciones fueron muy abundantes, generando desbordamientos de presas y ríos e inundaciones en gran parte de México.

Agradecimientos

El Proyecto TRAVASON/SWAMP se llevó a cabo gracias al esfuerzo, interés y apoyo de muchas personas e instituciones: primeramente agradecemos a la Comisión Nacional del Agua su participación y apoyo en la toma de datos rutinarios y especiales; al CONACYT por su apoyo financiero en la etapa de investigación; al ITSON por su dedicación y esmero en el procesamiento de los datos. En particular agradecemos al personal de todas las instituciones de México y de Estados Unidos de América que participaron en la fase operativa del proyecto: a los Sres. Isaac Orozco, Carlos Arias, Aurelio Rivera, Fortino García, Antonio Bobadilla, Felipe de Jesús Figueroa de la CNA; a los Sres. Javier García, Fernando Miranda, Martín Barrón, Rogelio Hasimoto, Benjamín Martínez, Mauricio Alcántara y José Espinoza, del CICESE; a los Sres. Salvador Díaz, Christopher Watts y a su equipo de trabajo en el ITSON; a los Sres. José Meitín y Ken Howard y a todo el equipo de trabajo del NSSL de la NOAA.

REFERENCIAS

- Adang, C. J. and R. Gall, 1989. Structure and dynamics of the Arizona summer monsoon boundary. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 1423-38.
- Badan, A., C. E. Dorman, M. A. Merifield y C. D. Winant, 1991. The lower atmosphere over the Gulf of California. *J. Geophys. Res.*, **6**(C9), 877-896.
- Benton, G. S. y M. A. Estoque, 1954. Water vapor transfer over the North American continent. *J. Meteor.*, **1**, 462-477.
- Bryson, R. A. and W. P. Lowry, 1955. Synoptic climatology of the Arizona precipitation singularity. *Bull. Amer. Soc.*, **36**, 329-345.
- Carleton, A. M., D. A. Carpenter y P. J. Weser, 1990. Mechanisms of interannual variability of the southwest United States summer rainfall maximum. *J. Climate*, **3**, 999-1014.
- Chen, T. C., 1985. Global water vapor flux and maintenance during FGGE. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 1801-1819.
- Díaz, H. F., R. L. Holle and J. W. Thorn, Jr., 1985. Precipitation trends and water consumption related to population in the southwest U. S., 1930-1983. *J. Climate Appl. Meteor.*, **24**, 145-153.
- Douglas, A. V., 1982. The Mexican summer monsoon of 1982. Proc. of the 7th Annual Climate Diagnostics Workshop, NOAA, Washington, D. C. 70-79.
- Douglas, A. V., R. H. Blackmon y P. J. Englehart, 1987. Mesoscale convective complexes in extreme western Mexico: A regional response to broadscale drought. Proceedings of the 11th Annual Climate Diagnostics Workshop. U. S. Dept. of Commerce, NASA, 129-140.
- Douglas, M., R. Maddox, K. Howard y S. Reyes, 1993. The Mexican monsoon. *Journal of Climate*.
- Douglas, M., Ch. Watts y S. Reyes, 1992. Gulf of California surges and associated rainfall during the southwest North American monsoon. Symposium on Weather Forecasting, AMS, Jan. 5-10, Atlanta, GA.
- Gibson, H. M. y T. H. Vonder Haar, 1990. Cloud and convection frequencies over the southeast USA as related to small-scale geographic features. *Mon. Wea. Rev.*, **118**, 2215-2227.
- Hales, J. E., 1972. Surges of maritime tropical air northward over the Gulf of California. *Mon. Wea. Rev.*, **100**, 298-306.
- Hales, J. E., 1974. Southwestern United States summer monsoon source-Gulf of Mexico or Pacific ocean?. *J. Appl. Met.*, **13**, 331-340.
- Hasimoto, R. y S. Reyes, 1988. Transporte atmosférico de vapor de agua sobre la región de América tropical de mayo a septiembre de 1979. *Geof. Int.*, Vol. **27-2**, 199-229.
- Hastenrath, S., 1966. The flux of water vapor over the Caribbean Sea and the Gulf of Mexico. *J. Appl. Meteor.*, **5**, 778-788.
- Jáuregui, E. y F. Cruz, 1981. Algunos aspectos del clima de Sonora y Baja California. Equipatas y surgencias de humedad. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, **10**, 143-180.
- Klitch, M. A., J. F. Weaver, F. P. Kelly y T. H. Vonder Haar, 1985. Convective cloud climatologies constructed from satellite imagery. *Mon. Wea. Rev.*, **113**, 326-337.
- Latorre, D. y L. Penilla, 1988. Influencia de los huracanes en la precipitación de Baja California Sur. *Atmósfera*, **1**(2), 99-112.
- Maddox, R., 1990. The Southwest Area Monsoon Project: Operations Plan, NSSL/NOAA, Norman, OK, pp. 57.

- Maddox, R. y K. Howard, 1988. Mexican mesoscale convective systems: large-scale environmental conditions. Preprints, III Inter. American Congress of Meteorology, Mexico City, 395-399.
- Meitin, J., 1991. The Southwest Area Monsoon Project: Daily Operations Plan, NSSL/NOAA, Boulder, CO., pp. 75.
- Miranda, F., S. Reyes, J. G. Espinoza y J. García, 1991. Climatología de la región noroeste de México. Parte II: Temperatura: series de tiempo del valor mensual y estadísticas del año climatológico. Publicación EBA No. 8, Reporte Técnico. CICESE, Ensenada, B. C., México, 186 pp.
- Miranda, F. and S. Reyes, 1992. Atlas de las cantidades atmosféricas derivadas del análisis del NMC sobre América tropical durante el verano de 1990. Reporte Técnico CICESE, Ensenada, México.
- Mosiño, P. y E. García, 1974. The climate of Mexico. In world survey of climatology. H. E. Landsberg, Ed. Elsevier, Vol. 11, 420 pp.
- Namias, J., 1940. An introduction to the study of air mass and isentropic analysis. 5th editon, AMS, 232 pp.
- Namias, J., 1983. Short period climatic variations. Collected works. 1975-1982. Vol. III, University of California, San Diego, 393 pp.
- Peixoto, J. y A. Oort, 1992. The Physics of Climate. American Institute of Physics, New York, 520 pp.
- Pyke, C. B., 1972. Some meteorological aspects of the seasonal distribution of precipitation in the western US and Baja California. University of California, Water Resources Center. Contribution No. 139, 205 pp.
- Rasmusson, E., 1967. Atmospheric water vapor transport and the water balance of North America. *Mon. Wea. Rev.*, **95**, 403-426.
- Reed, R. J., 1978. The structure and behaviour of easterly waves over west Africa and the Atlantic. *Meteorology over the tropical oceans. Roy. Met. Soc.*, 278 pp.
- Reitan, C. H., 1957. The role of precipitable water in Arizona's summer rains. Tech. Rep. on Meteorology and Climatology of arid regions. No. 2, Inst of Atmos. Phys., University of Arizona, Tucson, 18 pp.
- Reyes, S. y D. Cadet, 1986. Atmospheric water vapor and surface flow patterns over the tropical Americas during May-August 1979. *Mon. Wea. Rev.*, **114**, 1114-1125.
- Reyes, S. y D. L. Cadet, 1988. The southwest branch of the North American monsoon during summer 1979. *Mon. Wea. Rev.*, **116**, 1175-1187.
- Reyes, S. y J. E. Janowiak, 1986. Global atmospheric water vapor patterns derived from the NMC final analysis, Technical Report, CAC-NMC-NWS-NOAA, Washington, D. C., USA, 62 pp.
- Reyes, S. y R. Maddox (Eds.), 1990. I Reunión Regional México-EUA sobre Estudios del balance de Agua. Publicación EBA No. 5. 18-20 octubre 1989, Ensenada, B. C., México. 102 pp.
- Reyes, S., F. Miranda y J. García, 1990b. Climatología de la región noroeste de México. Parte I: Precipitación, series de tiempo del valor total mensual y estadísticas del año climatológico. Publicación EBA No. 3, Reporte Técnico. CICESE, Ensenada, B. C., México, 170 pp.
- Reyes, S., F. Miranda, J. G. Espinoza, J. García y Ch. Watts, 1991. Datos de superficie de la

- red del noroeste de México (BC, BCS, Sonora, Sinaloa y Durango) Parte I. Series de tiempo de valores diarios de temperatura y precipitación. Publicación EBA No. 6, Reporte Técnico, CICESE, Ensenada, B. C., México, 181 pp.
- Reyes, S., L. A. Palacios, M. W. Douglas y R. Maddox, 1990a. Transporte atmosférico de vapor de agua y su relación con el campo de precipitación de verano en el desierto sonorense, TRAVASON, verano 1990: Plan de operaciones. Publicación EBA No. 2, Reporte Técnico. CICESE, Ensenada, B. C., México, 50 pp.
- Reyes, S., y P. Rojo, 1985. Variabilidad de la precipitación en la península de Baja California. *Rev. Geof.*, **22/23**, 11-128.
- Reyes, S., D. Villalobos, R. Hasimoto y J. García, 1985. Analysis of the Level III-b FGGE data set over the tropical Americas. Technical Report. CICESE, Ensenada, B. C., México, 65 pp.
- Roden, G. I., 1958. Oceanographic and meteorological aspects of the Gulf of California. *Pacific Science*, **12**, 21-45.
- Salinas, C. A., A. Leyva, D. Lluch B., E. Díaz, 1990. Distribución geográfica y variabilidad climática de los regímenes pluviométricos en BCS, México. *Atmósfera*, **3(3)**, 217-237.
- Schmidt, R. H., 1989. The arid zones of Mexico: Climatic extremes and conceptualization of the Sonoran desert. *Journal of Arid Environments*, **16**, 241-256.
- Sellers, W. D. y R. H. Hill, 1974. Arizona climate, 1931-1972, University of Arizona Press, Tucson, 50 pp.
- Tang, M. y E. R. Reiter, 1984. Plateau monsoons of the Northern Hemisphere: A comparison between North America and Tibet. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, 617-637.
- Tuller, S. E., 1968. World distribution of mean monthly and annual precipitable water. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 785-797.
- Webb, R. H. y J. L. Betancourt, 1990. Climatic variability and flood frequency of the Santa Cruz river, Arizona. US Geological Survey, Openfile Report 90-553, 69 pp.