

DIAGNÓSTICO DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA SOBRE COLOMBIA Y EL OCÉANO PACÍFICO ORIENTAL DURANTE 1998-2002

Manuel Zuluaga y Germán Poveda

Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín

gpoveda@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 06 de Julio de 2004 / Aceptación: 03 de Septiembre de 2004 / Recibida versión final: 17 de Septiembre de 2004

RESUMEN

Los Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) se desarrollan frecuentemente sobre la parte más oriental del océano Pacífico y en diferentes regiones del trópico Americano. Su génesis, dinámica y ambientes atmosféricos no son bien conocidos. Se usó información de la Misión para la Medición de la Lluvia Tropical (TRMM), de Imágenes de Microondas y Radar de Precipitación (TMI y PR), para efectuar una clasificación cuantitativa de los sistemas de tormentas con y sin la presencia de SCM. Tal clasificación hizo posible extraer diferentes rasgos asociados a la precipitación de la convección en la mesoescala y su ciclo diurno durante el periodo 1998-2002. Se confirma que los SCM representan en volumen, alrededor del 70% de total de la precipitación clasificada. Se han encontrado las diferencias a lo largo del año y para el ciclo diurno entre la precipitación sobre la región oceánica y la precipitación ocurrida sobre tierra en Colombia. El ciclo diurno de la precipitación presenta sobre tierra un fuerte pico máximo en horas de la tarde, contrastando con un pico máximo no tan marcado sobre océano en horas de la madrugada. Todos estos resultados son consistentes con diferentes estudios relacionados usando tanto mediciones satelitales, como mediciones en tierra.

PALABRAS CLAVES: Precipitación tropical, Colombia, Océano Pacífico, Complejos Convectivos de Mesoescala, Satélite TRMM.

ABSTRACT

Mesoscale Convective Systems (MCS) frequently develop over the easternmost fringe of the tropical Pacific Ocean off the coast of Colombia and various regions of the country. Their genesis, dynamics and environmental conditions are not well known. We used information of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), Microwave Imager and Precipitation Radar (TMI and PR), to develop a quantitative classification of those MCS. Such classification made it possible to extract salient features related with mesoscale convection and its diurnal cycle during the 1998-2002 period. Results confirm that MCS represent about 70% of the total classified precipitation. Differences between rainfall over both the oceanic region and land-based rainfall over Colombia have been found in the seasonal and diurnal cycles. The diurnal cycle of rainfall over land exhibits a strong afternoon maximum, in contrast to the ocean region that's an early morning maximum occurs over the study region. All of this results are according with related studies using both satellite and surface data.

KEY WORDS: Tropical precipitation, Colombia, Pacific Ocean, Mesoscale Convective Systems, TRMM satellite.

1. INTRODUCCIÓN

La precipitación tropical es uno de los mecanismos más importantes en el ciclo hidrológico global. El entendimiento de la variabilidad de la lluvia tropical a escalas espacio-temporales de alta resolución, es una de las preguntas más relevantes de la hidroclimatología global. La respuesta a la pregunta no es sencilla, debido a la complejidad de los procesos que intervienen en la dinámica de la lluvia tropical, incluyendo una muy alta variabilidad espacio-temporal del fenómeno. Ese entendimiento básico es necesario desde el punto de vista científico, y por las múltiples aplicaciones en temas relacionados con el aprovechamiento de recursos hídricos, prevención de desastres, aeronáutica, agricultura, medio ambiente, biodiversidad, y otros. Obviamente esta ciencia requiere de información de precipitación a escalas grandes con resolución espacial muy fina. Este requisito lo cumple la información que recogen los satélites ambientales y meteorológicos. En este trabajo se usará la información del proyecto "Misión para la Medición de Lluvia Tropical", o TRMM por sus siglas en inglés (Kummerow et al., 1998), mediante la cual es posible disponer de campos espaciales y temporales de lluvia oceánica y terrestre sobre el trópico a una resolución espacial en franjas de 760 km de ancho y resolución de píxel de 4,6 km y que obtiene datos en diferentes horas del día de forma continua desde diciembre de 1997.

Existen diagnósticos muy parciales sobre la variabilidad espacio-temporal de la lluvia en Colombia. A escala anual se conoce el efecto del paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), asociado a los ciclos anual y semianual de precipitación (ver Mejía et al., 1999, Mesa et al., 2000, Poveda, 2004a). Se conocen los principales efectos de las dos fases del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO); (Poveda et al., 2001b, Waylen y Poveda, 2002), así como el efecto del paso de ondas tropicales del este, del paso de huracanes sobre el Caribe y el Pacífico nororiental, y principales rasgos dominantes del ciclo diurno de la precipitación (Velasco y Fritsch, 1987; Mesa et al., 1997; Poveda y Mesa, 1997; Poveda, 1998; Poveda y Mesa, 2000; Poveda et al., 2001a; Mapes et al., 2003, Poveda, 2004b). Por sus características geográficas y topográficas, Colombia y sus alrededores experimentan una alta tasa de precipitación con origen en mecanismos de convección profunda.

Sobre la costa Pacífica, la convección profunda se organiza en Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) (Velasco y Fritsch, 1987), es decir en conjuntos

organizados de tormentas que producen precipitación, con escalas espaciales del orden de ~100 km en la escala horizontal. Los SCM están en interacción dinámica y termodinámica con el Chorro del Chocó que penetra desde el Océano Pacífico al interior de Colombia (Poveda, 1998, Poveda y Mesa 1999, 2000). Este trabajo estudia la variabilidad espacio-temporal anual y diurna de la precipitación en regiones continentales y oceánicas (del Pacífico oriental) sobre la geografía de Colombia. Para ello se recopila y se procesa información de satélite de la Misión TRMM, y se realiza un análisis sobre la distribución espacial, análisis de frecuencia y ciclo diurno de la precipitación originada por los SCM en una región que contiene el territorio colombiano y gran parte de los mares circundantes.

2. INFORMACIÓN UTILIZADA

Este trabajo utiliza información de satélite y de radar del proyecto Misión para la Medición de Lluvia Tropical (TRMM). Se trata de una misión conjunta entre la Agencia espacial del Japón (National Space Development Agency, NASDA) y la de Estados Unidos(National Aeronautics and Space Administration, NASA). Esta misión está registrando información desde el mes de diciembre de 1997, cuando fue lanzada, hasta el presente. Los objetivos principales de la misión TRMM es medir la lluvia y los intercambios de energía (por ejemplo, calor latente de condensación) de las regiones tropicales y subtropicales del planeta. Los instrumentos principales abordo del satélite TRMM son un Sensor de Microondas (TMI), un radar de precipitación (PR) y un sistema de radiometría visible e infrarroja (VIRS), como se describe en la Tabla 1. La descripción completa de estos aparatos puede verse en Kummerow et al. (1998). La combinación de estos sensores de radiometría activa y pasiva proporcionan diferente clase de información tridimensional sobre la distribución de la precipitación y la transferencia de calor que ocurre en los trópicos. Las órbitas de la misión TRMM son circulares y no están sincronizadas con la órbita del sol, en una altitud de 350 km y con inclinación de 35° con el ecuador terrestre. Estas órbitas permiten un extensivo cubrimiento en los trópicos (entre las latitudes de 35° S y 35° N) y hacen que cada punto de la tierra sobre este rango, sea cubierto a una hora local diferente cada día. Este tipo de muestreo permite el análisis del ciclo diurno de la precipitación.

Característica	TMI	Sensor PR
Frecuencia/Longitud de onda	10.65, 19.35, 37.0, 85.5 GHz polarización dual; 22.23 a 21.3 GHz polarización vertical	13.8 GHz polarización horizontal
Resolución espacial	Rangos desde 5 km (85.5 GHz) a 45 km (10.65 GHz)	4.3 km en el nadir
Ancho del Barrido	760 km	220 km

TABLA 1. Características de los sensores a bordo del satélite TRMM.

La emisividad en la banda de las microondas del espectro electromagnético, producida por las corrientes ascendentes dentro de sistemas de nubes, se puede relacionar directamente con los tipos, distribución del tamaño y densidad de las gotas o partículas de hielo presentes en la atmósfera. La clase de datos que se utilizan en este trabajo son los que proporcionan los sensores TMI y PR que permiten caracterizar el tipo de lluvia, tipo de nube, altura de la cima de las nubes, cantidades volumétricas de lluvia, etc., con el propósito de clasificar los sistemas de tormentas. En especial se utilizaron los algoritmos 1B11 y 2A25. El primero proporciona datos de Temperatura de brillo del sensor TMI para las diferentes longitudes de onda y resoluciones espaciales, a diferentes horas del día y desde 1998. El segundo proporciona reflectividad de radar e intensidad de precipitación del sensor PR, entre otras variables, en superficie y en 80 niveles de la atmósfera (ver Tabla 1).

3. CLASIFICACIÓN DE EVENTOS DE PRECIPITACIÓN

La clasificación de eventos de precipitación a partir de sensores remotos requiere tener en cuenta los instrumentos de observación y cuantificación de tal precipitación. Se ha observado extensamente que la convección tropical tiende a desarrollarse por grupos o racimos, organizándose en ciertos casos en SCM que están compuestos por celdas convectivas múltiples y profundas distribuidas dentro de una región espacial determinada (Velasco y Fritsch, 1987; Mapes et al., 2003). Por ejemplo, Maddox (1980) usó información de satélite en la banda infrarroja sobre una porción central de los Estados Unidos, para definir Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM) que son una subclasiación de los SCM, en relación a sus características espaciales y temporales. Estos CCM son conjuntos de tormentas bien

establecidas, con temperaturas de brillo (T_b) menores o iguales a -32°C sobre un área de al menos $10,000 \text{ km}^2$ y T_b menores o iguales a -52°C sobre $50,000 \text{ km}^2$. Velasco y Fritsch (1987) usaron la definición de Maddox para clasificar CCM a partir de imágenes IR sobre varias regiones de América. Sin embargo, las mediciones de temperaturas en el tope de las nubes, basadas en sensores infrarrojos, no están bien relacionadas con los procesos físicos que ocurren dentro de los sistemas de tormentas (Nesbitt et al. 2000). Houze (1993) define los SCM como “*sistemas de nubes que ocurren en conexión con un conjunto de tormentas y que producen áreas de precipitación contiguas del orden de 100 km o más en la escala horizontal y en al menos una dirección*”.

Nuestro propósito es clasificar los eventos convectivos usando la clasificación propuesta por Nesbitt et al. (2000). Se diferencian los eventos convectivos entre aquellos que no conforman un Sistema Convectivo de Mesoescala (sin SCM) y aquellos que sí lo conforman (con SCM). Esta clasificación está basada en criterios de áreas de cubrimiento por debajo de un umbral de brillo e intensidad de precipitación, a partir de los datos del proyecto TRMM. El uso de las imágenes de microondas se justifica debido a que las capas de cirrus que se forman sobre los sistemas de convección profunda, son opacas a los sensores en los rangos Infra-rojo (IR) y visible, y por lo tanto ocultan los procesos que ocurren debajo de estas capas (Mapes y Houze, 1993). En cambio, la longitud de onda en la banda de las microondas, permite que estas penetren más profundo en los sistemas convectivos organizados que las longitudes de onda en la banda del IR. Es por esto que Nesbitt et al. (2000) sustentan el uso de las imágenes de microondas (MI), específicamente alrededor de 86 GHz, para realizar comparaciones cuantitativas entre diferentes niveles de convección organizada. Tales autores utilizaron una clasificación de fenómenos convectivos aplicando algoritmos con criterios

de tamaño e intensidad de precipitación a partir de los datos del Spatial Sensor Microwave/Imager (SSM/I) y TMI, utilizando valores de brillo mínimo que permitían distinguir fácilmente los fenómenos convectivos ocurridos sobre tierra y sobre océano. Así, a partir de los datos que proporciona la misión TRMM, en particular la información de TMI (1B11) y PR (2A25), es posible encontrar relaciones de intensidad de convección entre las propiedades asociadas a la precipitación y la contribución de la lámina de precipitación de acuerdo a su tipo, ya sea convectiva o estratiforme.

Para comparar las características de convección organizada en los sistemas ocurridos sobre océano y sobre tierra, es necesario distinguir en estas frecuencias (85GHz), la temperatura de brillo emitida por las partículas frías en las nubes de aquellas que son emitidas por las superficies frías de los océanos, montañas con nevados y páramos y hasta lagos fríos (Spencer et al., 1989). Para ello se utiliza la temperatura de brillo corregida por polarización, *PCT*. Al corregir este tipo de información de los datos atmosféricos, las mediciones que proporciona el sensor TMI dan información de los rasgos de lluvia correspondientes a los procesos internos de las nubes y las características microfísicas de los sistemas observados. El *PCT* se calcula con la temperatura de brillo de polarización horizontal (T_{bh}) y con la temperatura de brillo de polarización vertical (T_{bv}) del TMI a 85GHz como:

$$PCT = \frac{\beta T_{bh} - T_{bv}}{\beta - 1}$$

donde el parámetro β es igual a 0.45 para llevar los valores de *PCT* entre 275 y 290K (Nesbitt et al., 2000).

Luego de remover estos efectos, es posible clasificar los dos conjuntos de sistemas de convección organizada, por su tamaño y temperatura de brillo. El primero es el que se denominará “Sistemas sin Complejos Convectivos de Mesoescala” (sin SCM), los cuales estarán definidos por eventos con tamaños mayores que 75 km^2 y contienen píxeles contiguos con valores de $PCT = 250\text{K}$. El segundo conjunto se denominará “Sistemas con Complejos Convectivos de Mesoescala” (con SCM), los cuales están definidos por tamaños mayores de 2000 km^2 , píxeles contiguos con valores de $PCT = 250\text{K}$ y que contienen dentro de estos, por lo menos 185 km^2 con valores de $PCT = 225\text{K}$ y con lluvia asociada en el PR (reflejividad cerca de la superficie = 20 dBZ). Aquí es

necesario anotar que, dada la órbita del satélite TRMM, no es posible asociar una duración característica de estos sistemas convectivos.

La información original de la misión TRMM contiene la información extractada para la región de estudio, de los archivos originales de 1B11 y 2A25 obtenidos del Sistema de Información y Datos Científicos de la TRMM (TRMM Science Data and Information System, TSDIS Sitio web <http://tsdis.gsfc.nasa.gov/>). Los archivos consisten en información instantánea de temperatura de brillo (1B11) y reflectividad e intensidad de lluvia cerca de la superficie (2A25), para diferentes horas del día sobre la región mostrada en la Figura 1. Debido a que la órbita del satélite no es sincrónica con el sol, la información se almacena como puntos para cada píxel de los sensores TMI y PR. Esta información debe ser interpolada para obtener una malla con información continua en el espacio, utilizando una estrategia determinística basada en el vecino más cercano (Triangulación). Este procedimiento proporciona mapas raster de cada variable interpolada a una misma resolución ($4.6 \times 4.6 \text{ km}$).

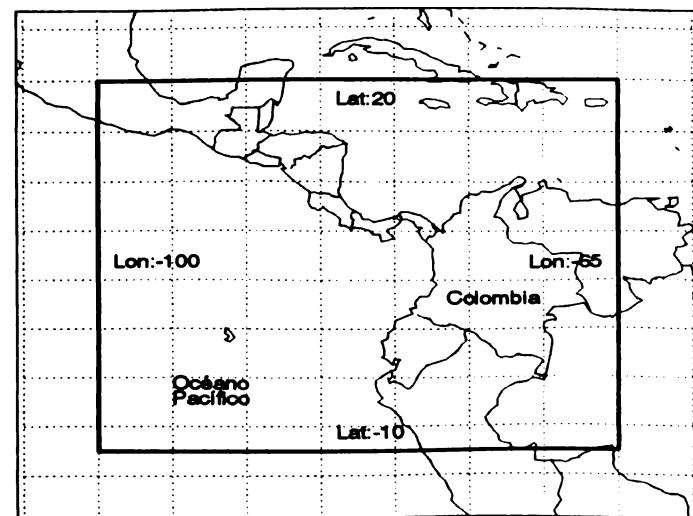


FIGURA 1. Región de estudio

4. RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN

Utilizando los criterios anteriores, se clasificaron los eventos de precipitación ocurridos durante el período 1998-2002. Durante este período se presentaron un total de 223,547 eventos de precipitación y de estos, 22,155 eventos con SCM (9.9%). La Tabla 2 presenta los resultados para cada uno de los años del período estudiado, discretizando los eventos ocurridos sobre el

oceano y sobre el continente. Es de anotar que el año 1998 (Figura 2 A) presentó el valor más alto de ocurrencia de eventos, el cual se puede explicar dado que durante el segundo semestre se presentó el fenómeno de La Niña, que causa una intensificación de las lluvias en la región. Otro resultado destacable es la presencia de una mayor cantidad de eventos sobre océano que sobre tierra en el año de 1998, caso contrario a lo que sucede para el resto del período (1999 a 2002), en el cual se presenta una

mayor cantidad de eventos sobre tierra que sobre océano. Esta misma característica se presenta para los eventos con SCM (ver Figura 2 B). Como se mencionó, estos resultados pueden estar influenciados por la presencia de ambas fases del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO) el cual reportó un pico fuerte en su fase cálida (El Niño) entre 1997-1998 y su fase fría (La Niña) entre 1998-2000.

TABLA 2. Resultados anuales de la clasificación de los eventos de tormentas.

	1998		1999		2000		2001		2002	
	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%	No.	%
Total Eventos	48799	100.0	46036	100.0	42707	100.0	41533	100	44472	100.0
Eventos Océano	25286	51.8	19933	43.3	18101	42.4	17460	42.0	18596	41.8
Eventos Tierra	23513	48.2	26103	56.7	24606	57.6	24073	58.0	25876	58.2
Total SCM	4929	10.1	4456	9.7	4112	9.6	4135	10.0	4523	10.2
SCM Océano	2761	56.0	2043	45.8	1889	45.9	1873	45.3	2058	45.5
SCM Tierra	2168	44.0	2413	54.2	2223	54.1	2262	54.7	2465	54.5
Vol. Lluvia SCM	-	70.7	-	68.2	-	67.8	-	69.2	-	69.7

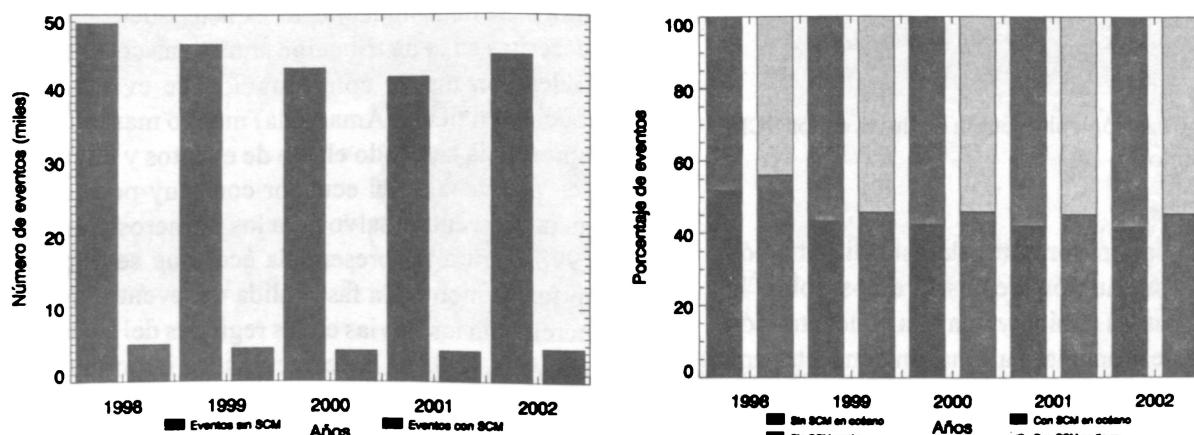


FIGURA 2. A) Número total de eventos clasificados en cada año. **B)** Porcentaje de ocurrencia de eventos en tierra y en océano.

Utilizando la información de intensidad de lluvia cerca de la superficie, obtenida del sensor PR (2A25), se estimó la contribución de lluvia de cada evento con SCM al total de los eventos de precipitación. La cantidad volumétrica de lluvia aportada en promedio por todos los SCM es del 69%, un valor bastante alto si se tiene en cuenta que apenas el 10% aproximadamente del total de eventos contienen SCM. Esto resultado muestra la importancia que presentan las grandes áreas lluviosas con Sistemas Convectivos de Mesoescala, para el entendimiento de los fenómenos que producen la precipitación en los trópicos. La contribución volumétricas de lluvia se puede ver de la Figura 3,

presentando proporciones muy similares, salvo nuevamente el año de 1998.

5. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL ANUAL DE EVENTOS

Los resultados del análisis espacial de la distribución de eventos sobre la región de estudio se muestran en las Figura 4 y Figura 5, para los todos los eventos y eventos con SCM, durante los años del periodo estudiado. Allí se observa la gran cantidad de eventos ocurridos en una banda entre 4°N y 12°N, en la región Amazónica y en

una mayor proporción, en la región occidental Colombiana, en particular sobre la costa Pacífica, y sobre la concavidad panameña. Esta zona ha sido catalogada una de las regiones más lluviosas del mundo (Eslava, 1994; Mesa et al., 1997; Poveda y Mesa, 2000) debido a su ubicación en el centro de la migración de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y la influencia de brisas locales (Poveda y Mesa, 2000; Mapes et al., 2003).

concentración uniforme de eventos con SCM, disminuyendo en frecuencia en la zona oceánica a la misma latitud. Se repite la zona de baja concentración de eventos en el océano Pacífico cercana a El Salvador y Nicaragua.

6. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL MENSUAL DE EVENTOS

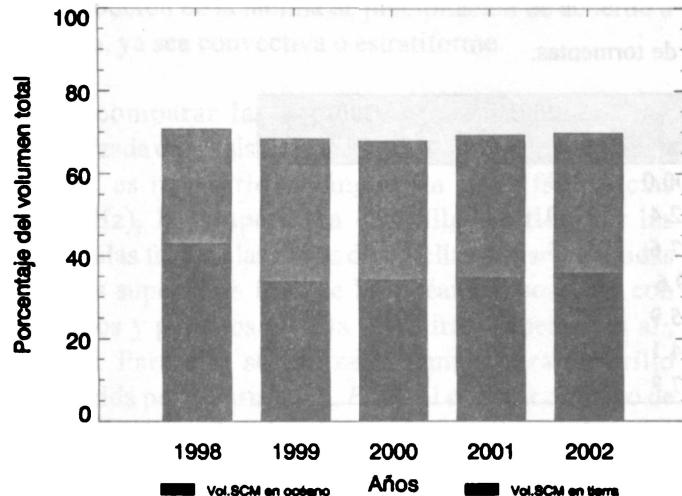


FIGURA 3. Contribución volumétrica de lluvia de los SCM al total de los eventos

Otras características importantes de esta distribución espacial es la disminución de los eventos sobre la cordillera de los Andes debido y una alta concentración en laderas y pies de montaña. La Amazonía muestra una distribución mucho más uniforme en tierra, pero mucho más dispersa en la región oceánica entre -10°S y 3°N , esta última zona, donde se presenta la menor concentración de eventos, salvo el año de 1998. Además se notan zonas de baja densidad de eventos, como la región norte de Colombia y Venezuela, las cordilleras de los Andes y una zona en el océano pacífico cercana a El Salvador y Nicaragua.

La Figura 5 muestra la distribución espacial de los eventos con SCM. Estas distribuciones son muy similares a las presentadas anteriormente en las zonas de alta y baja densidad de eventos. Se nota una alta concentración de eventos al este del océano Pacífico y la costa Colombiana, concordando con los resultados presentados por (Velasco y Fritsch, 1987). Al igual que los eventos sin SCM, en la región Amazónica se presenta una

La Figura 6 presenta la distribución mensual de eventos durante el año 2000. Se observa una distribución espacial de los eventos concordante con la migración meridional de la ZCIT, que se presenta en el continente en dirección noroeste-sureste. Se observa una concentración de eventos más al sur (norte), cuando la ZCIT se encuentra en el sur (norte), correspondiente al verano austral (boreal). Según Hastenrath (2002) el ciclo anual de la circulación superficial es caracterizada por una ZCIT cercana al ecuador en Febrero, un cambio norte-sur del desplazamiento en Junio-Agosto y una posición más al norte en Septiembre, características que se observan en la Figura 6. Se notan igualmente, características similares a las descritas en la distribución anual, una cordillera de los Andes con menor concentración de eventos, una distribución en tierra (Amazonía) mucho más uniforme y con presencia casi todo el año de eventos y un océano pacífico por debajo del ecuador con muy poca o nula presencia de eventos, salvo para los primeros meses del año 1998 (figura no presentada acá) que se relaciona con un fuerte pico en la fase cálida del evento ENOS y que incrementa las lluvias en las regiones del Ecuador y Perú (Poveda, 1998). Una característica importante que se presenta en estas distribuciones espaciales es la zona oceánica cercana a El Salvador y Nicaragua que presenta en los meses de Mayo a Septiembre, una baja densidad de eventos en una región circular rodeada por zonas de mayor cantidad de eventos de tormenta. La distribución mensual para los demás años del período de estudio es muy similar a la mostrada en la Figura 6. La Figura 7, presenta la distribución mensual de eventos con SCM para el 2000. Se nota una distribución similar a la presentada para todos los eventos, con características tales como la migración de la ZCIT, las bajas densidades en el Océano Pacífico al sur del ecuador (lo cual no ocurre en 1998), las concentraciones más uniformes en tierra y las altas concentraciones de eventos en la costa colombiana y la concavidad panameña.

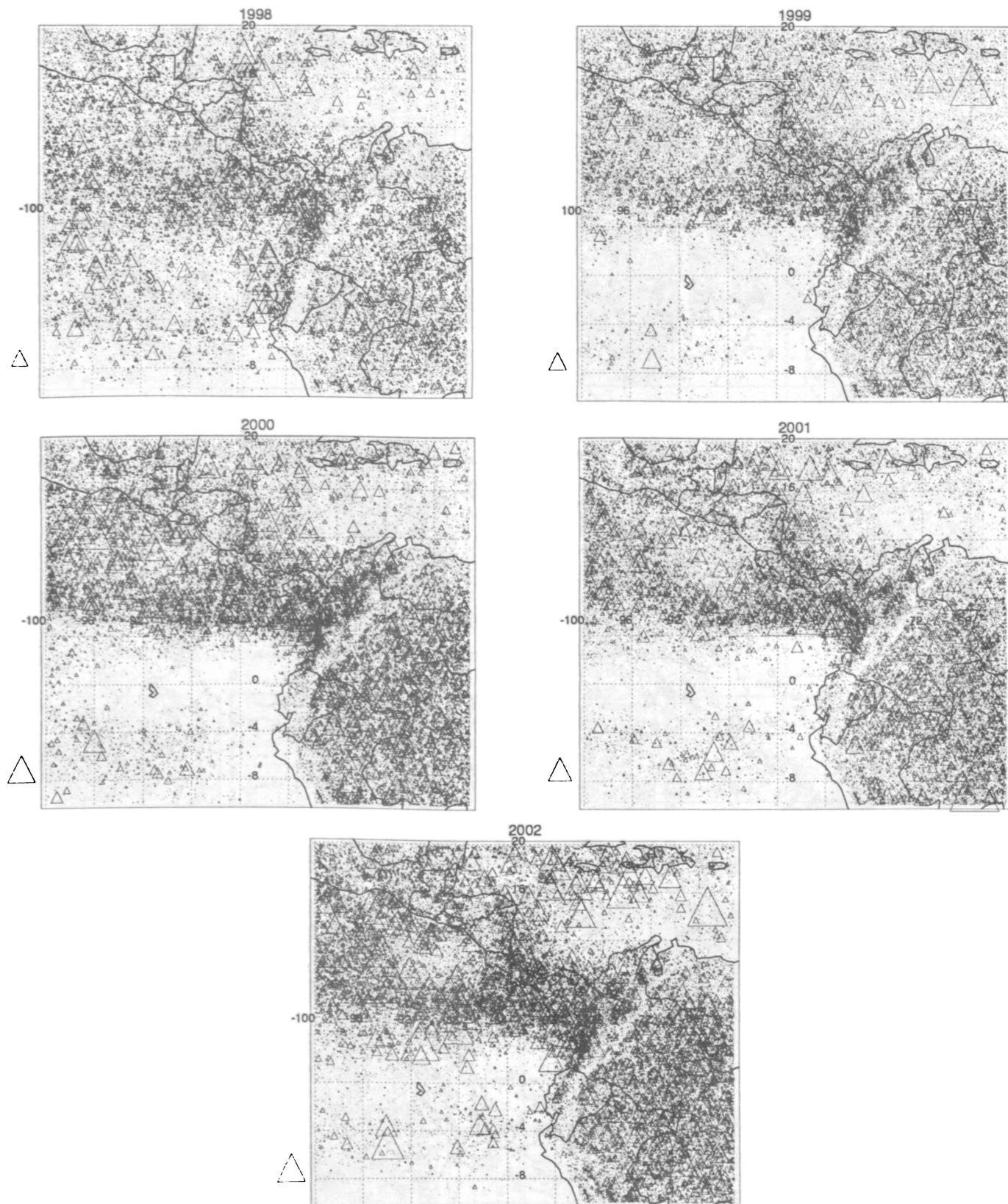


FIGURA 4. Distribución espacial de todos los eventos de tormenta clasificados para los diferentes años del período de estudio. El centro de cada triángulo está ubicado en el centroide geométrico de cada evento y su tamaño se relaciona con el área del evento. Además el triángulo en la esquina inferior izquierda de cada figura representa un evento con área de $50,000 \text{ km}^2$.

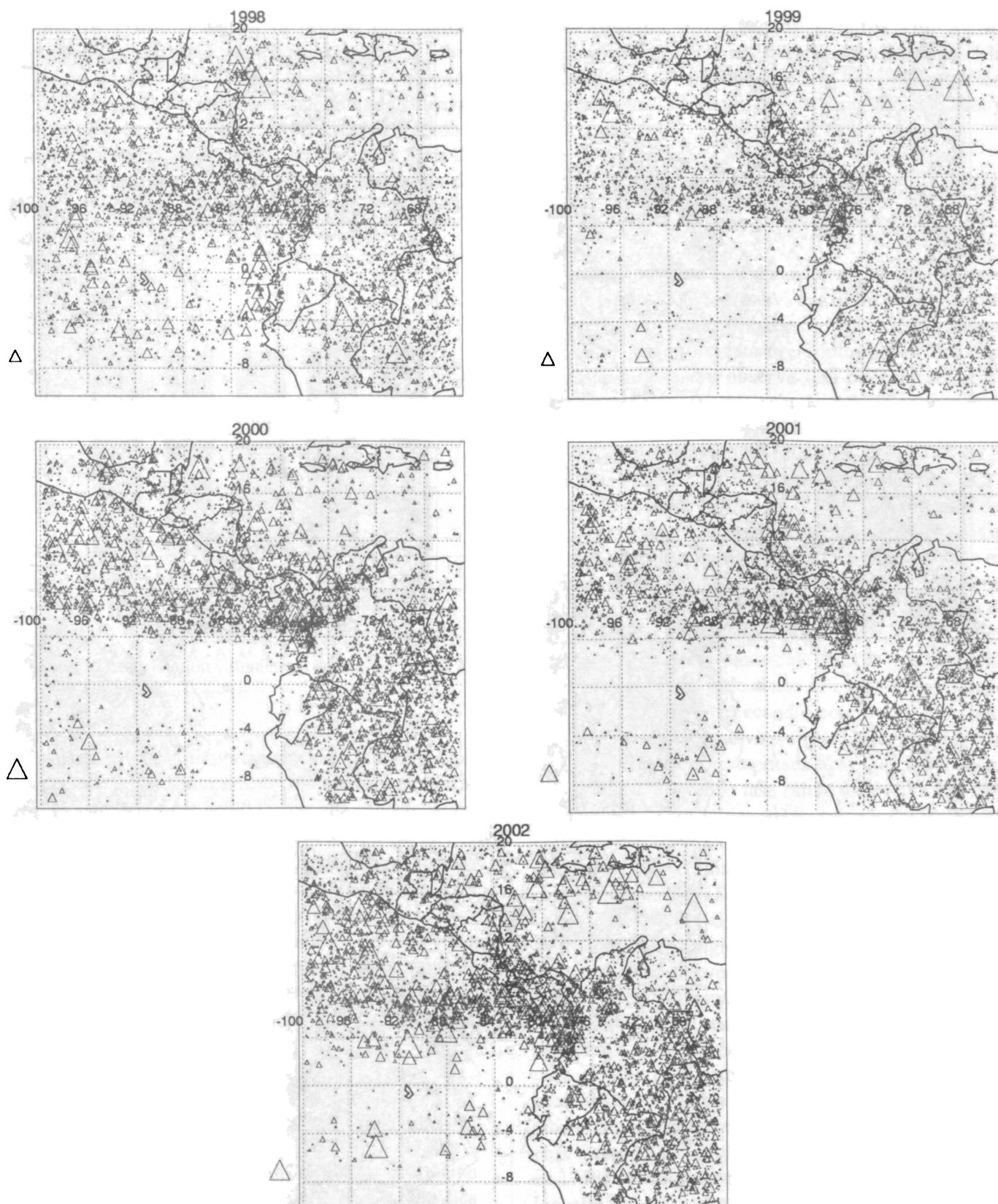


FIGURA 5. Distribución espacial de los eventos clasificados con SCM para los diferentes años del período de estudio. El centro de cada triángulo está ubicado en el centroide geométrico de cada evento y su tamaño se relaciona con el área del evento. Además el triángulo en la esquina inferior izquierda de cada figura representa un evento con área de 50,000 km².

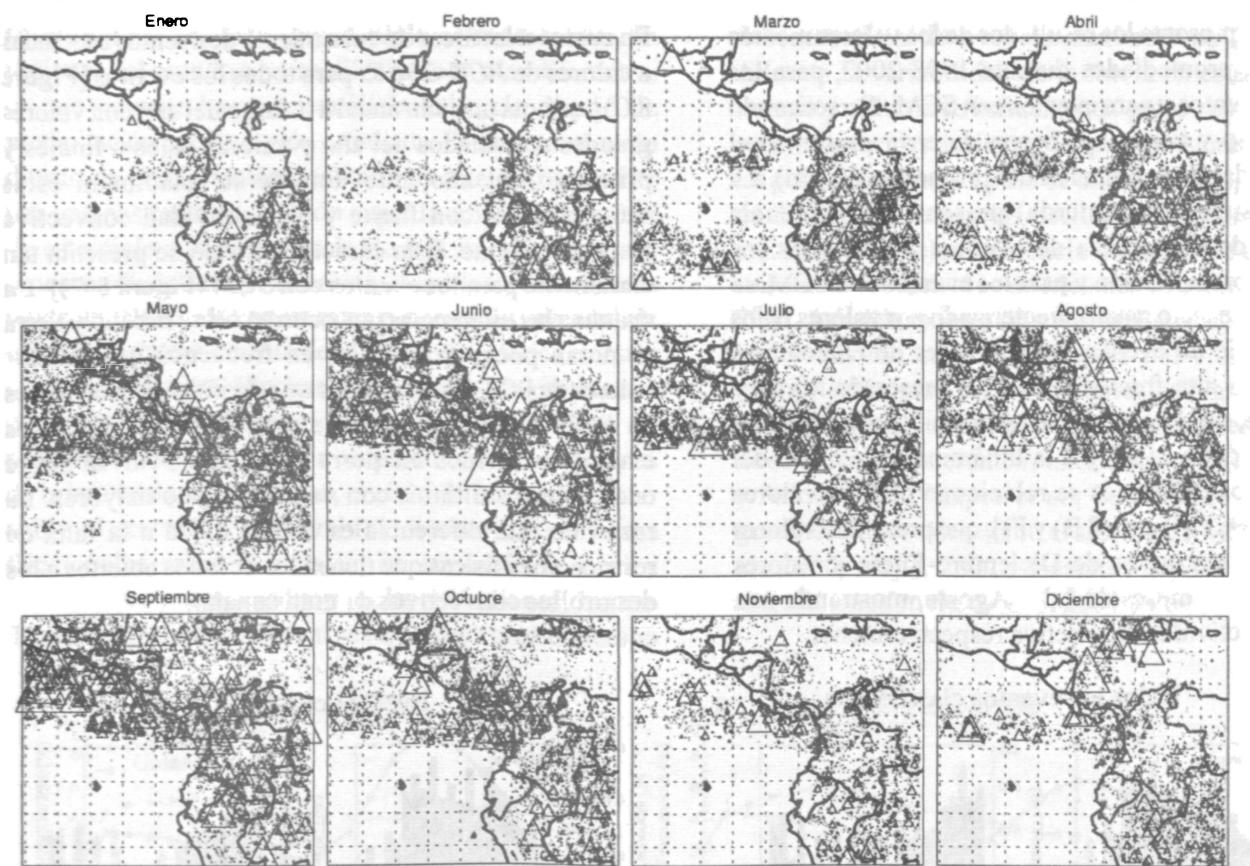


FIGURA 6. Distribución espacial mensual de todos los eventos para el año 2000.

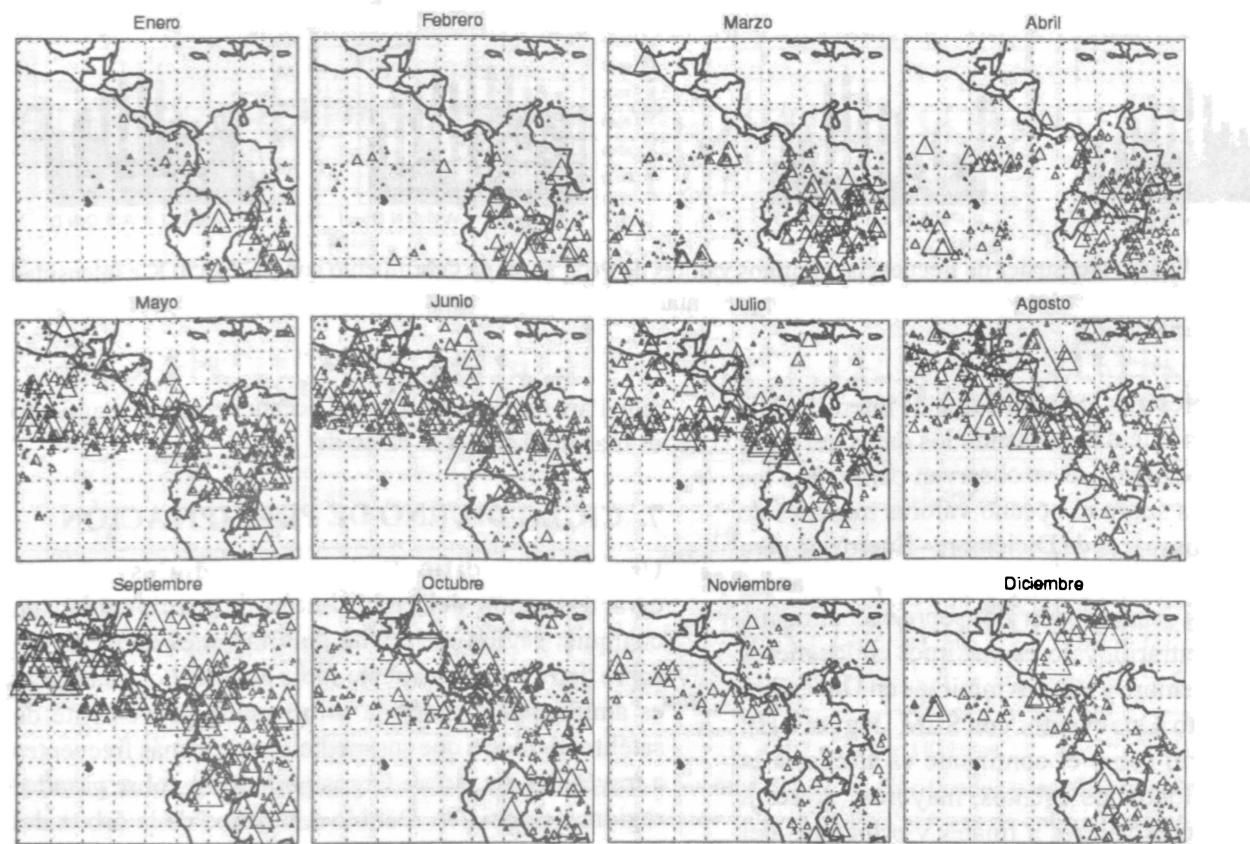


FIGURA 7. Distribución espacial mensual de los eventos clasificados con SCM para el año 2000.

La Figura 8 presenta los resultados de los valores medios mensuales, promediados durante 1998-2002, para los todos los eventos y para eventos con SCM, discretizando entre océano y tierra. Las barras de error presentan el error estándar de estimación del promedio. ($\pm 6/\sqrt{n}$). La figura 8 (superior izquierda) presenta la frecuencia promedio de ocurrencia de eventos. Para todos los eventos de precipitación y para los eventos con SCM, se nota un fuerte ciclo anual caracterizado por valores bajos de ocurrencia de eventos en los meses de Diciembre-Enero y una alta frecuencia en los meses de Mayo y Septiembre, característica que es atribuible a la variación meridional de la ZCIT y a la dinámica del Chorro del Chocó. Estos resultados se relacionan con los valores de mínimo PCT [Figura 8 B) y F)], que presentan valores mayores en los meses de Diciembre-Enero y valores menores en los meses de Julio-Agosto, mostrando una baja y alta actividad convectiva respectivamente.

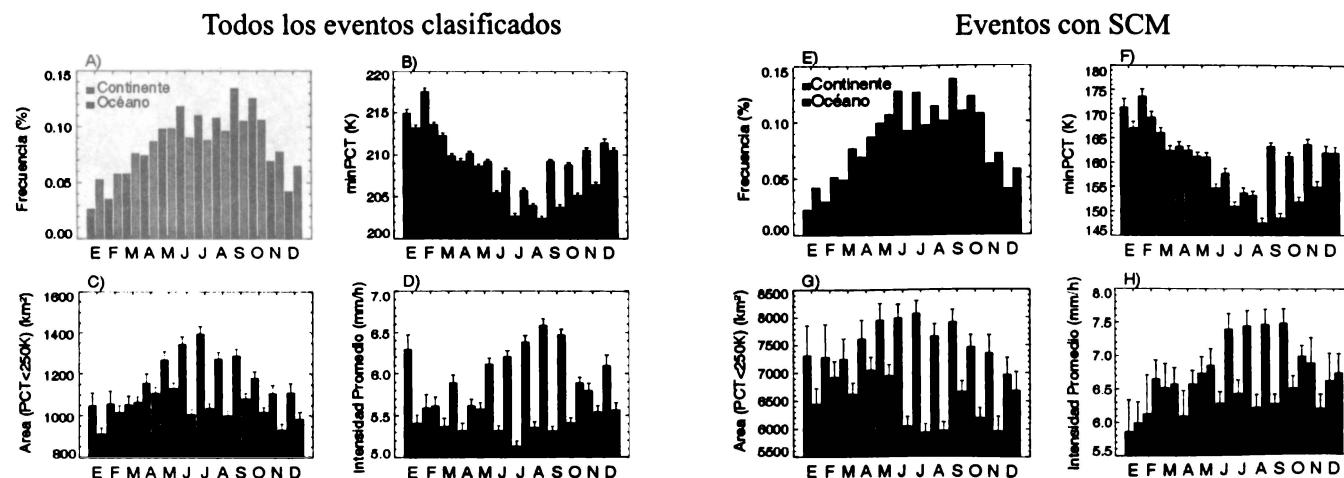
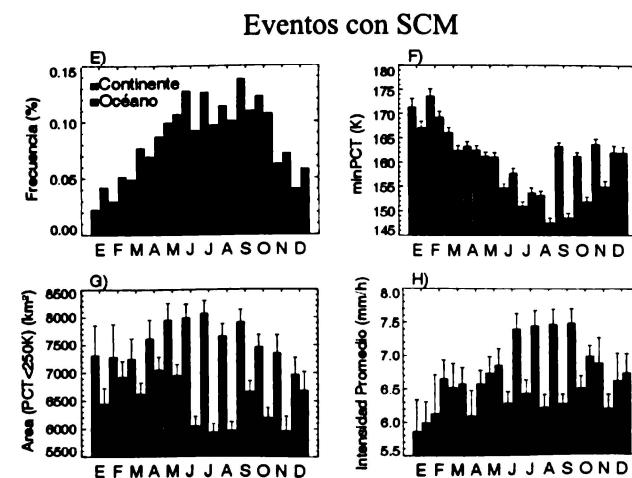


FIGURA 8. Estadísticas mensuales de frecuencia, mínimos valores de PCT, áreas de cubrimiento con $PCT<250$ K e intensidad promedio, para todos los eventos y eventos con SCM. Se presentan además las barras de error en la estimación de la media de cada una de las variables.

La Figura 8 D) presenta los promedios de intensidad de todos los eventos calculados usando los datos del radar PR (2A25). En esta gráfica se observan para todos los eventos ocurridos sobre el océano valores mayores de intensidad para los meses de Diciembre - Enero que para los meses de Julio - Agosto, sin presentar un ciclo anual marcado. Para los eventos ocurridos sobre el continente, se presenta lo contrario, valores máximos en los meses de Agosto - Septiembre y valores mínimos en Diciembre - Enero. En cuanto a los eventos con SCM [Figura 8 H], el comportamiento sobre el continente es similar a la clasificación de todos los eventos, mayores valores a mediados y menores valores a finales y principios del

En cuanto a las áreas de cubrimiento de eventos asociadas a valores de $PCT<250$ K para todos los eventos [Figura 8 C)], se nota un ciclo anual a lo largo del año con valores grandes a mediados del año y valores bajos a finales y principio del año, nuevamente se relacionan estas características con fuerte y baja actividad convectiva respectivamente. Esta característica no se presenta tan claramente para los eventos con SCM [Figura 8 G)]. En cuanto a las diferencias que ocurren sobre océano y tierra se notan pocas diferencias en frecuencia y mínimos valores de PCT. Para las áreas de cubrimiento con valores de $PCT<250$ K se nota una gran diferencia entre los eventos ocurridos en tierra y los que ocurren sobre océano, estos últimos con valores mucho mayores. La razón de esta diferencia es debida quizás a la falta de restricciones físicas que tienen los océanos abiertos a los desarrollos convectivos de gran tamaño.



año. Para los eventos sobre el océano, el comportamiento es más uniforme a lo largo del año.

7. CICLO DIURNO DE PRECIPITACIÓN

Una de las dificultades primordiales en una caracterización del ciclo diurno de precipitación en cualquier región es la falta de estaciones de medición sobre tierra y especialmente sobre océano. Por esta razón, es ampliamente usada la información proveniente de satélites debido a que sus mediciones son más frecuentes a través del día, sobre largos períodos y sobre grandes regiones espaciales. Debido a la forma de la órbita del

satélite TRMM, este puede realizar mediciones en regiones del mundo a horas diferentes en días diferentes, lo que permite hacer un análisis del ciclo diurno de precipitación para la región estudiada. Establecer un ciclo diurno de precipitación cualitativamente es importante por muchas razones. Debido a que la amplitud y la fase de este ciclo son el resultado de una interacción entre procesos dinámicos y radiativos, el grado de éxito que se tenga en la explicación de tales procesos es una medida útil para el entendimiento de la física atmosférica en estas escalas de tiempo. Muchas teorías han sido propuestas para explicar las variaciones en el ciclo diurno de precipitación y convección tropical. Las circulaciones de brisas costeras y marinas, el ciclo de insolación solar sobre el terreno y los cambios diurnos en esfuerzos friccionales sobre la capa límite atmosférica son los factores que pueden inducir en las variaciones diurnas de convergencias de bajo nivel, que controlan el tiempo

de ocurrencia de eventos convectivos (Dai, 2001). Además la variabilidad de la lluvia en estas escalas de tiempo puede verse influenciada por otros factores que ocurren a escalas de tiempo un poco mayores, tales como las perturbaciones del paso de ondas del este, oscilaciones de 30-60 días, como las oscilación de Madden-Julian, etc. Para una mejor referencia de varias de estas teorías se sugiere los artículos de Meisner y Arkin, 1987 y Dai, 2001. Además existen diversos trabajos en los cuales se han realizado ~~caracterizaciones~~ del ciclo diurno de precipitación para regiones tropicales. Para esto se han usado diversas fuentes de información provenientes tanto de satélites geosincrónicos tales como el GOES (Meisner y Arkin, 1987; Mapes et al., 2003; entre otros) y no-geosincrónicos tales como el satélite TRMM (Nesbitt et al., 2000; Mejia, 2002 y Nesbitt y Zipser, 2003); como de estaciones en tierra (Dai, 2001 y Poveda et al., 2000).

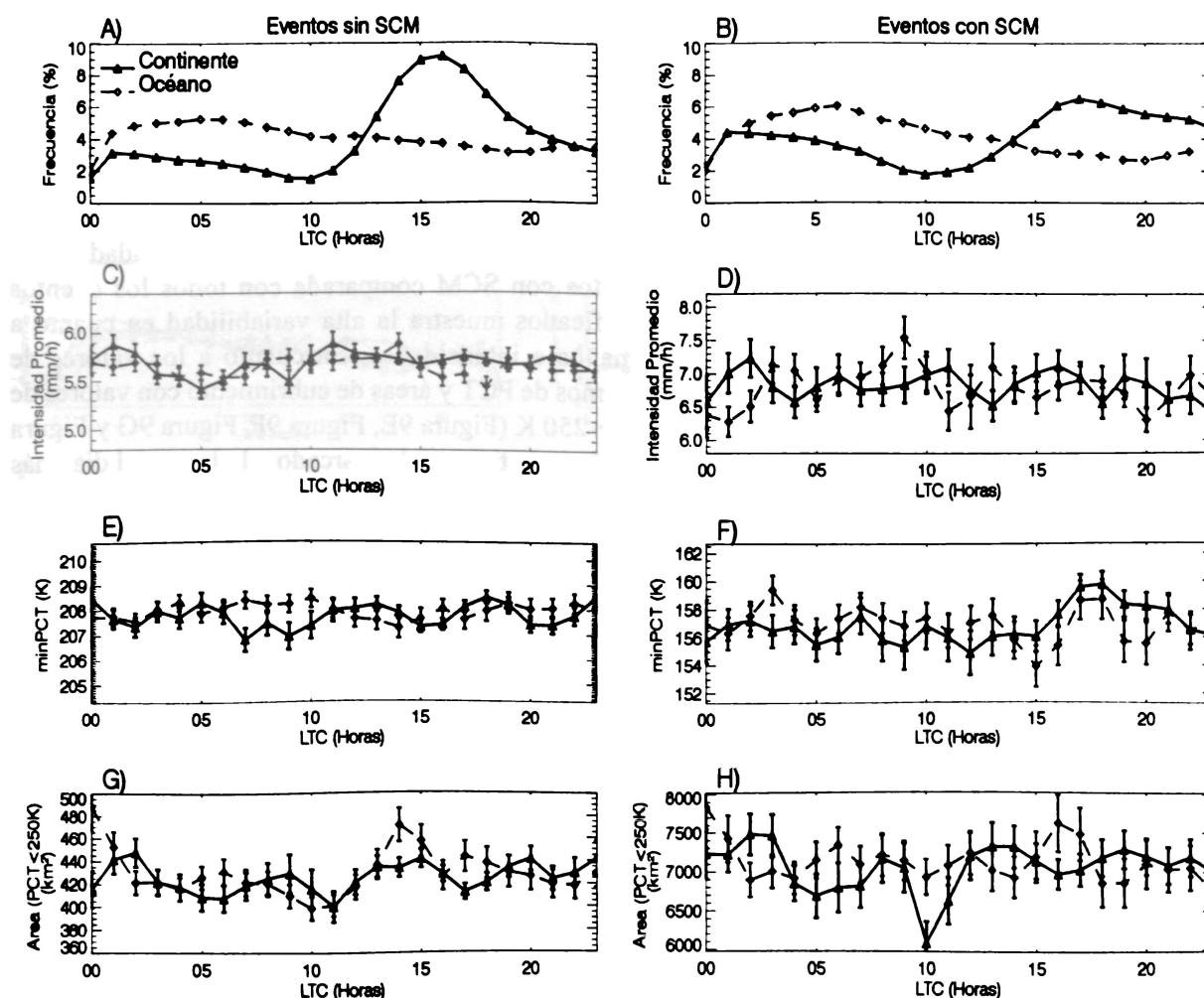


FIGURA 9. Ciclo diurno de los eventos todos los eventos y eventos con SCM clasificados para el periodo de estudio. Se muestra además el ciclo diurno de intensidad promedio, mínimos valores de PCT y áreas de cubrimiento con $PCT < 250$ K. Se presentan además las barras de error en la estimación de la media de cada una de las variables.

El satélite TRMM orbita con una inclinación de aproximadamente 35° , proporcionando datos en una región entre $\pm 36^{\circ}$ de latitud. Sin embargo debido a su reducido ancho de barrido (760km) puede proporcionar una subestimación de información diaria para ciertos lugares geográficos, debido a que según su órbita toma por lo menos, datos entre una vez por día en las regiones cercanas al ecuador y cerca de 2 veces en regiones cercanas a $\pm 35^{\circ}$ de latitud (Nesbitt y Zipser, 2003). Adicionalmente, necesita alrededor de 46 días para que el satélite retorne a una misma posición en una hora local dada. Por lo tanto para poder utilizar esta información para caracterizar un ciclo diurno completo es necesario construir una base de datos adecuada, para permitir que las estadísticas que se hagan de campos no lineales tales como la lluvia, sean robustas. Negri et al., 2002, utilizando información de tres años del radar PR y una modelación de las órbitas del satélite, llega a la conclusión que los datos de TRMM utilizados para una caracterización del ciclo diurno no se deben agrupar en regiones que sean menores de 12° y resoluciones temporales de una hora, para la muestra no sea inconsistente espacialmente.

Teniendo en cuenta la anterior restricción de muestras, se examinó el ciclo diurno de todos los eventos de precipitación y eventos con SCM clasificados anteriormente, para los cinco años del período de estudio (Enero 1998 - Diciembre de 2002), con no menos de 2 horas de agrupamiento temporal y para toda la región de estudio para garantizar la robustez estadística de las estimaciones. Además, no se realizó ningún intento para remover las variaciones causadas por otros fenómenos, que pueden influenciar la variabilidad del ciclo diurno en escalas de tiempo mayores. La Figura 9 presenta el ciclo diurno de todos los eventos clasificados y eventos con SCM para el período estudiado. La Figura 9A presenta la frecuencia relativa de ocurrencia de todos los eventos clasificados, separando los que ocurren sobre océano y sobre tierra. Se nota la marcada diferencia entre el ciclo diurno de ocurrencia de eventos entre el océano y la tierra. Sobre tierra (línea continua) se muestra un pico muy marcado de ocurrencia máxima de eventos hacia horas de la tarde (1500 hora local [LT], de ahora en adelante). Para los eventos con SCM ocurridos sobre tierra (Figura 9B), se presenta una característica similar a todos los eventos clasificados, pero con un pico máximo menos marcado más tarde, hacia las 1700 LT y un segundo máximo en la madrugada (0100 LT). Los valores

mínimos de ocurrencia de eventos se presentan hacia la mitad de la mañana (1000 LT) para ambas clasificaciones de eventos. Estos resultados concuerdan con reportados en los trabajos de Poveda et al. (2001) y Dai (2001), usando observaciones en tierra, así como en los trabajos de Mejía (2002) y Nesbitt y Zipser (2003), con información satelital. La amplitud del ciclo diurno de los eventos ocurridos sobre el océano es considerablemente menor que la de los eventos sobre tierra (Figura 9A y Figura 9B, líneas discontinuas), mostrando un valor máximo menos marcado hacia las horas de la madrugada (0400 LT) y valores mínimos al final de la tarde (1800 LT). Esta diferencia tan notoria entre tierra y océano se debe primordialmente al forzamiento solar y la asociada desestabilización de bajo nivel que ocurre sobre el continente, por la diferencia entre la inercia térmica entre las masas de tierra y las masas de agua.

En cuanto a las variaciones en la intensidad promedio de todos los eventos y eventos con SCM, no se notan diferencias marcadas a lo largo del día. Se nota un valor promedio de intensidades mucho mas alto para los eventos con SCM (6.8 mm/h, Figura 9C), que para todos los eventos (5.7 mm/h, Figura 9D) confirmando la importancia en intensidad de estos eventos. Además las fluctuaciones a lo largo del día de la intensidad de los eventos con SCM comparada con todos los eventos clasificados muestra la alta variabilidad en cuanto a tamaños e intensidades. En cuanto a los valores de mínimos de PCT y áreas de cubrimiento con valores de $PCT < 250$ K (Figura 9E, Figura 9F, Figura 9G y Figura 9H) no se nota un ciclo marcado a lo largo del día, más bien existe una variabilidad intrínseca al tipo de evento clasificado. Es posible decir que el comportamiento es muy similar a lo que sucede con la intensidad promedio, mayores variaciones a lo largo del día para los eventos con SCM debido a la variabilidad en tamaños e intensidades que estos presentan.

La Figura 11 y la Figura 11 presentan el ciclo diurno de todos los eventos y eventos con SCM para cada uno de los trimestres del año, separados por su ocurrencia sobre océano y continente.

Las Figura 10 A) y B) presentan las frecuencias relativas de ocurrencia de todos los eventos, notándose características similares a las presentadas en la Figura 9 A). De estas se nota que el ciclo de ocurrencia de eventos es igual, independiente de la época del año en que se encuentre, notándose un fuerte pico de ocurrencia de

eventos sobre el continente en las horas de la tarde (1500 LT), y un ciclo mucho menos marcado sobre el océano a través del día. Con mas detalle, se nota que el pico de la tarde en los eventos sobre el continente es mayor para los meses de Septiembre-Octubre-Noviembre (SON) y menor para Diciembre-Enero-Febrero (DEF) y un segundo pico, mucho menor, en la madrugada (0200 LT), que es mas grande para los meses de DEF y menor para SON. Para los eventos sobre océano, se nota un pico de ocurrencia de eventos en la madrugada (0300 LT), mayor para los meses de DEF y menor para SON. En cuanto a la intensidad promedio, se notan ciclos muy irregulares a través del día para todos los trimestres. Sobre el océano (Figura 10 C) se notan valores altos para el trimestre SON en la madrugada (0200 LT) y en el comienzo de la noche (1900 LT) y valores menores hacia las 1000 LT. Por el contrario, para los trimestres DEF y Marzo-Abril-Mayo (MAM) se notan valores mayores hacia el medio día y comienzos de la tarde (1100 LT y 1300 LT) y menores luego de la madrugada y al comienzos de la noche (0100 LT y 1900 LT). Para el trimestre Junio-Julio-Agosto (JJA) el ciclo de intensidad de precipitación los eventos sobre océano es más estable a través del día. Para la intensidad de eventos sobre el continente (Figura

10 D) se notan ciclos irregulares para todos los trimestres en las horas de la madrugada hasta el medio día y se vuelven mas estables en la tarde. Para los valores mínimos de PCT sobre océano y sobre continente (Figura 10 E y F) pueden verse mayores valores de mínimo PCT para el trimestre DEF, que puede relacionarse con baja actividad convectiva en este trimestre y menores para los trimestres de JJA y SON.

En la Figura 11 A) y Figura 11 B) se muestra el ciclo de ocurrencia de eventos a través del día para los eventos con SCM, se observa una característica similar a la presentada anteriormente para los todos los eventos. En los eventos sobre el continente se presenta ocurrencia mayor de eventos para el trimestre SON y menor para el trimestre DEF para el pico de la tarde y menor para SON y mayor para DEF en el pico de la madrugada. En cuanto a la intensidad promedio de los eventos con SCM, se nota un ciclo no tan marcado a través del día, salvo para el trimestre DEF en los eventos sobre el continente. Para los valores de mínimo PCT en eventos con SCM, se observa una característica similar a la presentada para todos los eventos, un trimestre DEF con mayores valores y un trimestre SON con menores valores a través del día.

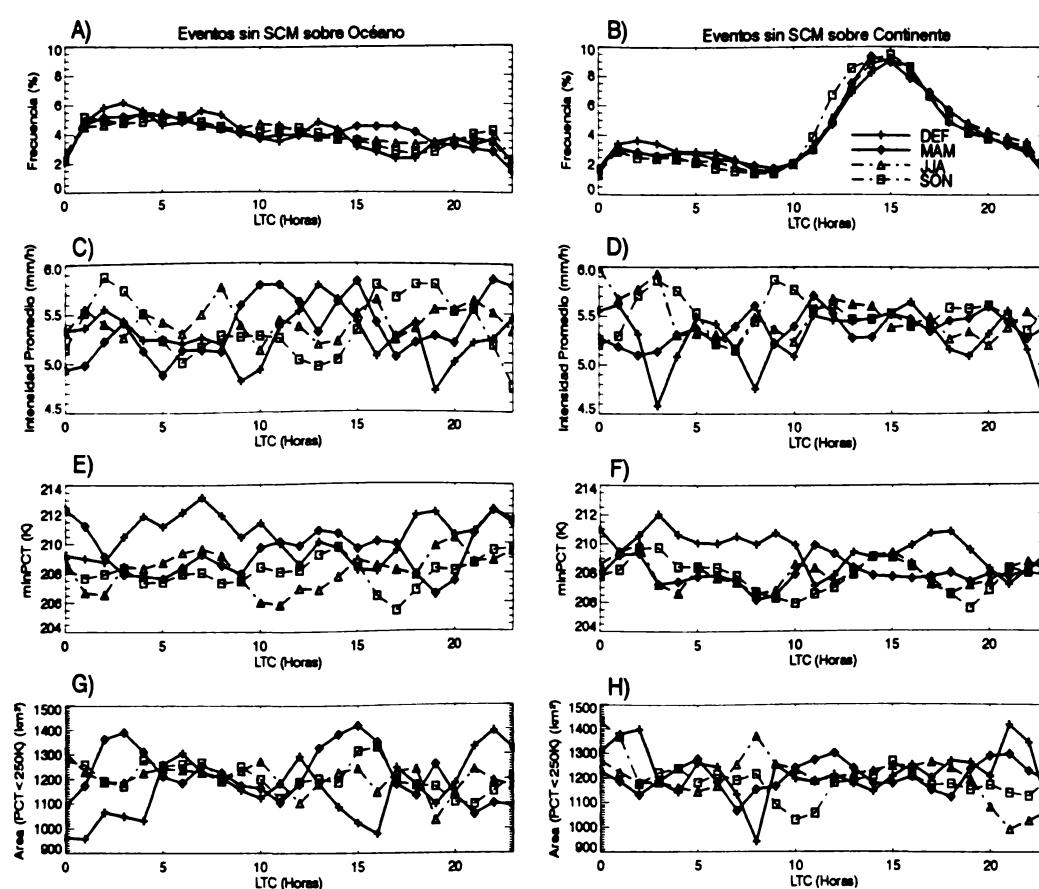


FIGURA 10. Ciclo diurno de los eventos todos los eventos clasificados para el periodo de estudio, separados por trimestres. Se muestra además el ciclo diurno de intensidad promedio, mínimos valores de PCT y áreas de cubrimiento con $PCT < 250$ K. En el gráfico superior derecho se encuentra la leyenda de la figura.

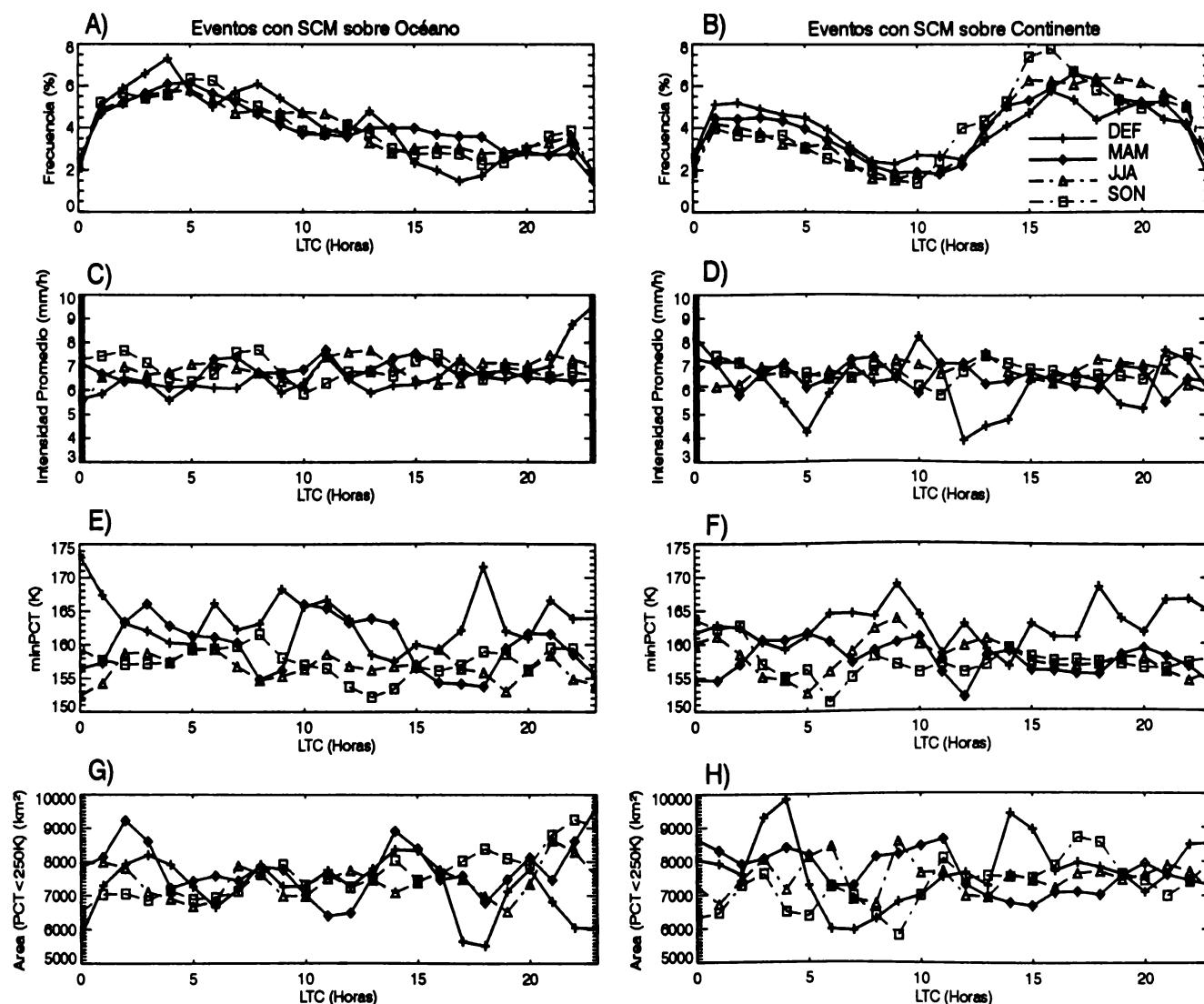


FIGURA 11. Ciclo diurno de los eventos con SCM clasificados para el periodo de estudio, separados por trimestres. Se muestra además el ciclo diurno de intensidad promedio, mínimos valores de PCT y áreas de cubrimiento con $PCT < 250$ K. En el gráfico superior derecho se encuentra la leyenda de la figura

8. CONCLUSIONES

Se realizó un diagnóstico y caracterización de los eventos de tormenta con Sistemas Convectivos de Mesoescala, usando información satelital de la misión TRMM, para el período 1998-2000. Se encontró un número bastante significativo de eventos (223,547) de tormenta ocurridos en la región de estudio. De este total, los eventos con SCM representan cerca del 10% total de los eventos pero aportan casi el 70% del volumen total de lluvia, lo que muestra la gran importancia de los SCM en el aporte de precipitación en el trópico Americano. Se observan diferencias en la ocurrencia de eventos, a través de los

años del periodo de estudio, mostrando que estos eventos están fuertemente influenciados por procesos de gran escala tales como las dos fases del fenómeno del Niño/ Oscilación del Sur. El análisis a escala mensual permitió identificar el fuerte ciclo anual de los eventos con y sin SCM, asociado a la migración meridional de la Zona de Convergencia Intertropical, y a la dinámica del Chorro del Chocó sobre la región de estudio.

Los análisis se diferenciaron los eventos sobre océano y sobre continente. Se encontraron diferencias entre océano y tierra para la intensidad promedio, presentándose valores mayores de intensidades entre marzo y septiembre

y valores menores de noviembre a enero para los eventos sobre el continente. Por el contrario, para los eventos sobre océano, no se encontraron diferencias tan marcadas a lo largo del año. La caracterización del ciclo diurno de los eventos de tormenta permitió identificar diferencias entre lo que ocurre sobre océano y sobre tierra. Se encontró que para los eventos ocurridos sobre tierra se presenta un fuerte ciclo diurno, con máximo en las horas de la tarde. Para los eventos ocurridos sobre océano, el ciclo es menos marcado, con un máximo en las horas de la mañana. En cuanto al ciclo diurno de intensidades medias, no se encontraron mayores diferencias a lo largo del día.

9. AGRADECIMIENTOS

Los datos usados en este estudio fueron adquiridos como parte de la Misión de Medición de la Lluvia Tropical («Tropical Rainfall Measuring Mission», TRMM). Algunos de los algoritmos fueron desarrollados por el Equipo Científico de TRMM. Los datos fueron procesados por el Sistema de Información y Datos Científicos de TRMM (TSDIS) y la Oficina de TRMM; los cuales son almacenados y distribuidos por el Goddard Distributed Active Archive Center. TRMM es un proyecto internacional apoyado conjuntamente por la Agencia de Desarrollo Espacial de Japón (NASDA) y por la Administración Nacional Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (NASA), Oficina de Ciencias Terrestres. Esta investigación ha sido financiada por COLCIENCIAS, por el Instituto Interamericano para la Investigación del Cambio Global (IAI), y por la División de Investigaciones de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín (DIME). Agradecemos los valiosos aportes de John Freddy Mejía.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Dai A., 2001. Global precipitation and thunderstorm frequencies. Part II: Diurnal variations. *Journal of Climate*, 14(6):1112–1128.
- Eslava J. A., 1994. Acerca de la distribución espacio-temporal de la precipitación en la región del pacífico colombiano. *Atmósfera*, 22:71–80.
- Hastenrath S., 2002. The intertropical convergence zone of the eastern pacific revisited. *International Journal of Climatology*, 22:347–365. DOI: 10.1002/joc.739.
- Houze R. A., 1993. *Cloud Dynamics*, volumen 53 de International Geophysics Series. Academic Press, INC, California, USA.
- Kummerow C. W., Barnes W., Kosu T., Shiue J. y Simpson, J., 1998. The tropical rainfall measuring mission TRMM sensor package. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15:809–817.
- Maddo, R. A. 1980. Mesoscale convective complexes. *Bulletin of American Meteorological Society*, 61:1374–1387.
- Mapes B. E., Warner T. T., Xu M. y Negri, A. J., 2003. Diurnal patterns of rainfall in northwestern south America. Part I: Observations and context. *Monthly Weather Review*, 131:799–812.
- Meisner B. y Arkin P. A., 1987. Spatial and annual variations in the diurnal cycle of large-scale tropical convective cloudiness and precipitation. *Monthly Weather Review*, 115(9):2009–2032.
- Mejía J. F., Mesa O. J., Poveda G., Vélez J. I., Hoyos C. D., Mantilla R., Barco J., Cuartas A., Montoya M. I. y Botero B., 1999. Distribución Espacial y Ciclos Anual y Semianual de la Precipitación en Colombia. *Revista DYNA*, 127:7-24.
- Mejía J. F., 2002. Ciclo diurno de la lluvia y ambientes atmosféricos en sistemas convectivos de meso-escala sobre Colombia y el este del océano pacífico usando datos de la TRMM y del reanálisis del NCEP/NCAR. Tesis de maestría, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Mesa O. J., Poveda G. y Carvajal L. F., 1997. *Introducción al Clima de Colombia*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, primera edición.
- Mesa O. J., Poveda G., Vélez J. I., Mejía J. F., Hoyos C. D., Mantilla R., Barco J., Cuartas A., Botero B. y Montoya M. I., 2000. Distribución espacial y ciclos anual y semianual de la precipitación en Colombia. En XIV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Villa de Leyva, Boyacá.
- Negri A. J., Bell T. L. y Xu L., 2002. Sampling of the diurnal cycle of precipitation using TRMM. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19:1333–1344.
- Nesbitt S. W. y Zipser E. J., 2003. The diurnal cycle of rainfall and convective intensity according to three years of TRMM measurements. *Journal of Climate*,

- 16(10):1456–1474.
- Nesbitt S. W., Zipser E. J. y Cecil, D. J., 2000. A census of precipitation features in the tropics using TRMM: Radar, ice scattering, and lightning observations. *Journal of Climate*, 13(23):4087–4106.
- Poveda G., 1998. Retroalimentación Entre el Fenómeno El Niño/Oscilación Del Sur y la Hidrología de Colombia. Tesis de doctorado, Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Poveda G. y Mesa O. J., 1997. Feedbacks between hydrological processes in tropical south America and large-scale ocean-atmospheric phenomena. *Journal of Climate*, 10(10):2690–2702.
- Poveda G. y Mesa O. J., 2000. On the existence of Lloró (the雨iest locality on earth): Enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, 27(11):1675–1678.
- Poveda G., Mesa O. J., Álvarez J. F., Agudelo P., Arias P. A., Moreno H. A., Salazar L. F., Toro V. G., Vieira S., Jaramillo A. y Guzmán, O., 2001a. Caracterización del ciclo diurno de la precipitación en los Andes tropicales de Colombia. *Meteorología Colombiana*, 5:35-47.
- Poveda G., Jaramillo A., Gil M. M., Quiceno N. y Mantilla R., 2001b. Seasonality in ENSO Related Precipitation, River Discharges, Soil Moisture, and Vegetation Index (NDVI) in Colombia. *Water Resources Research*, 37(8):2169-2178.
- Poveda G., 2004a. El Clima de Colombia: Una síntesis desde la escala interdecadal hasta la escala diurna. *Revista Academia Colombiana Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, en imprenta.
- Poveda G., Mesa O. J., Arias P. A., Salazar L. F., Moreno H., Vieira S. C., Agudelo P. A., Toro V. G. y Álvarez J.F., 2004b. Diurnal cycle of precipitation in the tropical Andes of Colombia, Aceptado en *Monthly Weather Review*.
- Spencer R. W., Goodman H. M. y Hood R. E., 1989. Precipitation Retrieval over Land and Ocean with the {SSM/I}: Identification and Characteristics of the Scattering Signal. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 6:254-273.
- Velasco I. y Fritsch J. M., 1987. Mesoscale convective complex in the Americas. *Journal of Geophysical Research*, 92(D8):9591–9613.
- Waylen P. y Poveda G., 2002. El Niño-Southern Oscillation and aspects of Western South America hydro-climatology, *Hydrological Processes*, 16:1247-1260.