

**XXI CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
SÃO PEDRO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL, OCTUBRE, 2004**

**DIAGNÓSTICO DE SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA SOBRE
COLOMBIA DURANTE 1998-2002**

Germán Poveda, Manuel Zuluaga y John Freddy Mejía

Posgrado en Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia

gpoveda@unalmed.edu.co

RESUMEN.

Los Sistemas Convectivos de Mesoescala SCM se desarrollan frecuentemente sobre la parte más al este del océano Pacífico y en diferentes regiones de Colombia. Su génesis, dinámica y ambientes atmosféricos no son bien conocidos. Se usó información de la Misión para la Medición de la Lluvia Tropical (TRMM), Imágenes de Microondas y Radar de Precipitación (TMI y PR), para desarrollar una clasificación cuantitativa de dichos 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 estos SCM representan en volumen, alrededor de el 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.

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 1998-2002 period. The 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 an strong afternoon maximum, in contrast to the ocean region that's an early morning maximum occurs over the study region.

Palabras Claves: Precipitación tropical, Colombia, Complejos Convectivos de Mesoescala, Satélite TRMM.

INTRODUCCIÓN

La precipitación tropical es uno de los mecanismos más importantes en el ciclo hidrológico global. Conocer y entender cómo es la variabilidad de la lluvia tropical a escalas espacio-temporales muy finas, es una de las preguntas que más inquietan a la comunidad hidroclimática. La respuesta a esta pregunta no es sencilla, debido a la complejidad de los procesos que intervienen en su formación y a la alta variabilidad espacio-temporal del fenómeno. Una de las formas de acercarse a esta respuesta es a través de observaciones y de herramientas matemáticas y físicas que permitan encontrar características de diagnóstico de la dinámica de la lluvia. Múltiples aplicaciones en los temas relacionados con el aprovechamiento de recursos hídricos, prevención de desastres, aeronáutica, agricultura y otros, serían beneficiados en forma directa con el estudio y entendimiento la dinámica de la lluvia tropical, tales como entender la distribución espacio-temporal, calcular la frecuencia e intensidad de éstos fenómenos, efectuar predicciones del estado del tiempo atmosférico, realizar estimaciones del balance entre agua y energía, interacciones océano-atmósfera y suelo-atmósfera, etc. No obstante, para realizar tales análisis es necesario poseer registros de mediciones en la vertical atmosférica y en forma continua. Con base en la información del proyecto "Misión para la Medición de Lluvia Tropical", o TRMM por sus siglas en inglés (Kummerow et al., 1998), es posible tener campos espaciales y temporales de lluvia oceánica y terrestre sobre el trópico a una resolución temporal y espacial muy fina.

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, se conocen los principales efectos de las dos fases del fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENSO), del 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., 2001; Mapes et al., 2003) 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), que es una clasificación que se da a un conjunto de tormentas y lluvias que producen precipitación a escalas de ~100 km en la escala horizontal. Estas clasificaciones permiten realizar caracterizaciones útiles en el entendimiento de la génesis, desarrollo y vida de sistemas organizados de tormentas. Este trabajo enfrenta el estudio de la variabilidad espacio-temporal de la precipitación en regiones continentales y oceánicas (del Pacífico) sobre la geografía de Colombia y propone utilizar metodologías de clasificación para caracterizar esta variabilidad. Para ello se recopila y se procesa información de satélite y a partir de ésta, 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 del los mares circundantes.

INFORMACIÓN UTILIZADA

Este trabajo se fundamenta en información de satélite y de radar del proyecto Misión para la Medición de Lluvia Tropical (TRMM). La TRMM es una misión conjunta entre dos agencias que administran y promueven las investigaciones espaciales, una Japonesa (National Space Development Agency, NASDA) y otra estadounidense, National Aeronautics and Space Administration (NASA). Esta misión está registrando información desde Diciembre de 1997, cuando fue lanzada hasta la actualidad. Los objetivos principales de la TRMM es medir lluvia e intercambios de energía (por ejemplo, calor latente de condensación) de las regiones tropicales y subtropicales sobre el 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), la descripción completa de estos aparatos puede verse en (Kummerow et al., 1998). La combinación de estos sensores de radiometría activa y pasiva proporcionan diferentes clases de información en las tres dimensiones, sobre la distribución de la precipitación y la transferencia de calor, que ocurre en los trópicos. Las orbitas 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 orbitas 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. 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

realizar caracterizaciones del tipo de lluvia, tipo de nube, altura de la cima de las nubes, cantidades volumétricas de lluvia, etc y mediante ello, hacer clasificaciones de los sistemas de tormentas. Algunas características de estos instrumentos y su resolución espacial se presentan en la Tabla 1.

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

Característica	Sensor	
	TMI	PR
Frecuencia/Longitud de onda	10.65, 19.35, 97.0, 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 de Barrido	760 km	220 km

CLASIFICACIÓN DE EVENTOS DE PRECIPITACIÓN

Siempre que se quiera realizar una clasificación de eventos de precipitación a partir de sensores remotos, es necesario tener en cuenta los instrumentos usados para observar y cuantificar dicha precipitación y las definiciones que se hagan de los datos que estos proporcionen. Se ha observado extensamente que la convección tropical tiende a desarrollarse por grupos, organizándose en ciertos casos en SCM que están compuestos por celdas convectivas múltiples y profundas distribuidas dentro de una región (Velasco y Fritsch, 1987; Mapes et al., 2003). Por ejemplo (Maddox, 1980), usó imágenes de satélite infrarrojas para definir Complejos Convectivos de Mesoescala (CCM), una subclasificación 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 $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ sobre un área de al menos $10,000\text{ km}^2$ y T_b menores o iguales a $-52\text{ }^{\circ}\text{C}$ sobre $50,000\text{ km}^2$. Otra clasificación fue utilizada por (Velasco y Fritsch, 1987), los cuales usaron la definición de Maddox y clasificaron CCM a partir de imágenes IR sobre varias regiones de América, sin embargo estas mediciones de temperaturas-tope de las nubes usando sensores infrarrojos no están bien relacionados 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 ensamble 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”.

Se pretende 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 si 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 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 que tiene la banda del IR. Es por esto que Nesbitt et al., 2000 argumentan que la física relacionada con lo que se capta en imágenes de microondas (MI), específicamente alrededor de 86 GHz, permiten realizar comparaciones cuantitativas entre diferentes niveles de convección organizada. Ellos 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 en tierra sobre los que ocurren en océano. Así, a partir de los datos que proporciona la misión TRMM, 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 sistemas de convección organizada entre aquellos ocurridos sobre océano y sobre tierra, es necesario distinguir, en estas frecuencias, la temperatura de brillo emitida por las partículas frías en las nubes

de las que son emitidas por las superficies frías de los océanos, montañas con nevados y páramos y hasta lagos fríos. 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 entonces clasificar por su tamaño y temperatura de brillo, los dos conjuntos de sistemas de convección organizada. El primero es el que se llamará sistemas sin Complejos Convectivos de Mesoescala (sin SCM), los cuales estarán definidos por eventos con tamaños mayores que 75km² y contienen píxeles contiguos con valores de $PCT \leq 250K$. El segundo conjunto, se llamará sistemas con Complejos Convectivos de Mesoescala (con SCM), y están definidos por tamaños mayores de 2000 km², píxeles contiguos con valores de $PCT \leq 250K$ y que contienen dentro de estos, por lo menos 185 km² con valores de $PCT \leq 225K$ y con lluvia asociada en el PR (reflectividad cerca de la superficie ≥ 20 dBZ). Además en este punto es necesario destacar que, debido a la órbita del satélite TRMM, no es posible asociar una duración característica de estos sistemas convectivos.

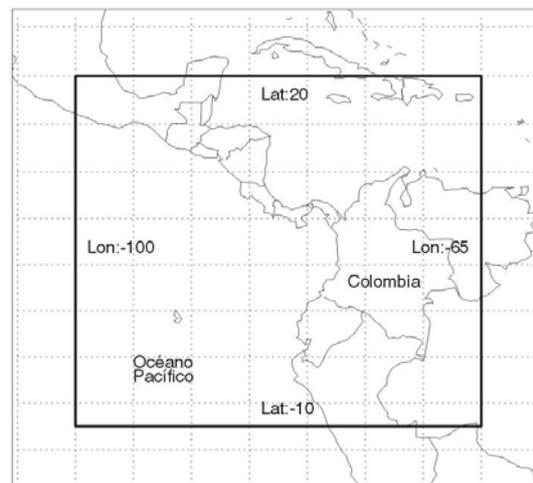


Figura 1. Región de estudio

Para realizar estas clasificaciones fueron construidos algoritmos de programación utilizando el lenguaje IDL. Se tiene como base de datos la información extractada para la región de estudio, de los archivos originales de 1B11 y 2A25 obtenidos de la TSDIS. Estos archivos consisten en imágenes instantáneas para diferentes horas del día de temperatura de brillo (1B11) y reflectividad e intensidad de lluvia cerca de la superficie (2A25) para la región mostrada en la Figura 1. Debido a la órbita no sincrónica con el sol que tiene el satélite, la información que se lee se almacena como puntos para cada píxel de los sensores TMI y PR. Esta información debe ser interpolada para obtener una malla continua de información, utilizando una estrategia determinística basada en el vecino más cercano (Triangulación). Esto nos proporciona mapas raster de cada variable que se interpolaron a una misma resolución (4.6×4.6 km) para realizar la clasificación.

RESULTADOS DE LA CLASIFICACIÓN

Utilizando los criterios anteriores, se clasificaron los eventos de precipitación para los años de 1998 a 2002. Durante este periodo 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 periodo estudiado, discretizando los eventos ocurridos sobre el océano y sobre el continente. Es de anotar que el año 1998 (Figura 2 A) presentó el valor más alto de ocurrencia de eventos. Otro resultado importante es la presencia de una mayor cantidad de eventos sobre océano que sobre tierra en el año de 1998, cosa que no sucede para el resto del periodo analizado (1999 a 2002) que 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). Estos resultados pueden estar influenciados por la presencia de ambas fases del fenómeno El Niño/Oscilación del sur (ENOS) el cual reportó un pico fuerte en su fase cálida (El Niño) alrededor de enero de 1998 y se reversó bruscamente en mayo-junio a su fase fría (La Niña). Todos estos resultados concuerdan además, con los encontrados por (Mejía, 2002).

Tabla 2. Resultados de la clasificación para cada uno de los años del periodo de estudio.

	1998		1999		2000		2001		2002	
	No.	%								
Total Eventos	48,799	100.0	46,036	100.0	42,707	100.0	41,533	100.0	44,472	100.0
Eventos Océano	25,286	51.8	19,933	43.3	18,101	42.4	17,460	42.0	18,596	41.8
Eventos Tierra	23,513	48.2	26,103	56.7	24,606	57.6	24,073	58.0	25,876	58.2
Total SCM	4,929	10.1	4,456	9.7	4,112	9.6	4,135	10.0	4,523	10.2
SCM Océano	2,761	56.0	2,043	45.8	1,889	45.9	1,873	45.3	2,058	45.5
SCM Tierra	2,168	44.0	2,413	54.2	2,223	54.1	2,262	54.7	2,465	54.5
Vol. Lluvia SCM	-	70.7	-	68.2	-	67.8	-	69.2	-	69.7

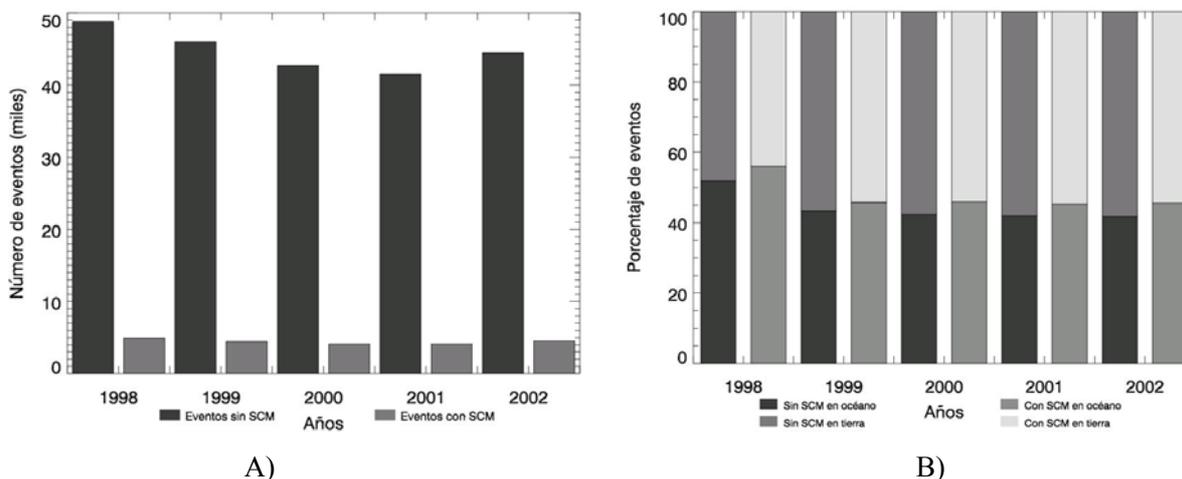


Figura 2. A) Número total de eventos clasificados en cada año y B) porcentaje de ocurrencia entre eventos en tierra y eventos en océano.

Utilizando la información de intensidad de lluvia cerca de la superficie 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 igual a 69%, lo cual es un valor bastante alto si se tiene en cuenta que apenas el 10% aproximadamente del total de eventos contienen SCM. Este resultado muestra la importancia que para el entendimiento de los fenómenos que producen la precipitación en los trópicos, presentan las grandes áreas lluviosas con Sistemas Convectivos de Mesoescala. En cuanto a los resultados sobre tierra y océano para estas contribuciones volumétricas de lluvia se puede ver de la Figura 3, proporciones muy similares, salvo nuevamente el año de 1998.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL ANUAL DE EVENTOS

Se realizó un análisis espacial de la distribución de eventos sobre la región de estudio. La Figura 4 y Figura 5 presentan estas distribuciones espaciales para los todos los eventos y eventos con SCM para cada uno de los años del periodo estudiado. En ellas se destacan 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 (la costa pacífica colombiana específicamente) y 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).

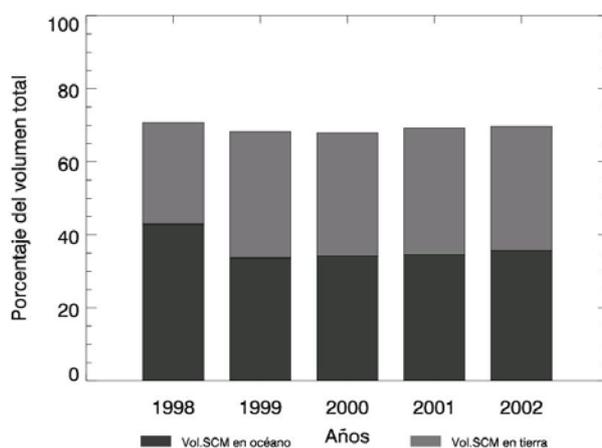


Figura 3. Contribución volumétrica de lluvia de los SCM al total de los eventos

Otras características importantes de esta distribución espacial es la disminución en la cordillera de los Andes debido a la baja ocurrencia de estos eventos en las zonas de alta montaña y las altas concentraciones 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.

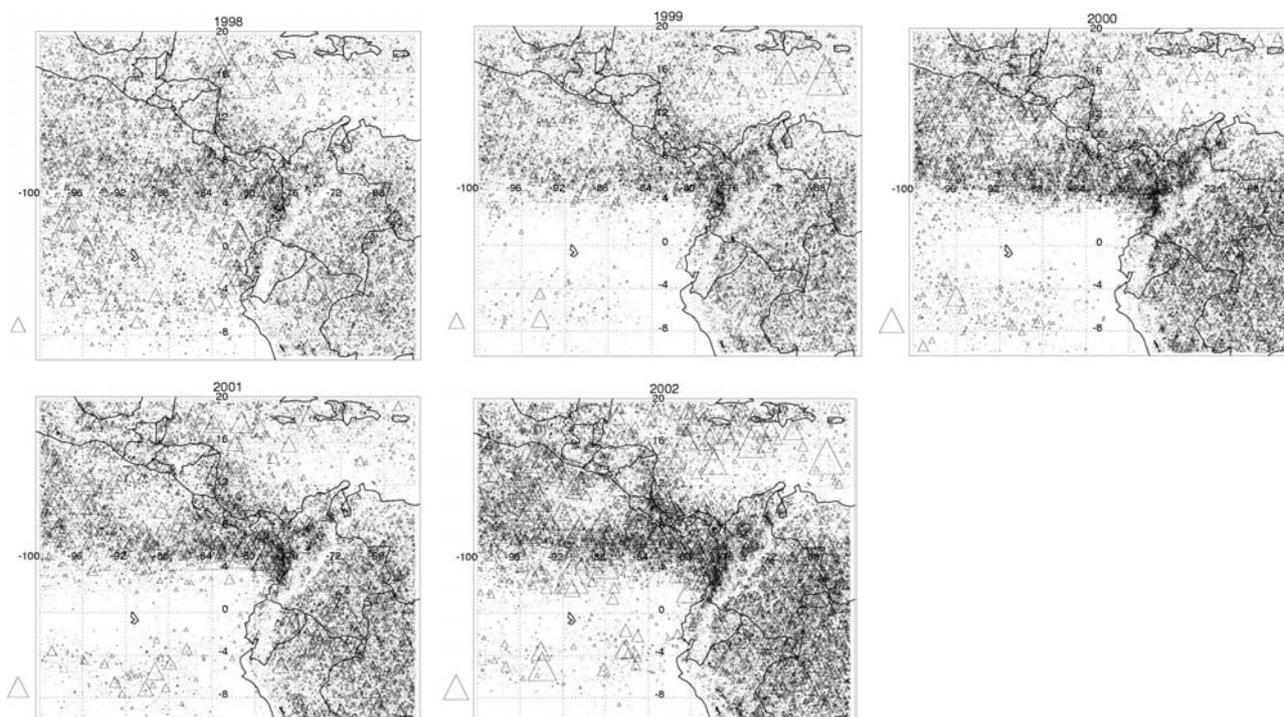


Figura 4. Distribución espacial de todos los eventos de tormenta clasificados para los diferentes años del periodo de estudio.

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 Pacífica 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 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.

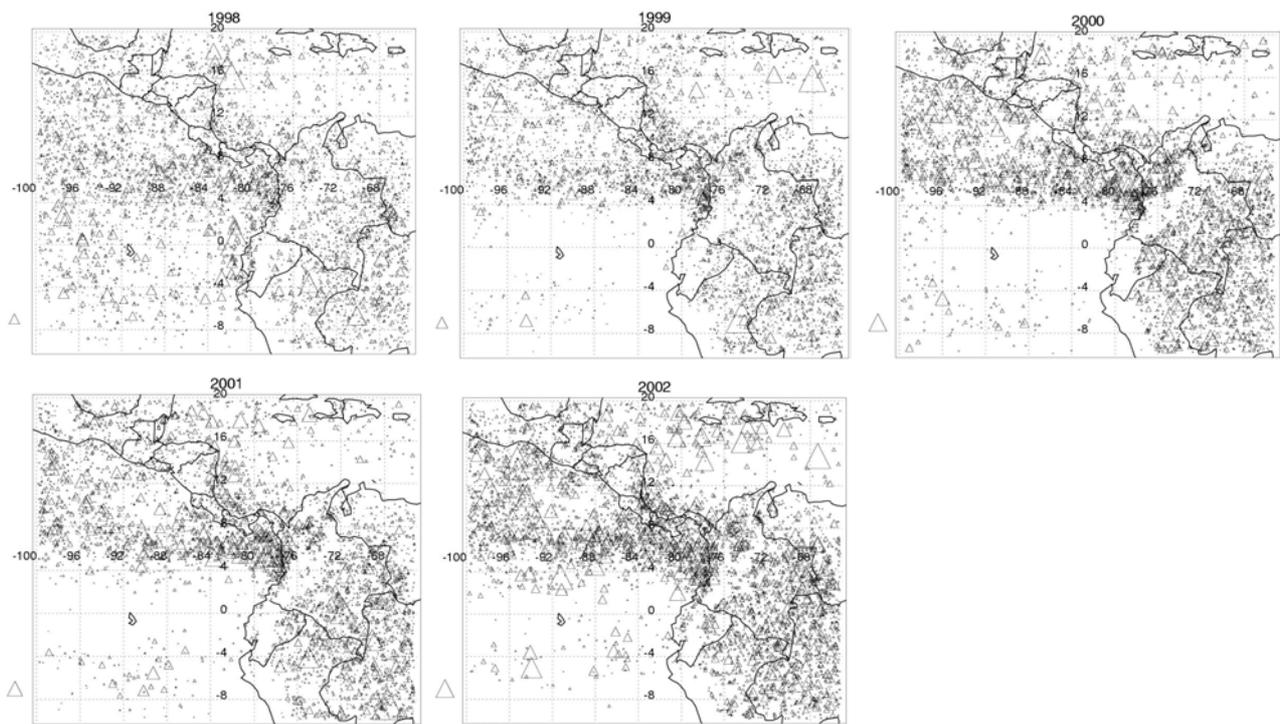


Figura 5. Distribución espacial de los eventos clasificados con SCM para los diferentes años del período de estudio.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL MENSUAL DE EVENTOS

La Figura 6 presenta la distribución espacial de todos los eventos por meses para el año 2000. La principal característica es la distribución espacial de los eventos en el año de acuerdo a 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, cuando la ZCIT se encuentra en el sur, correspondiente al verano austral. Cuando la concentración se encuentra más al norte, la ZCIT se encuentra al norte, correspondiente al verano 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, característica que se observa en la figura. 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 mas uniforme y con presencia casi todo el año de eventos, una zona oceánica con baja densidad de cercana a El Salvador y Nicaragua 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). Es de anotar que las distribuciones para los demás años (1998-1999-2001-2002) no se presentan por ser muy similares a la presentada para el año 2000. La Figura 7, presenta la distribución mensual de eventos con SCM para el 2000. Se nota una distribución similar a las presentadas para todos los eventos, presentándose las mismas características descritas: la migración de la ZCIT, las bajas densidades en el océano pacífico por debajo del ecuador (que no ocurre en el año 1998), las concentraciones más uniformes en tierra y las altas concentraciones de eventos en la costa colombiana y la concavidad panameña.

La Figura 8 presenta las estadísticas mensuales promediadas durante los años 1998-2002, para los todos los eventos y eventos con SCM discretizando los que ocurren en océano y los que ocurren en tierra. Estas figuras presentan además las barras de error asociadas a la estimación de la media ($\pm\sigma/\sqrt{n}$). La figura superior izquierda presenta la frecuencia promedio de ocurrencia de eventos. Para todos los eventos de precipitación y 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. 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.

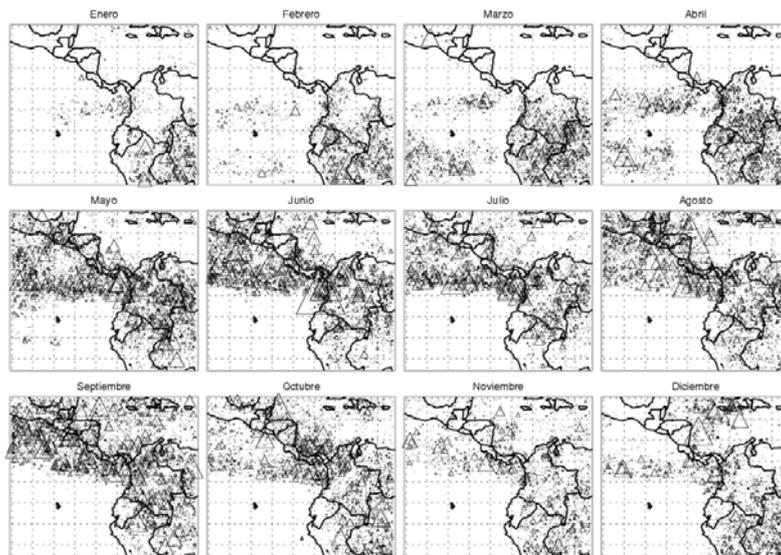


Figura 6. Distribución espacial mensual de todos los eventos clasificados para el año 2000.

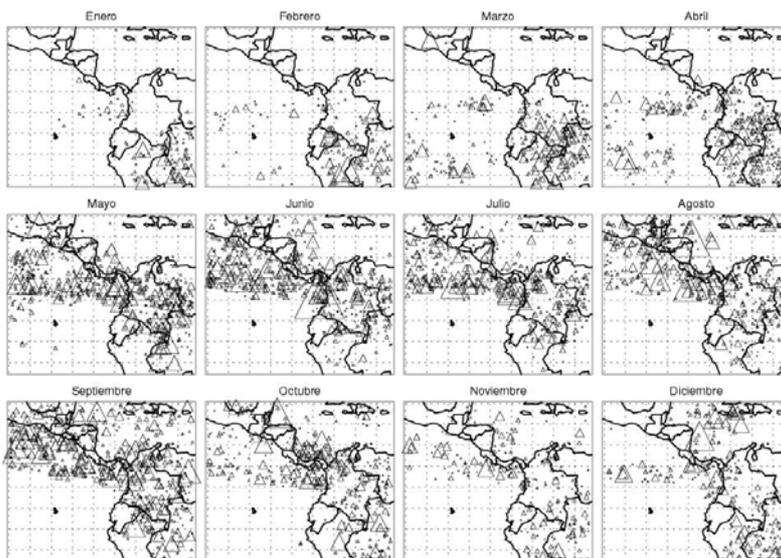


Figura 7. Distribución espacial mensual de los eventos clasificados con SCM para el año 2000.

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 quizá a la falta de restricciones físicas que tienen los océanos abiertos a los desarrollos convectivos de gran tamaño. 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 año. Para los eventos sobre el océano, el comportamiento es mas uniforme a lo largo del año.

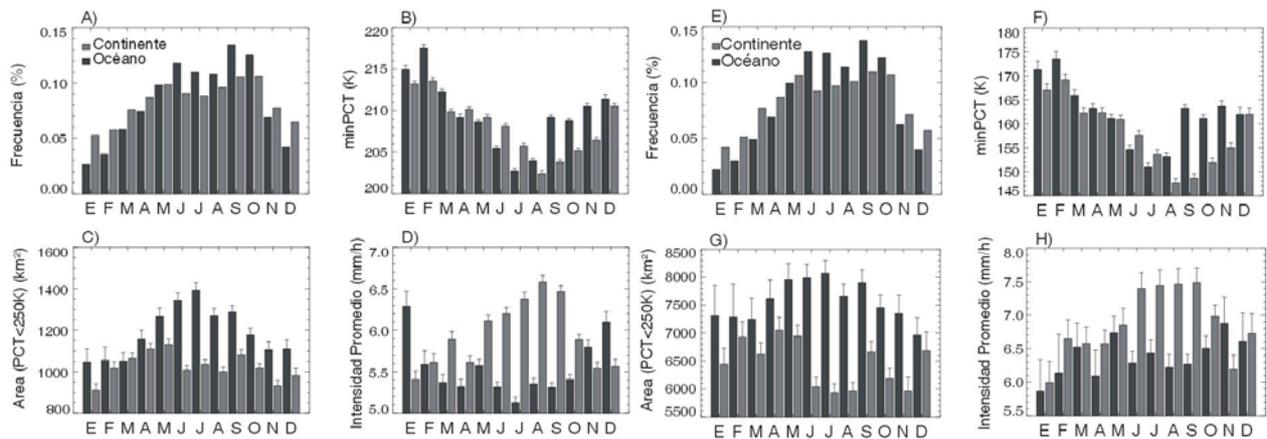


Figura 8. Estadísticas mensuales de frecuencia, mínimos valores de PCT, áreas de cubrimiento con $PCT < 250$ K e intensidad promedio, para todos los eventos y eventos con SCM. Se presentan además las barras de error en la estimación de la media de cada una de las variables.

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, necesarias para tal fin. Por esta razón, es ampliamente usada la información proveniente de satélites debido a que sus mediciones son más frecuentes a través de el día, sobre largos periodos 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; Mejía, 2002 y Nesbitt y Zipser, 2003); como de estaciones en tierra (Dai, 2001 y Poveda et al., 2000).

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 (750km) 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.

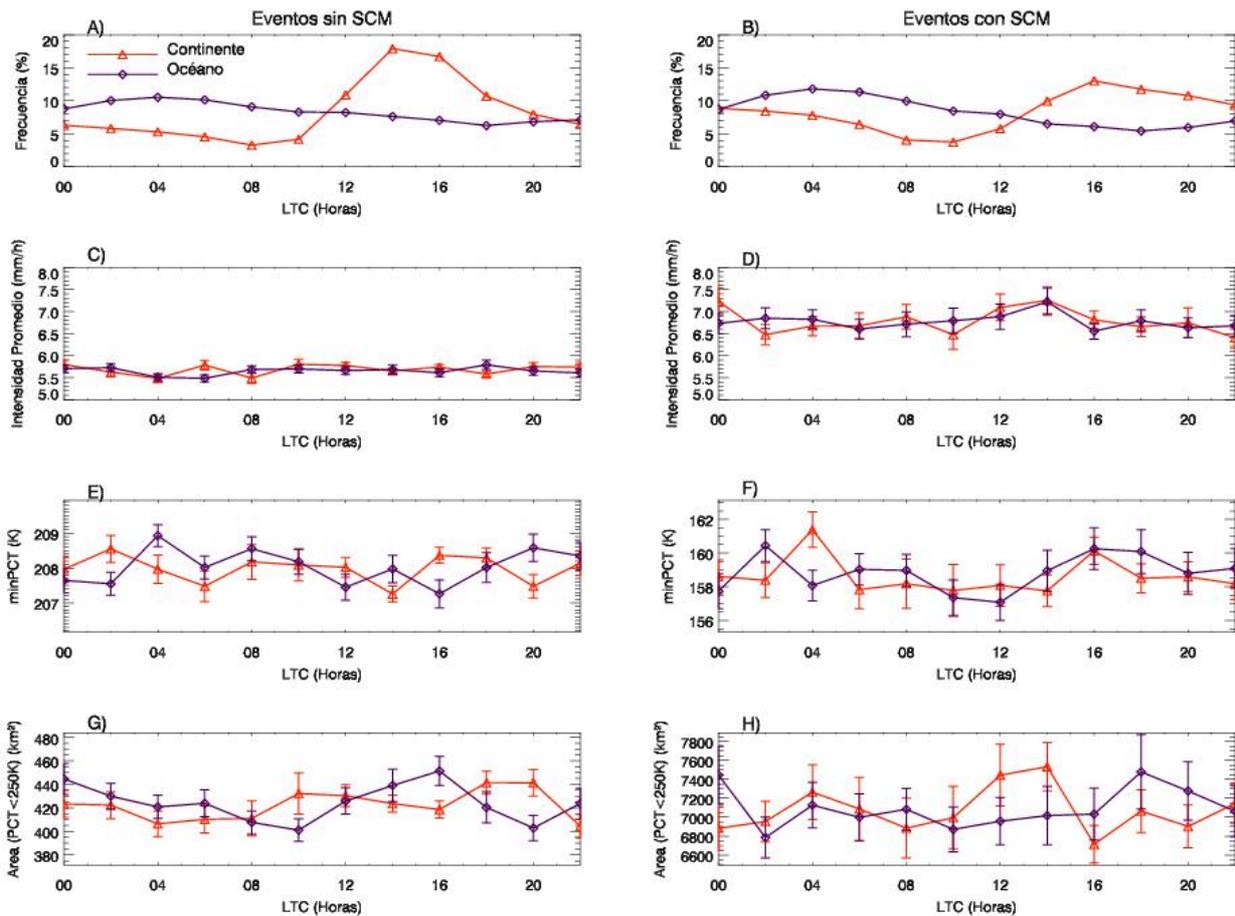


Figura 9. Ciclo diario de los eventos todos los eventos y eventos con SCM clasificados para el periodo de estudio. Se muestra además el ciclo diario de intensidad promedio, mínimos valores de PCT y áreas de cubrimiento con $PCT < 250$ K. Se presentan además las barras de error en la estimación de la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

Teniendo en cuenta la anterior restricción de muestras, se examinó el ciclo diario de todos los eventos de precipitación y eventos con SCM clasificados anteriormente, para los cinco años del periodo de estudio (Enero 1998 - Diciembre de 2002), con no menos de 2 horas de agrupamiento temporal y para toda la región de estudio para asegurar que las estadísticas que se hagan sean robustas. Además no se realizó ningún intento para remover las variaciones causadas por otros fenómenos, que pueden influenciar la variabilidad del ciclo diario en escalas de tiempo mayores. La Figura 9 presenta el ciclo diario de todos los eventos clasificados y eventos con SCM para el periodo estudiado. La Figura 9 A) 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 diario de ocurrencia de eventos entre el océano y la tierra. Sobre tierra (línea roja) se muestra un pico muy marcado de ocurrencia máxima de eventos hacia horas de la tarde (1400 hora local [LT], de ahora en adelante). Para los eventos con SCM ocurridos sobre tierra [Figura 9 B)], se presenta una característica similar a todos los eventos clasificados, pero con un pico máximo menos marcado más tarde, hacia las 1600 LT y un segundo máximo en la madrugada (0000 LT). Los valores mínimos de ocurrencia de eventos se presentan hacia la mitad y el final de la mañana (0800 y 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 y en los trabajos de Mejía, 2002 y Nesbitt y Zipser, 2003 información satelital. La magnitud del ciclo diario de los eventos ocurridos sobre el océano es considerablemente menor que la de los eventos sobre tierra [Figura 9 A) y B) líneas azules], 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.

CONCLUSIONES

Se realizó un diagnóstico y caracterización de los eventos de tormenta con Sistemas Convectivos de Mesoescala. Se encontró un número bastante significativo de eventos de tormenta ocurridos en la región de estudio. Además, a pesar de que los eventos con SCM representan el 10% aproximadamente del total de los eventos, estos aportan casi el 70% de el volumen total de lluvia, lo que muestra la gran importancia de estos en las tormentas que ocurren en los trópicos. 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 mayor escala tales como el fenómeno del Niño/Oscilación del Sur. Se realizó un análisis por meses de estos eventos, mostrando un fuerte ciclo anual caracterizado por la migración meridional de la Zona de Convergencia Intertropical en la región de estudio. Estos análisis fueron realizados discretizando lo que ocurre sobre océano y sobre continente. Se encontró un pequeño ciclo en la intensidad promedio de los eventos ocurridos sobre el continente, que muestra que existen mayores intensidades a mediados del año. En cambio para los eventos sobre océano, no se encontró un ciclo tan marcado. Se realizó una caracterización del ciclo diurno eventos de tormenta, mostrando grandes diferencias entre lo que ocurre sobre océano y sobre tierra. Estas diferencias se deben primordialmente a los ciclos de insolación diaria entre ellos. Se encontró que para los eventos ocurridos sobre tierra, hay una presencia de un fuerte ciclo diurno que presenta un pico 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 entre lo que ocurre a través del día. Estos resultados parecen ser similares tanto para todos los eventos clasificados, como para los eventos con SCM.

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.
- Maddox, 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. (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.
- 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., 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. (2001). Caracterización del ciclo diurno de la precipitación en los andes tropicales de Colombia. En *de Meteorología, S. C., editor, Memorias IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología y VIII Congreso Argentino de Meteorología*, Bogotá, Colombia. Sociedad Colombiana de Meteorología.
- 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 Iloró (the rainiest locality on earth): Enhanced ocean-atmosphere-land interaction by a low-level jet. *Geophysical Research Letters*, 27(11):1675–1678.
- Velasco, I. y Fritsch, J. M. (1987). Mesoscale convective complex in the Americas. *Journal of Geophysical Research*, 92(D8):9591–9613.