

Tesis de Posgrado

Sistemas convectivos precipitantes de mesoescala sobre sudamérica: ciclos de vida y circulación en gran escala asociada

Vila, Daniel Alejandro

2004

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Vila, Daniel Alejandro. (2004). Sistemas convectivos precipitantes de mesoescala sobre sudamérica: ciclos de vida y circulación en gran escala asociada. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3806_Vila.pdf

Cita tipo Chicago:

Vila, Daniel Alejandro. "Sistemas convectivos precipitantes de mesoescala sobre sudamérica: ciclos de vida y circulación en gran escala asociada". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 2004.

http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_3806_Vila.pdf

EXACTAS UBA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



UBA

Universidad de Buenos Aires

**UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA Y LOS OCÉANOS**

TESIS

Para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

por

DANIEL ALEJANDRO VILA

**SISTEMAS CONVECTIVOS PRECIPITANTES DE
MESOESCALA SOBRE SUDAMERICA: CICLOS DE
VIDA Y CIRCULACIÓN EN GRAN ESCALA
ASOCIADA**

Directores de Tesis:

INÉS VELASCO

LUIZ AUGUSTO TOLEDO MACHADO

3806

2004

A Claudia

AGRADECIMIENTOS

Solo aquellos que se animan a sumergirse en la aventura del conocimiento pueden comprender cabalmente lo que implica la culminación de un proyecto. Litros de café compartidos y largas discusiones coronan un proceso que no es individual, sino que involucra a muchas personas: directores, jurados, colegas y hasta la propia familia, la que, sin su apoyo incondicional, nada de lo aquí plasmado tendría sentido.

Por eso me urge la necesidad de agradecer. No solo por el apoyo que recibí de todas esas personas (desde aquellos anónimos operadores que grabaron los CD con la información satelital hasta aquellos que definieron la orientación del trabajo) sino también porque se que gracias a todos y cada uno de ellos, esta tesis es una realidad.

Es por eso que quisiera, en primer lugar, agradecer a mis directores: A Inés, porque siempre tuvo la capacidad y la palabra justa para orientarme en la dirección correcta y a Luiz Augusto porque nunca dejo de apoyarme y estimularme en el desarrollo de esta tesis.

Por otro lado quiero agradecer a todo el personal del Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos de Brasil que, a través del proyecto FUNCATE, financiaron una pasantía en dicha institución para el desarrollo del algoritmo utilizado en esta tesis.

También quiero agradecer a las autoridades del Instituto Nacional del Agua, en nombre de la Directora del Sistema de Alerta Hidrológico de la Cuenca del Plata, Dora Goniadzki, gracias a las cuales y mediante el otorgamiento de una licencia, pude dedicarme en forma total a la concreción de partes importantes de este trabajo.

Por ultimo, y no menos importante, quisiera agradecer a toda mi familia. A Claudia que silenciosamente siempre me apoyo en forma incondicional. A mis padres, gracias a los cuales hoy tengo una profesión que amo y a todos aquellos colegas y amigos que me apoyaron en la concreción de este sueño.

ÍNDICE

RESUMEN	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUCCIÓN	1
2. LA CONVECCION Y EL ESTUDIO DEL CICLO DE VIDA DE LOS SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA (SCM)	4
2.1. DEFINICIÓN Y PRINCIPALES TIPOS DE SCM	4
2.1.1. Las líneas de inestabilidad.....	6
2.1.2. Los complejos convectivos de mesoescala (MCC)	7
2.2. PRINCIPALES METODOLOGÍAS SOBRE EL ESTUDIO DE CICLOS DE VIDA DE SCM A TRAVÉS DE IMÁGENES DE SATÉLITE	8
2.2.1. La técnica de Willams y Houze (1987)	10
2.2.2. La técnica de Machado et al. (1998)	11
2.2.3. El producto RDT (Rapid Development Thunderstrom) (Morel, 2001)	16
2.3. CONCLUSIÓN	18
3. LA TÉCNICA ForTrACC	19
3.1. INTRODUCCIÓN	19
3.2. LA TÉCNICA ForTrACC	19
3.2.1. El método de detección: identificación de los SCM.....	19
3.2.2. Descripción del modelo ForTrACC.....	22
3.2.2.1. Etapa de pre-procesamiento	23
3.2.2.2. Etapa de identificación de los sistemas convectivos y cálculo de parámetros morfológicos y radiativos	24

3.2.2.3.	Etapa de seguimiento y generación de imágenes virtuales	25
3.2.2.4.	Tratamiento de imágenes faltantes y fase de pronóstico.....	27
3.3.	VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA DE GENERACIÓN DE IMÁGENES: USO COMO HERRAMIENTA DE PRONÓSTICO A MUY CORTO PLAZO.....	31
3.3.1.	Datos y Metodología	32
3.3.2.	Verificación de los Resultados	34
3.4.	RESUMEN Y CONCLUSIONES	39
4.	PROPIEDADES MORFOLÓGICAS Y RADIATIVAS DE LOS SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA SOBRE EL SUR DE SUDAMERICA.....	40
4.1.	INTRODUCCIÓN	40
4.2.	DATOS Y MATERIALES	40
4.3.	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS.....	42
4.3.1.	Selección de casos	42
4.3.2.	Región de Nacimiento y Desplazamiento de los SCM.....	48
4.3.2.1.	Región de Nacimiento de los SCM.....	48
4.3.2.2.	Desplazamiento de los SCM	49
4.3.3.	Ciclo diurno de diversos parámetros en la evolución de los SCM	51
4.3.4.	La expansión inicial de los SCM como variable predictora.....	56
4.4.	VARIACIONES INTERANUALES.....	58
4.5.	CONCLUSIONES	60
5.	LOS SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA Y LA PRECIPITACIÓN.....	63
5.1.	INTRODUCCIÓN	63
5.2.	DATOS Y METODOLOGÍA DE ANÁLISIS	64
5.2.1.	Definición de un evento lluvioso a partir de los datos de superficie	65
5.2.2.	Definición de un evento lluvioso a partir de los datos de satélite.....	67

5.3.	RESULTADOS	67
5.3.1.	Análisis de la temperatura media de brillo de las imágenes de satélite	67
5.3.2.	Composición de Familias: Estudio de trayectorias, tamaño, temperatura mínima, área de convección profunda y excentricidad.	70
5.3.2.1.	Trayectorias medias.....	71
5.3.2.2.	Distribución de frecuencias del tamaño, temperatura mínima, área de convección profunda y excentricidad.....	72
5.3.2.3.	Evolución temporal.....	76
5.4.	RESUMEN Y CONCLUSIONES	78
6.	EL ENTORNO EN GRAN ESCALA ASOCIADO A LOS EVENTOS DE PRECIPITACIÓN.....	81
6.1.	INTRODUCCIÓN	81
6.2.	ENTORNO SINÓPTICO ASOCIADO A LA REGIÓN "IGUAZÚ"	83
6.2.1.	Niveles bajos	83
6.2.1.	Niveles medios.....	86
6.2.2.	Niveles altos	87
6.3.	ENTORNO SINÓPTICO ASOCIADO A LA REGIÓN "URUGUAY"	89
6.3.1.	Niveles bajos	89
6.3.2.	Niveles medios.....	92
6.3.1.	Niveles altos	93
6.4.	CONCLUSIONES	94
7.	ESTUDIO DE DOS EVENTOS PARTICULARES CON PRECIPITACIÓN.....	96
7.1.	INTRODUCCIÓN	96
7.2.	LOS EVENTOS DE LOS DIAS 10 Y 11 DE FEBRERO DE 2003 – REGION URUGUAY.....	97
7.2.1.	Análisis de las trayectorias de los SCM.....	98

7.3.	LOS EVENTOS DE LOS DIAS 26 Y 27 DE ENERO DE 2003 – REGION IGUAZU	
	104	
7.3.1.	Análisis de las trayectorias de los SCM.....	105
7.4.	CONCLUSIONES	110
8.	RESUMEN, CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS	112
8.1.	RESUMEN	112
8.2.	CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS	112
9.	BIBLIOGRAFÍA	116
ANEXO 1.....		123
	DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS RADIATIVOS Y MORFOLÓGICOS DE UN SCM..	123
ANEXO 2.....		127
A.	CONJUNTO DE IMÁGENES EXISTENTES.	127
B.	RED DE ESTACIONES EN SUPERFICIE.....	129
	REGION URU	129
	REGION IGU.....	130

SISTEMAS CONVECTIVOS PRECIPITANTES DE MESOESCALA SOBRE SUDAMERICA: CICLOS DE VIDA Y CIRCULACIÓN EN GRAN ESCALA ASOCIADA

Daniel Alejandro Vila

Directores de Tesis: Inés Velasco y Luiz Augusto Toledo Machado

RESUMEN

El objetivo de esta tesis es desarrollar y aplicar un algoritmo automático para el seguimiento de las características físicas de los Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) a través de todo su ciclo de vida, usando información de los canales térmicos (10.8 μm) de los satélites geoestacionarios.

Los aspectos principales de este sistema son los siguientes: (1) un método de detección de nubes convectivas basado en un umbral de temperatura (235 K); (2) cálculo de parámetros morfológicos y radiativos de cada SCM detectado en el paso anterior; (3) un algoritmo de seguimiento basado en la superposición de áreas entre imágenes sucesivas; (4) construcción del ciclo de vida de cada SCM y (5) la generación de imágenes virtuales sobre la base de la evolución de los SCM en pasos de tiempo anteriores.

Esta metodología ha sido aplicada a un conjunto de imágenes de satélite sobre el sudeste de Sudamérica que corresponden a los meses de diciembre, enero y febrero de los años 2000-2001, 2001-2002 y 2002-2003. Los resultados de los diferentes análisis muestran una diferencia significativa entre aquellos SCM que desarrollaron topes fríos (valores de temperatura mínima por debajo de los 210 K) a lo largo de su ciclo de vida y aquellos que no lo hicieron. Mientras que los que no desarrollan topes fríos estarían asociados, en términos medios, a SCM pequeños y de corta duración (efectos termo-orográficos), aquellos que llegan a desarrollar topes suficientemente fríos, estarían relacionados con fenómenos termodinámicos de una escala mayor. No obstante, en promedio, se observa una característica común en todos los SCM estudiados, independientemente de la temperatura mínima que estos pudieron alcanzar a lo largo de su ciclo de vida: la influencia de ciclo solar sobre la convección. El máximo de actividad convectiva (definida como la cantidad media de píxeles definidos por la isoterma de 235 K) se produce sobre el final de la tarde acompañado por un decrecimiento de la temperatura de los topes nubosos. Además, es

durante el horario de la mayor insolación que se observan los mayores valores de la tasa de expansión de los SCM a lo largo del día.

Para el periodo diciembre 2002 - febrero 2003, se seleccionaron aquellos SCM asociados con precipitaciones intensas y extendidas sobre dos regiones seleccionadas en la cuenca del Plata. Los resultados obtenidos a través de este análisis muestran que: (1) las precipitaciones intensas y extendidas están relacionadas con mínimos de temperatura de brillo observadas por satélite; (2) de acuerdo con la distribución de frecuencias, los SCM asociados con precipitaciones intensas y extendidas alcanzan los mayores tamaños y (3) los máximos valores observados en la intensidad de los procesos de expansión y enfriamiento que experimentan los SCM durante la primeras etapas de su ciclo de vida están relacionados con estos eventos.

A partir del análisis del entorno de gran escala asociado a los SCM que produjeron precipitaciones intensas y/o extendidas identificados anteriormente en el momento de su máxima extensión (maduración), se observa la presencia de una zona frontal al sudoeste de ambas regiones de estudio, el giro de viento en sentido anticiclónico con la altura (advección cálida) y la presencia de una fuerte advección de humedad en capas bajas. Dentro de estas características comunes, también se puede observar un movimiento de ascenso en niveles medios de la atmósfera (expresado como valores negativos de la velocidad vertical w en 500 hPa) y una fuerte divergencia en el nivel de 200 hPa.

El estudio de dos eventos particulares muestra un cierto grado de consistencia con los resultados expresados anteriormente: el crecimiento de los SCM hasta la maduración (máxima extensión) ocurre durante las horas de la tarde para luego comenzar un proceso de disipación en fragmentos. En ambos casos, se observa que a partir de alguno de estos sistemas en disipación se produce un regeneramiento durante la madrugada siguiente. Por otro lado, existe una buena correlación entre la temperatura de brillo observada y los fenómenos de tiempo significativo observado en algunas estaciones meteorológicas, sin embargo la relación entre precipitación acumulada y temperatura de brillo no es unívoca.

Palabras claves: satélite – sistemas convectivos de mesoescala – precipitación.

RAINY MESOSCALE CONVECTIVE SYSTEMS OVER SOUTHAMERICA: LIFE CYCLE AND THE ASSOCIATED LARGE SCALE ENVIRONMENT

Daniel Alejandro Vila

Directores de Tesis: Inés Velasco y Luiz Augusto Toledo Machado

ABSTRACT

The goal of this thesis is to develop and apply an algorithm for tracking the physical characteristic of mesoscale convective systems (hereafter MCS's) through its whole life cycle using the thermal channel (10.8 μm) of geostationary satellites.

The main features of this software are the following: (1) the cloud cluster detection method is based on a threshold temperature (235 K); (2) the evaluation of morphological and radiative parameters of each MCS's detected in the previous step; (3) the tracking technique based on overlapping areas between successive images; (4) the construction of the life cycle of each MCS and (5) the virtual image generation based on the evolution of the MCS in previous steps.

This methodology was applied to satellite images dataset covering the southeastern South America for December, January and February of 2000-2001, 2001-2002 and 2002-2003. The results show a significant difference between the group of MCS's that can develop cold tops (brightness temperature below 210 K) and those who can't. While the MCS's with no cold tops are associated, in general, with little and short lasting MCS's (thermo - orographic effects), those with cold tops would be related with larger scale effects. Nevertheless, in average, there is a common feature for all MCS independently of their minimum temperature during their life cycle: the influence of solar cycle on convection. The greatest convective activity (defined as the mean number of pixels below 235 K of whole dataset) is during the afternoon, accompanied by a cooling process of cold tops. During the maximum insolation time, is observed the maximum expansion rate of MCS's along the diurnal cycle.

Considering the period December 2002 – February 2003 only those MCS's associated with heavy and wide extended precipitation over two regions of Del Plata basin were selected. The results of this analysis show that: (1) heavy and widely extended rainfall is related to minimum brightness temperature; (2) according to frequency distribution, those MCS's

associated with rainfall reach larger extension than the other MCS's; (3) the greatest magnitude of expansion and cooling rate is related with those particular events.

The analysis of large scale environment associated with those MCS's previously identified for both regions during the maximum extent period (mature) show the existence of a frontal zone over the southwestern of each region, an anticyclonic veering with height (warm advection) and moist air advection in the lower levels of the atmosphere. Among these common features, an upward motion in the 500 hPa level and a strong divergence in upper levels of the troposphere (200 hPa) can be detected.

The study of two particular events shows some degree of consistency with previous results: the growth of MCS's during the afternoon followed for the dissipation into fragments. In both cases, a regeneration process can be observed in some of the existing MCS during the following dawn. In addition, it was found a good correlation between brightness temperature and significant weather over meteorological stations. Nevertheless, the relationship between accumulated rainfall and brightness temperature is not univoque.

Key words: satellite – mesoscale convective systems – rainfall.

1. INTRODUCCIÓN

En Argentina, los fenómenos del tipo convectivo son frecuentes entre primavera y otoño, y son conocidos en algunos casos por los daños que estos causan. Las tormentas de Goya (1998) y Santa Fe (2003) son particularmente recordadas por la población argentina debido a los efectos devastadores sobre la población y sobre los efectos negativos que han tenido sobre la economía regional. En este último caso, de acuerdo con estimaciones del Instituto Provincial de Estadística y Censos (IPEC), 81.528 pobladores de la ciudad de Santa Fe resultaron damnificados (una tercera parte de la ciudad quedó bajo las aguas) y la estimación de CEPAL, agencia de la ONU encargada de la elaboración de estudios económicos, eleva el monto de los daños hasta un total de \$ 2.878 millones. Esta cifra, que abarca tanto a daños directos como indirectos, representa un 12% del PBI provincial. En dicho episodio, las precipitaciones registradas en algunas estaciones meteorológicas superaron los 300 mm en 24 horas!

En el estado de arte actual, los modelos de previsión numérica del tiempo no responden adecuadamente en el pronóstico del desplazamiento y evolución de los fenómenos convectivos en el corto y muy corto plazo. Los trabajos de investigación actualmente en desarrollo para la actualización de estos modelos se basan principalmente en la necesidad de mejorar tres aspectos:

- La resolución espacial de los modelos acompañados de la modificación de la dinámica de los mismos (por ejemplo, tomando en cuenta la no-hidroestaticidad de la atmósfera)
- La posibilidad de tener en cuenta la mayor cantidad de fenómenos físicos a través de parametrizaciones.
- La necesidad de asimilación de datos de estaciones de redes más densas y de diversas fuentes (por ejemplo, a través de satélites) para un análisis más fino del comportamiento de la atmósfera.

En particular, es necesario desarrollar en paralelo, métodos de asimilación que permitan reproducir las características de mesoescala que gobiernan el desarrollo y la evolución de estos fenómenos (zonas de convergencia de pequeñas dimensiones, etc.)

Con el objeto de responder en parte a las demandas generadas y de mejorar el conocimiento sobre el ciclo de vida de los sistemas convectivos de mesoescala (en adelante SCM), diversos investigadores y Servicios Meteorológicos (en particular los europeos) han desarrollado diversas técnicas de extrapolación (algoritmos no numéricos) basados en modelos conceptuales sobre la evolución de dichos fenómenos. Estos métodos se concentran en el análisis de la previsión de la evolución de los sistemas convectivos una vez que estos ya son detectados, dejando de lado el problema de la previsión de iniciación de dichos sistemas. Sin ser exhaustivo, se pueden citar algunos ejemplos de dichos algoritmos:

- El sistema NEFODINA (NEFOanálisis DINámico) utilizado por el Servicio Meteorológico Italiano (De Leonibus et al, 1998) se basa en el seguimiento de los sistemas convectivos más grandes a través de imágenes del satélite METEOSAT y, a partir del conocimiento de su fase en el ciclo de vida (crecimiento / decrecimiento), realiza un pronóstico a 30 minutos a través de una extrapolación lineal.
- El Servicio Meteorológico Español (Riosalido et al., 1998) genera un pronóstico a dos horas de plazo, del desplazamiento y evolución de sistemas convectivos a través de imágenes METEOSAT basado en un modelo conceptual del comportamiento de estos sistemas durante la época de verano. Este modelo es obtenido a partir de una climatología de estos sistemas que se desarrollan sobre España.
- El Sistema RDT (Rapid Developing Thunderstorm) cuya principal característica se basa en el uso de un umbral de temperatura adaptativo (Peak et Tag, 1994), fue desarrollado por Meteo France para el seguimiento y evolución de los sistemas convectivos desde estados muy precoces (típicamente con temperaturas de tope de nube inferior a los 263 K) hasta su disipación (Morel, 2001)

Este trabajo de tesis se inscribe en el uso de esta serie de herramientas que permiten el estudio del ciclo de vida de sistemas convectivos de mesoescala (SCM) a partir del uso de imágenes de satélite, como así también la provisión de un pronóstico a corto plazo del posible desplazamiento y evolución de dichos sistemas. Por otra parte, la generación de una base de datos con millares de estos sistemas, permitirá, en particular, la caracterización estadística climatológica de aquellos SCM asociados a fenómenos severos en la región que abarca desde los 35° a los 22° de latitud sur de América del Sur.

Más precisamente, los lineamientos de este trabajo son los siguientes:

- Una revisión bibliográfica de los algoritmos existentes y algunos resultados de su aplicación sobre la región sudamericana se presentan en el Capítulo 2.
- Desarrollar un sistema de seguimiento de sistemas convectivos utilizando los datos del canal 4 (10,4 μm) del satélite GOES 8 (Capítulo 3). Asimismo se desarrollarán algunos conceptos para que apuntan a la utilización de esta herramienta de seguimiento de sistemas convectivos como una herramienta de pronóstico a muy corto plazo (30 minutos a 2 horas) y la verificación de estas estimaciones con imágenes reales.
- A partir de la herramienta desarrollada, crear una base de datos con las características radiativas y morfológicas de los SCM (como ser la temperatura mínima, tamaño, excentricidad, etc), como así también sobre el estado de su ciclo de vida (iniciación, maduración y disipación), que afectan la región comprendida entre los paralelos 35° S y 22° S sobre el continente sudamericano. Esta herramienta, totalmente automática, permite la generación de estadísticas para tres veranos del hemisferio sur incluidos en este estudio (2000-2001, 2001-2002, 2002-2003)
- En el Capítulo 5 se analizan en detalle los sistemas que han producido importantes cantidades de precipitación en la región de estudio.
- La identificación del entorno sinóptico en gran escala a partir del uso de los datos del análisis del NCEP se desarrolla en el Capítulo 6. Se calculan aquellas variables dinámicas y termodinámicas que permiten la caracterización del estado y la posible evolución del sistema convectivo en las diferentes etapas de su ciclo de vida.
- En el Capítulo 7 se estudiarán algunos casos particulares de los analizados en el Capítulo 5 con el objeto de conocer en mayor profundidad la relación entre los parámetros físicos observados por el satélite y los fenómenos de tiempo significativos observados en las estaciones de la red meteorológica.

Trabajos futuros como regionalización de SCM, características morfológicas y radiativas de los SCM asociados a eventos particulares (por ejemplo, jet en capas bajas), como así también, la aplicación de modelos conceptuales de evolución de sistemas convectivos vistos a través de imágenes de satélite a la estimación de precipitación, son aplicaciones naturales que pueden desarrollarse tomando como base este trabajo.

2. LA CONVECCION Y EL ESTUDIO DEL CICLO DE VIDA DE LOS SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA (SCM)

2.1. DEFINICIÓN Y PRINCIPALES TIPOS DE SCM

La atmósfera obtiene las tres cuartas partes de su energía aproximadamente a través de la liberación de calor latente asociada a la formación de precipitación (Houze 1982, Johnson 1984). A partir de estas precisiones, es importante destacar que más de la mitad de la precipitación es provocada por convección (Houze 1977, 1989). Es por ello que el estudio de la estructura y la evolución de los sistemas convectivos ha sido extensamente estudiado a través de diversos trabajos y experiencias de campo tales como, por ejemplo, el GARP (Global Atmospheric Research Program) Atlantic Tropical Experiment (GATE, Leary y Houze 1979; Houze y Betts, 1981; Johnson y Houze, 1987), el experimento TOGA COARE (Tropical Ocean and Global Atmosphere Coupled Ocean – Atmosphere Response Experiment) (Cheng et al., 1996) y otras experiencias regionales que actualmente se están realizando como el LBA (Large – Scale – Biosphere – Atmosphere) (Silva Dias, 2001); y el VAMOS (Variability of American Monsoon Systems) (Torres y Nicolini, 2002)

A partir de las conclusiones de estos y otros trabajos, y de las valiosas discusiones de Cotton y Anthes (1989), se puede ver que la variedad y complejidad de los procesos convectivos y la estructura de los sistemas convectivos es muy grande. Esta información es esencial para el planteo de un modelo teórico que detalle las diferentes características de estos sistemas y de como éstos interactúan con la circulación general de la atmósfera.

Según lo documentan diversos autores (Cotton y Anthes, 1989) la convección puede ocurrir desde la pequeña escala (<60 km - < 4 horas), con una distribución espacial altamente aleatoria y donde la inestabilidad estática condicional generada por el calentamiento diferencial de la superficie terrestre juega un papel importante en su desarrollo; hasta los sistemas de mesoescala más organizados (200-2000 km). En este último caso, está documentado que la circulación en gran escala asociada cumple un papel importante en la organización y tiempo de vida de dichos sistemas (Machado y Rossow, 1993; Laing y Fritsch, 2000).

Es por ello que resulta útil, en este punto, distinguir entre lo que son celdas convectivas y sistemas convectivos de mesoescala. Los organismos celulares se pueden clasificar de acuerdo con la definición de Houze (1993) en:

Celdas convectivas individuales: estos sistemas están constituidos por una sola celda y tienen, en general, tiempos de vida inferior a una hora

Superceldas: son sistemas formados por una gran celda convectiva cuyo tiempo de vida puede ser de varias horas. Normalmente con este tipo de formación están asociados fenómenos severos (vientos fuertes, precipitación intensa, granizo, etc.)

Formaciones multicelulares: están constituidas por una gran cantidad de celdas convectivas en diferentes estadios de su ciclo de vida, cuya formación se genera en la periferia de la generación de las celdas precedentes con intervalos que varían entre 10 y 15 minutos.

Para cada una de estas formaciones existen condiciones propicias para su desarrollo, como así también modelos conceptuales adecuados sobre su génesis y evolución (Weisman y Klemp, 1982).

Los sistemas convectivos de mesoescala resultan de la organización de sistemas celulares en conglomerados de tamaño más importante. Mientras que, en general, los sistemas celulares corresponden a la mesoescala meso γ (de 2 a 20 km) o la escala meso β , (20 a 200 km.) (Orlanski, 1975), los sistemas convectivos de mesoescala (SCM) tienen una escala horizontal superior a los 200 km, encontrándose, en su gran mayoría, en la mesoescala meso α (200 a 2000 km). Es de hacer notar que los sistemas multicelulares alcanzan dimensiones comparables a las de un pequeño SCM.

Houze (1993) definió un sistema convectivo de mesoescala de la siguiente forma:

"... un sistema convectivo de mesoescala es un sistema nuboso que aparece compuesto de sistemas celulares y que produce una zona continua de precipitaciones de extensión horizontal del orden de los 100 km o más..."

Si bien este enunciado permite incluir dentro de los SCM todos aquellos sistemas nubosos de cierto tamaño sin imponer criterios morfológicos; esta definición no se adapta bien a una 'definición satelital' de SCM, ya que la zona de precipitación es difícil de evaluar en regiones donde la red de medición es pobre.

Existe cierto consenso sobre la existencia de diferentes tipos de sistemas convectivos de acuerdo con su organización y estructura observada desde los satélites: las líneas de inestabilidad, caracterizadas por su organización en forma de líneas de celdas convectivas individuales (Houze, 1977; Houze y Betts, 1981; Johnson y Houze, 1987), los complejos convectivos de mesoescala (MCC), caracterizados por un arreglo organizado de las celdas convectivas individuales (Maddox, 1980; Velasco y Fritsch, 1987; Miller y Fritsch, 1991) y todos aquellos que no puedan ser involucrados en alguna de estas categorías.

2.1.1. Las líneas de inestabilidad

Con el objetivo de tener una caracterización más precisa sobre cada uno de estos tipos de SCMs, Zipser (1977) propone la siguiente definición para las líneas de inestabilidad:

“... nubes del tipo cumulonimbus, organizadas en forma de línea, asociadas con un pseudo frente frío en superficie, que se desplazan más rápidamente que el aire del entorno en niveles bajos y con la dirección del viento coincidente con el aire frío que se encuentra por detrás de la línea de inestabilidad ...”

Este tipo de sistemas ha sido bastante estudiado por diversos autores y existen modelos conceptuales como el propuesto por Houze y otros (1989b) (Figura 2.1). Este modelo se basa en que la organización en forma de línea provee el calor y la humedad necesaria que está por delante del sistema, dentro de las celdas convectivas individuales cuyo ordenamiento es paralelo al borde anterior del sistema. Asimismo la fuerte cortante de viento en el entorno separa las corrientes ascendentes de las descendentes de tal manera que los movimientos en gran escala son posibles (Houze 1989a, Weisman 1992).

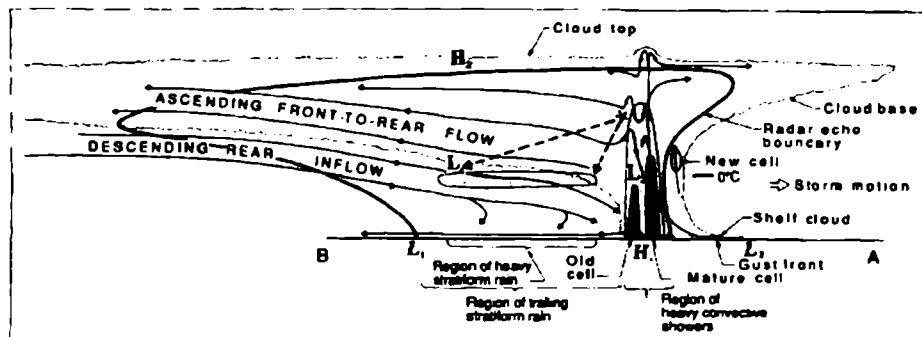


Figura 2.1 : Modelo conceptual de una línea de inestabilidad con su correspondiente región estratiforme (después de Houze et al., 1989b)

2.1.2. Los complejos convectivos de mesoescala (MCC)

La definición de un complejo convectivo de mesoescala fue propuesta por Maddox (1980) y se basa en una combinación de criterios de duración, tamaño y forma de los sistemas basados en información de imágenes GOES IR. Más precisamente, la definición de Maddox es la siguiente:

“... se llama complejo convectivo de mesoescala (MCC) a todo sistema convectivo de mesoescala que cumpla con los siguientes requisitos en las imágenes satelitales infrarrojas”

- *La superficie de la región con temperaturas inferiores o iguales a los -32° debe superar los 100.000 Km.*
- *La superficie de la región con temperaturas inferiores o iguales a los -52° debe superar los 50.000 Km.*
- *Las características A y B deben persistir por lo menos durante 6 horas*
- *El coeficiente de aspecto (relación entre los diámetros mayor y menor del sistema) en el umbral de -52 grados debe ser superior a 0.7 en el momento que esa región alcance su máxima extensión ...”*

No obstante, diversos autores han modificado levemente esta definición pero han mantenido el criterio del coeficiente de aspecto. En particular, en el trabajo de Velasco y Fritsch (1987) sobre el tamaño y frecuencia de los MCC en Sudamérica, los umbrales utilizados fueron de -42°C y -64°C para un conjunto de datos y -40°C y -62°C para otro conjunto de datos, por lo que los resultados de este trabajo en particular proveen una estimación más conservadora en relación con los resultados obtenidos por Maddox.

Existen diversos trabajos como el de Maddox (1983) y Cotton et al. (1989b) entre otros, sobre los entornos favorables para la formación de complejos convectivos de mesoescala. Los mismos sugieren la existencia de ciertas características comunes en todos aquellos lugares del mundo donde se forman: la existencia de una vaguada de onda corta junto con una zona frontal cuasi-estacionaria y un pronunciado jet en capas bajas (LLJ) acoplado con

advección caliente en el área inmediata de formación de estos sistemas. Estos elementos son fundamentales para la evolución de dichos complejos según Laing y Fritsch (2000).

2.2. PRINCIPALES METODOLOGÍAS SOBRE EL ESTUDIO DE CICLOS DE VIDA DE SCM A TRAVÉS DE IMÁGENES DE SATÉLITE

Las mediciones realizadas a través de satélites no sustituyen a otros sistemas de medición como estaciones de superficie y radar, sino que complementan a dichas medidas en dos formas: mientras que las mediciones realizadas a través de un radar meteorológico son sensibles a la "lluvia", las longitudes de onda que se utilizan en los satélites son sensibles a las nubes, incluidas aquellas asociadas con la convección. Por otro lado, solamente las mediciones realizadas a través de satélite pueden cubrir un amplio rango de escalas temporales y espaciales continuas involucradas con los ciclos de vida de los sistemas convectivos (SCM). Solamente con el uso de estos sistemas de medición indirecta es posible el monitoreo de sistemas de algunos cientos de kilómetros de extensión y su interacción con la circulación en gran escala (Machado et al., 1998).

En diferentes trabajos se han usado imágenes de satélite para el estudio del ciclo de vida de los SCM. La mayoría de ellos se basaron en el uso de los canales infrarrojos y/o visibles de los satélites meteorológicos geoestacionarios (Velasco y Fritsch, 1987; Duvel, 1989; Laing y Fritsch, 1993^a, 1993b; Machado y Rossow, 1993, entre otros). Más recientemente, la introducción de sensores que actúan en el espectro de las microondas, tanto activas como pasivas, sobre los satélites de órbita polar y aquellos diseñados para el estudio de la distribución de la precipitación en los trópicos (Tropical Rainfall Measurement Misión - TRMM) han provisto una fuente de información adicional. (Mohr y Zipser 1996, Kummerow et al 2000, Ferraro 1996).

Los métodos que utilizan datos de satélite para el estudio de los SCM pueden ser aplicados desde tres puntos de vista diferentes: 1) Desarrollo de algoritmos que generen información acerca de las propiedades físicas de las nubes (como la precipitación, por ejemplo) combinando los sensores de diferentes satélites. (Miller 2000, Turk 2000); 2) Desarrollo de metodologías para el estudio estadístico de parámetros morfológicos y radiativos de la estructura interna de los sistemas convectivos (Machado 1998, Vila y Machado, 2002); 3) Desarrollo de métodos de seguimiento de sistemas convectivos para seguir la evolución de

sus propiedades morfológicas y radiativas a través de todo su ciclo de vida (Machado et al., 1998).

En los párrafos siguientes se presenta una revisión de los principales métodos de seguimiento de sistemas convectivos a lo largo de su ciclo de vida a través de imágenes de satélite.

Para la generación de una base de datos de SCM vistos a través de imágenes de satélite, debido a la gran cantidad de datos que esto involucra, es necesario recurrir a la automatización de tareas, ya que el proceso manual de inspección desarrollado por Maddox (1980), y Fritsch y sus colegas, por ejemplo, (Velasco y Fritsch, 1987; Miller y Fritsch, 1991) es muy tedioso y, a veces, subjetivo. Estas características hacen que sea muy difícil acceder a estadísticas confiables por lo limitado de la cantidad de casos que se pueden considerar.

Antes de continuar con la descripción de las diferentes metodologías, es preciso introducir algunos términos representativos de las tres principales etapas que tienen estos algoritmos de seguimiento de sistemas y que son comunes, en general, a todos los métodos:

La etapa de la detección de los sistemas convectivos: Esta operación consiste en la definición en una imagen infrarroja (i.e., $10,8 \mu\text{m}$ en el satélite GOES 8) del conjunto de píxeles que representan los sistemas nubosos en dicha imagen. Esta operación, también llamada segmentación por otros autores, es aquella que permite la identificación de un SCM como el conjunto de píxeles contiguos que tienen ciertas características radiométricas. En general, se propone un umbral fijo de temperatura de brillo para la discriminación de estos sistemas (o valor de espesor óptico, en caso de usar canales visibles), aunque existen otras metodologías cuyo umbral es dinámico (Peak y Tag, 1994). En esta etapa es posible el cálculo de otros parámetros radiativos y morfológicos que permiten una mejor identificación del sistema convectivo (Vila y Machado, 2003).

La etapa de seguimiento: Esta etapa permite, a través de la detección de los SCM en imágenes consecutivas, determinar la continuidad en el tiempo de un dado sistema convectivo. Los principales criterios para determinar esta continuidad se basan en la conservación de parámetros radiativos y/o morfológicos (Máxima superposición en Machado et al., 1998 o máxima correlación espacial entre sistemas en Carvalho et Jones, 2001) combinados con criterios físicos determinados, como la velocidad crítica de los sistemas y su

máxima contracción o expansión. Este procedimiento permite generar trayectorias de los sistemas que son almacenadas en la base de datos

La etapa de discriminación: Esta etapa, aunque no está directamente relacionada con todos los algoritmos y esta relacionada con la detección y selección de aquellas trayectorias que pertenezcan efectivamente a un sistema convectivo a partir de criterios de temperatura, tamaño, etc.

2.2.1. La técnica de Willams y Houze (1987)

Las técnicas automáticas de seguimiento de sistemas convectivos, se han desarrollado a partir del trabajo de Woodley et al (1980), basado en la velocidad de propagación de dichos sistemas. Esta idea fue tomada por otros autores, entre ellos está el trabajo de Williams y Houze (1987) (en adelante WH87), como punto de partida de sucesivas mejoras en los algoritmos de seguimiento de sistemas nubosos. Este trabajo se desarrolló como parte del experimento WMONEX (Winter Monsoon Experiment) usando un conjunto de imágenes de temperatura de brillo del satélite japonés GMS-1 en el periodo que va del 9 al 29 de diciembre de 1978 sobre una región comprendida entre los 15° N y los 10° S y entre los 100° W y los 125° W. La resolución espacial de las imágenes era de 2,4 km. en el punto subsatélite y su resolución temporal de 3 horas. Debido a que el objetivo de ése trabajo fue el seguimiento de áreas con precipitación, en la etapa de detección se fijó un umbral de temperatura relativamente bajo ($T_{ir} < 213^{\circ} \text{K}$). Según los autores, ese umbral está más estrechamente relacionado con los eventos de precipitación en esa región y para esa época del año. En esa primera etapa, la detección de un SCM no estaba solamente asociada a un umbral de temperatura, sino que también debía alcanzar un tamaño mínimo de $5 \times 10^3 \text{ km}^2$. En la etapa de seguimiento de un conglomerado ("*cluster*"), de una imagen a la siguiente, el algoritmo asume que la posición de un dado SCM en el tiempo t_0 tiene una superposición suficiente con el mismo sistema en el tiempo t_{0+3h} . Este requisito debe cumplirse para cada par de imágenes tanto avanzando en el tiempo como retrocediendo en el mismo. En otras palabras, se realiza una comparación entre la imagen en el tiempo t_0 y t_{0+3h} , como así también entre el tiempo t_{0+3h} y el tiempo t_0 para cada par de imágenes consecutivas.

Este último requerimiento, también incluido en la metodología ForTrACC (Forecasting and Tracking of Active Cloud Clusters) desarrollada en esta tesis, asegura la posibilidad de capturar tanto la separación de un sistema convectivo en dos o más (comparación

retrocediendo en el tiempo), como así también la fusión de varios sistemas en uno solo (comparación en avance del tiempo).

Entre los resultados más importantes de WH87 se puede mencionar el hecho de que el total de precipitación acumulada es atribuible a unos pocos "clusters" que alcanzaron su máxima extensión. Otro punto importante es la diferencia entre la distribución de tamaño de los sistemas entre continente y océano. Al igual que en Machado et al. (1993) y entre otros autores, sobre el océano, una considerable proporción de cobertura nubosa y, por lo tanto, de lluvia proviene de "clusters" cuya extensión es superior a los 1.200.000 km², mientras que no se observaron sistemas de ese tamaño sobre el continente. Asimismo, la ocurrencia de SCM está relacionada con la existencia (o no) de los monzones, por lo que se sugiere que la escala sinóptica juega un rol importante en el desenvolvimiento de grandes conglomerados nubosos. En la introducción no aparecen estos sistemas ya que no son incluidos en este estudio.

2.2.2. La técnica de Machado et al. (1998)

La importancia del trabajo de Machado et al. (1998), en adelante (M88) reside en algunos puntos a destacar:

- La validación de la metodología de seguimiento de sistemas convectivos a través de un doble análisis: manual y automático;
- El estudio, con una cantidad de trayectorias analizadas superior a las 3200, cubre todo el continente americano (tanto en regiones tropicales como latitudes medias) y todas las estaciones del año (dos años de datos entre 1987 y 1988)
- La realización de una evaluación de la sensibilidad de diversos parámetros morfológicos y radiativos para la correcta identificación del sistema convectivo en el tiempo posterior.

El trabajo se desarrolló utilizando dos años de imágenes de temperatura de brillo del canal 4 (10,8 μm) del satélite GOES remuestreados y estandarizados a una resolución espacial de 30 Km. y una resolución temporal de 3 horas (Rossow et al, 1991). Estas imágenes cubren todo el continente americano desde los 40° N hasta los 40° S. La etapa de detección se lleva a cabo utilizando dos umbrales de temperatura de brillo: los SCM fueron identificados por las áreas cuya temperatura era inferior a los 245° K ($T_{ir} < -28^\circ \text{C}$), que en algunos casos

contienen topos más fríos, identificados como los píxeles cuya temperatura de brillo era inferior a 218°K ($T_{ir} < -55^{\circ}\text{C}$). En este proceso de detección se imponía un tamaño mínimo de 4 píxeles (3.600 km^2). En esa primera etapa son calculados varios parámetros morfológicos y radiativos que describen a cada sistema convectivo en particular, como ser: localización, área, número de topos fríos (si los hubiera), fracción de área convectiva, excentricidad y orientación, temperatura mínima y media del SCM, varianza y gradiente medio de temperatura de brillo, entre otros (ver Tabla 1 en Machado et al, 1998). Todas estas variables son tomadas en cuenta en el estudio de sensibilidad en la etapa de seguimiento.

La etapa de seguimiento se llevo a cabo a través de dos procedimientos; uno automático y otro semiautomático. En ambos casos se determinó una ventana de búsqueda del sistema convectivo en el tiempo t_{o+3h} de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ centrado en el centro de masa del sistema en el tiempo t_o . En la imagen siguiente (t_{o+3h}) se individualizan todos los sistemas que se encuentran en la ventana definida anteriormente. Estos son los posibles candidatos a suceder al sistema convectivo en el tiempo t_{o+3h} . En el sistema automático se examinan las diferencias de los diferentes parámetros entre el SCM en el tiempo t_o y los posibles candidatos en el tiempo t_{o+3h} , eligiéndose aquel cuya diferencia sea menor. En la metodología semiautomática, el operador debe elegir entre los posibles candidatos cual es el sucesor (o no) del sistema convectivo original.

Asimismo, se propone, siguiendo la línea de WH87 y otros investigadores, el criterio de máxima superposición para el seguimiento del SCM. Además, se consideran los sistemas con tamaño superior a los 31.400 km^2 (radio efectivo de 100 km) que aproximadamente representan un porcentaje inferior al 33% de los sistemas convectivos, pero que son responsables de la mayor parte de la cobertura nubosa (Vila y Machado, 2003). Con la misma técnica se analizan los posibles candidatos y se escoge aquel cuya superposición sea máxima y que supere, por lo menos el 15% del área del sistema en el tiempo t_o .

Al igual que en WH87 en M88 se requiere que el SCM esté presente en por lo menos 3 imágenes (duración mínima de 6 horas). Una nueva restricción es impuesta a las trayectorias obtenidas: las mismas no pueden comenzar luego de una imagen faltante y no pueden finalizar antes de una imagen faltante. De esta manera, se asegura que la trayectoria no haya estado presente ni antes ni después de una imagen faltante. Esto elimina sistemas que

pueden haber existido en el período analizado, hecho a tener en cuenta si se hace algún tipo de estadística.

En M88 el sucesor del sistema original es aquel que tiene mayor área superpuesta, descartando al resto. De acuerdo con los autores, esta limitación no es importante teniendo en cuenta las características espacio – temporales de los datos (30 km, 3 horas), como así también la limitación en el tamaño de los sistemas. En este caso, la alternativa de único sistema que cumpla con el requisito de mínima superposición (15%) se cumple en aproximadamente el 90% de los casos.

Los principales resultados obtenidos por los autores pueden sintetizarse en los siguientes puntos:

- En cuanto al tiempo de vida y la trayectoria de los sistemas convectivos se puede concluir que el tiempo de vida medio es de 10 horas en las estaciones de verano y otoño australes. Similares resultados fueron obtenidos por Guedes y Silva Dias (1985) y Velasco y Fritsch (1987). Asimismo las cartas medias estacionales del ciclo de vida (en horas) y de dirección de propagación realizadas sobre una grilla de 5° X 5° se asemejan a los patrones de gran escala mostrando, en particular sobre la región sudamericana al sur del Ecuador, ciertos rasgos característicos de los sistemas que actúan en el continente. La circulación anticiclónica predominante alrededor del Alta Boliviana y la presencia de la zona de convergencia del Atlántico Sur (SACZ) durante el verano austral, son algunas de las características que este trabajo reproduce con fidelidad.
- Otro aporte importante de este trabajo es la relación entre algunos parámetros radiativos y morfológicos de los SCM (ya citados anteriormente) y su ciclo de vida: existe una relación casi lineal entre el tamaño medio del sistema convectivo y su duración. Esta misma relación se repite si se toma el tamaño de los topes más fríos. Cuanto mayor es su tamaño medio mayor es su tiempo de vida. En cuanto a los valores absolutos obtenidos por los autores, los tamaños medios de los sistemas convectivos (umbral de 245° K) varían entre 70.000 y 280.000 km²; mientras que el de los topes fríos más grandes oscilan entre los 11.000 y los 31.000 km² (umbral de 218° K). Es importante tener en cuenta que se impuso el criterio de seguimiento de sistemas convectivos mayores a los 31.400 km². Los ciclos de vida variaron entre las

6 horas (mínimo impuesto por la metodología) y las 27 horas. La fracción de área convectiva (relación entre el área total y el área ocupada por los toques fríos) se mantiene casi inalterable para todos los tamaños y tiempos de vida, pero decrece monótonamente a lo largo del ciclo de vida. Este hecho refuerza la hipótesis propuesta por Machado y Rossow (1993) donde durante la etapa de formación del sistema convectivo la fracción de área convectiva es muy grande y va decreciendo a lo largo del ciclo de vida hasta que el sistema se disipa en fragmentos (figura 2.2)

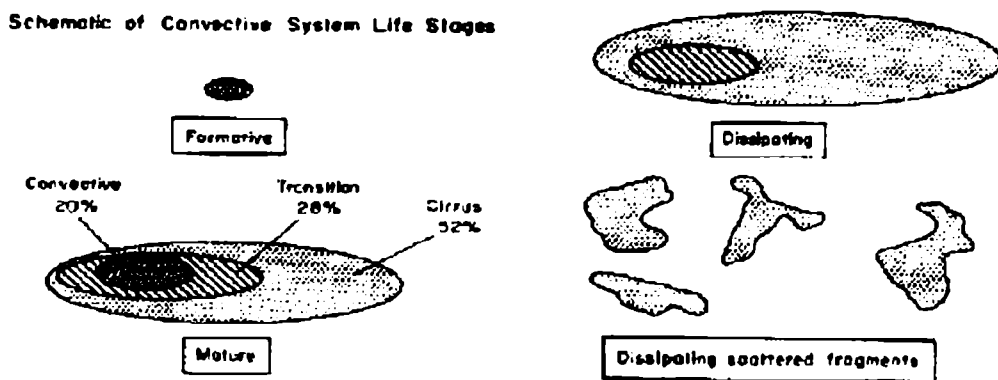


Figura 2.2: Representación esquemática de ciclo de vida de un sistema convectivo (después de Machado y Rossow, 1993)

- En cuanto a la evolución de los sistemas convectivos, este trabajo sugiere que existe una relación entre la expansión de los sistemas y las propiedades de los toques fríos durante las primeras horas de su tiempo de vida y su posible evolución (duración y tamaño máximo). Este punto en particular va a ser abordado luego durante el desarrollo de este trabajo de tesis.

Una mejora a esta metodología fue desarrollada por Vila et al. (2000) la cual se evaluó para un pequeño conjunto de datos sobre el sudeste de Sudamérica. Cincuenta y siete imágenes del satélite GOES 8 (Southern Hemisphere Scan) – canal 4 (10.8 μm) cuya resolución espacio-temporal es de 4 Km. y $\frac{1}{2}$ hora (en promedio) entre el 15 y 16 de abril de 1999 fueron utilizadas para probar el desempeño del nuevo modelo. Basado en el mismo proceso de detección (umbrales de temperatura de 245° K y 218° K respectivamente para la identificación del sistema convectivo y los toques fríos asociados (si los hubiera), la etapa de seguimiento se realizó a través de una ventana dinámica cuyas dimensiones se obtienen como el rectángulo que contiene al sistema y un criterio de máxima velocidad (40 km/h) para desplazar los lados de este rectángulo y así obtener la ventana de búsqueda.

Asimismo, el tamaño de los sistemas a seguir (*“tracking”*) no era fija sino que se basaba en la diferencia horaria entre las imágenes. Si la diferencia horaria entre imágenes es menor, será posible acompañar a sistemas más pequeños durante el ciclo de vida. Esta relación (entre el tamaño del SCM y su posible tiempo de vida) fue determinada por Machado et al (1998) de donde se extrajo la Figura 2.3 en la cual se puede observar, por ejemplo, que si la diferencia horaria entre imágenes es de 6 horas, solamente podrán ser seguidos aquellos SCM cuyo tamaño sea mayor a 71.000 km² (o 150 píxeles expresado como radio efectivo, Machado et al, 1998)

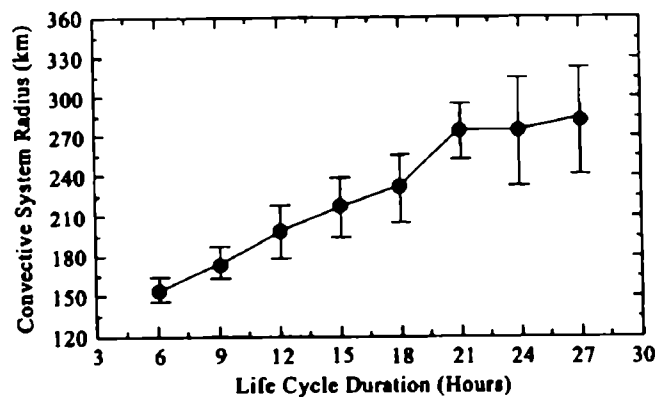


Figura 2.3: Promedio y desvío estándar del tamaño del sistema convectivo (expresado como radio efectivo) en función de la duración del ciclo de vida (después de Machado et al, 1998)

Por último, la superposición de áreas es llevada a cabo ajustando una elipse (teniendo en cuenta la excentricidad e inclinación de cada sistema) a cambio del círculo propuesto por la metodología de Machado et al (1998). La reconstitución de sistemas convectivos a través de esta técnica ha dado resultados satisfactorios (Vila y Machado, 2003). En este caso también, los criterios de mínima superposición (fijados en el 15% para el caso de Machado et al, 1998) no son fijos y se basan en valores teóricos de superposición que tienen en cuenta la forma (excentricidad), el desplazamiento (velocidad crítica) y valores de convergencia / divergencia máximos de los sistemas convectivos (variación en el área entre un tiempo y el siguiente).

Debido al tamaño de la muestra no es posible extractar conclusiones definitivas pero para esta muestra en particular, se obtuvo que el horario de inicio de los sistemas como su distribución geográfica (océano – continente) coinciden con los resultados de Velasco y Fritsch (1987) para el caso particular de los MCCs.

2.2.3. El producto RDT (Rapid Development Thunderstrom) (Morel, 2001)

Enmarcado en el proyecto SAF (Satellite Application Facilities) de la agencia EUMETSAT (EUropean organization for the exploitation of METeorological SATellites), el servicio meteorológico Francés desarrolló una metodología operativa de seguimiento de sistemas convectivos: el producto RDT (Morel, 2001).

Este algoritmo, a diferencia de las metodologías tradicionales de seguimiento de sistemas nubosos donde los umbrales de temperatura para la detección de los mismos son fijos (normalmente entre 245 K y 235 K, según Mapes y Houze, 1993); se basa en un umbral de temperatura adaptativo con el objeto de la detección precoz de sistemas nubosos que luego se desarrollarán como sistemas convectivos de mesoescala. En efecto, en la metodologías basadas en umbrales fijos de temperatura, si la temperatura de detección es demasiado 'fría', la detección de los sistemas se producirá en estados del ciclo de vida más avanzados; mientras que un umbral demasiado 'caliente' traerá como consecuencia un único gran sistema nuboso que posee diferentes células (cuyo estado de ciclo de vida puede ser diferente) dentro del mismo.

La solución propuesta por los autores, inspirada en los métodos de clasificación jerárquica de Peak y Tag (1994) , propone la utilización de un umbral de temperatura no fijo (adaptativo) que depende del estado de desarrollo vertical de cada uno de los sistemas detectados. Gracias a esa dependencia, es posible la detección de los sistema convectivos en sus primeras etapas de su ciclo de vida (usando un umbral 'caliente') y luego seguirlos a lo largo de su ciclo de vida utilizando un umbral más 'frío' a medida que estos sistemas se desarrollan verticalmente.

El algoritmo de detección cuenta con varios parámetros para la detección de sistemas nubosos: el umbral de temperatura más caliente (T_{calido}), el umbral de temperatura más frío ($T_{frío}$), el incremento de temperatura (ΔT) y un umbral de tamaño (S_{min}). En el trabajo de Morel (2001), que sirvió para testar esta metodología, los valores utilizados fueron los siguientes: $T_{calido} = 263$ K (-10° C), $T_{frío} = 218$ K (-55° C), $\Delta T = 5^\circ$ C y $S_{min} = 30$ km² (aproximadamente 1 píxel).

La técnica RDT se basa en la siguiente regla: *el umbral de temperatura utilizado para la detección de un sistema nuboso dado es el umbral de temperatura más frío para aquel cuya diferencia de temperatura entre ese umbral y la temperatura mínima de la célula sea superior*

o igual a ΔT_{tour} . En este caso $\Delta T_{tour} = 3^\circ \text{C}$. Esta regla puede ser ejemplificada a través de la Figura 2.4 extractada del trabajo de Morel (2001) en la cual se puede observar un caso simple (Figura 2.4, izquierda), en la cual la célula será seguida en el umbral de temperatura $T_{chaud} - 2\Delta t$ y en el caso mas complejo (Figura 2.4, derecha) en que solo la célula de la derecha es seguida ya que la de la izquierda no cumple con la condición de $\Delta T_{tour} > 3^\circ \text{C}$

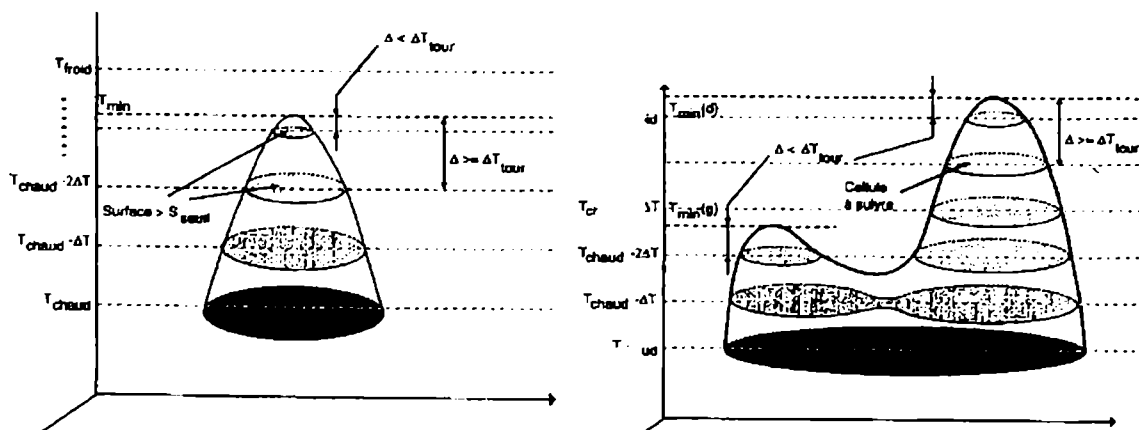


Figura 2.4: Representación esquemática de funcionamiento de la regla de detección basada en la temperatura de las células para un caso simple (izquierda) y para uno mas complejo (derecha) (después de Morel, 2001)

Debido a la gran cantidad de pequeños sistemas nubosos que genera este método de detección, el método de seguimiento basado en áreas superpuestas de imágenes sucesivas (Williams y Houze, 1987; Machado, 1998) no es útil en el caso de sistemas pequeños. Es por ello que en el caso de no haber superposición (si la hay, la continuidad esta garantizada), la técnica RDT usa un método de búsqueda basado en una ventana fija de 30 píxeles y una técnica de estimación de desplazamiento basada en la correlación cruzada espacial es utilizado en este caso. Si el coeficiente de correlación es superior a 0.5 ($\rho \geq 0.5$) se considera que existe una continuidad en la trayectoria del sistema nuboso analizado.

Una metodología de seguimiento similar basada en correlaciones espaciales es presentada por Carvalho y Jones (2001) para sistemas mayores a 31400 km² y cuyo umbral de temperatura es $T_{ir} < 235 \text{ K}$. Esta metodología fue utilizada para la generación de trayectorias de un conjunto de imágenes de la campaña Wet-Season Atmospheric Mesoscale Campaign (WETAMC) del Large-Scale Biospher-Atmosphere Experiment (LBA) (Silva Dias et al., 2001)

Otro nuevo elemento que incorpora el RDT es la etapa de discriminación basada en la 'clase de sistemas nubosos' para cada una de las trayectorias detectadas, ya que el seguimiento del sistema no se produce 'a temperatura constante', sino que en cada etapa de su ciclo de vida el sistema es detectado por diferentes de temperatura de brillo. El trabajo de Morel (2001) luego clasifica estas trayectorias en convectivas y no convectivas de acuerdo con datos de descargas eléctricas. Estas consideraciones no pueden incluirse en esta tesis por falta de información.

2.3. CONCLUSIÓN

De la revisión bibliográfica se demuestra que a través del uso de la imágenes del canal infrarrojo térmico (usualmente centrado alrededor de los 10 -11 μm) de satélites geoestacionarios es posible establecer categorías de SCM definidos por sus características morfológicas (tamaño, excentricidad) y radiativas (temperaturas). Por otro lado, la descripción de algunas de las metodologías de seguimiento de sistemas convectivos a través de las imágenes de este tipo de satélite sirven de base para el desarrollo de la técnica utilizada en este trabajo.

3. LA TÉCNICA ForTrACC

3.1. INTRODUCCIÓN

La técnica llamada ForTrACC (*Forecasting and Tracking of Active Cloud Clusters*) cuya traducción sería Pronóstico y Seguimiento de Sistemas de Nubes Activos es un conjunto de programas que permite la construcción automática de una base de datos de sistemas nubosos (en particular trabajaremos con sistemas convectivos de acuerdo con las definiciones que se darán luego) a partir de imágenes de satélite del canal 4 (10.8 μm) del satélite GOES 8.

Los principales elementos que componen este sistema son los siguientes:

- Un algoritmo de detección y construcción de conglomerados nubosos (*'clusters'*).
- Un programa para el cálculo de los diversos parámetros estadísticos y morfológicos de los sistemas hallados en el punto anterior.
- La técnica de seguimiento en sí, que permite la construcción de las trayectorias de los sistemas a lo largo de su ciclo de vida (*'familias'*).
- La etapa de la generación de imágenes virtuales o sintéticas. Esta última es utilizada tanto para cubrir los horarios de imágenes faltantes como para la etapa de pronóstico a muy corto plazo (*'nowcasting'*).

3.2. LA TÉCNICA ForTrACC

3.2.1. El método de detección: identificación de los SCM

Los satélites meteorológicos, en la longitud de onda del infrarrojo térmico, han sido ampliamente usados para el estudio de la naturaleza de los sistemas nubosos que poseen células con convección profunda (Ej. Houze, 1977; Maddox, 1980) y que pueden penetrar dentro de la alta troposfera (hasta más allá de los 12 km). El método de detección de un SCM está asociado a la determinación de un umbral de temperatura de tope, a partir del cual se puede esperar que esté reflejando un sistema convectivo (no garantizado solo por este umbral, que puede ser, por ejemplo, un reflejo de cirrus densos). Un nivel representativo de tope de convección bien desarrollado podrá estar representado por una altura de 6 y 9 km y

a una temperatura del orden de los 245 a 265 K de acuerdo con los valores medios encontrados por Velasco y Necco (1980) en regiones de latitudes medias y bajas de la República Argentina durante el verano. Aunque la elección de un umbral para definir regiones con convección activa es arbitraria, existe un cierto consenso en la comunidad científica que valores de temperatura de brillo por debajo de los 245 K identifican satisfactoriamente los sistemas convectivos. Maddox (1980) utiliza un valor de 241 K para la detección de Complejos Convectivos de Mesoescala (MCC), mientras que Velasco y Fritsch (1987) toman un valor inferior (231 K o 233 K) de acuerdo con la disponibilidad de imágenes con diferentes curvas de contraste en el momento de realización de ese trabajo. Por último, Machado et al. (1998) proponen un valor de 245 K para la identificación de sistemas convectivos. La elección de estos umbrales yace en el hecho de que autores como Machado et al. (1993a) y Mapes y Houze (1993) han encontrado una dependencia casi lineal entre el tamaño de los sistemas nubosos y los umbrales de temperatura escogidos (típicamente por debajo de 245 K) en un rango de 10 - 20 K, lo cual explica una relativa insensibilidad en la elección de un valor específico de dicho umbral en el rango anteriormente definido. *En esta tesis se elige arbitrariamente un umbral de temperatura de brillo de 235 K para la detección de sistemas convectivos.* Esta elección coincide con los trabajos de Laurent et al. (2002); Machado y Laurent, (2004) y Carvalho y Jones, (2001)

Asimismo, es importante distinguir aquellos SCM que en alguna etapa de su ciclo de vida contuvieron núcleos de convección profunda de aquellos que no la han tenido. Esta distinción se busca debido a que algunos SCM (incluidos algunos cirrus suficientemente gruesos) pueden registrar esa temperatura y no contener células de convección profunda en estas latitudes medias, lo que podría determinar propiedades físicas diferentes de cada uno de estos SCM. Por lo tanto, además de definir el umbral de 235 K para la detección de un SCM se debe incluir en el análisis un segundo umbral de temperatura de brillo para la detección de la convección profunda. Esta línea de pensamiento va en la misma dirección que Maddox (1980), el cual requiere un área contigua superior a los 50.000 km² cubierta por valores de temperatura de brillo inferiores a 221 K. De la misma forma, Velasco y Fritsch (1987) utilizan umbrales entre 208 y 211 K para la detección de topes convectivamente activos y Machado et al. (1998) definen este umbral en los 218 K. La elección de éstos umbrales está más relacionado con una cierta correspondencia entre estos valores de temperatura y las áreas de precipitación detectadas a través de imágenes de radar. En el

presente estudio se escogió el umbral de 210 K siguiendo los trabajos de Laurent et al (2002) y Machado et Laurent (2004).

Por otro lado, es importante definir cuales deben ser las características (en cuanto a tamaño mínimo) que deben tener los núcleos convectivos de un SCM para que el mismo pueda ser descrito tanto radiativa como morfológicamente; como así también para ser seguido a lo largo de su ciclo de vida. Diversos autores han propuesto diferentes umbrales de tamaño de los SCM para la detección y posterior seguimiento. Mientras que Maddox (1980) propone que la superficie de la región con temperaturas inferiores o iguales a los 221 K debe superar los 50.000 km², Torres (2003) propone un umbral de 25.000 km² para una temperatura inferior a los 218 K. Este tipo de selección puede afectar fuertemente algunos parámetros estadísticos como el tiempo de vida medio de los SCM, la localización de la posición de génesis del sistema convectivo, etc.

En esta tesis se decidió realizar un ejercicio teórico o ensayo para decidir el umbral de tamaño, teniendo en cuenta el umbral de temperatura de 235 K. Para este ejercicio teórico se considera un sistema convectivo el cual es representado por una elipse en dos imágenes sucesivas (típicamente separadas por 30 minutos). Si se tiene en cuenta el máximo desplazamiento de su centro de masa sugerido por Machado et al. (1998) que no puede superar los 45 km/h, la distancia entre el centro de masa en el instante inicial y el siguiente no podría superar los 22,5 km en un intervalo de tiempo de media hora. A partir de este dato, se calcula el porcentaje de área superpuesta entre dos elipses que tengan diferente tamaño y diferente excentricidad. En este caso no se consideran procesos de crecimiento o decrecimiento. En la Figura 3.1 se puede observar esta situación. Si se asume un valor de excentricidad media igual a 0.5 y se exige una superposición mínima entre sistemas del 25%, surge un valor de 150 píxeles (2.400 km²) como umbral de tamaño mínimo que se debería considerar para el seguimiento de los sistemas convectivos.

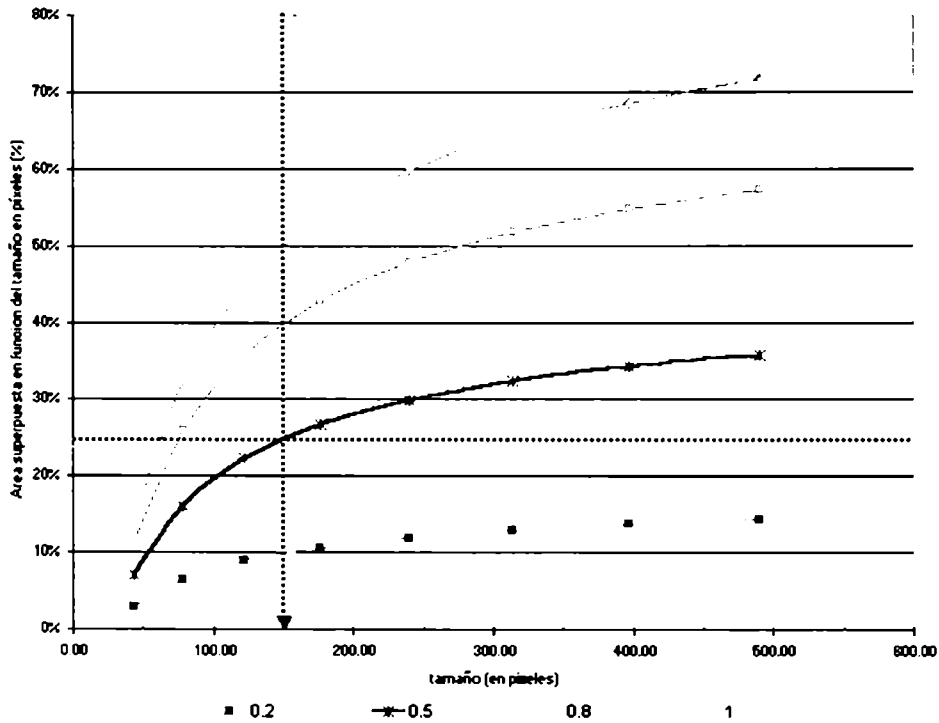


Figura 3.1: Representación gráfica del porcentaje de área superpuesta entre dos elipses con diferentes excentricidades. Para sistemas con un tamaño superior a 150 píxeles y excentricidad superior a 0.5 se asegura una superposición superior al 25%.

3.2.2. Descripción del modelo ForTrACC

El modelo ForTrACC está diseñado como un sistema de módulos independientes que son llamados desde una rutina central que maneja todo el proceso. En la Figura 3.2 se puede observar un esquema de bloques de los diferentes componentes que integran el sistema completo.

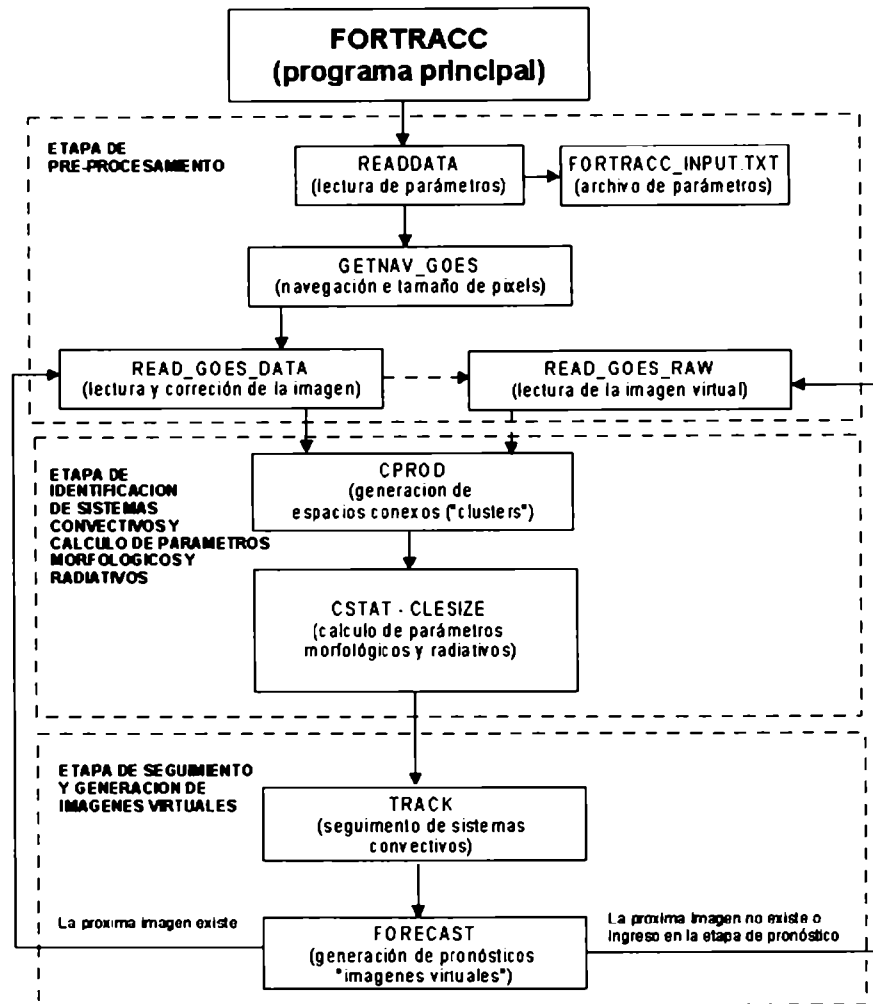


Figura 3.2: Representación en un diagrama de bloques de los diferentes módulos que integran el sistema ForTrACC

En las siguientes secciones se realizará una descripción más detallada de cada una de las etapas que integran el modelo de seguimiento y pronóstico a corto plazo del programa ForTrACC.

3.2.2.1. Etapa de pre-procesamiento

Esta compuesta por un módulo de lectura de diversos parámetros a tener en cuenta para la ejecución del programa; el módulo que realiza la lectura de las matrices correspondientes a la posición geográfica y tamaño de cada píxel y la rutina de lectura y corrección de fallas de las imágenes. En el caso de la navegación, dado que las imágenes han sido registradas a una proyección rectangular latitud-longitud, tanto el espaciamiento entre píxeles como su

área no varían en toda la imagen. Por otro lado, la rutina de lectura de las imágenes contiene un sistema simple de control de calidad de los píxeles basado en un rango de valores de temperatura posibles que permite su corrección sobre la base del vecino más próximo. También está contemplado en este módulo el relleno de líneas faltantes (hasta 4 líneas consecutivas y que no superen el 15% de la imagen).

3.2.2.2. Etapa de identificación de los sistemas convectivos y cálculo de parámetros morfológicos y radiativos

Para identificar en la imagen de satélite aquellas regiones que cumplan con los requisitos de temperatura de tope de nube y tamaño mínimo, el módulo CPROD realiza un proceso de identificación de espacios conexos (*clusters*) definido como la región de píxeles contiguos que cumplen con los criterios de temperatura y tamaño definidos en el punto 3.1.1 correspondiente a la identificación de sistemas convectivos. Se define como un píxel contiguo aquel que tiene por lo menos un lado en común con otro píxel y que ambos cumplen con el criterio de tener temperatura por debajo de determinado umbral (Figura 3.3). A cada uno de estos *clusters* se les asigna un número (que esta representado por un color diferente en la Figura 3.3) que permitirá la generación de estadísticas de cada sistema nuboso y su identificación a lo largo del proceso de seguimiento.

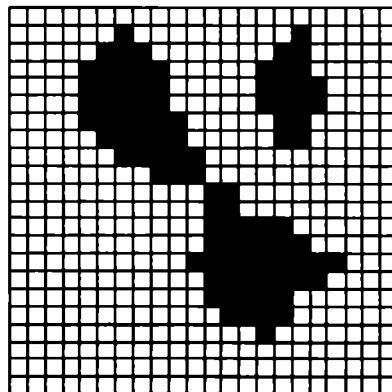


Figura 3.3: Representación esquemática a nivel de píxeles del proceso de identificación de espacios conexos. El contacto de vértices entre píxeles con las mismas características de temperatura no es considerado como contigüidad. Los colores identifican sistemas diferentes.

Este proceso se realiza para cada uno de los umbrales seleccionados en el punto 3.1.1: 235 K y 210 K.

Los parámetros radiativos y morfológicos de cada sistema convectivo, incluyendo la información de sus topes fríos, se presentan en el Anexo 1. En dicho anexo se realiza una breve descripción sobre la metodología de cálculo de alguno de esos parámetros.

Los datos calculados en esta etapa del proceso dan una "radiografía" del sistema convectivo, describiendo las características morfológicas (tamaño, excentricidad, inclinación, etc.) y radiativas (temperatura media y mínima de los SCM, fracción de área con topes fríos, etc.) de cada uno de ellos. Parte de estos datos serán utilizadas para clasificar la fase del ciclo de vida, la intensidad, la tendencia y otras características del sistema convectivo. Otras, en cambio, no serán utilizadas inmediatamente, pues aún no se conoce el potencial de una determinada información para su uso en el diagnóstico y pronóstico del sistema convectivo. No obstante, estos datos son calculados y archivados para trabajos posteriores que puedan utilizar estos parámetros para generar una aplicación específica.

3.2.2.3. Etapa de seguimiento y generación de imágenes virtuales

El antecedente más reciente sobre el algoritmo de seguimiento que utiliza este sistema puede encontrarse en Mathon y Laurent (2001). Este método de seguimiento de un mismo SCM en el tiempo " t " y en la imagen sucesiva en el tiempo " $t+\Delta t$ ", está basado en un *criterio de máxima superposición de áreas* de los SCM en imágenes sucesivas. El número mínimo de píxeles que debe tener un sistema para considerar su continuidad en el tiempo es de 150 píxeles (aproximadamente 2.400 km²) para un $\Delta t = 30$ minutos, coincidente con la cantidad mínima de píxeles para la identificación inicial de un SCM.

Al igual que en Williams y Houze (1987) la comparación de imágenes se realiza tanto adelantándose en el tiempo como retrocediendo en él, es por ello que hay cuatro tipos de situaciones posibles a considerar con este algoritmo de acompañamiento:

Sistema nuevo o de generación espontánea (N): Es aquel SCM que es identificado en una imagen y no está presente en la imagen anterior.

Continuidad (C): Es aquel SCM que es identificado en una imagen y está presente en la imagen anterior, cumpliendo con los criterios fijados para la existencia de continuidad. Esta situación puede ser visualizada en la Figura 3.4.

División o "split" (S): Cuando en el instante " t " existe un sistema que cumple con el tamaño mínimo y existen dos o más sistemas en el tiempo " $t+\Delta t$ " que cumplen con los requisitos de

tamaño y mínima superposición, esto es considerado un proceso de separación ("split"). En este caso, el sistema con menor diferencia de tamaño entre el tiempo " t " y " $t+\Delta t$ " es considerado como la continuidad del SCM. Esa situación puede ser visualizada en la Figura 3.4

Fusión o "merge" (M): Situación contraria a la anterior. Cuando en el tiempo " t " existen dos o más SCM que cumplen con el criterio de mínima superposición con un sólo sistema en el tiempo " $t+\Delta t$ ", es considerado un proceso de fusión ("merge"). En este caso, el sistema con menor diferencia de tamaño entre el tiempo " t " y " $t+\Delta t$ " es considerado como la continuidad del SCM. Esa situación puede ser visualizada en la Figura 3.4

Más allá de estas consideraciones sobre el seguimiento de los SCM, en esta etapa del proceso es calculada la variación temporal de los parámetros estadísticos más importantes. Las variables radiativas y morfológicas incluidas en esta primera etapa son: área, temperatura media del SCM y temperatura mínima (ver Anexo 1). Otra variable que es calculada en esta etapa es la *velocidad de desplazamiento del sistema convectivo*. El cálculo es realizado sólo en aquellas situaciones que existe una continuidad (sin separación ni fusión). En este caso, la velocidad de desplazamiento es calculada como la diferencia de la posición del centro de masa en el instante " t " y en el instante " $t+\Delta t$ ", dividido " Δt ".

$$V = \frac{S_t - S_{t+\Delta t}}{\Delta t} \quad (1)$$

En los casos de división o fusión, muchas veces la velocidad calculada no es realista. Es por ello que, en este caso, la velocidad del SCM es estimada como una media ponderada por la distancia de la velocidad de los sistemas más próximos al sistema en cuestión que posean continuidad. El criterio de proximidad utilizado considera un círculo de 2,5 grados de radio centrado en el centro de masa o de cuatro veces el radio efectivo del sistema, el que fuese mayor. En el caso de un sistema nuevo o de generación espontánea, es utilizado el criterio de proximidad para estimar su velocidad inicial.

A partir de esta información es posible generar una lista que describe la variación temporal de diversas variables radiativas (temperatura media y mínima, área cubierta por topes fríos, etc.) y morfológicas (tamaño, excentricidad, etc.) del SCM a lo largo de su ciclo de vida, desde de su primera detección hasta su disipación completa.

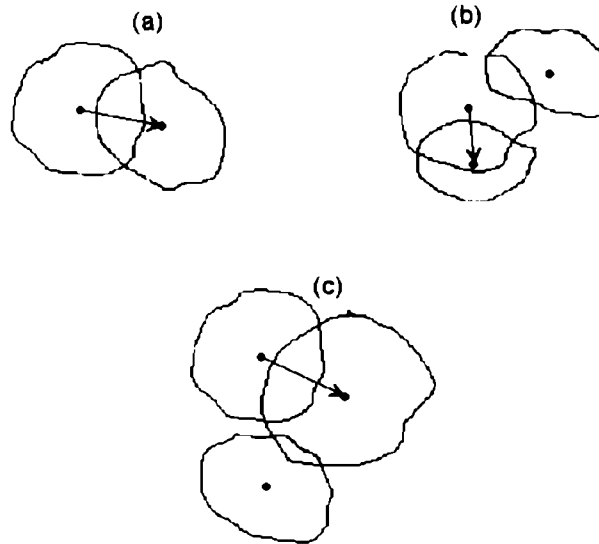


Figura 3.4: Representación esquemática de las diversas situaciones generadas a partir del seguimiento de un SCM. Las figuras sin relleno representan sistemas nubosos en el instante t , mientras que los sistemas en tonos grises corresponden al tiempo $t + \Delta t$. (a) Continuidad, (b) "Split", (c) "Merge". En todos los casos se indica cual es la continuidad de la familia.

3.2.2.4. Tratamiento de imágenes faltantes y fase de pronóstico

Al igual que el método de Williams y Houze (1987), la técnica FORTRACC requiere que el tiempo entre imágenes consecutivas sea constante. En este caso, el intervalo de tiempo escogido es de 30 minutos ($\Delta t = 30 \text{ min}$). Dado que durante la rutina de recepción del sistema GOES sobre el hemisferio sur (Southern Hemisphere Scan) se producen intervalos mayores a 30 minutos en los cuales no hay imágenes disponibles (Clark, 1993), es necesario diseñar una metodología para subsanar esta limitación. En particular, en este caso, se decidió aplicar un algoritmo de generación de imágenes virtuales sobre la base de la evolución del ciclo de vida de cada uno de los sistemas convectivos detectados en la imagen inmediatamente anterior a la falta de información. Este proceso de extrapolación, se realiza teniendo en cuenta fundamentalmente dos parámetros: la estimación del desplazamiento de un dado sistema convectivo y su fase dentro del ciclo de vida (crecimiento / decrecimiento) del SCM.

Es importante destacar que este proceso no es sólo utilizado para cubrir aquellos horarios con falta de información, sino que también puede ser usado como herramienta para realizar un pronóstico a muy corto plazo ("nowcasting") sobre la evolución de sistemas convectivos.

En los párrafos siguientes se realiza una breve descripción de la metodología de estimación de la velocidad y tendencia de crecimiento de los SCM.

Estimación de la velocidad y dirección de propagación: A partir del criterio de identificación y seguimiento de un mismo SCM en los tiempos " $t-2\Delta t$ ", " $t-\Delta t$ ", " t " (tres imágenes sucesivas), se estima el desplazamiento de un dado sistema convectivo aplicando el siguiente procedimiento: La velocidad estimada en el intervalo de tiempo anterior (en km/h) es calculada considerando el desplazamiento del centro de masa entre los tiempos " $t-2\Delta t$ " y " $t-\Delta t$ ". De esa manera se obtiene una velocidad $V(t-1)$. Considerando constante esa velocidad (en módulo y dirección), se genera una velocidad pronosticada $VP(t)$. Simultáneamente, se calcula la velocidad real entre el tiempo " $t-\Delta t$ " y " t " ($V(t)$). El pronóstico de desplazamiento del sistema convectivo $VE(t+1)$ es calculado como la velocidad en el tiempo " t " más la diferencia entre el desplazamiento real y el previsto en el tiempo " t " ($DV(t) = V(t) - VP(t)$). Este procedimiento puede ser visualizado en la Figura 3.5.

En el caso de no tener tres imágenes consecutivas, el procedimiento es el siguiente: si sólo existen dos imágenes, $VP(t) = VE(t+1)$, mientras que si se trata de la primera imagen de la serie, no es posible aplicar la metodología.

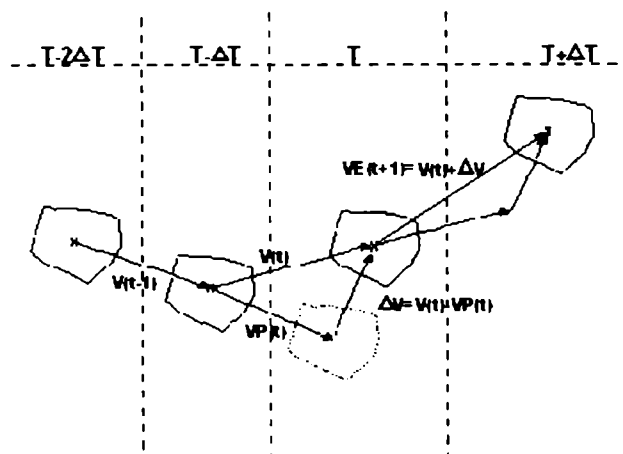


Figura 3.5: Estimación del desplazamiento del sistema para el tiempo "t+Δt"

Tendencia de crecimiento del SCM: La tendencia de crecimiento es la variación relativa del área del SCM con respecto al tiempo, expresada como $1/A * (\delta A / \delta t)$ donde A es el área del SCM. Este parámetro, indicativo del crecimiento (o decrecimiento) relativo de un sistema convectivo con respecto a su área actual en un intervalo de tiempo δt (½ hora en este trabajo), tiene un valor positivo si el sistema está en proceso de expansión y si su estado es de disipación el valor es negativo.

Para determinar si un SCM está en fase de crecimiento o disipación se procedió a realizar un estudio estadístico de dicho parámetro de las familias generadas a partir de conjunto de imágenes de la campaña Wet-Season Atmospheric Mesoscale Campaign (WETAMC) del Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment (LBA) (Silva Dias et al., 2000). Para dicho estudio sólo se seleccionaron aquellas familias cuyo nacimiento es espontáneo, es decir, el SCM no está presente en la imagen anterior, no experimentan fusión (merge), ni división (split) a lo largo de su ciclo de vida, y su finalización es "normal" (el SCM no está presente en la imagen posterior a la de su disipación). La utilización de esta base de datos para este estudio estadístico se debe a que ésta posee un escaso número de imágenes faltantes por lo que se generan una mayor cantidad de familias con las características citadas anteriormente.

El objetivo de este punto, y a partir de las estadísticas generadas, es la determinación de los parámetros de un modelo general que representa el ciclo de vida de un SCM que se utilizará para la creación de imágenes virtuales a partir de la información del ciclo de vida de los

sistemas. Machado et al. (1998) y Machado y Laurent (2004) proponen que el modelo del ciclo de vida de un SCM puede ser estimado a partir de la siguiente ecuación:

$$A(t) = \alpha * e^{at^2 + bt + c} \quad (1)$$

donde $A(t)$ es el área del sistema convectivo en función del tiempo, α , a , b y c son parámetros a ser definidos de acuerdo con el tiempo de vida total del sistema. Por lo tanto, $1/A * (\delta A / \delta t)$ son típicamente rectas de la forma

$$1/A * (\partial A / \partial t) = at + b \quad (2)$$

donde los valores de a y b dependen del tiempo de vida total del sistema. El estudio estadístico sobre las familias del experimento LBA WETAMC estuvo focalizado en la determinación de los valores de a y b (pendiente y ordenada al origen) de acuerdo con el tiempo total del ciclo de vida de un dado SCM: menor que 2 horas, entre 2 y 4 horas, 4 a 8 horas y mayor que 8 horas de acuerdo con la siguiente metodología: .

Para cada uno de estos cuatro grupos y con los datos de la muestra disponible, se calculó: (a) el valor medio de la expansión inicial como el promedio del parámetro definido como tendencia de crecimiento en el primer instante de tiempo, (b) el tiempo medio en que este parámetro ($1/A * (\delta A / \delta t)$) estuvo cercano a cero (máximo tamaño) y (c) el valor medio del mismo en el instante de disipación del SCM.

El resultado de este estudio estadístico (valores promedio de todas las familias consideradas y que cumplen con el requisito planteado en el primer párrafo) es un conjunto de curvas con el valor de $1/A * (\delta A / \delta t)$, para cada uno de los grupos considerados. Éstas pueden ser observadas en la Figura 3.6. A partir de estas curvas se ajustaron rectas y de esa manera se obtuvieron los valores a y b de cada grupo.

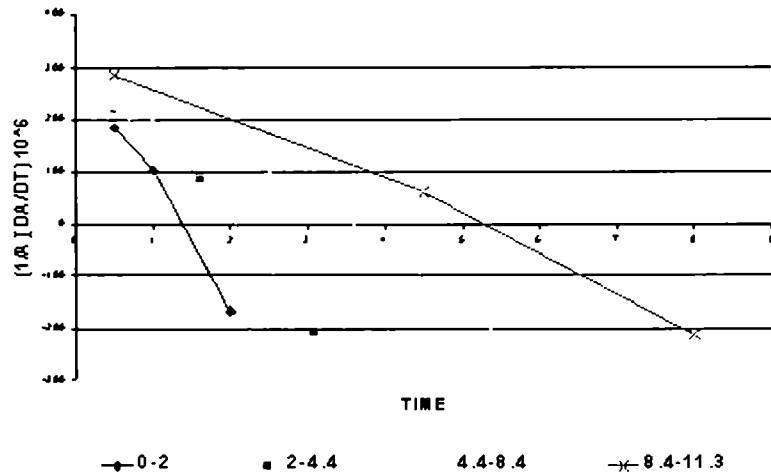


Figura 3.6: Variación del área con el tiempo, con respecto al tiempo de vida total del sistema. Valores positivos indican crecimiento, mientras que los valores negativos significan decrecimiento del sistema convectivo

3.3. VALIDACIÓN DE LA TÉCNICA DE GENERACIÓN DE IMÁGENES: USO COMO HERRAMIENTA DE PRONÓSTICO A MUY CORTO PLAZO

Como se planteó en el apartado anterior, el proceso de extrapolación para la generación de imágenes sintéticas se realiza teniendo en cuenta fundamentalmente dos parámetros: (a) la estimación del desplazamiento de un dado sistema convectivo en función de las posiciones que ha tenido el mismo en tiempos anteriores; (b) su fase dentro del ciclo de vida (crecimiento / decrecimiento) basado sobre las estadísticas del comportamiento de los sistemas convectivos del conjunto LBA WETAMC (Figura 3.6).

En este apartado se desarrollará la descripción de la metodología utilizada para validar los resultados obtenidos en la generación de imágenes sintéticas (tanto para rellenar una imagen faltante o como herramienta de pronóstico a muy corto plazo) estimando la bondad del pronóstico a partir de estadísticos generados con tablas de contingencia. En este caso, la verificación de la estimación se realiza sobre el pronóstico hasta 120 minutos de la evolución de los SCM presentes en un dado horario inicial.

3.3.1. Datos y Metodología

Para aplicar esta técnica en el modo pronóstico (ya que en este caso se utilizará el programa como herramienta de pronóstico a muy corto plazo), se procedió de la siguiente manera: dado un horario inicial (HHMM) a partir del cual se quiere pronosticar la evolución de los SCM presentes en dicha imagen; se inicia el programa 8 horas antes del mencionado tiempo (HHMM – 8 hs) con el objeto de determinar el instante del ciclo de vida de cada uno de los SCM presentes en la imagen a partir de la cual se quiere realizar el pronóstico. La elección de este valor (8 horas) esta basada en que es muy difícil determinar el ciclo de vida de sistemas convectivos con tiempos de vida superiores a las ocho horas, ya que, en general, muestran un comportamiento aleatorio producto de comportamientos complejos como fusiones, separaciones y regeneraciones a partir de disipaciones que no llegan a ser totales (Machado, 2004).

A partir de la imagen del horario inicial (HHMM), el proceso continúa durante dos horas más generando así cuatro imágenes pronosticadas: 30, 60, 90 y 120 minutos. El mecanismo de generación es el mismo que se utiliza en el caso de imágenes faltantes. A partir de la imagen del horario HHMM, primero se genera una imagen pronosticada a 30 minutos. Con esta información (asumida como imagen 'real') se genera la siguiente imagen con un intervalo de tiempo de 30 minutos (pronóstico a 60 minutos) y así sucesivamente hasta completar las dos horas de pronóstico. En la Figura 3.7 se muestra la imagen observada (arriba izquierda) en la cual se colocó un valor de 273 K en aquellas regiones donde no existen sistemas nubosos de interés (por debajo de los 235 K) y se excluyeron aquellos sistemas con un tamaño menor a los diez píxeles (que igualmente no es posible seguirlos a partir del umbral impuesto de 150 píxeles) para facilitar la visualización de los sistemas de interés; y el resultado del pronóstico a 30, 90 y 120 minutos.

En este caso, como la imagen a pronosticar sería la correspondiente al 24 de diciembre de 2002 a las 22:15 horas, el pronóstico de 30 minutos está basado en la imagen de las 21:45 horas del mismo día; el pronóstico de 60 minutos está basado en la imagen de las 21:15 y así sucesivamente. En dicha figura se puede observar la presencia de un gran SCM que posee tres núcleos activos bien definidos y un conjunto de sistemas menores ubicados al nordeste del mismo. A partir de la aplicación de la técnica se puede ver que el pronóstico ha podido rescatar con bastante fidelidad las principales características de la imagen observada (tanto en su posición como en su tamaño), en especial hasta los 90 minutos. En la última

imagen cuyo tiempo de pronóstico es de 120 minutos, es donde se observa una mayor disparidad entre la posición, tamaño e intensidad de los sistemas observados y pronosticados a pesar de que los conglomerados nubosos tienen una estructura similar

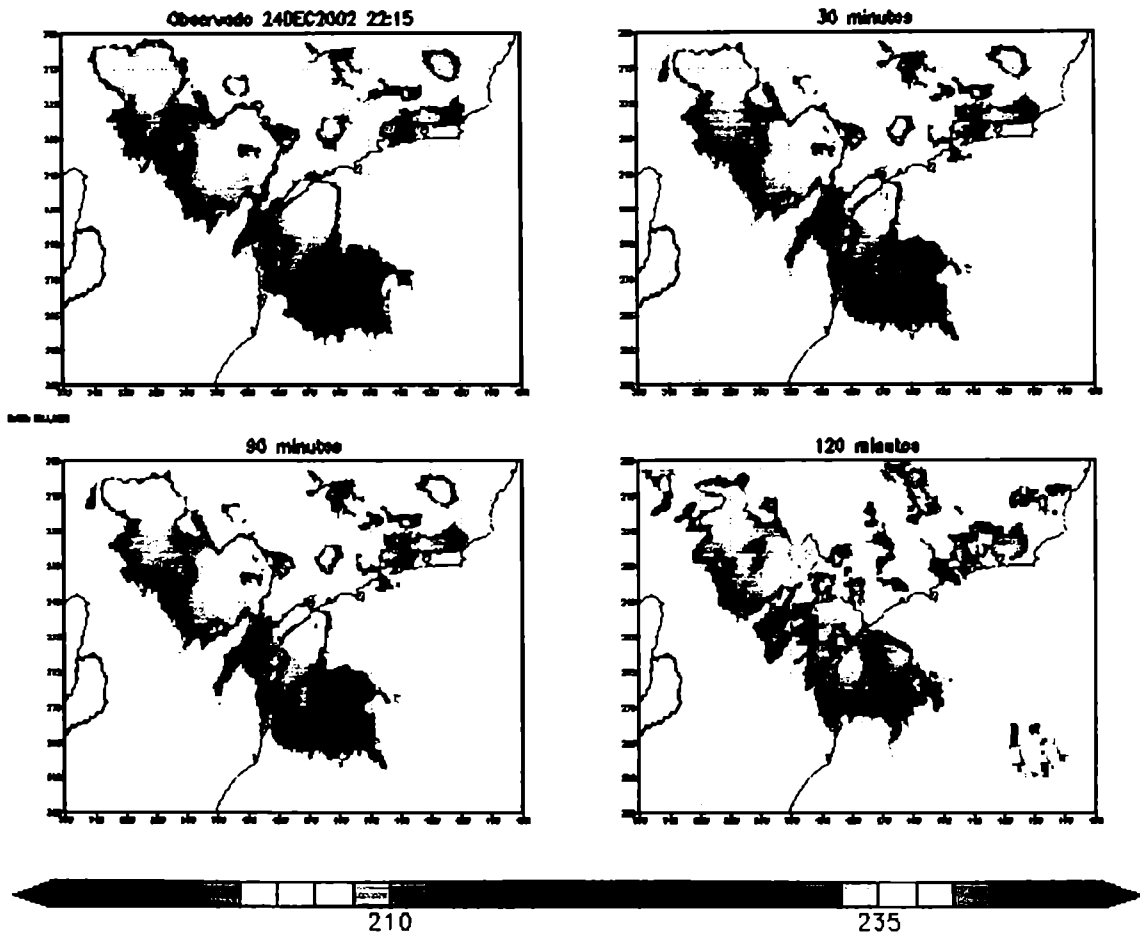


Figura 3.7: Imagen observada y pronósticos a 30, 90 y 120 minutos para el 24 de diciembre de 2002 a las 22:15 horas sobre la región de la cuenca alta del río Paraná en territorio brasileño.

La verificación de la bondad de esta metodología se llevó a cabo sobre dos conjuntos de datos: entre el 25 y 27 de diciembre de 2002 y entre el 6 y 11 de enero de 2003. La elección de estos intervalos responde al hecho de que en ambos casos la cantidad de imágenes de cada uno de los días que lo componen es superior 30 imágenes diarias con intervalos máximos de tiempo entre imágenes sucesivas no superior a las 2 horas (Anexo 1). Es importante que exista la mayor cantidad de imágenes posibles ya que, la metodología de pronóstico es la misma utilizada para la generación de imágenes faltantes. En este caso, el

pronóstico estaría basado sobre otra estimación y, por lo tanto, los errores involucrados en la técnica se propagarían.

3.3.2. Verificación de los Resultados

La validación de los resultados se llevo a cabo a través de una tabla de contingencia en la cual se consideró la ocurrencia o no de píxeles con temperatura por debajo de 235 K en la imagen observada y la estimada. A partir de estos datos se construyó la siguiente tabla.

		OBSERVADO	
		SI	NO
PRONOSTICADO	SI		
	NO		

La tabla de contingencia es una herramienta útil para determinar el tipo de errores que se están cometiendo al hacer una estimación (o un pronóstico, según sea el caso). Un modelo perfecto sólo produce correctos ($q1$) y correctos negativos ($q4$), mientras que las sorpresas y las falsas alarmas son cero. Una gran variedad de estadísticos basados en estas categorías puede ser calculada a partir de estos elementos para describir la bondad de la estimación. Para este caso se calcularon cuatro estadísticos: la precisión (ACU), el "bias score" (BIAS), la probabilidad de detección (POD) y la tasa de falsas alarmas (FAR).

El estadístico ACU es la fracción de pronósticos correctos sobre la cantidad total de píxeles de una dada imagen sobre la cual se realiza. El valor de pronóstico perfecto es 1 y se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$ACU = \frac{q1 + q4}{\sum_{i=1}^4 qi} \quad (3)$$

Su interpretación es bastante intuitiva y se refiere a la proporción de aciertos (sea SCM o no) sobre la cantidad total de pronósticos realizados (en este caso la cantidad total de píxeles de una dada imagen). Este estadístico suele estar influenciado por el valor de $q4$ ya que la proporción de correctos negativos presentes en cada imagen es alta.

El segundo estadístico esta definido a partir de la siguiente ecuación:

$$BIAS = \frac{q1 + q2}{q1 + q3} \quad (4)$$

En este caso el BIAS Score mide la relación entre el número de píxeles en que se pronosticó la existencia de un SCM y el número de píxeles donde efectivamente se observaron sistemas. El valor de pronóstico perfecto es 1. Este estadístico determina si el modelo está sobreestimando ($BIAS > 1$) la cantidad de píxeles pronosticados o subestimado ($BIAS < 1$). No obstante no determina cuán ajustados en espacio están los sistemas ya que sólo tiene en cuenta la frecuencia relativa. En otras palabras, en el caso extremo de que $q1 = 0$ (sin pronósticos correctos) y $q2 = q3$ el valor del BIAS también sería 1 y el modelo no estaría funcionando correctamente.

Para evitar la inclusión de falsos negativos en la estadística, se incluyó en el estudio la probabilidad de detección (POD), la cual es calculada a partir de la siguiente expresión:

$$POD = \frac{q1}{q1 + q3} \quad (5)$$

En este caso el valor perfecto es 1 (cuando $q3 = 0$) y permite conocer qué fracción de los píxeles que efectivamente corresponden a la existencia de SCM han sido correctamente pronosticados. Como este valor es insensible a las falsas alarmas ($q2$), se utiliza en conjunción con otro índice llamado tasa de falsas alarmas (FAR) el cual es calculado a través de la siguiente expresión:

$$FAR = \frac{q2}{q1 + q2} \quad (6)$$

En este caso el valor perfecto es 0 y corresponde al caso de $q2 = 0$. Este estadístico indica la proporción de falsas alarmas con respecto a la cantidad de píxeles pronosticados como SCM (temperatura por debajo de los 235 K)

La aplicación de estos estadísticos se realizó en los conjuntos de datos antes descritos generando un pronóstico cada media hora y hasta 120 minutos. La comparación entre observación y pronóstico se realizó sólo en el caso de que el tiempo de pronóstico (sea cual fuere el mismo) coincidiera con la existencia de una imagen real.

En la Figura 3.8 se puede observar la cantidad de píxeles observados y pronosticados cada media hora (en el caso de que se pueda comparar con una imagen real) para el intervalo de pronóstico de media hora para el periodo entre el 6 y el 11 de enero de 2003. En principio se puede observar un marcado ciclo diurno que es correctamente pronosticado en este intervalo de tiempo. El valor medio para todo el periodo es de 30057 píxeles observados por imagen, mientras que 28938 es la cantidad media de píxeles pronosticados por imagen para el mismo periodo. Si se considera el periodo entre el 25 y 27 de diciembre los valores son algo menores: 24396 y 23959 píxeles respectivamente. Estos valores dependen de la actividad convectiva de cada uno de los periodos considerados. No obstante, en ambos casos, se observa en promedio, una leve subestimación de la cantidad de píxeles pronosticados. Este hecho se puede observar mejor en la serie de la evolución temporal del Bias Score (Figura 3.9) donde la mayor parte de los valores se encuentran por debajo de 1, lo que estaría indicando esta subestimación.

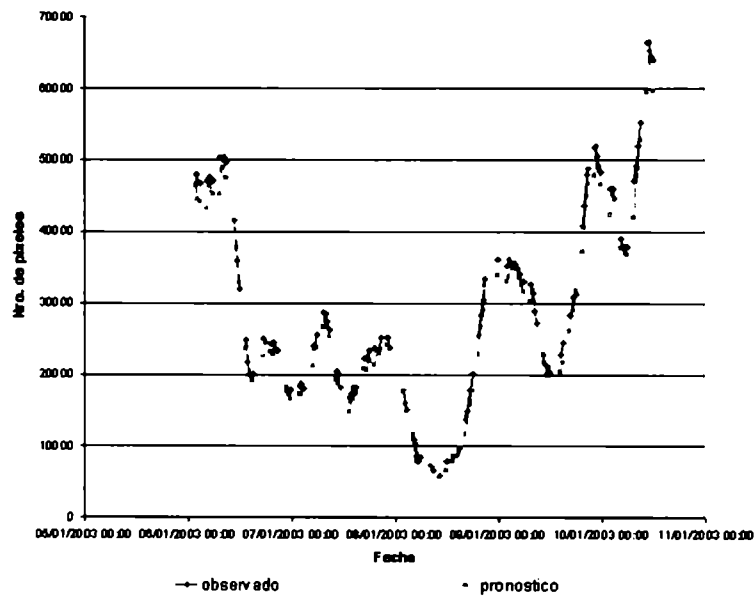


Figura 3.8: Evolución temporal de la cantidad de píxeles pronosticados y observados para el tiempo de pronóstico de 30 minutos para el periodo 6 al 11 de enero de 2003

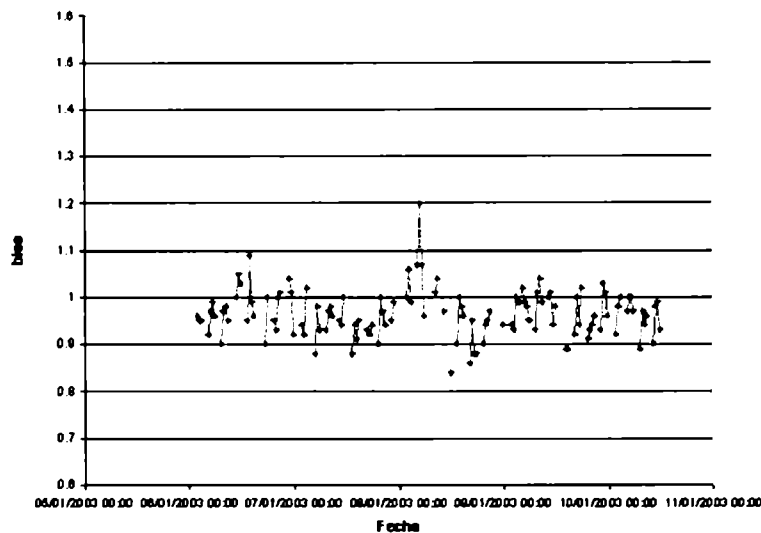


Figura 3.9: Evolución temporal de Bias Score para el tiempo de pronóstico de 30 minutos para el periodo 6 al 11 de enero de 2003.

En el caso del estadístico ACU el valor medio supera 0.98 para ambos periodos de análisis. Es decir, el 98% de los píxeles han sido correctamente pronosticados. Sin embargo, este valor tan alto se debe fundamentalmente a que la gran parte de la imagen corresponde a correctos negativos.

En el caso de la probabilidad de detección (POD) el valor es de aproximadamente 0.77 y las tasa de falsas alarmas es de 0.20. Es decir, el 77% de los píxeles correspondientes a SCM (observados) fueron correctamente predichos, mientras que el 20% de los píxeles pronosticados como SCM, no fueron observados en la realidad.

La situación menos favorable, como era de esperar, se obtiene para el intervalo de pronóstico de 120 horas. En la Figura 3.10 se observa que la cantidad de píxeles pronosticados es menor a la cantidad de píxeles observados. Es decir, el modelo propuesto tiende a disipar más rápidamente los sistemas de lo que ocurre en la realidad. Esto se explica por el hecho de que mientras en el modelo propuesto de evolución de los sistemas existe un inicio, una maduración y una disipación; en la realidad, el comportamiento es más complejo con frecuentes regeneramientos y fusiones que no están consideradas en el modelo propuesto. No obstante, el pronóstico refleja la misma estructura en cuanto al ciclo diurno de la convección. En cuanto al Bias Score es más frecuente la subestimación aunque

existen momentos del día en que la cantidad de píxeles pronosticados es mayor a la cantidad de píxeles observados.

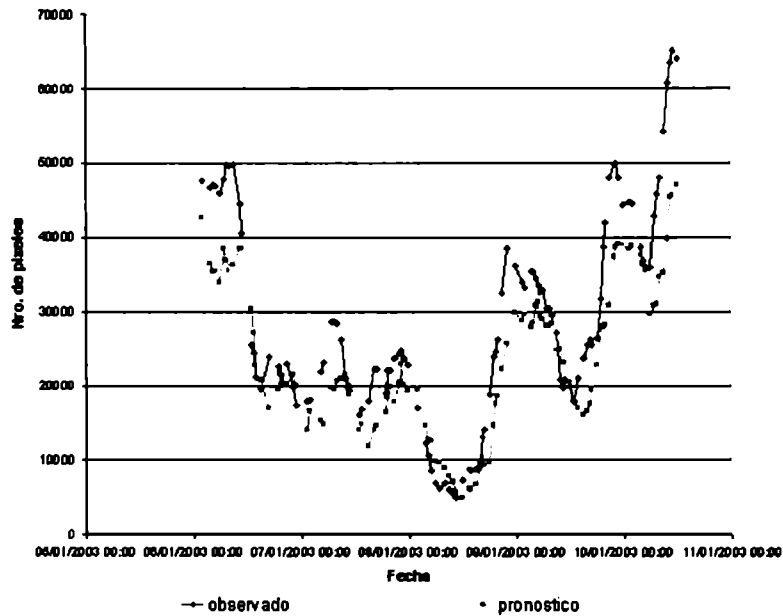


Figura 3.10: ídem Figura 3.8 para el periodo de pronóstico de 120 minutos

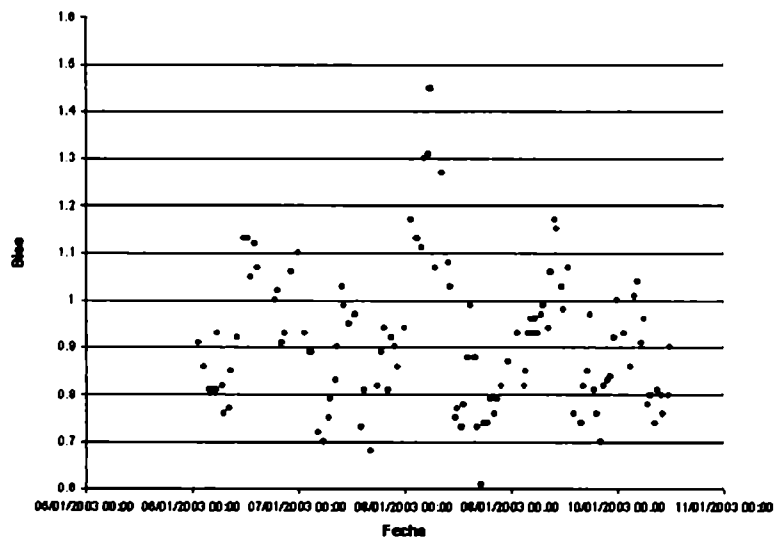


Figura 3.11: ídem Figura 3.9 para el periodo de pronóstico de 120 minutos.

En el caso del estadístico ACU el valor medio supera 0.96 para ambos periodos de análisis. Es decir, el 96% de los píxeles han sido correctamente pronosticados (considerando también los falsos negativos), pero el valor de la probabilidad de detección (POD) es de aproximadamente 0.53 y las tasa de falsas alarmas es de 0.40.

3.4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En el presente capítulo se presentó la técnica ForTrACC para la detección, el seguimiento y pronóstico de SCM a través de imágenes de satélite. Esta técnica, totalmente automatizada, se compone de cuatro módulos independientes a saber: (a) uno para la detección de conglomerados nubosos definidos por un umbral de temperatura; (b) otro para el cálculo de parámetros estadísticos; (c) el tercero contiene el algoritmo de seguimiento basado en superposición de imágenes y (d) el último módulo genera imágenes sintéticas.

A partir de los supuestos planteados en la metodología de generación de imágenes sintéticas, se realizó una verificación estadística entre las imágenes reales y las imágenes generadas a partir de la metodología propuesta. Los principales resultados pueden resumirse en los siguientes puntos:

- (a) Considerando la cantidad de píxeles con temperaturas por debajo de 235 K estimados y observados (independientemente de su posición) se observa que, en promedio, el modelo tiende a subestimar la cantidad de píxeles observados, esta subestimación, en promedio, es mayor cuanto mayor es el plazo de pronóstico. Las sobreestimaciones se producen, en general, durante la etapa de disipación de los SCM ya que la metodología, basada en valores estadísticos medios, tiende a suavizar estos procesos
- (b) La metodología de pronóstico rescata muy aceptablemente la evolución diurna del proceso de convección.
- (c) La precisión (ACU) alcanzada en cada uno de los tiempos de pronóstico supera, en media, el 95%. Este alto valor se debe fundamentalmente a la inclusión de los correctos negativos. En el caso de POD y FAR (que no consideran la inclusión de estos falsos negativos) se observa un gradual pérdida de la calidad de la estimación con un aumento de POD y un crecimiento de FAR cuanto mayor es el tiempo de pronóstico.

En trabajos posteriores debería profundizarse el estudio de las fusiones, separaciones y regeneraciones sobre la evolución del ciclo de vida de los SCM más complejos que, en general, son los que alcanzan mayores dimensiones.

4. PROPIEDADES MORFOLÓGICAS Y RADIATIVAS DE LOS SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA SOBRE EL SUR DE SUDAMERICA.

4.1. INTRODUCCIÓN

A partir de la base de datos creada con la técnica ForTraCC, el objetivo de este capítulo es el estudio estadístico de las características radiativas y morfológicas de los SCM como así también sobre su ciclo de vida (iniciación, maduración y disipación). En otras palabras, no solamente se hará hincapié sobre el estudio de las características físicas de un SCM en forma aislada, sino que se estudiará ese SCM como miembro de una familia de sistemas que evolucionan a través del tiempo. La región de trabajo es aquella comprendida entre los paralelos 35° S y 22° S sobre el continente sudamericano para el periodo de diciembre, enero y febrero de los años 2000-2001, 2001-2002 y 2002-2003.

4.2. DATOS Y MATERIALES

Para la realización de este trabajo se contó con imágenes de satélite GOES 8 (75° W, 0°) con una resolución espacial de 4 km x 4 km y una resolución temporal teórica de ½ hora correspondientes al canal 4 (10.7 μm , infrarrojo térmico). Estas imágenes fueron provistas por el Centro de Previsión del Tiempo y Clima (CPTEC) dependiente del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Brasil. El sector sobre el cual se trabajó es el Southern Hemisphere Scan (SHEM) que cubre desde 20° S hasta 45° S aproximadamente, lo que abarca gran parte de la Cuenca del Plata (Figura 4.1). Las imágenes originales, en la proyección propia del satélite la cual incluye una matriz de posición (latitud y longitud) de cada uno de los puntos, fueron corregidas tanto geométrica como radiométricamente. En el primero de los casos, la imagen fue transformada a una proyección geográfica (latitud-longitud) utilizando una metodología de remuestreo conocida como la del píxel vecino más cercano que es la que menor alteración produce en el valor original de radianza. En el segundo caso, la temperatura original fue corregida de acuerdo con el ángulo cenital entre el satélite y el píxel dado (Joyce, 2001). Asimismo, se realizó un control de calidad sobre píxeles y líneas con fallas, corrigiendo o rechazando las imágenes según un criterio de porcentaje de fallas existentes (hasta un 15%) en cada imagen.



Figura 4.1: Área cubierta por las imágenes del SHEM en la que se muestra la región de la Cuenca del Plata sobre la cual se analizarán casos particulares más adelante.

El periodo de estudio es el comprendido entre diciembre de 2000 y febrero de 2001, diciembre de 2001 y febrero de 2002 y diciembre de 2002 y febrero de 2003. En el Anexo 2 se realiza una pormenorizada descripción del conjunto de datos disponible. Como resumen de dicha información, cabe señalar que en el verano 2000-2001 se contaron con 2518 imágenes, para el de 2001-2002 fueron apenas 1736 imágenes con un periodo de 13 días consecutivos sin imágenes (entre el 28 de enero y el 9 de febrero) y 2497 imágenes en el último periodo analizado (2002-2003). Esta cantidad de imágenes arroja un promedio de aproximadamente 28 imágenes por día aunque su distribución es aleatoria: existen días con 35 imágenes y otros con menos de 10. Es por ello, que para el estudio del ciclo de vida de un SCM, y con el objeto de establecer un seguimiento a partir de las pautas impuestas por el algoritmo con el cual se trabajó (superposición entre imágenes sucesivas) se incluyó en la descripción del conjunto de imágenes el valor máximo de tiempo entre dos imágenes consecutivas como otro parámetro para evaluar la "calidad de seguimiento" que se puede lograr para los SCM que se desarrollaron durante un día dado.

4.3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

4.3.1. Selección de casos

A partir de la muestra considerada y aplicando la metodología propuesta, se obtuvieron aproximadamente alrededor de 22000 familias para todo el periodo. Posteriormente, se eliminaron todas aquellas familias en las cuales alguno de sus miembros estuviera en contacto (más de 10 píxeles) con los bordes de la imagen. Este tipo de familia distorsiona la estadística sobre los parámetros morfológicos del sistema, ya que parte de ella podría estar fuera de los límites considerados en la imagen. Luego de este filtrado, el número de familias para la confección de las estadísticas decrece a unas 20000 aproximadamente. Como se puede apreciar en la Tabla 4.1, la mayoría de las familias tienen una duración superior a las 2 horas (71%), mientras que el 29 % no alcanzó las 2 horas de vida.

Los SCM, a partir de las características propias de esta técnica, se pueden clasificar de acuerdo con su tipo de nacimiento y por su tipo de disipación. El primero caso, los nacimientos (primer miembro de una familia) pueden deberse a: (a) nuevo set de datos: es el caso en el cual no se cuentan con imágenes anteriores (ni reales ni sintéticas) y, por lo tanto, todos los SCM serían los primeros miembros de las familias. En este caso no es posible determinar el periodo total de vida de estas familias. (b) Nacimientos espontáneos: se considera que un nacimiento es espontáneo cuando existe una imagen anterior al nacimiento de un dado SCM donde no haya sido detectado. (c) Nacimiento por separación: es el caso donde un SCM se divide en dos o más SCM. En este caso, la continuidad de la familia está determinada por aquel SCM con menor diferencia de tamaño con el de la imagen precedente. El resto de los SCM formados a partir de esa división forman nuevas familias de las cuales son ellos los primeros miembros.

En el caso de la disipación ocurre algo similar y existen tres tipos de disipación total de un SCM. (a) Fin de set de datos: es el caso en el cual no se cuentan con imágenes posteriores y, por lo tanto, todos los SCM serían los últimos miembros de las familias. Tal como sucede con el caso de un nacimiento a partir de un nuevo set de datos, en este caso no es posible determinar el periodo total de vida de estas familias. (b) Finalizaciones espontáneas: se considera que una finalización es espontánea cuando existe una imagen posterior a la finalización de un dado SCM donde no haya sido detectado. (c) Finalización por fusión: es el caso donde dos o más SCM se fusionan en un solo SCM en la imagen posterior. En ese

caso, la continuidad de la familia esta determinada por aquel SCM con menor diferencia de tamaño con el de la imagen precedente (ver capítulo 3, apartado 3.2.2.2.). El resto de los SCM tienen una disipación por fusión en la imagen anterior a el proceso mencionado. En la Tabla 4.1 se muestran los totales y porcentajes de SCM de acuerdo con esta clasificación

TOTAL FAMILIAS

CLASIFICACION POR TIEMPO DE VIDA		CLASIFICACION POR TIPO DE NACIMIENTO			CLASIFICACION POR TIPO DE DISIPACION		
menor que 2 horas	mayor que 2 horas	Nuevo set de datos	Nacimiento por separacion	Nacimiento espontaneos	Disipacion por fusion	Fin set de datos	Disipacion espontaneos
5682 (29%)	14128 (71%)	796 (6%)	4846 (34%)	8467 (60%)	4233 (30%)	1053 (7%)	6842 (63%)

Tabla 4.1: Clasificación del total de familias por tiempo de vida, tipo de nacimiento y tipo de disipación.

En primer lugar, para el estudio estadístico de las familias obtenidas, se consideraron aquellas familias que tuvieran al menos 4 miembros (tiempo de vida mayores o iguales a 2 horas). Por otro lado, y con el objeto de obtener un conjunto más homogéneo para estudiar las características físicas de los SCM, se consideraron aquellas familias que hayan nacido y finalizado espontáneamente. Esto excluye a aquellos nacimientos que se producen por separación (34% del total de la muestra de SCM con tiempos de vida superiores a las 2 horas) o a partir de un nuevo conjunto de datos o aquellas finalizaciones que corresponden a casos de disipación por fusión (30%) o por fin de conjunto de datos (7%). No obstante, se permitió la existencia de fusiones y separaciones durante el ciclo de vida de una determinada familia, ya que, de otra manera, el conjunto de SCM a analizar sería demasiado limitado en sus características para generar una estadística confiable.

A partir del análisis del total de familias que cumplen con las condiciones exigidas (un nacimiento y disipación espontáneos), el 82% de ese total no tiene fusiones ni separaciones durante su ciclo de vida, siendo el valor medio de su tiempo de vida de 2,2 horas. En otras palabras, su tiempo de vida es apenas superior al límite mínimo impuesto de 2 horas y, por lo tanto, se estarían considerando solo un tipo muy particular de SCM, ignorando la gran variedad de SCM que afectan a la región (Torres 2003, Velasco y Fritsch, 1987). Si se consideran ahora las familias restantes, es decir que experimentan fusiones y separaciones (y que representan un 18% del total), el valor del tiempo de vida medio sube a casi 5 horas.

El estudio estadístico sobre las diferentes propiedades físicas de los SCM, como así también sobre la evolución de diversos parámetros radiativos y morfológicos de los mismos a lo largo de su ciclo de vida, se realizó sobre el total de las familias que cumplieron con las

condiciones anteriormente expuestas: nacimiento y finalización espontánea permitiendo la existencia de fusiones y divisiones durante su ciclo de vida.

Si bien la muestra obtenida es sesgada (con gran cantidad de SCM de corta duración y un número bastante menor de familias con tiempos de vida más largos), esta distribución de frecuencias parece ser una característica intrínseca a la distribución espacio-temporal de los SCM. En la Figura 4.2 se puede observar la distribución de frecuencias para el tiempo de vida de las familias analizadas en este estudio. Como valores estadísticos de la muestra, se dan el tiempo de vida medio de los SCM que es de 3.7 horas, la mediana de apenas 3 horas y la moda de 2 horas. Similares distribuciones se observan en los trabajos de Mathon et Laurent (2001) sobre el estudio de los ciclos de vida de los SCM sobre la región del Sahel (África) y de Laurent et al (2002), cuyo estudio está centrado sobre la región amazónica.

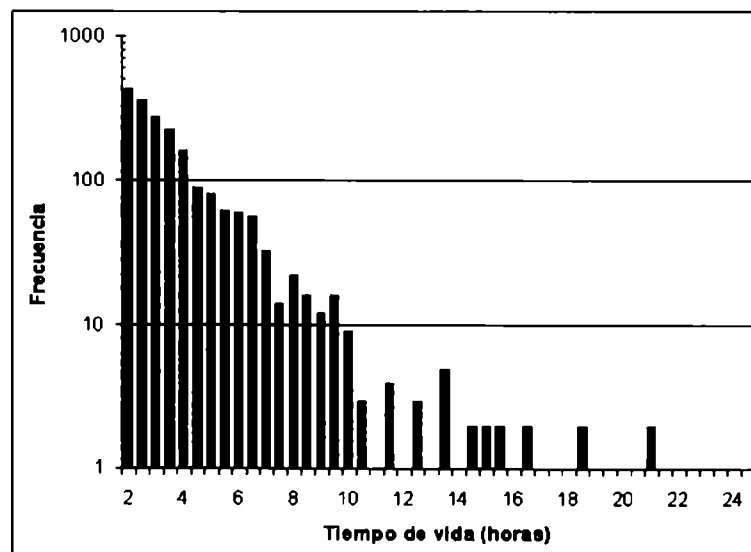


Figura 4.2: Distribución de frecuencias del tiempo de vida total de los SCM. El eje de las ordenadas tiene una escala logarítmica.

Considerando ahora el tamaño máximo que alcanzan los SCM (en píxeles, 1 píxel = aproximadamente 16 km²) a lo largo de su ciclo de vida en función de su tiempo total de vida, se puede observar que las familias con menor tiempo de vida no llegan a tener gran extensión horizontal y, a partir de un tiempo de vida mayor, mayor es la probabilidad de que dichos SCM alcancen a cubrir grandes áreas (Figura 4.3).

A partir de este primer análisis, es posible determinar que: a) más del 50% de los SCM tienen vidas inferiores a las 3 horas y b) el máximo tamaño que éstos alcanzan está relacionado con su duración a partir de una relación de probabilidades.

Otro aspecto que se exploró estuvo relacionado con el desarrollo de toques muy fríos que permitió dividir la muestra en dos subconjuntos teniendo en cuenta la temperatura mínima que alcanza una dada familia durante alguna fase de su ciclo de vida: En el primer subconjunto se incluyeron a aquellos SCM que *no* desarrollaron toques fríos (píxeles con temperatura de brillo por debajo de los 210 K) durante la totalidad de su ciclo de vida (conjunto SCM-STF, de aquí en adelante) y, por otro lado, aquellas familias que si cumplen con esta condición (conjunto SCM-CTF, de aquí en adelante), es decir que tuvieron temperaturas por debajo de los 210 K durante algún instante de su ciclo de vida.

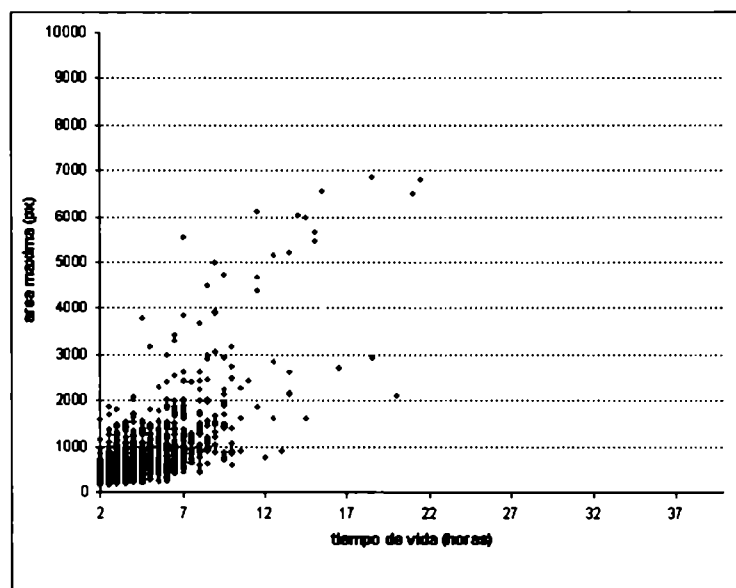


Figura 4.3: Área máxima (en píxeles) en función del tiempo de vida de los SCM.

A partir de esta clasificación, se encontró que el 82% de las familias estudiadas no alcanzan a desarrollar toques fríos durante todo su ciclo de vida, mientras que solo el 18% si alcanzan a desarrollarlos. Si bien los cantidad de elementos de cada uno de los conjuntos en esta clasificación es similar a la presentada anteriormente sobre las familias con o sin fusiones o separaciones, los elementos de ambos conjuntos son diferentes. Por ejemplo, el tamaño de un SCM por si solo no siempre refleja la intensidad de la convección definida por la

temperatura de los topes más fríos. Es por ello que en este trabajo se tomó la propiedad física de alcanzar o no topes fríos como un rasgo distintivo de los SCM.

Para los dos nuevos conjuntos (SCM-STF y SCM-CTF), se observa que la distribución de frecuencias del tiempo de vida es sensiblemente diferente en ambos conjuntos: mientras el conjunto SCM-STF el tiempo de vida medio es de 3.4 horas, en el caso del conjunto SCM-CTF el valor asciende a 5.3 horas. Por otro lado, y como se puede ver en la Figura 4.4 la moda para el conjunto SCM-STF es de 2 horas mientras que en el caso SCM-CTF el valor es cercano a 4 horas y por otro lado se observan una mayor cantidad de familias con tiempos de vida superiores a las 10 horas entre los casos SCM-CTF.

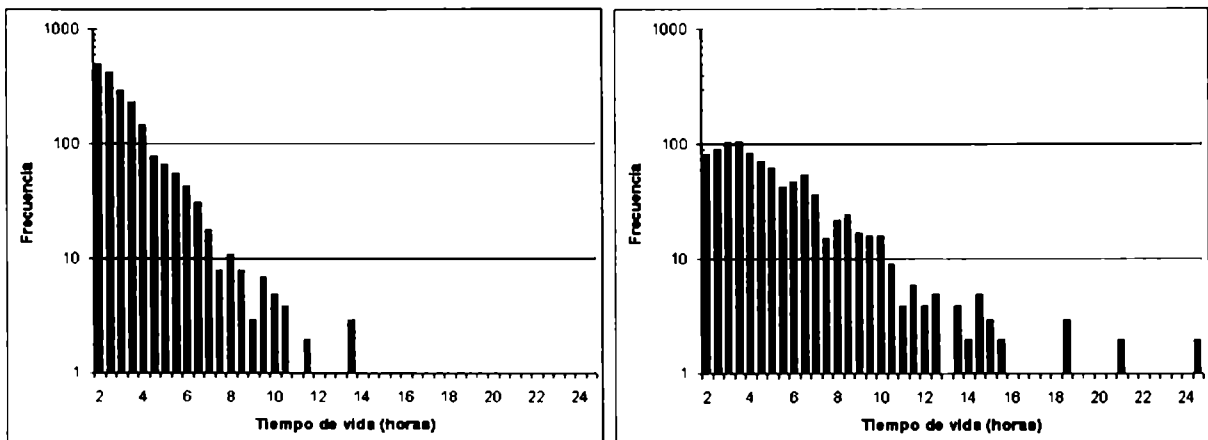


Figura 4.4: Distribución de frecuencias del tiempo de vida total de los SCM para cada uno de los conjuntos definidos. El gráfico de la izquierda corresponde al conjunto SCM-STF mientras que el de la derecha es el correspondiente al conjunto SCM-CTF. El eje de las ordenadas tiene una escala logarítmica.

Algo similar se observa cuando se estudia el área máxima alcanzada en función de su tiempo de vida (Figura 4.5). La probabilidad de encontrar SCM con áreas máximas superiores a los 32000 km² (2000 píxeles) es relativamente baja en el conjunto SCM-STF es mayor en el conjunto SCM-CTF. En ambos casos se ajustó la distribución de puntos a partir de una función de segundo grado la cual permitiría estimar el área máxima alcanzada por un dado SCM en función de su tiempo total de vida.

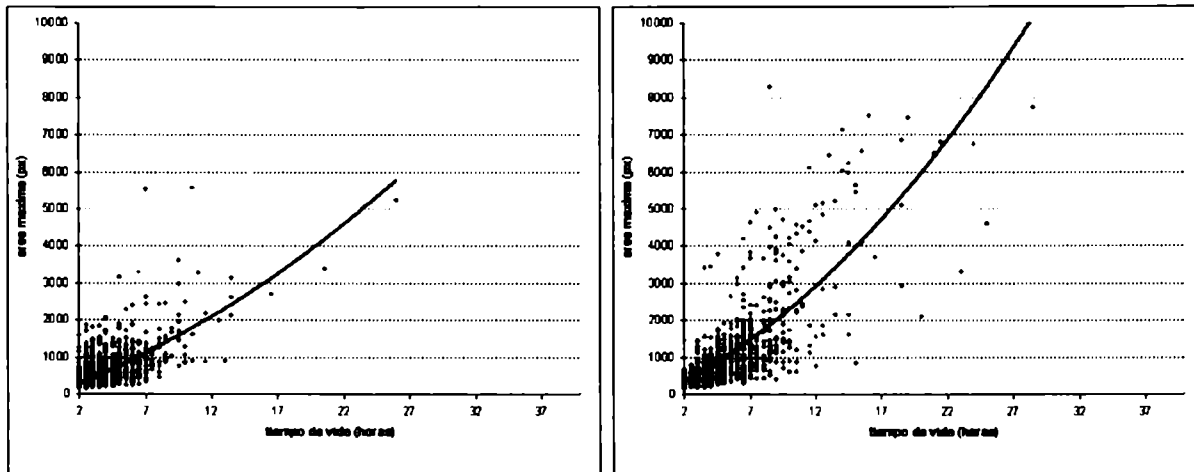


Figura 4.5: Área máxima (en píxeles) en función del tiempo de vida de los SCM para cada uno de los conjuntos antes definidos. El gráfico de la izquierda corresponde al conjunto SCM-STF mientras que el de la derecha es el correspondiente al conjunto SCM-CTF.

Otra característica notable que diferencia a ambos conjuntos es su aspecto. En este caso se utilizó el parámetro de excentricidad (relación entre el diámetro mayor y el diámetro menor considerando los puntos extremos del SCM) para estudiar esta característica. En la Figura 4.6 se muestra la distribución de frecuencias del parámetro excentricidad en el momento del área máxima, para cada uno de los conjuntos. En el caso SCM-CTF se observa un marcado desplazamiento hacia la derecha en la distribución lo que estaría indicando que los SCM que alcanzan topes fríos tienen un formato más circular en el momento de su máxima extensión, mientras que valores medios cercanos a 0,4 en el caso SCM-STF indicarían una forma más indefinida de los miembros de este conjunto.

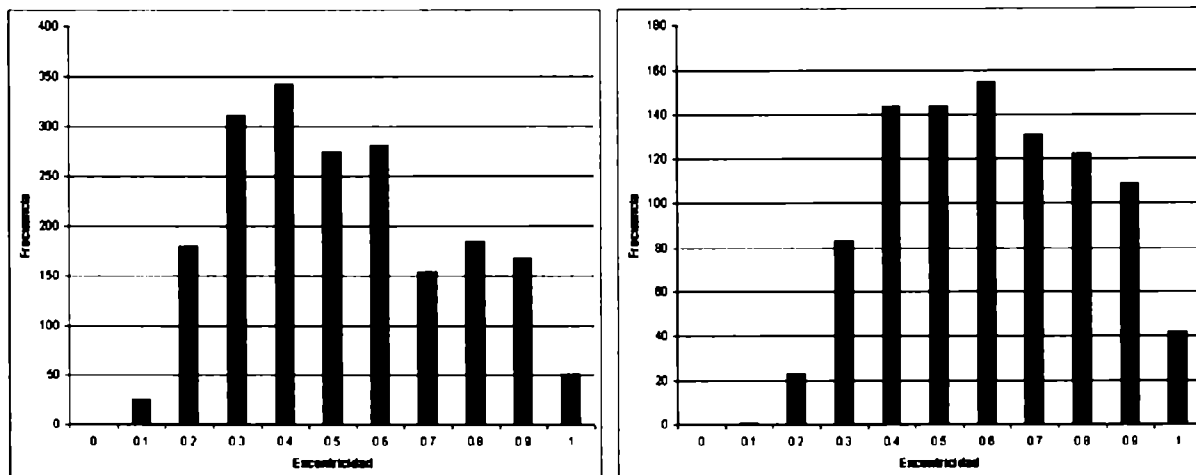


Figura 4.6: Distribución de frecuencias del parámetro excentricidad en el momento del área máxima para cada uno de los conjuntos antes definidos. El grafico de la izquierda corresponde al conjunto SCM-STF mientras que el de la derecha es el correspondiente al conjunto SCM-CTF.

4.3.2. Región de Nacimiento y Desplazamiento de los SCM.

4.3.2.1. Región de Nacimiento de los SCM.

En la presente sección se analizarán las características físicas que presentan los SCM de los dos conjuntos definidos en la sección anterior. En primer lugar, se estudiará la distribución geográfica de los nacimientos de los SCM. En este caso se cubrió el area de estudio con una malla regular que divide la escena en retículos o celdas de $2^\circ \times 2^\circ$ y se calculó la cantidad de sistemas convectivos (frecuencia) que son detectados por primera vez (por generación espontánea) en cada celda. En el caso SCM-STF, se pueden observar tres máximos relativos de actividad convectiva bien definidos (Figura 4.7 izquierda). El más importante esta ubicado sobre el noroeste de Argentina relacionado con la actividad termo-orográfica propia de la región (Lichtenstein, 1980), mientras que un segundo máximo se ubica sobre las nacientes del río Paraná, en la región de la sierra da Mantiqueira y Serra do Mar, en Brasil. El tercer máximo relativo se ubica sobre la provincia de Mendoza. Este último esta relacionado con una fuerte actividad convectiva que se produce fundamentalmente por el calentamiento diurno que suele estar acompañado frecuentemente con la ocurrencia de tormentas (Simonelli, 2000). Los tres máximos observados parecen indicar una alta correlación entre la frecuencia de nacimientos de SCM y la topografía. Esto puede estar relacionado con los efectos termo-orográficos que generan este tipo de sistemas. En

general, el tipo de convección que se produce en estas regiones es del tipo local y de una escala pequeña, inclusive menor a la de la resolución del satélite, por lo cual las temperaturas mínimas observadas a través del satélite no son tan bajas debido, probablemente, a efectos de contaminación de escala menor al tamaño del píxel del satélite usado (16 km²).

En la Figura 4.7, derecha, que corresponde al caso SCM-CTF, se observa que existen dos máximos relativos de iniciación de los SCM: uno de ellos sobre el sur de Bolivia y otro sobre la región de los estados de Mato Grosso y Mato Grosso do Sul en Brasil. Es probable que estos máximos estén relacionados con efectos dinámicos, en particular, con el flujo medio en capas bajas (Doyle y Barros, 2002). En el caso del máximo ubicado al este estaría relacionado con la intensificación de la ZCAS, mientras que el ubicado al oeste podría indicar un debilitamiento de la misma (ver Figura 14 del citado trabajo).

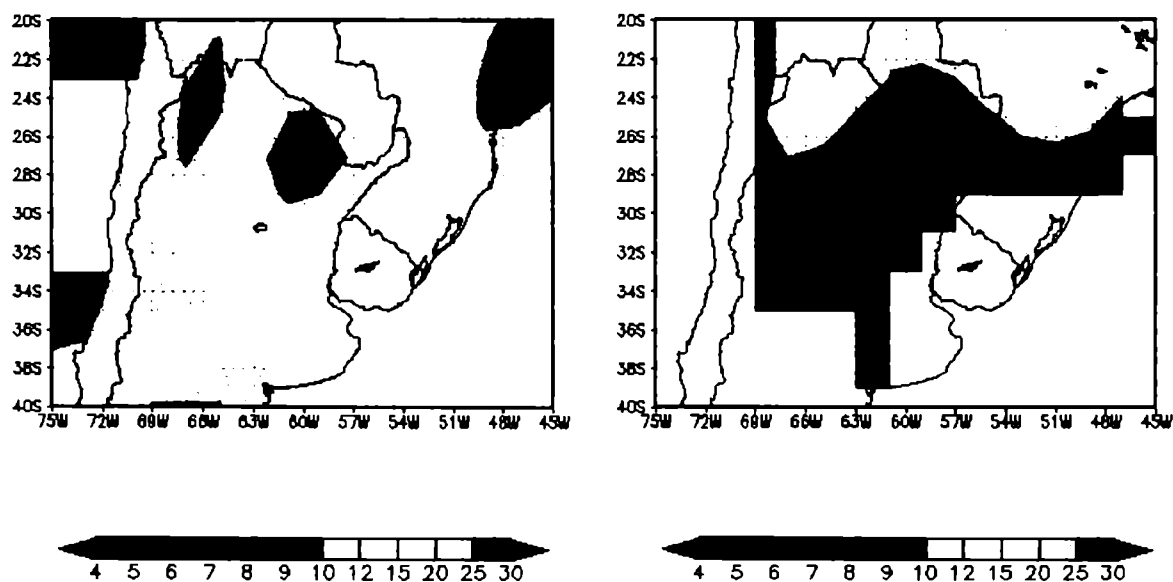


Figura 4.7: Distribución geográfica de la frecuencia de nacimientos para los casos SCM-STF (izquierda) y SCM-CTF (derecha)

4.3.2.2. Desplazamiento de los SCM

El desplazamiento se lo caracterizó como la velocidad media del conjunto de SCM que atravesaban una celda de 2° X 2°. Solo se consideraron aquellos sistemas nubosos que provenían de una continuidad con respecto al tiempo anterior. Esta última exigencia se

realizó para evitar resultados espurios resultantes de fusiones o divisiones. En este caso no se observan diferencias significativas entre los casos SCM-CTF y SCM-STF (Figura 4.8) salvo la cantidad de SCM que atraviesa cada cuadrícula. En ambos casos se observa que, en general, el desplazamiento promedio de los sistemas es hacia el este. En el caso SCM-STF la velocidad media de los SCM es más uniforme excepto aquellos sistemas convectivos que se forman sobre el oeste de Argentina en la ladera oriental de los Andes (particularmente en la provincia de Mendoza) que tienen un escaso desplazamiento por lo que su disipación se produce prácticamente en el mismo lugar donde se generaron. En el caso del conjunto SCM-CTF, el máximo de la velocidad media se produce en la región de latitudes medias (aunque la cantidad de SCM usadas en el cálculo sea menor), mientras que sobre las regiones tropicales dicho valor es algo menor (aproximadamente la mitad que en la región anteriormente descrita).

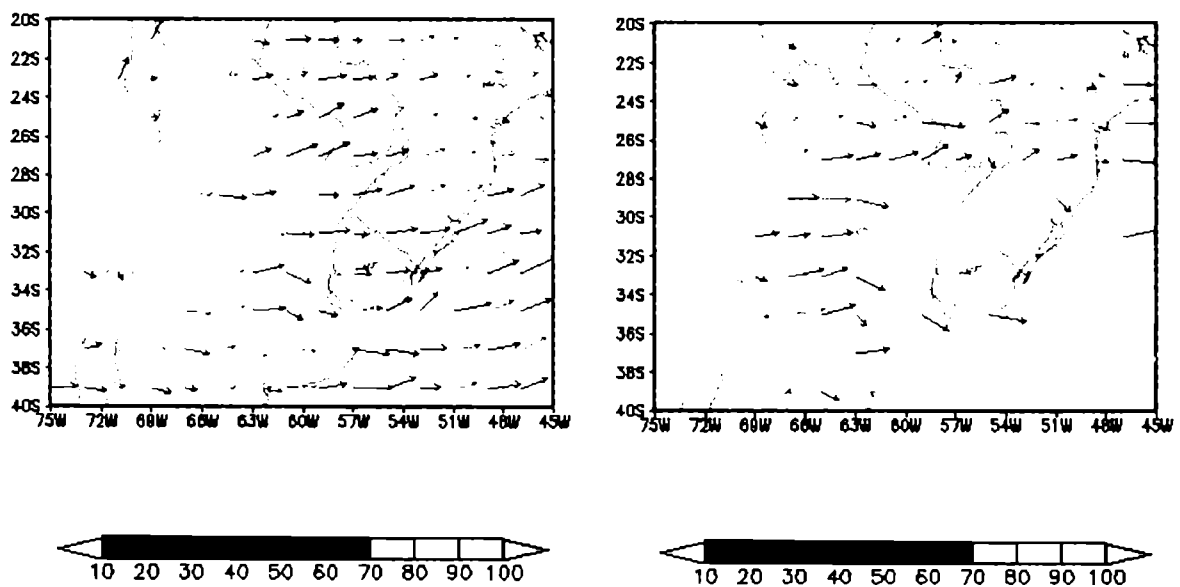


Figura 4.8: Velocidad media de los SCM para los casos SCM-STF (izquierda) y SCM-CTF (derecha). La paleta de colores indica la cantidad de sistemas que fueron considerados para hacer el promedio mientras que la extensión de la flecha indica el módulo de la velocidad. El tamaño mas grande presente en las figuras es del orden de 8 m/s.

4.3.3. Ciclo diario de diversos parámetros en la evolución de los SCM

En primer lugar se muestra la evolución diaria de la cantidad media de píxeles con temperatura menor a 235 K existentes en cada imagen. En la Figura 4.9 se puede observar el comportamiento de este parámetro para ambos conjuntos. En primer lugar se observa un ciclo diario más marcado en el conjunto SCM-CTF con un mínimo cercano al mediodía y un máximo alrededor de las 18 horas (hora local). La relación entre el máximo y el mínimo de píxeles observados es alrededor de 5 a 1. Este crecimiento en la cantidad de píxeles se produce en un corto lapso de tiempo (6 horas), por lo que, como se verá más adelante, existe un fuerte proceso de expansión durante ese lapso. En cambio, el decrecimiento es más lento. En el conjunto SCM-STF se puede observar la misma modulación que en el conjunto SCM-CTF aunque su amplitud no supera el 3 a 1 y el crecimiento de los sistemas es más moderado.

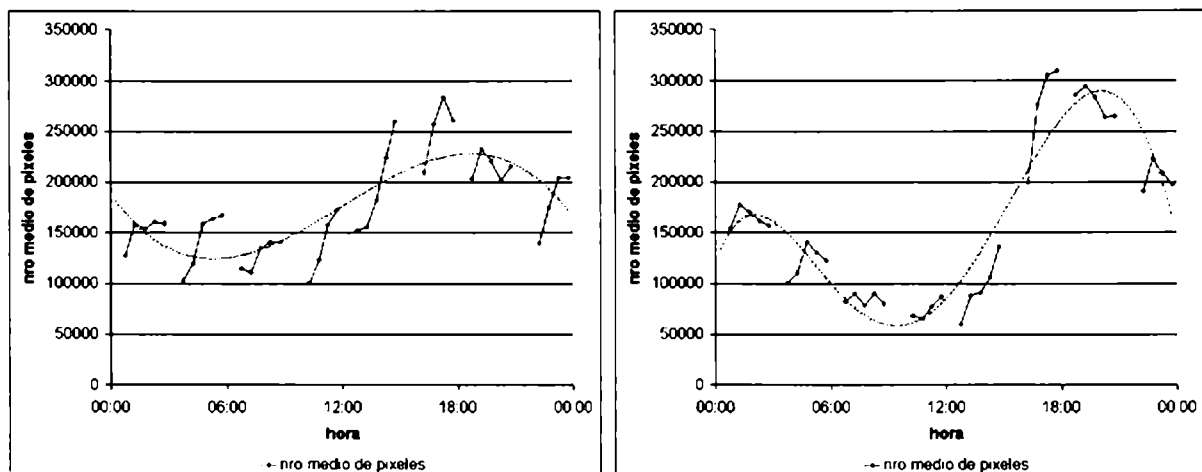


Figura 4.9: Numero medio de píxeles por imagen (en azul) cubiertos por el conjunto SCM-STF (izquierda) y SCM-CTF (derecha). En color rojo se observa la aproximación polinómica de dichos puntos

Complementando el análisis anterior, en la Figura 4.10 se puede observar el ciclo diario de la temperatura mínima y la evolución de tamaño (expresada como $1/A \times DA/DT \times 10^6$, donde A es el área delimitada por la isoterma de 235 K) para los conjuntos SCM-STF y SCM-CTF. Tal como se observó en el análisis anterior, en este caso, también la variabilidad es mucho mayor en el conjunto SCM-CTF que en el conjunto SCM-STF. Este análisis complementa, en

cierta manera, al resultado mostrado anteriormente: a partir de un máximo de temperatura mínima (que coincide con la mínima cantidad de píxeles por imagen por debajo de los 235 K), comienza un proceso de enfriamiento seguido por un proceso de expansión (que es mucho más marcado en caso SCM-CTF). Es decir, el SCM primero se desarrolla verticalmente (alcanza topes más fríos) y luego se expande hasta alcanzar su máxima extensión definida por la isoterma de 235 K. Estos elementos reafirman la hipótesis planteada por Machado y Rossow (1993) en la cual este proceso de fuerte enfriamiento con una posterior expansión del área comprendida por la isoterma de 235 K correspondería a las primeras fases del ciclo de vida.

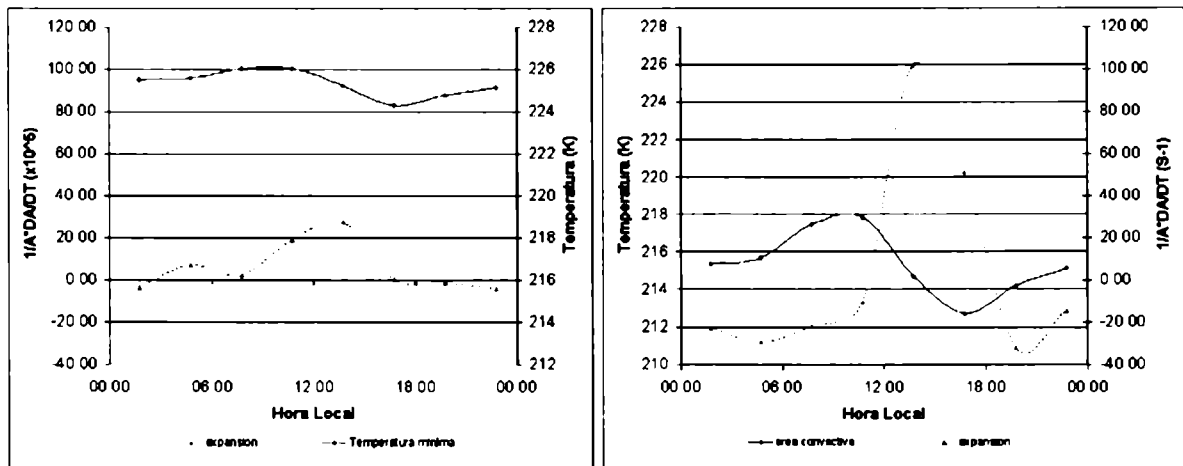


Figura 4.10: Ciclo diario de la temperatura mínima y la expansión (expresada como $1/A \times DA/DT \times 10^6$, donde A es el área limitada por la isoterma de 235 K) para los conjuntos SCM-STF (izquierda) y SCM-CTF (derecha).

También resulta interesante estudiar la distribución espacial a lo largo del día de la variable expansión. Al igual que en el caso del cálculo del desplazamiento y los nacimientos, se dividió el dominio en un retículo de 2 x 2 grados y se promedió para cada SCM presente en el retículo (sea cual fuere el estado de su ciclo de vida) el valor de la expansión para cada uno de los momentos del día: madrugada (hasta las 06:00 hora local), mañana (hasta las 12:00), tarde (hasta las 18:00) y noche (hasta las 24:00). En la Figura 4.11 se puede observar el comportamiento del ciclo diario de esta variable para el conjunto general ya que la cantidad de datos es más significativa para cada uno de los cuatro conjuntos. A partir de los resultados obtenidos en el análisis de la cantidad de píxeles con temperatura menor a 235 K existentes en cada imagen, la cantidad de SCM presentes durante la madrugada y la mañana (columna izquierda, arriba y abajo respectivamente) es menor y, por lo tanto, no es

posible calcular la expansión en todas las cuadrículas. No obstante se puede observar un predominio de valores negativos durante la madrugada (salvo en Chaco y Formosa) y positivos durante la mañana. Durante la tarde (abajo, derecha) se produce una gran expansión en toda la región, con máximos relativos en la cordillera de los Andes (por un efecto térmico), sobre la provincia de La Pampa y sobre la cuenca del río Uruguay. Este proceso de expansión se produce fundamentalmente sobre el continente. Durante la noche se produce un máximo de decrecimiento sobre todo el este de la cuenca que estaría relacionado con un calentamiento de los topes (Figura 4.10), por consiguiente, una disminución del área delimitada por la isoterma de 235 K.

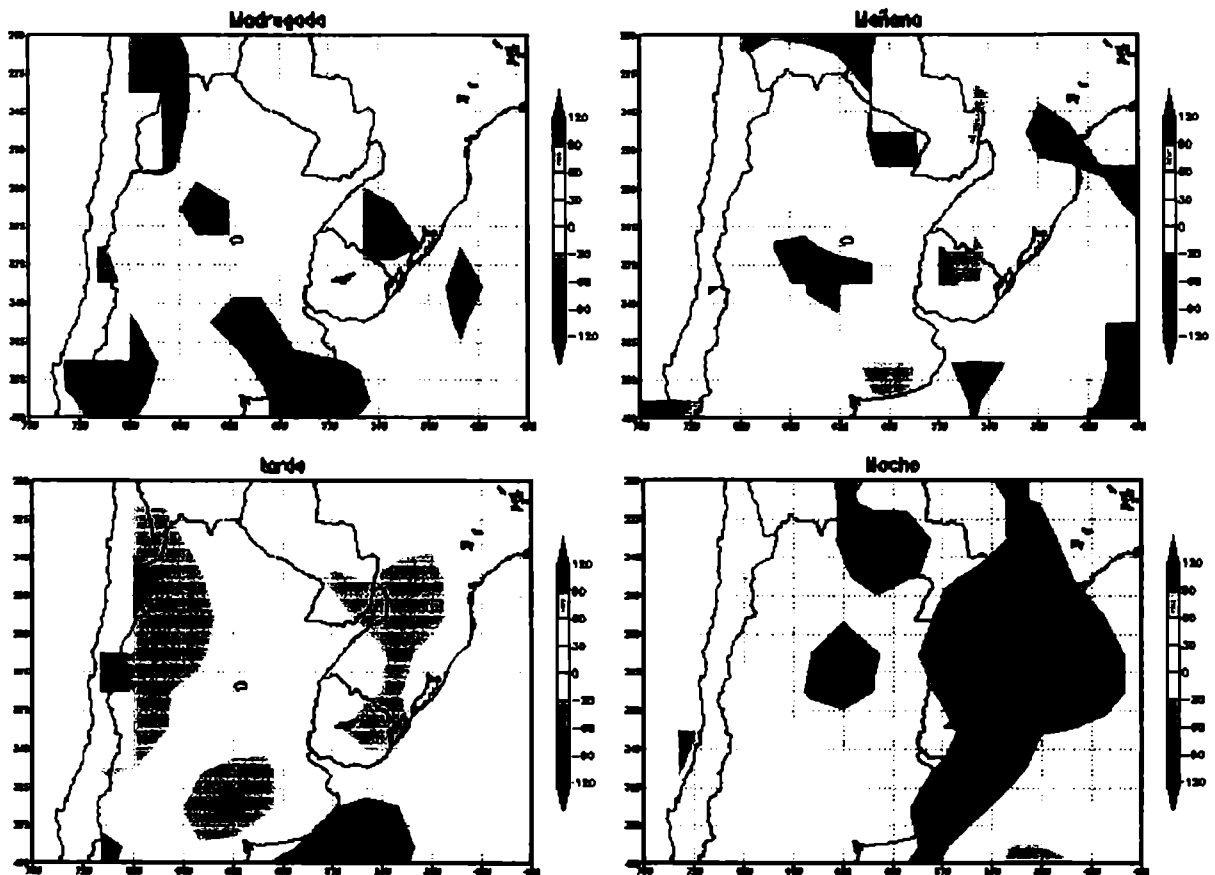


Figura 4.11: Distribución espacial de la expansión (expresada como $1/A \times dA/dT \times 10^6$, donde A es el área delimitada por la isoterma de 235 K) para el conjunto general para la madrugada, mañana, tarde y noche.

Otro elemento a tener en cuenta en el estudio de las propiedades radiativas del conjunto SCM-CTF es la proporción de píxeles más fríos (área delimitada por la isoterma de 210 K) que están presentes, en términos medios, en cada imagen (Figura 4.12). En un primer

análisis se puede observar que su evolución diaria es muy similar a la cantidad de píxeles definidos por la isoterma de 235 K (Figura 4.9 derecha).

Para complementar este análisis se incluyó asimismo la evolución diaria de la temperatura mínima media de cada uno de los SCM presentes en cada imagen (Figura 4.12). En este caso, su evolución es prácticamente inversa a la que presenta la cantidad media de píxeles delimitados por la isoterma de 210 K: cuando la temperatura mínima media es alta, la cantidad media de píxeles delimitados por la isoterma de 210 K es baja y viceversa. Igualmente se puede observar que dichos máximos y mínimos están levemente desplazados. En especial, se observa que el enfriamiento de los SCM (en promedio) es levemente más rápido que la expansión del área definida por la isoterma de 210 K. Este hecho también está en consonancia con lo expresado en párrafos anteriores sobre la evolución de los SCM durante sus primeras fases de su ciclo de vida (Machado y Rossow, 1993)

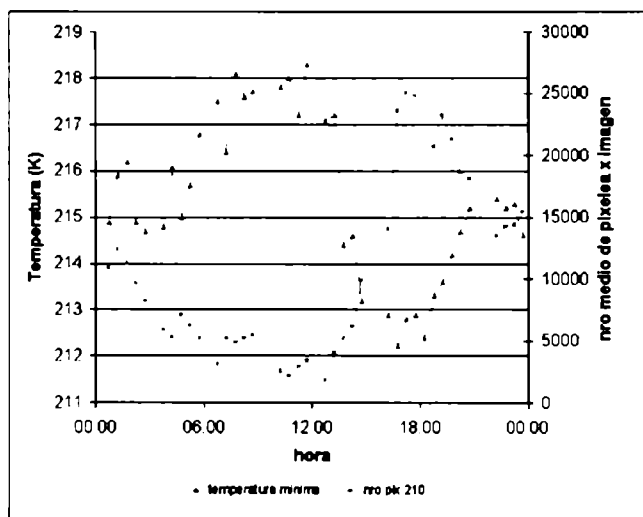


Figura 4.12: Ciclo diario de la temperatura mínima media (en el eje izquierdo) y la cantidad media de píxeles por debajo de 210 K (eje derecho)

Continuando con el análisis de las diversas variables se analizó el comportamiento de la cantidad de nacimientos y decaimientos que se producen a lo largo del día para ambos conjuntos. En primer lugar se puede observar en la Figura 4.13 que existen diferencias en el comportamiento entre ambos conjuntos. Mientras el máximo en la cantidad de nacimientos de SCM en el caso SCM-STF ocurre, en promedio, en las primeras horas de la tarde (en coincidencia con el máximo de insolación), en el caso SCM-CTF este se produce al

atardecer (cerca de las 18:00 hora local). Otra diferencia en lo que respecta a nacimientos de SCM, radica en el hecho de que prácticamente no se producen nacimientos de SCM que luego desarrollen topos fríos (conjunto SCM-CTF) durante toda la mañana, mientras que en el conjunto SCM-STF, siempre se están generando nuevos SCM a lo largo del día. Como se expuso en el comienzo del capítulo, en general estos sistemas son pequeños y de corta duración.

Con respecto a los decaimientos, en general estos se dan en la últimas horas de la tarde y durante la noche. Como este análisis se realiza sobre valores medios, el intervalo de tiempo existente entre el número máximo de nacimientos y el número máximo de decaimientos está directamente relacionado con el tiempo medio de vida de los SCM: mientras en el caso SCM-STF es del orden de las 3 horas, en el caso SCM-CTF ese valor asciende a las 5 horas.

Con respecto a las divisiones y fusiones en el conjunto SCM-STF (como era de esperar ya que se trata de SCM pequeños y de corta duración) el número de las mismas es mucho menor que el de los nacimientos y decaimientos, por lo que no han sido graficadas en la Figura 4.13 (izquierda). En el conjunto SCM-CTF, se puede observar la siguiente secuencia: luego del máximo de los nacimientos se produce un máximo de fusiones, posteriormente un máximo de divisiones (coincidente con la última fase del ciclo de vida de los SCM) y, por último, un máximo de disipación total. Este tipo de configuración, que también fue encontrada por Mathon et Laurent (2001) sobre la región del Sahel (África). Este hecho también responde al modelo conceptual del ciclo de vida de los SCM planteado por Machado y Rossow (1993) (Figura 1.2) en el cual durante la etapa de formación del sistema convectivo la fracción de área convectiva es muy grande y va decreciendo a lo largo del ciclo de vida hasta que el sistema se disipa en fragmentos.

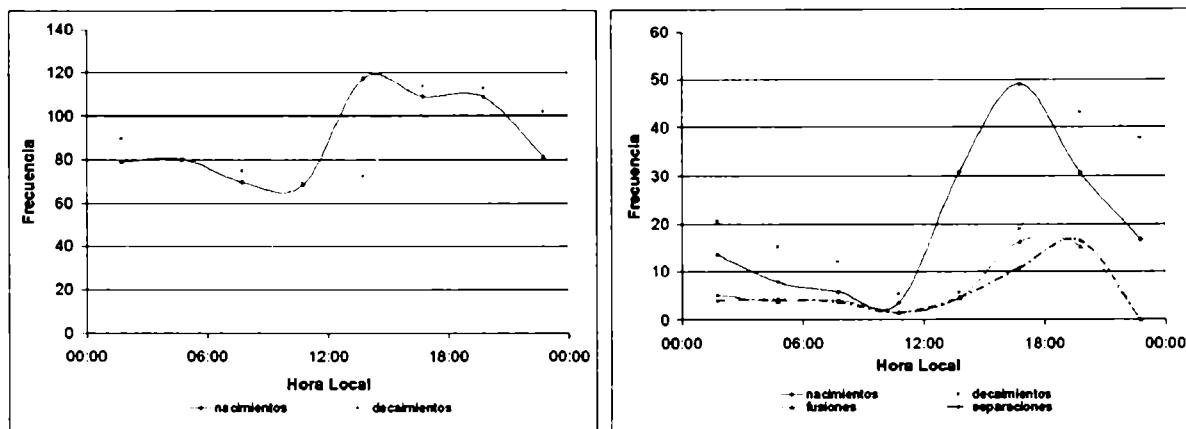


Figura 4.13: Ciclo diario de la frecuencia media de nacimientos y disipaciones por imagen para el conjunto SCM-STF (izquierda) y frecuencia de nacimientos, disipaciones, fusiones y separaciones para el conjunto SCM-CTF (derecha).

4.3.4. La expansión inicial de los SCM como variable predictora

De acuerdo con lo planteado por Machado et Laurent (2004) la tasa de desarrollo inicial de tamaño inicial de los sistemas puede considerarse una variable predictora muy importante para estimar el tiempo de vida de aquellos SCM. A partir de los resultados obtenidos en esta tesis, este hecho queda claramente reflejado en la Figura 4.14 en la que se puede observar que la expansión del SCM (expresada como $1/A \cdot dA/dt \cdot 10^6$, donde A es el tamaño y dt es la variación de tiempo, en este caso, de media hora) observada entre el nacimiento espontáneo de un dado SCM y la primera media hora es, en promedio para todo el conjunto estudiado, mayor cuanto mayor es el tiempo total de vida del SCM. Algo similar ocurre con la variación de la temperatura mínima, donde se observa que para los sistemas con menores tiempos de vida, en promedio, este valor es muy pequeño (entre 0,5 y 1 grado). Es decir, el sistema prácticamente no varía su temperatura a partir de su primera detección, iniciando luego su proceso de disipación (Figura 4.14 izquierda). Para los SCM con tiempos de vida mayores este valor es claramente negativo lo que indica un enfriamiento del tope de la nube acompañado con una expansión del área observada a través de imágenes de satélite.

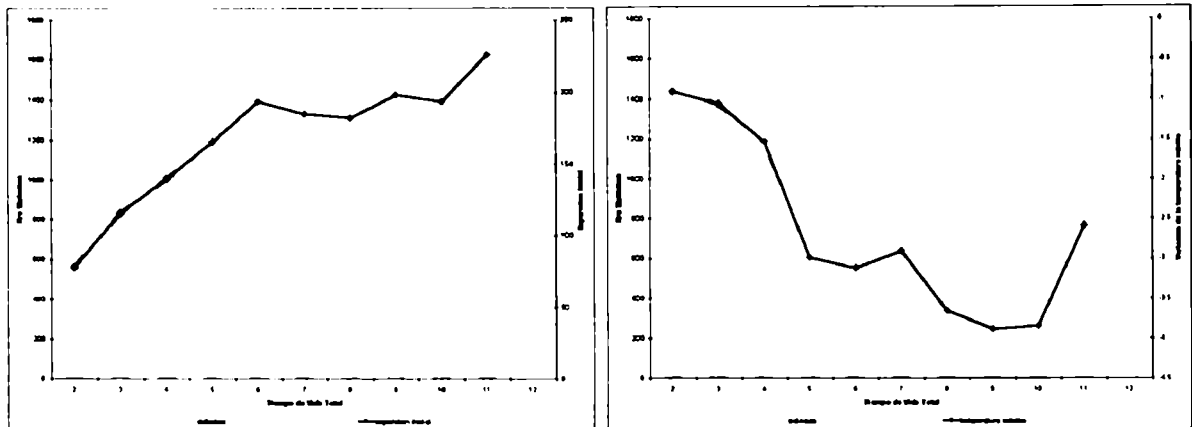


Figura 4.14: Variación promedio de la expansión del tamaño inicial (izquierda) y de la temperatura mínima (derecha) en función de tiempo de vida total de SCM. En el eje izquierdo de las ordenadas se observa el número de familias que se consideraron para obtener el valor promedio.

Con el objeto de determinar si alguno de los dos procesos (enfriamiento y expansión del área) sucede primero, se generaron las curvas promedio de variación de tamaño y temperatura mínima a lo largo de su ciclo de vida para los sistemas convectivos con tiempos de vida inferior a 4 horas, de 4 a 8 horas y mayor que 8 horas (Figura 4.15). En dicha figura se puede observar que el mínimo de temperatura sucede con anterioridad a la máxima expansión (esto es particularmente notable en los sistemas con un mayor tiempo de vida). Este hecho refuerza nuevamente la hipótesis planteada por Machado y Rossow (1993) en la que proponen un modelo conceptual sobre el ciclo de vida de los SCM, en el que durante la etapa de formación, el SCM primero alcanza el máximo enfriamiento y luego se expande durante la etapa de maduración. Posteriormente, al comienzo de su etapa de disipación, alcanza su máximo tamaño antes de disiparse en fragmentos. Otro hecho para remarcar es que la temperatura mínima durante los primeras etapas del ciclo de vida también puede ser utilizada como un parámetro predictor del tiempo de vida de un SCM. Cuanto menor es su temperatura mínima, mayor probabilidad existe que su tiempo de vida sea mayor. No se pueden establecer criterios con el tamaño ya que la detección de los sistemas está relacionado con su tamaño (la primera detección se realiza cuando el área del SCM es mayor que 150 píxeles).

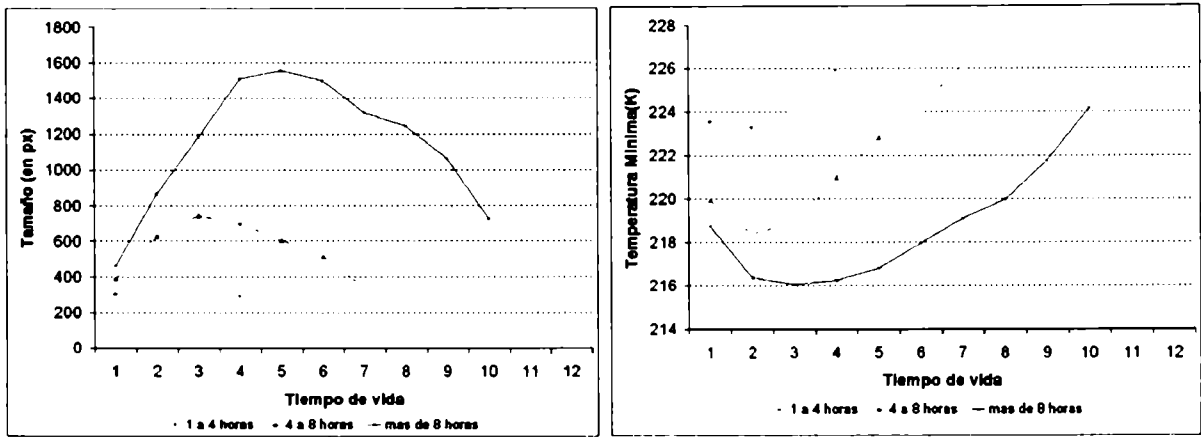


Figura 4.15: Curvas promedio de variación de tamaño (izquierda) y temperatura mínima (derecha) de los SCM a lo largo de su ciclo de vida para tres diferentes clases: SCM con tiempos de vida inferiores a 4 horas, entre 4 y 8 horas y más de 8 horas.

4.4. VARIACIONES INTERANUALES

Para completar el capítulo de las características morfológicas y radiométricas de los SCM, se realizó el promedio mensual de algunos de los parámetros estudiados anteriormente para el periodo diciembre – febrero de los años 2000-2001, 2001-2002 y 2002-2003. Este estudio se llevó a cabo a partir del conjunto general, es decir, el conjunto SCM-STF más el conjunto SCM-CTF. En primer lugar, en la Figura 4.16 se puede observar la cantidad de imágenes disponibles para cada uno de los meses mencionados.

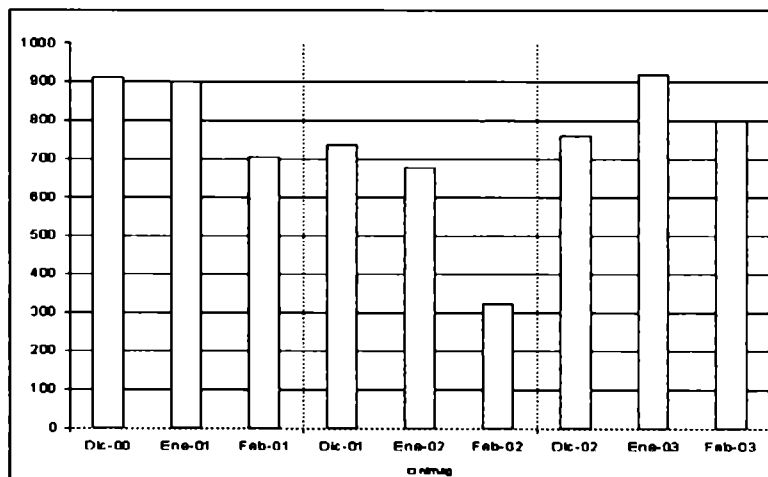


Figura 4.16: Número de imágenes disponibles para cada mes del periodo de estudio

Como se mencionó en el punto 4.2., durante el año 2002 existe un número importante de días consecutivos sin imágenes (28 de enero al 9 de febrero). En el resto de los meses, la cantidad imágenes es superior a las 28 imágenes por día, lo que arrojaría un promedio de algo más de una imagen por hora.

En la Figura 4.17 se muestra la marcha mensual de la temperatura mínima media para los tres veranos de estudio junto con la cantidad media de píxeles por imagen por debajo de 210 K. En este caso se observa, al igual que en la Figura 4.12, un comportamiento inverso entre estas dos variables: mientras se observan máximos en la temperatura mínima media, es mínima el área cubierta por la isoterma de 210 K y viceversa. Asimismo cabe señalar que mientras el primer verano (diciembre 2000 – Febrero 2001) es aquel que presenta una mayor variabilidad intra-estacional, el verano 2001-2002, es aquel en el que se observa una menor actividad convectiva (si bien esto puede estar relacionado con el hecho de que existe una cantidad importante de días sin imágenes disponibles, si es que en estos días hubo algún tipo de actividad superior al promedio estacional mostrado en la Figura).

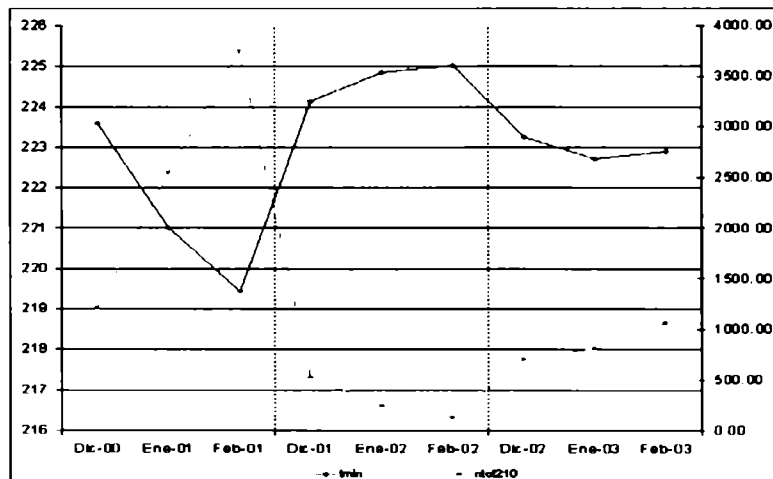


Figura 4.17: Marcha estacional de la temperatura mínima media y de la cantidad media de píxeles por imagen por debajo de 210 K

Para realizar la siguiente comparación se incorporó una nueva variable independiente del conjunto de datos utilizado: la lluvia media mensual para el área de la Cuenca del Plata calculada a través de metodologías de interpolación. En la Figura 4.18 se muestra la marcha mensual de la cantidad media de píxeles por imagen con temperatura por debajo de los 235 K versus la precipitación media mensual en la cuenca del Plata (Figura 4.1). En este caso, la acumulación se llevo a cabo teniendo en cuenta que la cantidad de imágenes existentes

para un dado día supere las 24 imágenes, es decir, con un promedio de 1 imagen por hora, con el objeto de asegurarse un mínimo seguimiento de los SCM. En caso contrario, el valor medio areal de ese día no es considerado en la acumulación mensual. En la Figura 4.18 se puede observar que existe una alta correlación entre la cobertura nubosa media por imagen para el umbral de 235 K y la precipitación, lo cual es, desde el punto de vista físico, coherente. En esta alta correlación están basados la mayor parte de los modelos que utilizan el canal infrarrojo térmico de los satélites geoestacionarios para la estimación de precipitación a través de satélites (por ejemplo, Vicente et al, 1998; Adler y Negri, 1988).

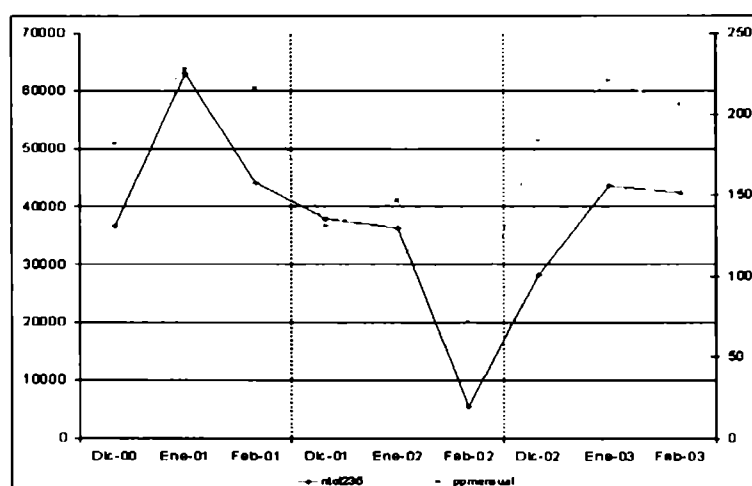


Figura 4.18: Marcha mensual de la precipitación acumulada mensual y de la cantidad media de píxeles por imagen por debajo de 235 K

4.5. CONCLUSIONES

A partir de las imágenes de satélite de los meses de diciembre, enero y febrero de 2001, 2002 Y 2003 se realizó una caracterización estadística de las distintas propiedades físicas determinadas a través de imágenes de satélite de los SCM que afectaron a la cuenca del Plata durante el periodo considerado. En primer lugar, se contó con una muestra algo superior a las 5200 familias cuyo tiempo medio de vida fue de un valor apenas inferior a las 4 horas. Es de destacar que la gran mayoría de las familias consideradas tiene un periodo de vida muy corto: el 75% no supera las 4,5 horas, mientras que el 50% no supera las 3 horas de duración. En este estudio solo se incluyen las familias con un periodo de vida superior a las 2 horas.

A partir de una primera clasificación de las familias estudiadas en aquellas que desarrollaron o no topes fríos (valores de temperatura mínima por debajo de los 210 K), los resultados de este análisis son algo diferentes para ambos subconjuntos. En ese caso del subconjunto SCM-STF, el tiempo de vida medio para el fue de 3,4 horas, mientras que el tiempo de vida medio para el subconjunto SCM-CTF es algo superior a las 5 horas.

Teniendo en cuenta esta misma división (subconjuntos SCM-CTF y SCM-STF) se observó que en el conjunto SCM-CTF es más probable que los SCM-CTF alcancen una mayor extensión areal y, como fue mencionado anteriormente, un periodo de vida más largo. Asimismo, es notable el corrimiento hacia mayores valores en la distribución de frecuencias de la excentricidad de los SCM-CTF en el momento de máxima extensión lo que estaría indicando que dichos sistemas tienden a adquirir una forma más circular que los del subconjunto SCM-STF.

Con respecto al nacimiento de los SCM se puede concluir que este parámetro está altamente relacionado con la orografía y con los fenómenos locales en el subconjunto SCM-STF, mientras que en el subconjunto SCM-CTF estaría más relacionado con la dinámica de la circulación en capas bajas. En cuanto al desplazamiento de los SCM, en reglas generales, se desplazan de oeste a este con valores más altos de velocidad en latitudes medias, especialmente en el conjunto SCM-CTF.

En lo que respecta al estudio del ciclo diurno de las diferentes variables, es notable la influencia del calentamiento diurno solar sobre el comportamiento de todas ellas. Se observa un máximo de actividad convectiva (mayor cantidad de píxeles delimitados por la isoterma de 235K) sobre el final de la tarde (luego de la mayor insolación) acompañado por un decrecimiento de la temperatura mínima de los topes nubosos. Es durante el horario de la mayor insolación que se observan los valores de expansión más altos a lo largo del día. Este hecho se hace más evidente en el conjunto SCM-CTF.

Se estudio también el comportamiento de las variables expansión media y la variación media de la temperatura mínima para familias con diferentes tiempos de vida. Los resultados arrojados por este estudio indican que la expansión inicial es mayor cuanto mayor es el tiempo de vida del SCM, mientras que sucede lo contrario con la variación de la temperatura mínima. Es de destacar el valor predictivo de ambas variables para determinar el tiempo de vida probable de un SCM dado.

Por último, se realizó un estudio sobre la marcha estacional de algunas variables obtenidas a través de esta metodología y su relación con otras variables independientes del conjunto de datos usado. En primer lugar, se obtuvo una alta coherencia entre las variables de temperatura mínima y cobertura nubosa definida por el umbral de 210 K, mientras que también existe una alta correlación entre la cobertura nubosa definida por el umbral de 210 K y la precipitación.

5. LOS SISTEMAS CONVECTIVOS DE MESOESCALA Y LA PRECIPITACIÓN

5.1. INTRODUCCIÓN

Desde los trabajos pioneros en la temática de la década de los 80 (Maddox, 1980; 1983), una de las motivaciones principales de todos los autores ha sido relacionar la estructura interna de los SCM con el entorno de gran escala existente y la precipitación observada en superficie. En general, estos trabajos están principalmente enfocados al estudio de un tipo especial de SCM: los complejos convectivos de mesoescala (capítulo 2 - apartado 2.1.2). La motivación principal para esta elección se basa en el hecho de que a pesar de ser pocos en número en relación al total de SCM, el aporte a la cobertura nubosa es significativo y, por otro lado, este tipo de sistemas individualmente son responsables de una proporción importante de la precipitación observada en superficie (Velasco y Fritsch, 1987; Miller y Fritsch, 1991, Laing y Fritsch, 1993).

A partir de la introducción de metodologías automáticas de generación de ciclos de vida de SCM, trabajos más recientes como el de Torres (2003), dan una extensa descripción del entorno de gran escala asociado a diferentes fases del ciclo de vida de los SCM, en la región comprendida entre los 20° S y los 40° S en Sudamérica. Mathon y Laurent (2002) ofrecen un criterio de definición objetivo para la detección de un evento lluvioso en la región del Sahel basado en la observación efectiva de precipitación en superficie (área mínima cubierta por lluvia e intensidad mínima) y un área mínima de superposición entre el área de estudio y los SCM definidos a partir de un umbral de temperatura de 233 K.

De los numerosos trabajos consagrados al tema de la estimación de precipitación por satélite a través de canales infrarrojos (por ejemplo, Vicente et al, 1998; Adler y Negri, 1988), en todos ellos se muestra la dificultad de establecer una relación inequívoca entre los parámetros de la temperatura de brillo observada por satélites y precipitación en superficie. El objetivo de este capítulo no es el proponer una nueva metodología de estimación de precipitación por satélites sino explorar como los resultados obtenidos a partir de la aplicación de esta técnica puedan ser de aplicación directa en ese tipo de algoritmos.

El objetivo de este capítulo es encontrar cuales son los parámetros distintivos (a través del estudio de sus condiciones medias a lo largo de su ciclo de vida) que permitan distinguir

aquellos SCM que producen precipitaciones generalizadas e intensas en determinadas regiones de la Cuenca del Plata de aquellos que no las producen y cual es el entorno de gran escala en que se desarrollan este tipo de sistemas convectivos.

5.2. DATOS Y METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Los resultados obtenidos en este capítulo se basan en el estudio de los eventos de precipitación acaecidos durante los meses de diciembre de 2002, enero y febrero de 2003. Para ello, se contó con un total de 2479 imágenes de satélite (ver Anexo 2 – inciso A) y se definieron dos regiones de estudio: una centrada en la subcuenca del río Iguazú ($54^{\circ} 47' W - 48^{\circ} 53' W$, $22^{\circ} 52' S - 27^{\circ} 36' S$), en adelante llamada IGU (Figura 5.1); y otra sobre la República Oriental del Uruguay ($59^{\circ} W - 53^{\circ} W$, $30^{\circ} S - 35^{\circ} S$), en adelante llamada URU (Figura 5.2). La elección de estas regiones estuvo basada simplemente en la disponibilidad de datos al momento de confección de esta tesis. En ambas regiones la distribución espacial de las estaciones de medición es superior a la media de toda la cuenca (ver anexo 2 – inciso B) con un valor medio de 1 estación cada 1000 km^2 y 5000 km^2 para las regiones IGU y URU respectivamente. En dichas estaciones se contó con datos de precipitación a paso diario (acumulada en 24 horas). Vale hacer la aclaración de que en el caso de IGU, el periodo de medición es desde las 12 UTM del día anterior a las 12 UTM del día actual (día pluviométrico), mientras que en el área denominada URU, los datos se registran a las 10 UTM. Esta diferencia en los horarios de medición ha sido tomada en cuenta para la determinación de la precipitación de los SCM que están actuando sobre cada una de las regiones para un día dado.

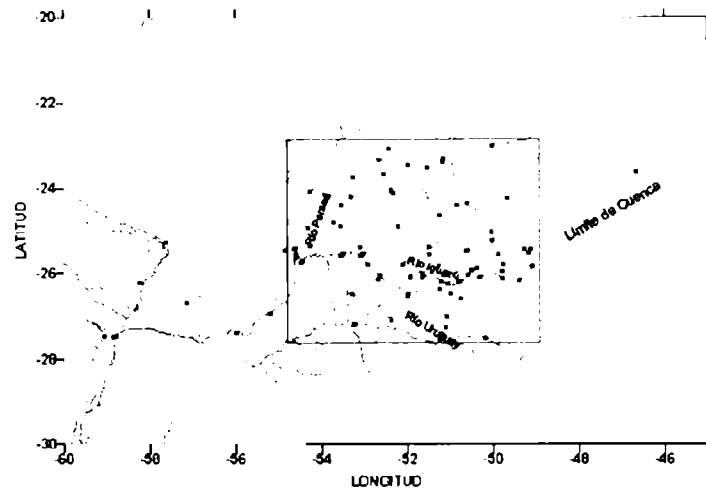


Figura 5.1: El cuadro interior define la región IGU y en él se muestra la distribución geográfica de las estaciones pluviométricas sobre la región.

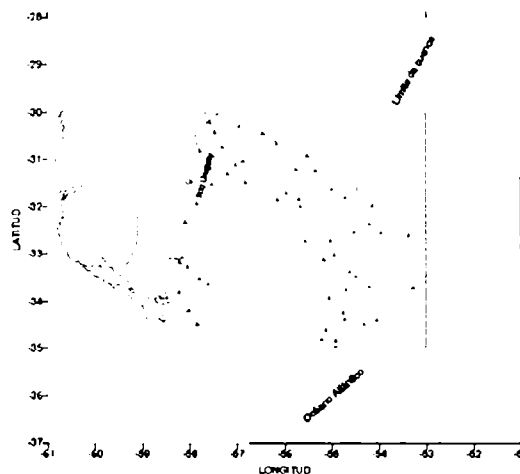


Figura 5.2: Ídem Figura 10 sobre la región URU

5.2.1. Definición de un evento lluvioso a partir de los datos de superficie

En este caso, el análisis se basó en una adaptación de la metodología utilizada por Mathon et Laurent (2002) ya que no se contó con datos horarios de precipitación como en el caso del mencionado trabajo. Es por ello que se consideró *evento lluvioso* como aquel que produce *precipitaciones superiores a los 25 mm en un área superior a los 50000 km² ($r \approx 125$ km expresado como radio de un círculo) o que, no cumpliendo esta condición, se registran precipitaciones superiores a los 75 mm en alguna estación de una dada región.*

Capítulo 5: Los Sistemas Convectivos de Mesoescala y la Precipitación

En función de esta definición, se seleccionaron los siguientes eventos de la región IGU (Tabla 5-1) y de la región URU (Tabla 5-2). En dichas tablas, y como información adicional para determinar la calidad del posible seguimiento de los SCM, se incluyen la cantidad de imágenes disponibles en cada uno de los días seleccionados, la máxima diferencia de tiempo entre dos imágenes consecutivas y las áreas cubiertas por precipitación para los umbrales de 25, 50, 75 y 100 mm. En este caso, el área está definida como el radio de un círculo cuya superficie es igual al área delimitada por una dada isoyeta.

Día	cantidad	max delta (hr)	25 mm	50 mm	75 mm	100 mm
02/12/2002	36	2	137	11	3	0
06/12/2002	29	4	73	29	15	0
07/12/2002	12	7.5	142	95	2	0
15/12/2002	33	2.5	51	26	7	0
21/12/2002	36	2	128	3	0	0
24/12/2002	8	6	183	145	80	18
04/01/2003	29	3	167	72	26	0
11/01/2003	32	3	128	48	30	23
19/01/2003	34	2	83	59	40	22
23/01/2003	32	2.5	135	28	0	0
26/01/2003	30	3.5	131	54	17	0
27/01/2003	36	2	206	100	40	9
08/02/2003	34	2	144	0	0	0
11/02/2003	36	2.5	177	36	17	4
13/02/2003	35	2.5	140	15	0	0
17/02/2003	32	3.5	173	28	0	0
20/02/2003	31	4.5	174	118	78	47

Tabla 5-1: Eventos seleccionados a partir del criterio definido en el texto para la región IGU.

Día	cantidad	max delta (hr)	25 mm	50 mm	75 mm	100 mm
04/12/2002	36	2.5	164	128	94	68
05/12/2002	16	5	234	160	73	0
06/12/2002	29	4	240	186	22	0
20/12/2002	22	5.5	189	64	0	0
23/12/2002	21	3.5	338	319	263	128
28/12/2002	32	4	155	0	0	0
30/12/2002	30	2	180	127	66	21
08/01/2003	34	2.5	192	0	0	0
10/01/2003	37	2	126	6	0	0
20/01/2003	35	2	215	84	32	0
02/02/2003	29	3	167	86	56	0
03/02/2003	29	2.5	248	73	0	0
05/02/2003	28	2.5	209	118	62	22
07/02/2003	38	2	80	54	30	0
08/02/2003	34	2	174	93	46	22
11/02/2003	36	2.5	209	92	68	48
12/02/2003	35	2.5	283	195	126	69
16/02/2003	32	2.5	129	0	0	0
20/02/2003	31	4.5	125	0	0	0
24/02/2003	18	13	216	87	8	0
25/02/2003	16	7.5	173	35	0	0
26/02/2003	30	4	153	80	33	0

Tabla 5-2: Idem 5-1 para la región URU

Para la región IGU se detectaron 17 días con precipitación de los cuales, salvo el 7 y 24 de diciembre de 2002, se posee una cantidad de imágenes suficientes para el seguimiento del ciclo de vida de los SCM que afectaron esta área. En el caso de la región URU, se contabilizaron 22 días con la condición descrita anteriormente, de los cuales solo 3 de ellos (5 de diciembre de 2002, 24 y 25 de febrero de 2003) poseen menos de 20 imágenes, una cantidad poco adecuada para el posible seguimiento de los SCM a lo largo de su ciclo de vida. Para estos días, no fue posible realizar un seguimiento completo del ciclo de vida de los SCM que afectaron ambas áreas, ya que la secuencia fue interrumpida frecuentemente por la falta de imágenes.

5.2.2. Definición de un evento lluvioso a partir de los datos de satélite

La definición de un evento lluvioso a partir de los datos de satélite se llevó a cabo de una manera más simple a la propuesta por Mathon et Laurent (2002) en la cual se contaban con datos horarios de precipitación y, por lo tanto, fue posible relacionar la existencia de un SCM y ocurrencia de precipitación en un dado instante. *En el caso de este estudio, para cada una de las estaciones en las cuales se midieron precipitaciones superiores a 25 mm en 24 horas, se determinaron que SCM estuvieron actuando sobre ella a lo largo del día sobre la base de un umbral de temperatura de 235 K. A partir de esta detección, se identificó la familia a la cual pertenecían los SCM, generando así una base de datos con todas las familias que pudieron contribuir a generar precipitación sobre el área.* En el caso, que una sola familia afecta a una serie de estaciones durante toda la jornada, se puede considerar o aceptar que existe una relación directa entre la precipitación registrada y la familia dada.

A partir de la metodología descrita en el párrafo anterior, se han podido seleccionar 32 familias en el caso de la región IGU y 33 para la región URU. A partir de un análisis de dichas familias surge que tan solo 9 familias han sido categorizadas como completas (de acuerdo con la definición del capítulo anterior, dicha familia tiene un nacimiento espontáneo y una disipación espontánea) en el área IGU y 4 tienen esas características en la región URU.

5.3. RESULTADOS

5.3.1. Análisis de la temperatura media de brillo de las imágenes de satélite

Con el objeto de establecer si existe un patrón espacial característico en el campo de la temperatura de brillo para cada una de las dos áreas (IGU y URU) para los eventos

seleccionados en cada una de ellas, se calculó la temperatura media de brillo de todas las imágenes que comprenden dichos eventos. Asimismo se calculó la temperatura media de brillo del resto de las 2479 imágenes que comprenden el conjunto completo de datos (diciembre de 2002, enero y febrero de 2003). Este último cálculo se realizó con el objeto de poder comparar los patrones espaciales de los eventos lluviosos, con los obtenidos para el resto de los días.

En Figura 5.3 que corresponde al cálculo de la temperatura media de brillo del resto de las imágenes que comprenden el conjunto completo de datos, se puede observar que los mínimos de temperatura media coinciden aproximadamente con las áreas de nacimiento de los SCM: en las laderas orientales de la cordillera de los Andes en el noroeste argentino y sur de Bolivia y en la región del sur de Brasil mencionadas en el capítulo anterior. Sin embargo, no se observa un mínimo sobre la provincia de Mendoza. Esto se puede deber a que dichos sistemas no alcanzan temperaturas tan bajas (ver discusión en el capítulo anterior) y por su corto periodo de vida, por lo que la mayor parte del día el cielo está despejado y el suelo alcanza muy altas temperaturas, influyendo así sensiblemente el valor de la temperatura media.

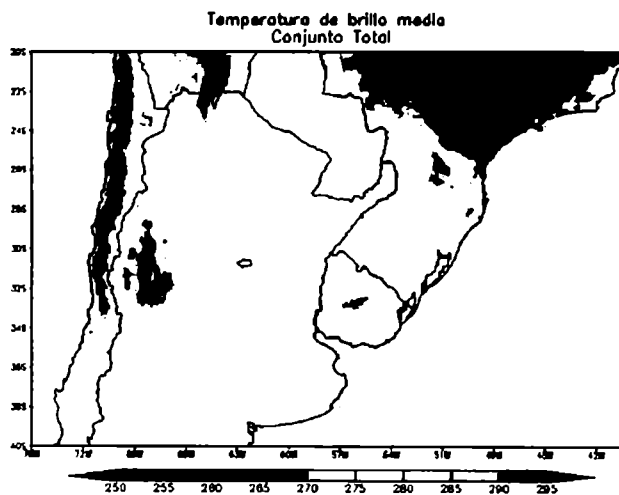


Figura 5.3: Temperatura media de brillo para el conjunto de imágenes de los meses de diciembre de 2002, enero y febrero de 2003.

Si se consideran los eventos seleccionados para la región IGU (Figura 5.4, derecha) se observa un mínimo de temperatura marcado sobre la región de estudio. Esto se hace más evidente si se analizan las anomalías (definiendo la anomalía como la diferencia entre el valor medio de los eventos seleccionados menos la temperatura media del resto de los días).

En la Figura 5.4 izquierda, se puede observar que la presencia de bajas temperaturas en la región de la cuenca del río Iguazú coincide también con bajas temperaturas Paraguay, norte del Litoral y la región de la falda oriental de la cordillera de los Andes en el NOA, mientras que en el resto de la cuenca no se percibe una diferencia significativa con respecto a los valores medios. Esta región de bajas temperaturas coincide con el área donde se observa mayor cantidad de Complejos Convectivos de Mesoescala (MCC's) durante el verano (Velasco y Fritsch, 1987). Por otra parte, la advección de humedad proveniente del Amazonas a través de un fuerte jet en capas bajas actuando sobre la región (Virji, 1981; Doyle y Barros, 2002) favorece el desarrollo de SCM.

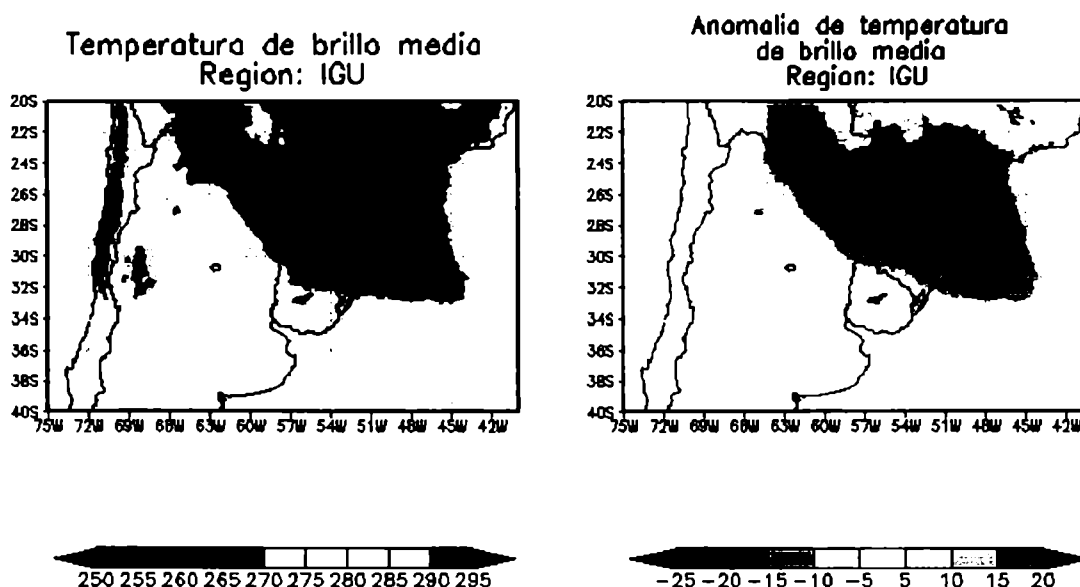


Figura 5.4: Izquierda: Temperatura media de brillo de todas las imágenes de los eventos seleccionados como IGU. Derecha: Anomalia de temperatura de los eventos lluviosos con respecto al conjunto general.

De la misma manera se procedió para los eventos URU. En la Figura 5.5 izquierda, se puede observar, al igual que en los eventos IGU, que las menores temperaturas se hallan situadas aproximadamente sobre la región de interés. De alguna manera, este hecho reafirma aquello que está profusamente difundido en la literatura (Adler y Negri, 1988; Vicente et al, 1998): las precipitaciones de gran extensión areal y de gran intensidad están relacionadas, en promedio, con temperaturas bajas de topes de nube. Si se observan las anomalías (definidas como en el caso anterior) (Figura 5.5 derecha), se puede observar un comportamiento de tipo oscilatorio que alterna regiones secas y húmedas como se describe en los trabajos de

Nogues - Paegle y Mo (1997) y Liebmann et al (1999) sobre la existencia de un dipolo en la circulación relacionado con la intensidad de la Zona de Convergencia del Atlántico Sur (ZCAS).

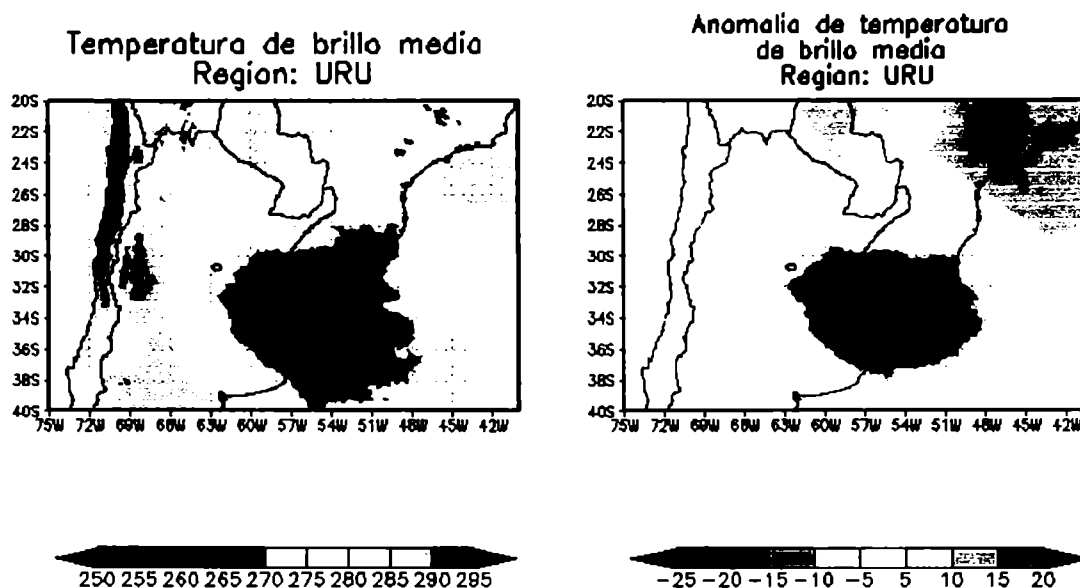


Figura 5.5: Idem Figura 11 para los eventos URU

A partir de este análisis, es posible asegurar que la elección de los eventos (tanto IGU como URU) tienen características comunes en cuanto a la temperatura de brillo observada por satélite y que, más adelante, se relacionará con el entorno de gran escala asociados a estos eventos.

5.3.2. Composición de Familias: Estudio de trayectorias, tamaño, temperatura mínima, área de convección profunda y excentricidad.

En esta sección, se estudiarán los ciclos de vida de los sistemas que afectaron cada una de las regiones de estudio. Debido a que la cantidad de sistemas completos existentes (con nacimiento y disipación espontáneas) en cada una de las regiones es escaso con respecto al total de familias para cada región y que, por lo tanto, no representa el comportamiento 'medio' de ciclo de vida de todos los SCM que actúan en cada área, se decidió la construcción de una composición que represente el comportamiento medio de los SCM que actuaron en cada zona de estudio.

Esta composición se llevó a cabo de la siguiente forma: se tomaron en cuenta todas las familias con un tiempo de vida superior a 2 horas (tres imágenes) y se descartaron aquellas familias cuyo nacimiento se inicia luego de un periodo sin imágenes disponibles (y que, por lo tanto, es imposible conocer la evolución anterior de dichos SCM). Posteriormente, y teniendo en cuenta el tiempo de vida parcial de cada SCM perteneciente a una dada familia (en el caso de las divisiones se contempló el tiempo de vida de cada SCM anterior a la división del SCM), se realizó un promedio de los principales parámetros que describen el comportamiento de cada uno de los SCM, a saber: posición, tamaño, temperatura mínima, área de convección profunda y excentricidad. De esta manera se obtuvo un valor medio de estos parámetros para cada intervalo de tiempo: para la primera media hora (en este caso tomando en cuenta todas las familias cuyo nacimiento fue espontáneo), al cabo de una hora, para una hora y media siguiente y así sucesivamente.

Este procedimiento se llevó a cabo tanto para el conjunto de familias seleccionadas a través de los criterios de evento lluvioso antes mencionados, como así también tomando en cuenta todas las familias que afectaron la regiones de estudio durante el periodo completo de los tres meses y que no están contenidas en el conjunto anterior. Por una cuestión de convención se decidió llamar a este conjunto "eventos no lluviosos", lo cual significa que las familias que lo componen no cumplen con los requisitos mencionados en la definición de un evento lluvioso y no estrictamente que no se haya producido precipitación cuando esos SCM hayan actuado.

El objetivo de este último procedimiento es comparar la evolución de los parámetros seleccionados de las familias que produjeron precipitaciones extendidas e intensas con respecto al conjunto de familias que afectaron a una dada región pero que no produjeron este tipo de fenómenos aunque, como se mencionó anteriormente, pudieron haber producido algunas precipitaciones sin las características de extendidas e intensas.

5.3.2.1. Trayectorias medias

En la Figura 5.6 se muestran las trayectorias medias de las familias que corresponden a eventos lluviosos que afectaron la región IGU y URU respectivamente. El criterio utilizado en este caso para llevar a cabo la composición es el siguiente: solamente están incluidas en esta media aquellas familias que hayan tenido un nacimiento espontáneo. En ambas figuras se puede observar que el nacimiento y la etapa de inicio de los SCM se produce, en términos medios, fuera de la región de estudio; al igual que la etapa de disipación. Solamente durante

la etapa de maduración (máxima extensión) el centro de masa del SCM esta dentro de las áreas de estudio. No obstante, y debido al tamaño de los SCM, prácticamente toda el área estaría cubierta por nubosidad convectiva durante la etapa de maduración.

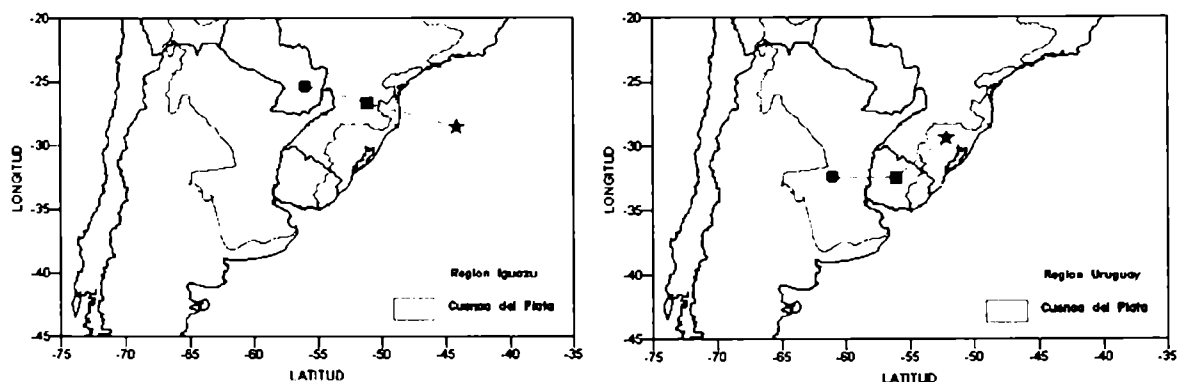


Figura 5.6: Trayectorias medias de las familias que corresponden a eventos lluviosos que afectaron la región IGU (izquierda) y la región URU (derecha). El círculo representa la posición media de la fase de iniciación, el cuadrado a la de maduración y la estrella a la de disipación.

La diferencia más notable entre las trayectorias de las dos regiones es la dirección predominante que toman los SCM a lo largo de su ciclo de vida. Mientras que en el caso de la región IGU, la trayectoria es en dirección ESE, en el caso de la región URU es ENE con curvatura anticiclónica, pero no se ha encontrado una explicación a este comportamiento

5.3.2.2. Distribución de frecuencias del tamaño, temperatura mínima, área de convección profunda y excentricidad

A partir de los resultados de la composición realizada, se hizo un análisis de la distribución de frecuencias relativas expresadas en porcentaje (histogramas) del tamaño, temperatura mínima, área de convección profunda y excentricidad a lo largo del ciclo de vida de dicha composición. Este procedimiento se llevo a cabo por separado para las dos regiones (IGU y URU) y para los dos subconjuntos de datos (eventos lluviosos y eventos no lluviosos).

El análisis de la distribución de frecuencias del tamaño de los SCM (Figura 5.7) sugiere la ocurrencia de sistemas de gran extensión está directamente relacionada con la ocurrencia de lluvia intensa en una región amplia. No existen SCM por encima de 10.000 píxeles (160.000 km²) que estén relacionados con eventos no lluviosos. Igualmente, los SCM más pequeños tienen una mayor probabilidad de pertenecer al conjunto de eventos no lluviosos aunque, como se verá más adelante cuando se analice la evolución temporal, esto

dependerá de la fase del ciclo de vida en que se encuentran los SCM. No obstante, es posible afirmar que, en valores medios para cada uno de los conjuntos y para ambas regiones, las familias que producen precipitaciones extensas e intensas pueden alcanzar el triple de tamaño con respecto a los que no las producen. Este resultado puede estar influido por la forma en que se definió un evento lluvioso: la extensión de 50.000 km² con precipitaciones por encima de 25 mm es una condición que puede estar afectando estos resultados

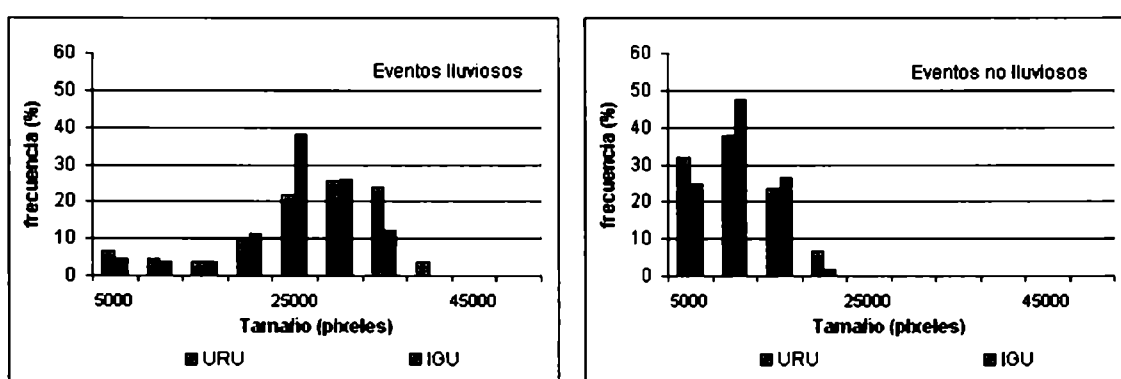


Figura 5.7: Distribución de frecuencias relativas (en %) del tamaño del SCM a lo largo del ciclo de vida de la composición de los eventos lluviosos (izquierda) y para eventos no lluviosos (derecha).

Si ahora se analiza el comportamiento de la temperatura mínima, se puede observar que las familias que afectan a la región IGU tienen mayor probabilidad de tener temperaturas menores que los de la región URU. Esta particularidad se puede observar en ambos conjuntos (eventos lluviosos y eventos no lluviosos), aunque, por los resultados ya obtenidos en el análisis de la temperatura de brillo para ambos subconjuntos, la distribución de frecuencias del conjunto de los eventos lluviosos está desplazada hacia las menores temperaturas (Figura 5.8).

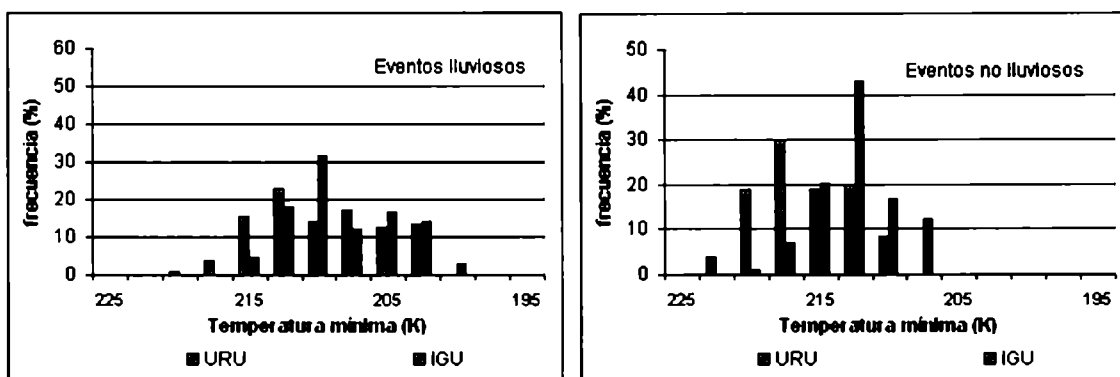


Figura 5.8: Distribución de frecuencias relativas (en %) de la temperatura mínima del SCM a lo largo del ciclo de vida de la composición de los eventos lluviosos (izquierda) y para eventos no lluviosos (derecha).

En virtud de los resultados obtenidos, es notable de ver que las familias que producen precipitaciones intensas y extensas en la región URU tienen una mayor tendencia de alcanzar mayores tamaños en algún momento de su ciclo de vida en relación con las que afectan a la otra zona de estudio, mientras que los SCM que afectan a la región IGU tienen una mayor probabilidad de alcanzar toques más fríos. En resumen: los SCM que afectan a la región IGU tienden a ser más pequeños en tamaño y desarrollan toques más fríos que los que afectan a la región URU.

Con respecto al comportamiento del área de convección profunda en ambos conjuntos (Figura 5.9), ocurre algo semejante que con el tamaño de los SCM. El área de convección profunda es marcadamente superior en el conjunto de eventos lluviosos que en el conjunto complementario. Sin embargo, no se observa una diferencia marcada entre las dos regiones en los eventos lluviosos como ocurría en el caso del análisis del tamaño. Esto trae como consecuencia que la fracción de área convectiva (relación entre el área total del SCM limitada por la isoterma de 235 K y el área correspondiente a los 210 K) sea mayor, en valores medios, en el caso IGU que en la región URU. Por otro lado, el hecho de que existan regiones de convección profunda en el conjunto de eventos no lluviosos podría deberse a que habiéndose registrado precipitaciones, estas no cumplen con el criterio para considerar a esa familia como evento lluvioso.

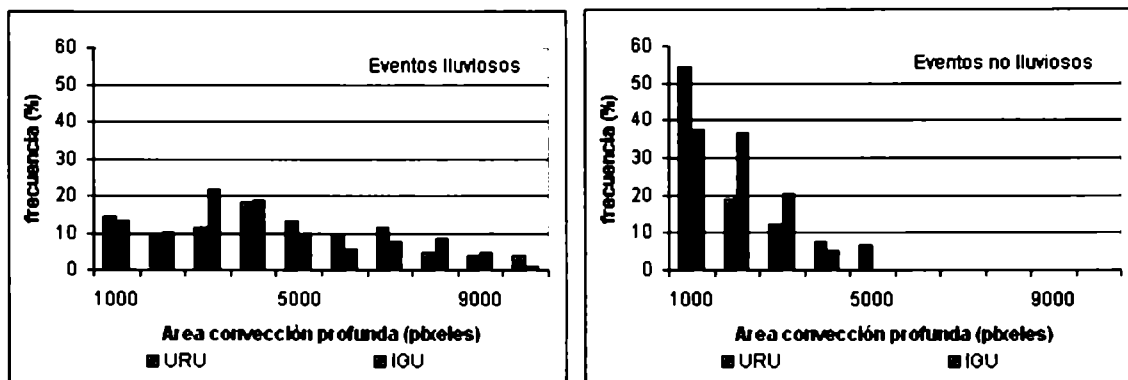


Figura 5.9: Distribución de frecuencias relativas (en %) del tamaño del área definida por la isoterma de 210 K del SCM a lo largo del ciclo de vida de la composición de los eventos lluviosos (izquierda) y para eventos no lluviosos (derecha).

Por último, el análisis de la distribución de frecuencias de la excentricidad (cuya definición se encuentra en el Anexo 1 – Inciso A) a lo largo del ciclo de vida de los SCM no indica diferencias significativas entre los conjuntos de eventos lluviosos y eventos no lluviosos, aunque en ambos casos para la región IGU se observa un leve desplazamiento hacia valores mayores de excentricidad (especialmente en el conjunto de eventos lluviosos). Esto indicaría una tendencia a que se fomen sistemas convectivos ‘más circulares’ (mayor barotropía) en la región IGU que en la región URU, región en la cual la forma de los sistemas tiende a ser ‘más elíptica’ (Figura 5.10).

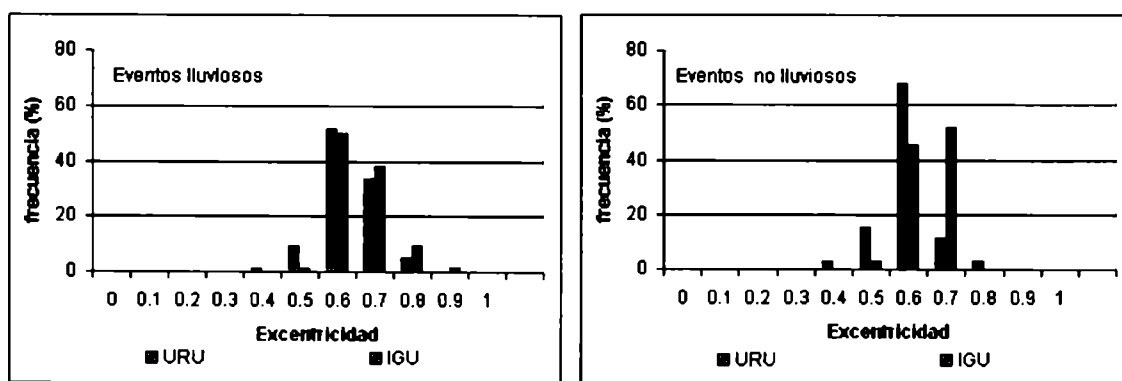


Figura 5.10: Distribución de frecuencias relativas (en %) de la excentricidad del SCM a lo largo del ciclo de vida de la composición de los eventos lluviosos (izquierda) y para eventos no lluviosos (derecha)

5.3.2.3. Evolución temporal

En la Figura 5.11 y la Figura 5.12 se puede visualizar la evolución temporal del tamaño medio de la composición realizada, la temperatura mínima media y el tamaño medio del área de convección profunda para cada uno de los conjuntos (evento lluvioso y no lluvioso) para la región IGU. En todos los casos se estudió la evolución de dichas variables desde su nacimiento y expansión inicial hasta su estado de máxima extensión, ya que luego su evolución es mucho más compleja (con frecuentes disipaciones y regeneramientos) lo que toma imposible la distinción de familias de SCM independientes.

En primer lugar se observa que la variación temporal de la temperatura mínima es mucho mayor en el conjunto de eventos lluviosos que en el conjunto complementario, por lo que se podría inferir que aquellos SCM cuyo decrecimiento en la temperatura supera cierto umbral (del orden medio de 2 K /h) durante las primeras horas de vida, tienen una mayor probabilidad de producir precipitación durante alguna fase de su ciclo de vida.

Si ahora se evalúa el comportamiento del tamaño de los SCM a lo largo de las primeras fases del ciclo de vida, se observa que este crece mucho más fuertemente durante las primeras etapas del ciclo de vida en el caso de eventos lluviosos que en el otro caso.

Con respecto al comportamiento del área media de convección profunda, esta tiene una evolución similar al área total del SCM (definido como la isoterma de 235 K) con un más rápido crecimiento durante las primeras etapas del ciclo de vida en el conjunto de eventos lluviosos que en el complementario. Sin embargo, se puede observar tenuemente un máximo relativo cerca de las 8 a 10 horas en el caso del conjunto de eventos lluviosos, en concordancia con un mínimo de la temperatura mínima media que ocurría con dos horas de anterioridad. En otras palabras, este hecho reafirma la hipótesis de que los SCM primeramente se enfrían y con posterioridad se expanden. Las evaluaciones de la evolución de la excentricidad media (no se muestran), no mostraron diferencias significativas entre ambos conjuntos con valores cercanos a 0.6 (relación entre el radio menor y el mayor de un SCM dado).

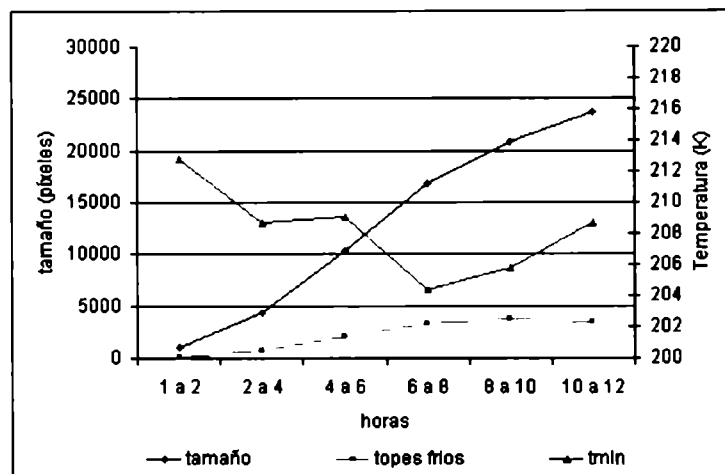


Figura 5.11: Evolución temporal del tamaño (en píxeles), del área cubierta por los topes fríos (en píxeles) y la temperatura mínima de los nueve píxeles (en K, eje derecho) para los eventos lluviosos en la región IGU.

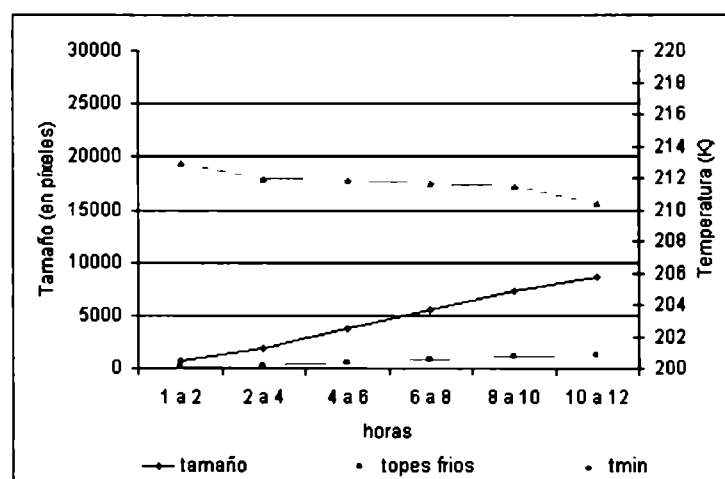


Figura 5.12: Ídem Figura 5.11 para los eventos no lluviosos en la región IGU.

En la Figura 5.13 y Figura 5.14 se muestra para la composición realizada la evolución temporal del tamaño medio, la temperatura mínima media y el tamaño medio de los topes más fríos para cada uno de los conjuntos (evento lluvioso y no lluvioso) para la región URU.

El comportamiento de las diferentes variables estudiadas es similar al encontrado en la región anterior, aunque adicionalmente se observa para esta región, que la temperatura mínima media para las familias consideradas como evento lluvioso es significativamente menor (alrededor de 7 K) que la temperatura mínima media para los eventos no lluviosos durante las dos primeras horas de vida. Este nuevo elemento, sumado a lo detectado

anteriormente con respecto al gradiente temporal, es un parámetro adicional que permitiría detectar aquellos SCM que mayor probabilidad tendrían de generar lluvias extensas e intensas.

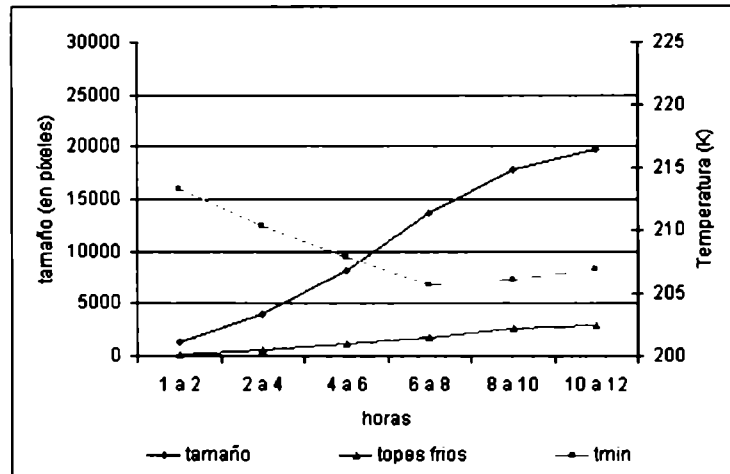


Figura 5.13: Evolución temporal del tamaño (en píxeles), del área cubierta por los topos fríos (en píxeles) y la temperatura mínima de los nueve píxeles (en K, eje derecho) para los eventos lluviosos en la región URU.

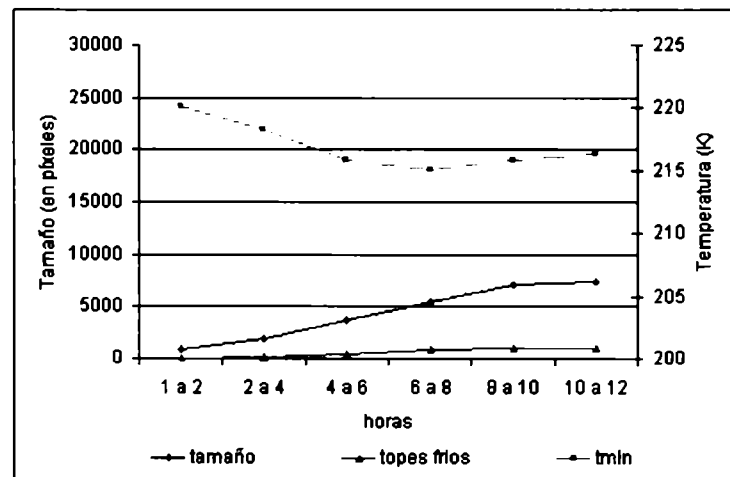


Figura 5.14: Ídem Figura 5.13 para los eventos no lluviosos en la región URU.

5.4. RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este capítulo se desarrolló una metodología para el estudio del ciclo de vida de aquellos SCM que produjeron precipitaciones importantes sobre algunas regiones seleccionadas en la

cuenca del Plata. En un primer paso se definió un evento lluvioso usando los datos de superficie (montos y extensión espacial de la lluvia) y los datos de satélite. Estos últimos corresponden a las familias para las cuales se detectaron precipitaciones en superficie durante alguna etapa de su vida en correspondencia con las imágenes de satélite.

Posteriormente, se llevo a cabo un análisis de la temperatura media de brillo de aquellas imágenes correspondientes a los días en los cuales se produjeron precipitaciones extendidas e intensas (usando el criterio de los datos de superficie) sobre cada una de las áreas. En ambos casos se puede observar un mínimo de temperatura de brillo (en coincidencia con los topes más altos) sobre cada una de las áreas de estudio.

En segundo lugar, y por el escaso numero de familias completas que cumplían con la condición de un nacimiento y una disipación espontánea, se realizó una composición de familias teniendo en cuenta el tiempo parcial de vida de cada familia, obteniendo así valores promedios de las principales variables que describen físicamente a un SCM: posición, tamaño, temperatura, tamaño de la porción más activa y excentricidad. Esta metodología se aplicó tanto para el conjunto de familias relacionadas con eventos de precipitación como así también para aquellas familias que no cumplían con ese requisito.

A partir de dicho análisis se obtuvieron los valores medios de la posición de nacimiento, maduración y disipación de los SCM que produjeron precipitaciones en ambas áreas de estudio, como así también su trayectoria media. En este caso se observa que mientras en la región IGU, la trayectoria media de los SCM es noroeste – sudeste, en la región URU es, durante las primeras etapas de vida del sistema, hacia el este para luego girar hacia el noreste.

El resto de las variables se las estudió a partir de su distribución de frecuencias relativas, separándolas en eventos lluviosos y no lluviosos y del análisis de la evolución temporal de los parámetros durante las primeras horas del ciclo de vida. En el primero de los análisis se observó que, para este conjunto de datos, existe una alta correlación entre el tamaño que alcanzan los SCM a lo largo de su ciclo de vida y la posibilidad de producir precipitaciones intensas y extensas: los SCM de gran extensión areal son los que producen precipitaciones de las características citadas en la definición de evento lluvioso. Este hecho se observa en ambas áreas de estudio. En el caso de la temperatura, esto no es tan evidente, aunque se nota un pequeño comimiento de la temperatura hacia valores menores en el caso de los eventos lluviosos. Esto se debe a que en el conjunto de eventos no lluviosos, pueden estar

incluidos días con precipitación pero que no hayan alcanzado los requisitos mínimos impuestos en esta tesis. Es por ello que, en este caso, algunos SCM con topes suficientemente fríos, pueden estar incluidos en el conjunto de eventos no lluviosos, desplazando así la distribución de frecuencias hacia valores menores. Si el análisis se realiza ahora sobre el área convectiva (cantidad de píxeles por debajo de los 210 K) ocurre algo similar a lo que ocurre con el tamaño de los SCM: para los eventos lluviosos es más probable encontrar áreas convectivas de mayor extensión que en los caso de eventos no lluviosos. Con respecto a la excentricidad no se observan marcadas diferencias entre eventos lluviosos y no lluviosos aunque en el caso IGU existe una tendencia a formar SCM 'más circulares' que en el caso URU, como se observó en el conjunto general, esto es sin discriminar entre eventos lluviosos o no.

En lo que respecta a la evolución temporal, es notable la mayor tasa de expansión y el enfriamiento que experimentan los SCM durante las primeras etapas del ciclo de vida aquellos sistemas que producen precipitaciones en comparación con aquellos que no las producen. Esto se observa tanto en la región IGU como en la región URU.

A partir de estos resultados sería posible incluir en los modelos de estimación de precipitación por satélite usando información infrarroja información sobre las tasas de variación en temperatura y tamaño de las áreas que definen tanto al SCM como sus topes más fríos para determinar el estado de su ciclo de vida, como así también si dicho sistema esta activo o no (expansión / enfriamiento o contracción / calentamiento).

6. EL ENTORNO EN GRAN ESCALA ASOCIADO A LOS EVENTOS DE PRECIPITACIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN

Para el estudio de entorno de gran escala asociado a los eventos URU y IGU se contó con los análisis correspondientes a las 00:00 y 12:00 UTC generados por el National Center of Environmental Prediction (NCEP/NOAA) cuya resolución espacial es de 1° X 1° y 8 niveles en la vertical (1000, 925, 850, 700, 500, 300, 250 y 200 hPa). La elección de estos datos esta basada en que, a pesar que tiene una menor cantidad de datos que los reanálisis y una física asociada más simple, la mayor resolución espacial podría permitir capturar algunos patrones sinópticos y estructuras termodinámicas de menor escala presentes en el entorno asociado a los SCM (Torres, 2003).

A diferencia de otros autores (ver Maddox, 1983; Cotton et al. 1989), la metodología de trabajo aplicada en esta tesis es más simple: mientras Laing y Fritsch (2000) centran su análisis en el entorno de gran escala asociado a la génesis de los MCC y Torres (2003) ofrece un estudio pormenorizado sobre el entorno de gran escala asociado a la diferentes fases del ciclo de vida (inicio, maduración y disipación) de aquellos SCM asociados con altos valores de precipitación, en este caso; y a partir de la definición de evento lluvioso y no lluvioso para cada una de las regiones (Tablas 5-1 y 5-2), se realizó una composición de los campos correspondientes a las 00:00 UTC (que corresponde a un horario intermedio del día pluviométrico) para el estudio del entorno de gran escala asociado con los SCM. Asimismo, se utilizaron los análisis de las 12:00 UTC del día anterior al evento (se recuerda que los días seleccionados están expresados como el día de la medición) para obtener una posible evolución de los campos asociados.

La elección de las 00:00 UTC estaría justificada porque dicho horario es el más cercano, en promedio, a la etapa de mayor extensión de los SCM. Esto se puede observar en la Figura 6.1, donde se muestra la evolución del tamaño medio de los SCM para los casos de eventos lluviosos en las regiones IGU y URU durante los días caracterizados como evento lluvioso (Tablas 5-1 y 5-2). Por otro lado, la mayor actividad convectiva se produce entre la tarde y la noche hora local (ver Capítulo 4 - inciso 4.3.2) y, por lo tanto, es más probable encontrar los elementos distintivos del entorno de gran escala asociados con la precipitación producida por los SCM. En este caso, la inclusión del análisis de las 12 horas previas responde a la

posibilidad de poder estudiar una evolución media de los sistemas sinópticos que afectan a una determinada región y no esta relacionado con otras etapas de vida de los SCM ya que, cabe recordar, tanto la etapa de génesis como la de disipación de los SCM para los eventos lluviosos se produce fuera del área de estudio (Capítulo 5 – Inciso 5.3.2.1) y los tiempos de vida asociados a estos sistemas no son homogéneos.

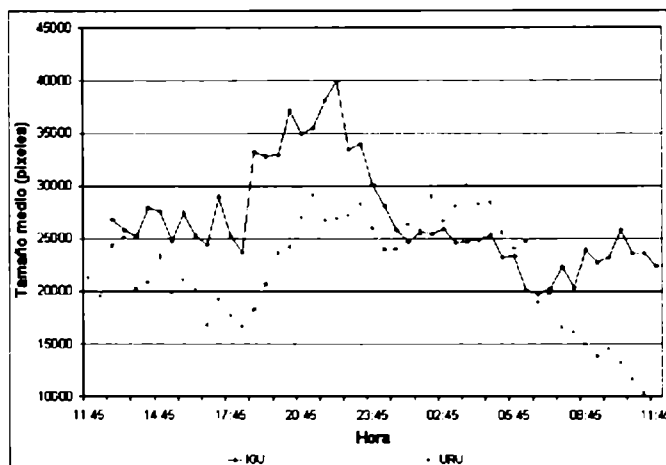


Figura 6.1: Evolución del tamaño medio de los SCM para los casos de eventos lluviosos en las regiones IGU y URU.

Otra diferencia significativa radica en el hecho que tanto Torres (2003) como Laing y Frisch (2000) y otros autores usaron un retículo ajustado para el estudio de los patrones espaciales de las diferentes variables meteorológicas centrada en el centro de masa del SCM. En este caso, y debido a que las zonas de estudios son relativamente pequeñas en comparación con la totalidad de la cuenca, la composición de campos se realizó en forma directa.

De esta manera, se definieron cuatro conjuntos de imágenes a partir de los cuales se realizó la composición, dos para cada una de las regiones: la composición del campo medio de los eventos lluviosos (ver Tabla 5-1 y 5-2) y la composición del campo medio de los eventos no lluviosos, es decir, el resto de los días del trimestre diciembre 2002, enero y febrero 2003. Este último conjunto, y para ser consistentes con lo realizado sobre el estudio de los parámetros del ciclo de vida de los SCM, se construyó con el objeto de establecer las diferencias entre el entorno de gran escala asociado con precipitación extendida e intensa y aquellos días que no cumplieron esta condición. Este mismo proceso se llevó a cabo para los análisis de las 12:00 UTC correspondientes al día anterior al evento.

La dinámica de estudio que se aplica en el resto del capítulo para ambas regiones y en todos los niveles es la siguiente: en primer lugar se realizará una descripción del campo a estudiar correspondiente a las 12:00 UTC del día anterior (Figura izquierda) y posteriormente se procederá a analizar el campo correspondiente a las 00:00 UTC del día del evento (Figura derecha).

6.2. ENTORNO SINÓPTICO ASOCIADO A LA REGIÓN “IGUAZÚ”

6.2.1. Niveles bajos

En el campo medio correspondiente a los 1000 hPa para los eventos lluviosos (Figura 6.2), se observa en el horario de las 12:00 UTC del día anterior, que el flujo sobre la región de interés es débil de sector NE y ENE, variando al sector sur (SE y ESE) al sur de la misma, lo que estaría indicando, junto con un débil eje de bajas presiones sobre en sentido N-S, la presencia de una zona frontal fría al sudoeste del área de estudio que se extiende desde el noroeste de Argentina hasta el estado de Río Grande do Sul (Brasil). Una situación similar se puede ver a las 00:00 UTC del día del evento no evidenciándose un sustancial cambio en las condiciones descritas.

En el campo medio para los eventos lluviosos de 850 hPa. (Figura 6.3) se pueden observar características comunes en ambos horarios. Como primera característica, se nota un aumento de la velocidad del viento y un giro en sentido anti-horario corriente arriba de la región mencionada con respecto al nivel de 1000 hPa. Este flujo es más intenso y está levemente desplazado hacia el sudoeste en el horario de las 12:00 UTC (Figura 6.3, izquierda). Este hecho estaría indicando la presencia advección cálida y de una zona débil baroclínica en niveles bajos sobre dicha zona. Asimismo se observa una lengua de altos valores de θ_e (en la Figura 6.3 se muestra la isoterma de $\theta_e = 340$ K) que cubre el NE de Argentina y Paraguay. Además, en ambos horarios, se observa la presencia de una vaguada en el campo de geopotencial ubicada levemente al oeste de una zona frontal fría descrita en el párrafo correspondiente a la descripción del nivel de 1000 hPa. Estos resultados son similares a los encontrados por Laing y Fritsch (2000) para los MCC y por Torres (2003) para los MCS que producen precipitaciones muy intensas.

Con respecto al campo de humedad, en la Figura 6.4 se presenta la diferencia del campo medio de la convergencia de humedad en 850 hPa para el conjunto de eventos lluviosos con respecto al conjunto de eventos no lluviosos para ambos horarios. En esta figura, los valores

positivos (están graficados aquellos valores superiores a $0.2 \cdot 10^{-4} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$) indican que los valores de convergencia de humedad en este nivel de presión son mayores en los eventos lluviosos que en los eventos no lluviosos. En este par de figuras se observa un máximo de convergencia de humedad que se encuentra corriente abajo del máximo de viento en el sector caliente de la discontinuidad frontal en el horario de las 12:00 UTC y que posteriormente en el horario de las 00:00 UTC es menos extendido pero de mayor intensidad, ubicado al este de la posición anterior.

Algo similar a lo que ocurre con el campo de convergencia de humedad, se puede observar en el campo de diferencias del índice k para eventos lluviosos y no lluviosos para ambos horarios (Figura 6.5). En este caso los valores positivos (solo estos valores están representados como el área sombreada en dicha Figura) indican valores mayores de inestabilidad en los eventos lluviosos que en los no lluviosos. De acuerdo con este análisis, los valores del índice k son superiores a 35 en toda el área de estudio para los eventos lluviosos (no se muestra), lo que estaría indicando la probabilidad de ocurrencia de tormentas (George, 1960). Asimismo, se observa que estas diferencias positivas están dispuestas siguiendo la línea frontal y son más débiles en el caso de las 12:00 UTC que en el de las 12 horas posteriores (00:00 UTC). El máximo a las 00:00 UTC esta desplazado e intensificado, como en el caso de la convergencia de humedad, hacia el sudeste respecto a las 12 horas precedentes.

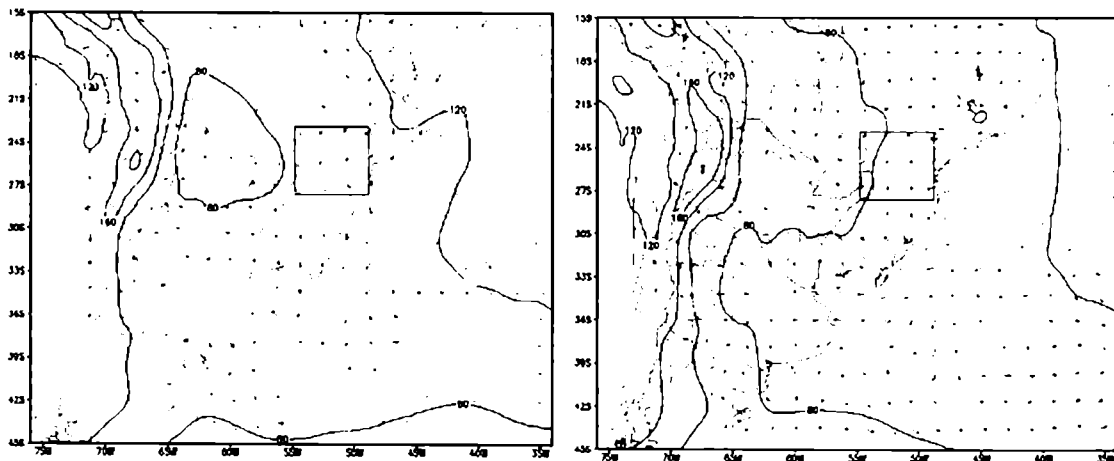


Figura 6.2: Campo medio de 1000 hPa para los eventos lluviosos IGU correspondientes a las 12:00 UTC (izquierda) y 00:00 UTC (derecha): en negro altura geopotencial (m, en negro) y viento (m/s, en flechas coloreadas) La isolínea amarilla gruesa corresponde al valor de $\theta_e = 350 \text{ K}$

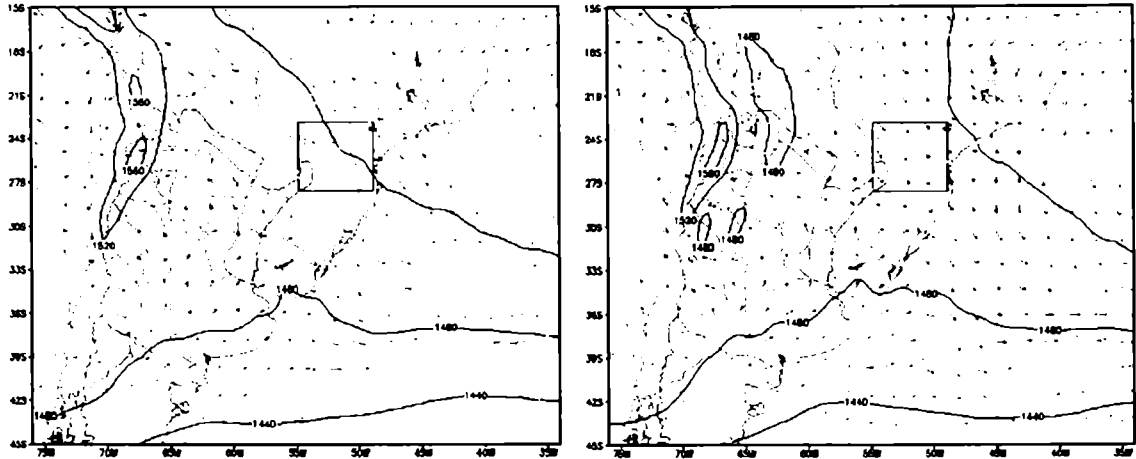


Figura 6.3: Campo medio de 850 hPa para los eventos lluviosos IGU correspondientes a las 12.00 UTC (izquierda) y las 00:00 UTC (derecha): altura geopotencial (m, en negro); temperatura (°C, en verde) punteada y viento (m/s, en flechas). La isollnea amarilla gruesa corresponde al valor de $\theta_e = 340$ K

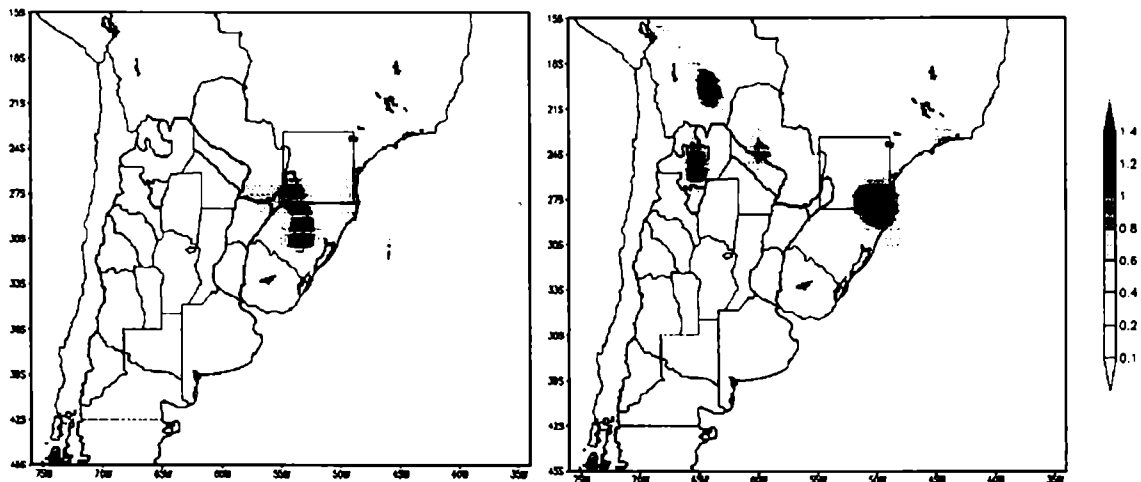


Figura 6.4: Diferencia en el campo medio de la convergencia de humedad ($\text{gr s}^{-1} \times 10^{-4}$) entre el conjunto eventos lluviosos y eventos no lluviosos para la región IGU correspondientes a las 12.00 UTC (izquierda) y las 00:00 UTC (derecha)

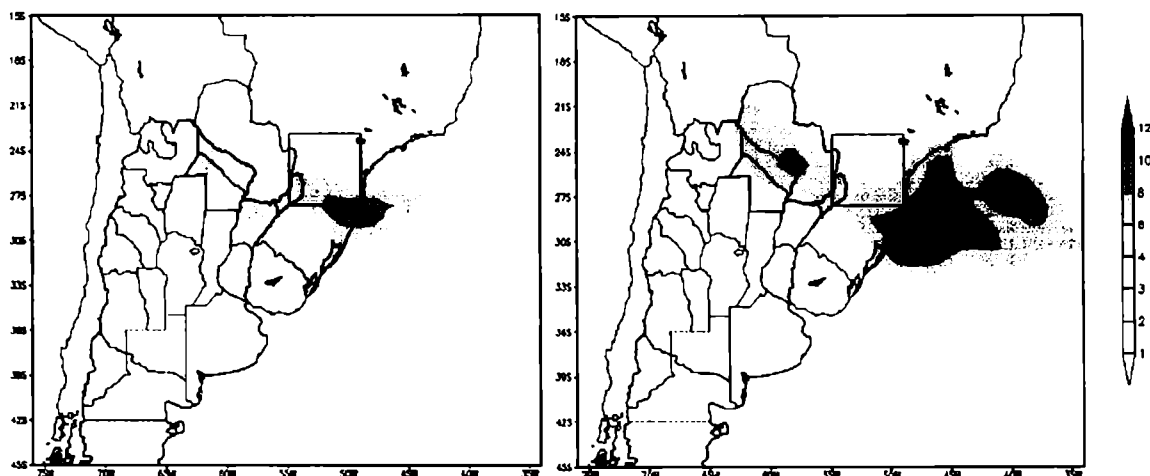


Figura 6.5: Diferencia en el campo medio del índice K entre el conjunto eventos lluviosos y eventos no lluviosos para la región IGU correspondientes a las 12.00 UTC (izquierda) y las 00:00 UTC (derecha).

6.2.1. Niveles medios

Con respecto a los niveles medios se observa el progreso de una vaguada de onda larga en 500 hPa sobre el centro de Argentina. La posición de la vaguada está levemente desplazada hacia el oeste y con una amplitud algo mayor en el horario de las 00:00 UTC (Figura 6.6, derecha) con respecto a las 12 UTC del día anterior (Figura 6.6, izquierda). El viento continua girando en sentido antihorario con respecto al nivel de 850 hPa corriente arriba de la región de estudio aunque no se evidencia un cambio significativo en módulo en ambos horarios. Asimismo, se observa un máximo de viento al sur de la región de estudio. Este máximo es consistente con la presencia del frente frío mencionado en el análisis de los niveles bajos. La temperatura en este nivel es alrededor de -5°C con un leve enfriamiento entre las 12:00 UTC y las 00:00 UTC.

En el campo de anomalía de velocidad vertical media omega w en 500 hPa entre los eventos lluviosos y no lluviosos, se observa un máximo de -0.4 Pa/s a las 12:00 UTC (Figura 6.7 izquierda) coincidente con el área de inicio de los SCM (Figura 5.6) que luego se desplaza hacia el este coincidiendo también con la región de maduración de los SCM en el área de estudio a las 00:00 UTC (Figura 6.7 derecha).

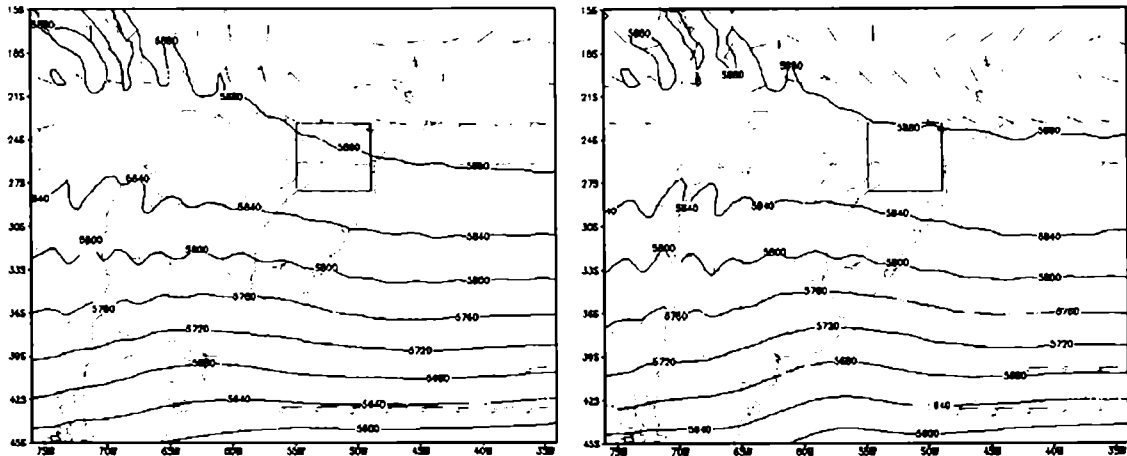


Figura 6.6: Análisis de 500 hPa correspondientes a los eventos lluviosos para la región IGU. Altura geopotencial (m, en negro), temperatura ($^{\circ}$ C, en verde punteado) y viento (m/s, en barbas)

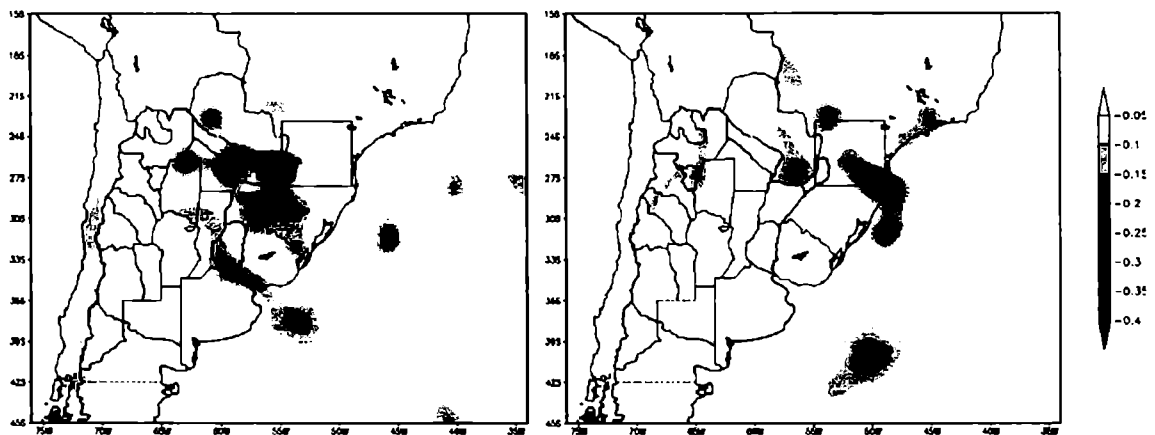


Figura 6.7: Anomalia de velocidad vertical media omega ω en 500 hPa (en Pa s^{-1}) entre los eventos lluviosos y no lluviosos. Se representan únicamente los valores por debajo de -0.05 Pa s^{-1}

6.2.2. Niveles altos

En el nivel de 200 hPa (Figura 6.8) se observa, para ambos horarios, una lengua de aire más cálido al oeste de la región de interés que no era tan marcada en niveles inferiores. El viento, del ONO, es más intenso en este nivel que en el nivel de 500 hPa, mientras que la presencia del jet en la franja de latitud que va entre 36° S y 39° S refuerza la existencia de un frente frío en la zona mencionada en los análisis anteriores.

En este nivel se observa la mayor anomalía de la divergencia media entre los eventos lluviosos y los no lluviosos sobre la región IGU para los horarios de 12:00 UTC y 00:00 UTC

(Figura 6.9). Este rasgo es compatible con el área de temperaturas por debajo de las medias para este periodo y que se muestra en el análisis realizado precedentemente (Figura 5.4 derecha).

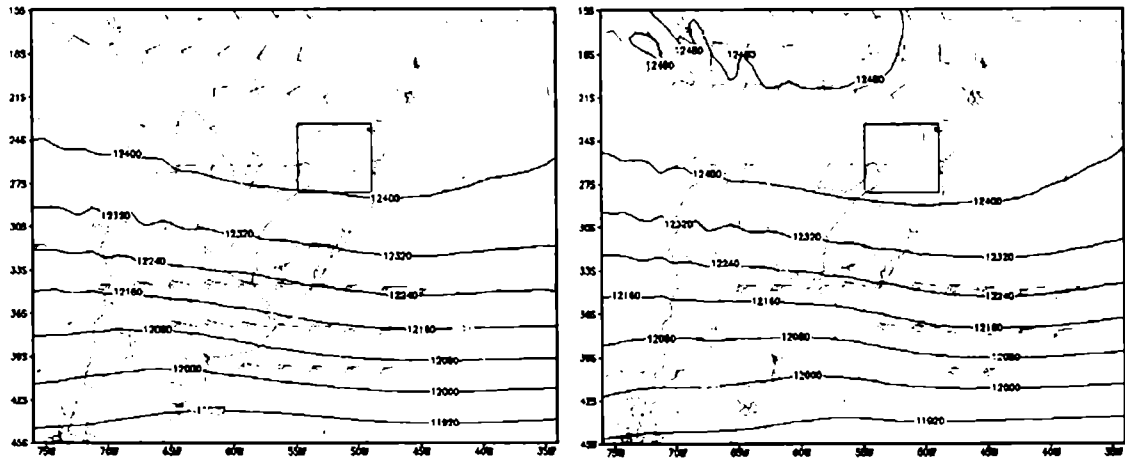


Figura 6.8: Análisis de 200 hPa correspondientes a los eventos lluviosos en la región IGU. Altura geopotencial (m, en negro), temperatura (°C, en verde punteado) y viento (m/s, en barbas)

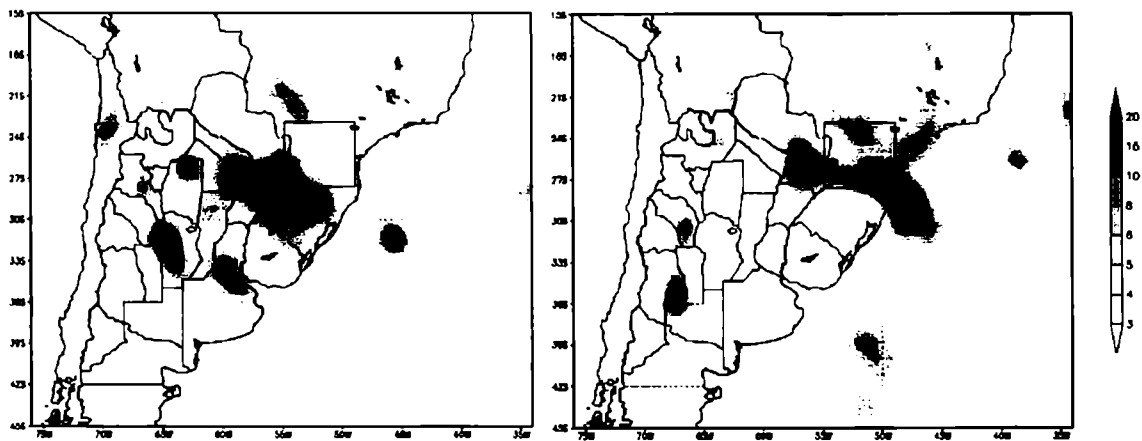


Figura 6.9: Diferencia del campo medio de la divergencia en 200 hPa ($s^{-1} \times 10^{-6}$) para los eventos lluviosos y no lluviosos para la región IGU. Se representan solamente los valores superiores a $3 \times 10^{-6} s^{-1}$.

6.3. ENTORNO SINÓPTICO ASOCIADO A LA REGIÓN “URUGUAY”

6.3.1. Niveles bajos

En el campo medio correspondiente a los 1000 hPa para los eventos lluviosos sobre la región URU (Figura 6.10), se observa que el viento corriente arriba de la región de interés es moderado y del sector norte en las 12 horas previas (comienzo del día pluviométrico) para luego perder intensidad y rotar al sector noreste, mientras que en el norte de la región patagónica, la configuración del campo de vientos se corresponde con la presencia de un frente frío (esto es más notable en el caso de las 00:00 UTC, Figura izquierda) . Por otro lado, una lengua de aire más cálido que el entorno cubre toda el área al norte de la región de estudio con valores medios superiores a 30° C en el norte de Argentina. El campo medio de geopotencial muestra un eje de bajas presiones en el sentido N – S que se desplaza hacia el este levemente entre ambos horarios.

Analizando el campo medio para los eventos lluviosos en 850 hPa. se puede observar un aumento de la velocidad del viento con respecto al nivel de 1000 hPa y un giro en sentido anti-horario en la región que se encuentra corriente arriba de la región mencionada. Este rasgo es muy notable en la Figura 6.11 izquierda correspondiente a las 12:00 UTC (comienzo del día pluviométrico) con valores superiores a los 15 m/s. Este hecho estaría indicando la ocurrencia de una advección cálida sobre la región de estudio y su configuración se corresponde con un evento de LLJ de acuerdo con la definición de Bonner (1968). Por otro lado, al sudeste de la misma, el viento es francamente del sector SO y OSO, asociado con la presencia de un frente frío sobre la región del Río de la Plata que se extiende luego zonalmente hacia el oeste de la Argentina. Esta afirmación se ve reforzada por la presencia de una lengua de aire más cálido ($\theta_e > 340$ K) en el horario de las 00:00 UTC (Figura 6.11, derecha) que cubre el centro y norte de Argentina, mientras que en el campo de geopotencial se observa una vaguada que se desplaza de oeste a este (el eje de mínimas presiones se encuentra más hacia el este en la Figura 6.11, derecha, correspondiente a las 00:00 UTC con respecto a las 12 horas anteriores).

Con respecto al campo de humedad, en la Figura 6.12 se presenta la diferencia entre la convergencia media de humedad en el nivel de 850 hPa para los eventos lluviosos y los eventos no lluviosos para la región URU. En esta Figura se puede observar que existe convergencia de humedad (sólo se muestran los valores positivos) tanto en el horario de las

12:00 UTC (cuando este rasgo es más intenso sobre la región de estudio), como también en el horario de las 00:00 UTC, aunque, en este caso, dicha característica no es tan marcada. Al igual que ocurre con la región IGU, esta convergencia de humedad se produce sobre el sector caliente del la zona frontal mencionada en el análisis del nivel de 1000 hPa.

En la Figura 6.13 se muestra la diferencia entre el valor del índice K para los eventos lluviosos y no lluviosos. De la misma manera que ocurría en la región IGU, los valores del índice K son superiores a 35 en toda el área de estudio para los eventos lluviosos (no se muestra) lo que estaría indicando, al igual que en la región IGU, la probabilidad de ocurrencia de tormentas (George, 1960). Asimismo se observa que estas anomalías están dispuestas siguiendo la orientación del frente en superficie y no se observa una diferencia significativa de intensidad en el caso de las 00:00 UTC que con respecto a las 12 horas anteriores. No obstante, se observa al igual que con el caso de la convergencia de humedad que la mayores anomalías están mayormente centradas en el oeste de la región (coincidiendo con las etapas de inicio y maduración y que luego se desplazan hacia el noreste respecto a las 12 horas precedentes, al igual que sucede con el desplazamientos de los SCM sobre dicha región (Figura 5.6, derecha).

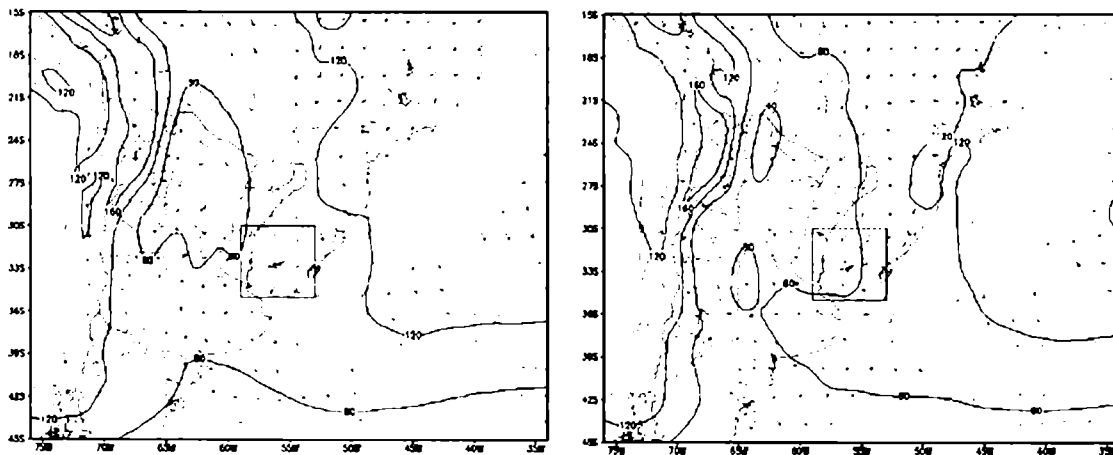


Figura 6.10: Campo medio de 1000 hPa para los eventos lluviosos URU: en negro altura geopotencial (m, en negro) y viento (en flechas coloreadas). La isólna amarilla gruesa corresponde al valor de $\theta_e = 350$ K

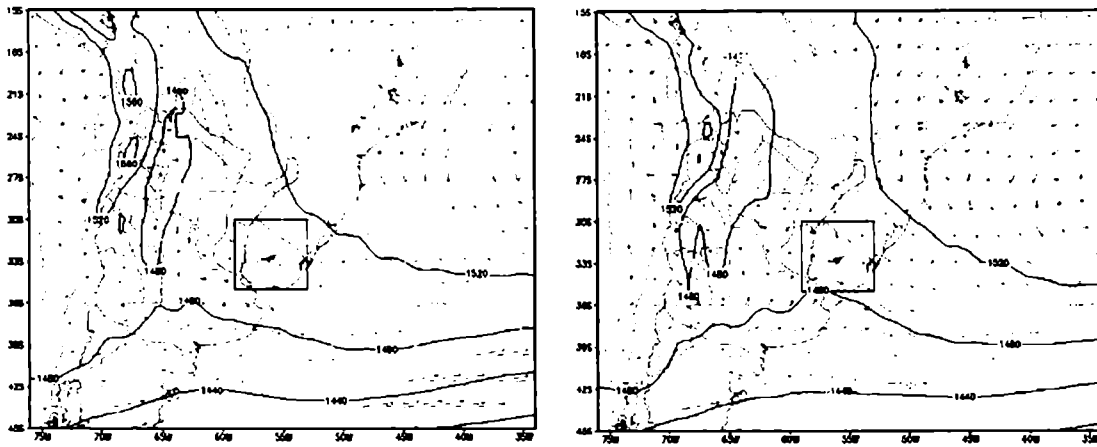


Figura 6.11: Campo medio de 850 hPa para los eventos lluviosos URU: altura geopotencial (m, en negro); temperatura ($^{\circ}\text{C}$, en verde) punteada y viento (en flechas). La isolínea amarilla gruesa corresponde al valor de $\theta_e = 340$ K

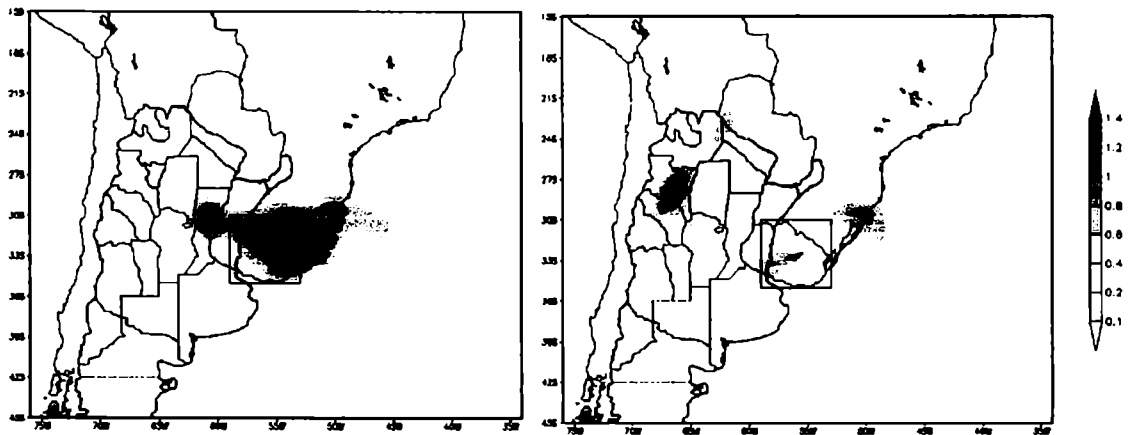


Figura 6.12: Diferencia en el campo medio de divergencia de humedad (gr kg^{-1}) entre el conjunto eventos lluviosos y eventos no lluviosos para la región URU

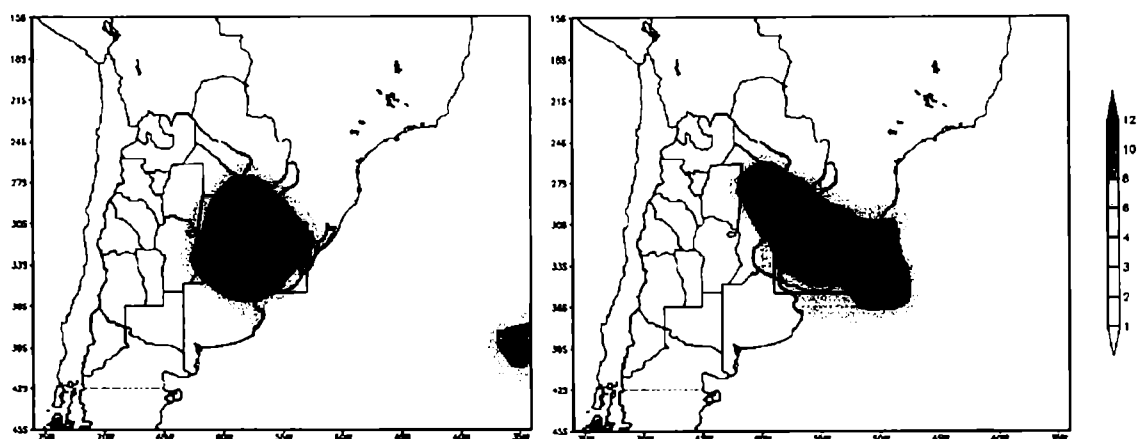


Figura 6.13: Diferencia en el campo medio del índice K entre el conjunto eventos lluviosos y eventos no lluviosos para la región URU.

6.3.2. Niveles medios

Con respecto a los niveles medios se observa el pasaje de una vaguada de onda larga sobre la región Pampeana consistente con la descripción sinóptica realizada previamente sobre los niveles bajos. El viento continua girando en sentido antihorario corriente arriba de la región de estudio (Figura 6.14) con respecto al nivel de 850 hPa aunque no se evidencia un cambio significativo en módulo entre ambos horarios.

La anomalía del campo de velocidad vertical entre los eventos lluviosos y no lluviosos muestra un máximo de 0.3 Pa/s sobre la posición media de los nacimientos de los SCM (Figura 5.6, derecha) que afectan luego la región URU en el horario de las 12:00 UTC (Figura 6.15 izquierda). Este rasgo, en promedio, no es tan intenso en el horario que corresponde a las 00:00 UTC (Figura 6.15, derecha) y se encuentra levemente desplazado hacia el noreste, al igual que sucede con el índice de inestabilidad K y la convergencia de humedad en capas bajas.

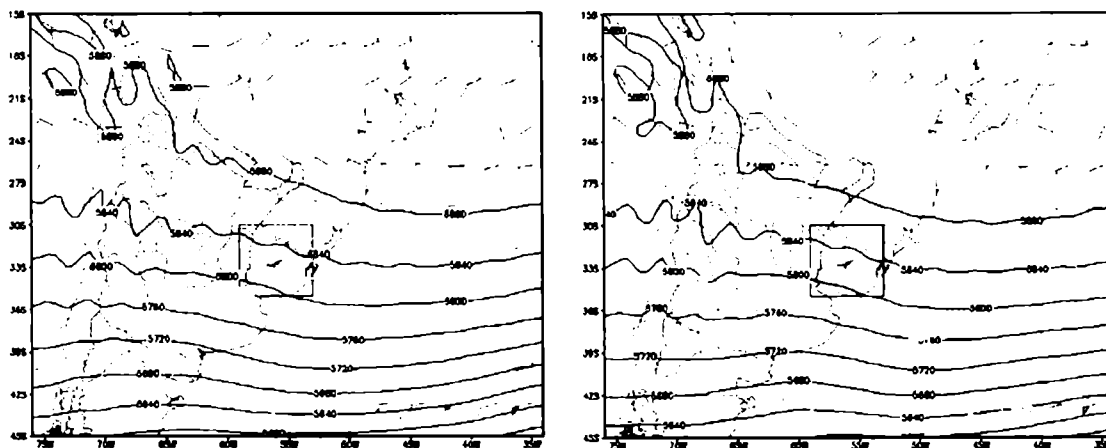


Figura 6.14: Análisis de 500 hPa correspondientes a los eventos lluviosos para la región IGU. Altura geopotencial (m, en negro), temperatura (°C, en verde punteado) y viento (en barbas)

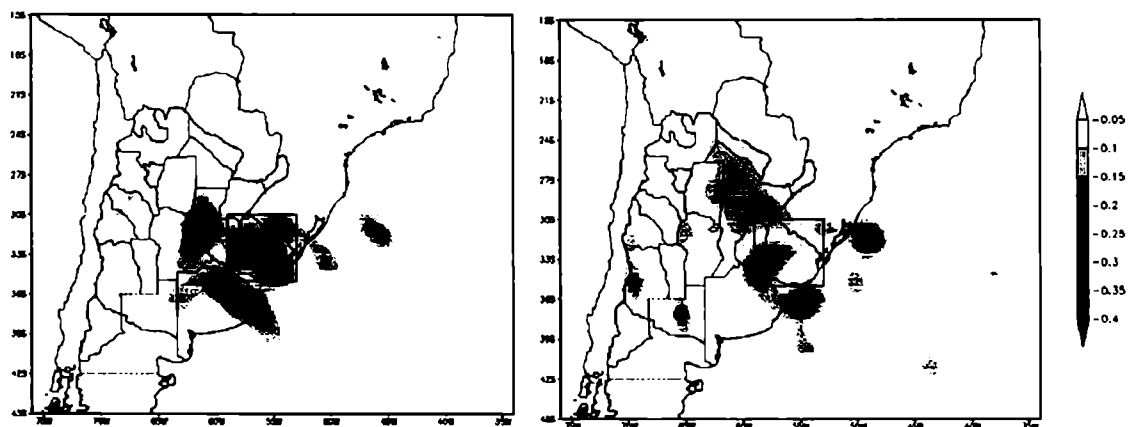


Figura 6.15: Velocidad vertical omega ω en 500 hPa (en Pa s^{-1}). Se representan únicamente los valores por debajo de -0.1 Pa s^{-1} .

6.3.1. Niveles altos

En el nivel de 200 hPa (Figura 6.16) se observa una variación muy pequeña en el campo de temperatura, mientras que el viento, que sopla del ONO, se encuentra algo más intenso en este nivel con respecto al nivel de 500 hPa. La presencia un máximo de viento al este de la región patagónica (cuya posición es mas al este en el horario de las 00:00 UTC con respecto a las 12 horas anteriores) indica el pasaje de una zona frontal sobre la región de estudio.

El rasgo más distintivo en este nivel es la anomalía de la divergencia entre eventos lluviosos y no lluviosos existente sobre la región URU (Figura 6.17). Esta configuración es compatible

con la expansión del área de 235 K que se puede observar en el análisis realizado en el capítulo anterior como así también con el resto de los campos analizados con anterioridad

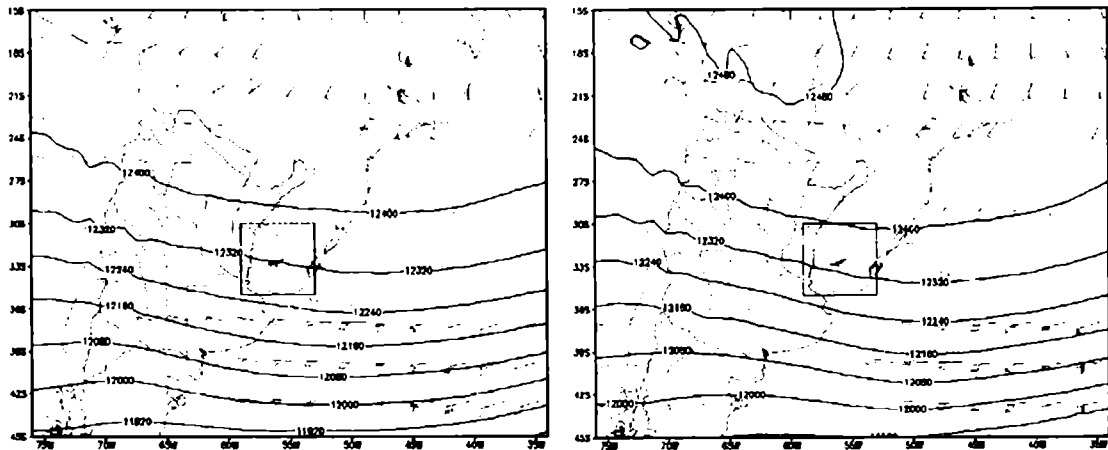


Figura 6.16: Análisis de 200 hPa correspondientes a los eventos lluviosos en la región URU. Altura geopotencial (m, en negro), temperatura (° C, en verde punteado) y viento (en barbas)

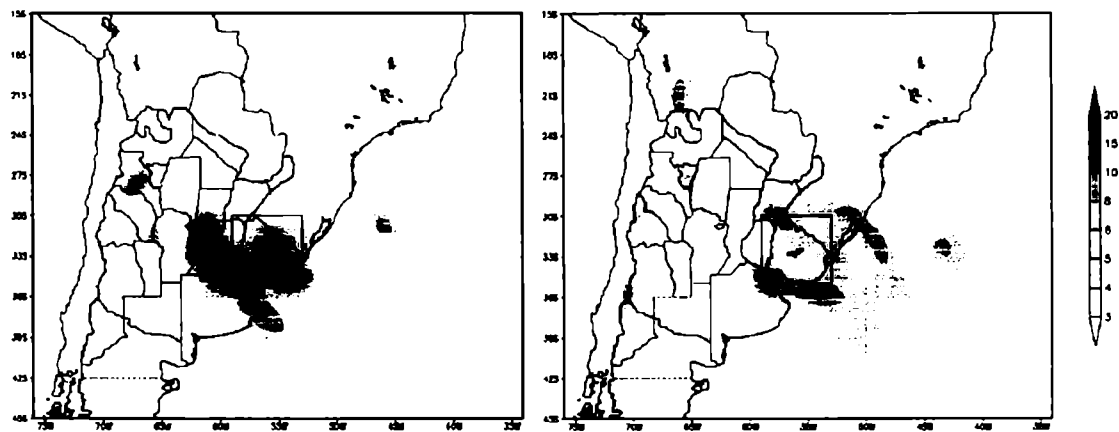


Figura 6.17: Diferencia del campo medio de la divergencia en 200 hPa ($s^{-1} \times 10^{-6}$) para los eventos lluviosos y no lluviosos para la región URU. Se representan solamente los valores superiores a $3 \times 10^{-6} s^{-1}$

6.4. CONCLUSIONES

En ambos casos, tanto en la región URU como IGU existen características comunes con respecto al entorno de gran escala para el desarrollo de precipitaciones extendidas e intensas. La presencia de una zona frontal, el giro de viento en sentido anticiclónico con la altura (advección cálida) y la presencia de una fuerte advección de humedad en capas bajas están presentes en ambos casos. Dentro de estas características comunes, también se

puede observar un movimiento de ascenso en niveles medios de la atmósfera (expresado como valores negativos de la velocidad vertical ω) y una fuerte divergencia en el nivel de 200 hPa. Los elementos enunciados se ajustan al modelo conceptual de características asociadas con precipitaciones en latitudes medias

En los niveles bajos de la atmósfera analizados (1000 hPa y 850 hPa) en la región IGU, los resultados del análisis de los campos medios de eventos lluviosos de los horarios de las 12:00 UTC correspondiente al día previo del evento y de las 00:00 UTC del día del evento muestran el pasaje de un frente frío sobre la región de estudio con una convergencia de humedad sobre el sector caliente del mismo y valores del índice K superiores a 35, lo que estaría indicando la probabilidad de ocurrencia de tormentas. Por otro lado, en el nivel de 500 hPa se observan valores negativos de la velocidad vertical ω lo que estaría indicando, en valores medios, un ascenso de las masas de aire en este nivel de presión. En el nivel de 200 hPa el rasgo más distintivo, y en concordancia con el ascenso observado en los niveles medios, es una fuerte expansión que se ve expresada a través de la diferencia del campo medio de divergencia entre eventos lluviosos y no lluviosos (Figura 6.9). Es de destacar la alta correlación espacial existente entre la expansión expresada a través de la divergencia en niveles altos de la atmósfera y la temperatura media observada a través de satélite de los eventos lluviosos, donde los mínimos de temperatura se corresponden con los máximos de expansión.

Por otro lado, en la región URU, uno de los rasgos más distintivos en los niveles inferiores de la atmósfera es la presencia de un máximo de viento en el nivel de 850 hPa superior a los 15 m/s, corriente arriba de la región de estudio cuya configuración se corresponde con la de un evento LLJ y la presencia de convergencia de humedad en la región de inicio y maduración (máxima extensión) de los SCM de acuerdo con el análisis realizado en el capítulo anterior. En los niveles medios y altos de la atmósfera se observa, además de los elementos comunes descritos en el primer párrafo, se observa el pasaje de una vaguada de onda larga en la región de latitudes medias como así también la presencia de un máximo de viento al sur de la zona frontal.

7. ESTUDIO DE DOS EVENTOS PARTICULARES CON PRECIPITACIÓN

7.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se estudiarán, en forma descriptiva, la evolución de los SCM que se desarrollaron durante dos diferentes días sobre las regiones URU e IGU respectivamente. Esta selección se llevó a cabo teniendo en cuenta la magnitud de los eventos de precipitación (moderados a intensos) que se observaron y la disponibilidad de datos para estudiarlos.

Para llevar a cabo esta tarea, se cuenta con la base de datos de las familias que actuaron sobre cada una de las áreas, las imágenes de satélite GOES 8 (canal 4, 10.8 μm) y los datos pluviométricos en 24 horas correspondientes a las estaciones de ambas áreas. En la región IGU se contó, además, con los datos del radar meteorológico de Morro da Igreja (Santa Catarina) para relacionar máximos de reflectividad con la existencia de sistemas convectivos definidos a través de la isoterma de 235 K en las imágenes de satélite.

El primero de los casos se desarrolla en conjunción con el avance de un frente frío desde el centro del país hacia el noreste, que luego se ondula formando un sistema de baja presión sobre la región de la República Oriental del Uruguay, mientras que en el segundo se observa de un frente estacionario sobre el norte de Santa Catarina y Paraná en Brasil sobre el que se desarrollan diferentes SCM, cuya trayectoria preferencial es desde el noroeste hacia el este-sudeste.

Para ambos casos se contó con 36 imágenes a lo largo del día con un intervalo máximo de tiempo de 2 horas sin imágenes, por lo que la calidad del seguimiento se estima como buena. Por otro lado, se midieron precipitaciones por encima de los 100 mm en varias estaciones, mientras que el área con precipitaciones por encima de los 25 mm fue superior a los 125.000 km^2 tanto en la región IGU como en la región URU.

Los elementos seleccionados para llevar a cabo el estudio de ambos eventos particulares son los siguientes: (a) estudio de la trayectoria de las familias que actuaron sobre ambas regiones durante el día seleccionado; (b) la evolución temporal de su temperatura y su

tamaño; y (c) su relación con los fenómenos de tiempo significativo existentes en diversas estaciones meteorológicas de la región.

7.2. LOS EVENTOS DE LOS DIAS 10 Y 11 DE FEBRERO DE 2003 – REGION URUGUAY

Durante los días 10 y 11 de febrero de 2003 se produjeron importantes cantidades de precipitación sobre la región nordeste del país, extremo sur de Brasil y del este de la República Oriental del Uruguay. La Figura 7.1 muestra precipitación acumulada entre las 12:00 UTC del día 10 de febrero y las 12:00 UTC del día siguiente registrada en diferentes estaciones de superficie.

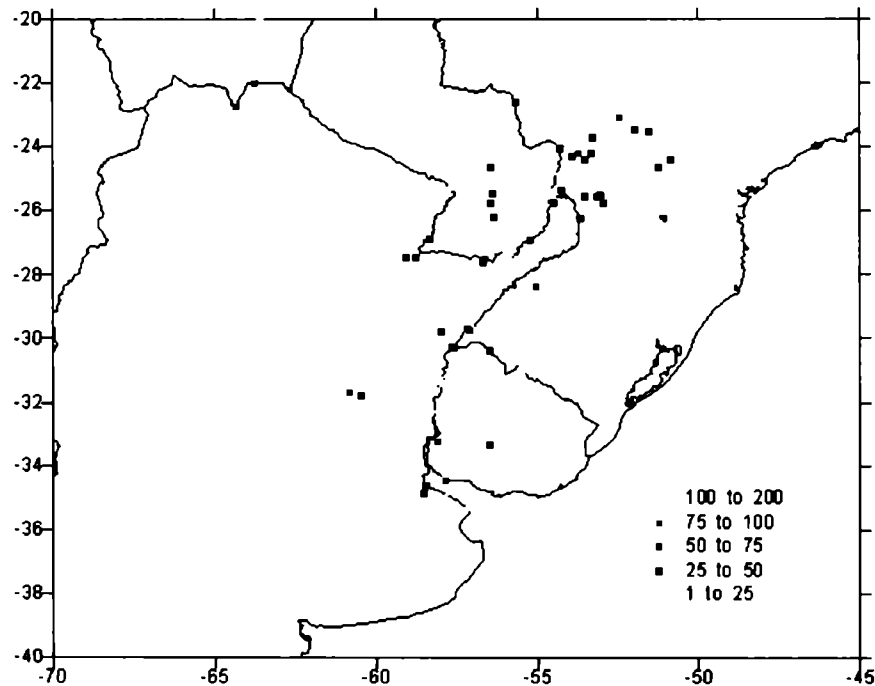


Figura 7.1: Precipitación acumulada correspondiente al día pluviométrico 10 de febrero de 2003.

Los rasgos más salientes, desde el punto de vista de la distribución de precipitación, son los siguientes: (a) una vasta región en el estado de Paraná, sudeste de Paraguay y extremo nordeste argentino con precipitaciones entre 25 y 50 mm con algunos puntos aislados con montos algo superiores. (b) algunos puntos en la cuenca media del río Uruguay con valores superiores a 50 mm y (c) una región con valores cercanos a los 100 mm sobre la desembocadura del Río de la Plata. Sobre esta región en particular, y tomando en cuenta que sobre la República Oriental del Uruguay las mediciones de la red pluviométricas se

realizan a las 10:00 UTC, se produjeron montos extraordinarios con valores cercanos a los 200 mm como se muestra en la Figura 7.2 .

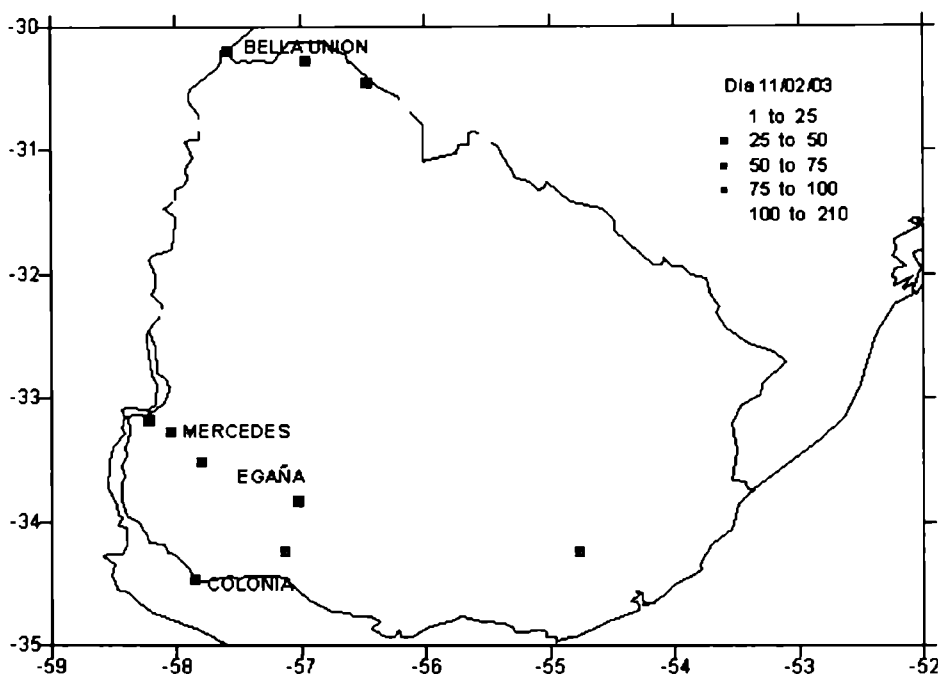


Figura 7.2: Precipitación acumulada en la Republica Oriental del Uruguay el día pluviométrico 10 de febrero de 2003.

En la estación Egaña (Uruguay) se registraron 200 mm en 24 horas, mientras que en otras estaciones cercanas el valor superó los 100 mm diarios. Como se puede observar en la Figura 7.2, todo el sudoeste de ese país tuvo, en promedio, precipitaciones del orden o superiores a la normal del mes de febrero en solo 24 horas. Es de destacar que esta situación continuó durante el día 11 de febrero (con valores superiores a 100 mm en algunas estaciones), pero la misma excede al análisis que se desea realizar en este momento.

7.2.1. Análisis de las trayectorias de los SCM

En esta sección se analizarán las trayectorias de los SCM que actuaron sobre la región de estudio y su relación con los fenómenos de tiempo significativo observados en algunas estaciones de la red meteorológica.

En la Figura 7.3 se muestran algunas imágenes correspondientes a los días 10 y 11 de febrero de 2003 entre las 10:15 UTC del día 10 y las 05:15 UTC del día siguiente. Junto con la información radiométrica se incluyó la trayectoria de las familias más importantes que

actuaron sobre la región de estudio. En la Imagen 1, correspondiente a las 10:15 UTC, se observa un gran SCM con 4 regiones frías bien definidas. La línea amarilla sobre la figura en cuestión representa la trayectoria del centro de masa del SCM definido con la isoterma de 235 K desde las 10:15 UTC del día 10/2 hasta su fusión con otro SCM a las 18:45 UTC del mismo día (círculo relleno). En la figura siguiente (Imagen 2), correspondiente a las 13:15 UTC, se observa que el núcleo frío que estaba más al norte en la imagen anterior, se separa formando una nueva familia y comienza a desplazarse hacia el oeste, donde vuelve a fundirse con el SCM que le dio origen. A las 19:15 UTC se puede observar, entre otros rasgos, un gran sistema que es fruto de la fusión de las familias antes mencionadas que comienza a dirigirse hacia el noreste para luego tener una trayectoria más o menos aleatoria hacia el final de su ciclo de vida como muestra la línea color anaranjado que representa la evolución temporal del centro de masa de dicho SCM. En la Imagen 5 correspondiente a las 23:15 UTC se puede observar sobre la margen uruguaya del Río de la Plata un sistema convectivo (que aun está inmerso dentro del SCM antes mencionado), pero que a partir de la 01:45 del día 11/2 tendrá entidad propia como familia (flecha roja). A las 02:45 UTC se observa que el gran SCM antes mencionado comienza a disiparse en varios fragmentos mientras que el SCM que se encuentra al sur de Uruguay comienza a desarrollarse independientemente del sistema que le dio origen. Como se ve en la trayectoria de su centro de masa, este sistema es cuasi estacionario (línea color anaranjado en la Imagen 6) y a las 05:15 UTC (no se muestra) se encuentra más desarrollado pero la posición de su centro de masa no ha variado sustancialmente.

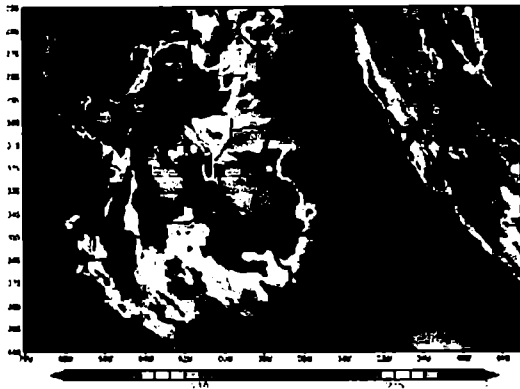


Imagen 1: Hora 10:15UTC

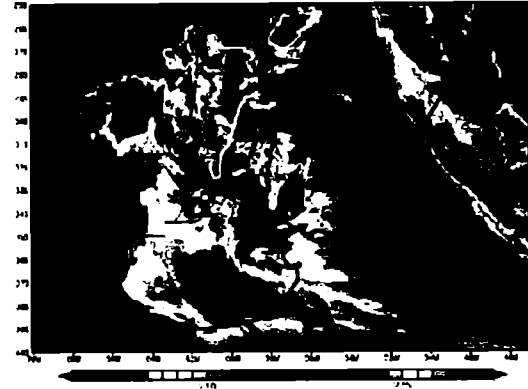


Imagen 2: Hora 13:15

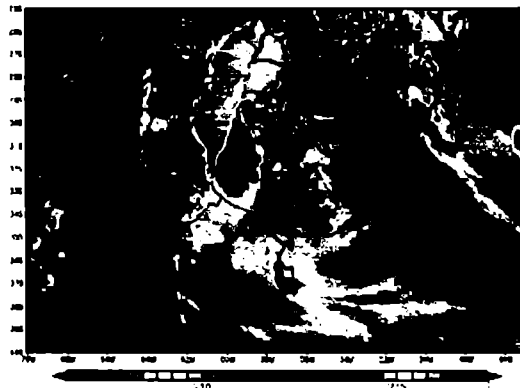


Imagen 3: Hora 17:45UTC

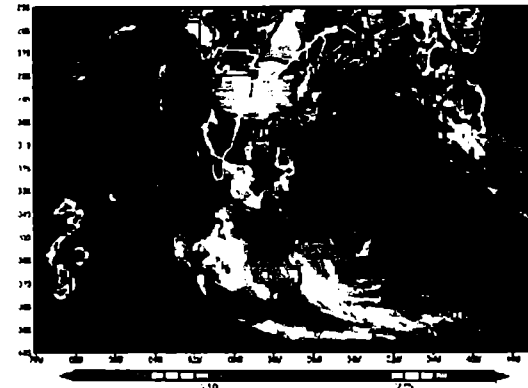


Imagen 4: Hora 19:15UTC

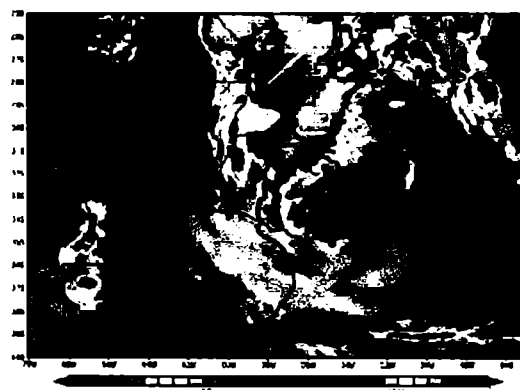


Imagen 5: Hora 23:15UTC

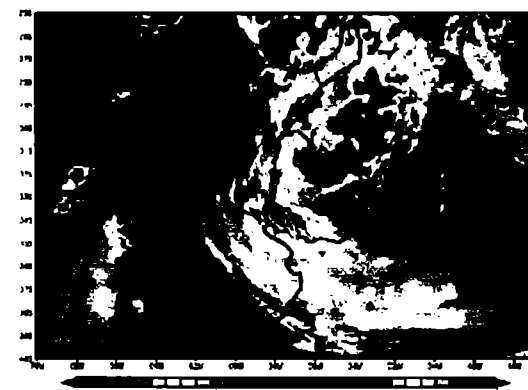


Imagen 6: Hora 02:45UTC

Figura 7.3: Evolución de los SCM entre los días 10 y 11 de febrero de 2003

El siguiente análisis se realizará sobre lo ocurrido en las estaciones del oeste y sudoeste de la República Oriental del Uruguay y la evolución de los SCM que afectaron esta región.

En la Figura 7.4 se puede observar la evolución de la temperatura mínima y el tamaño del sistema convectivo que, a partir de una separación de un sistema mayor, afectó la mencionada área. La línea punteada corresponde a la finalización del día pluviométrico analizado, los puntos son los datos medidos y la línea corresponde a un promedio móvil de 3 datos. El intervalo de tiempo entre datos es de media hora.

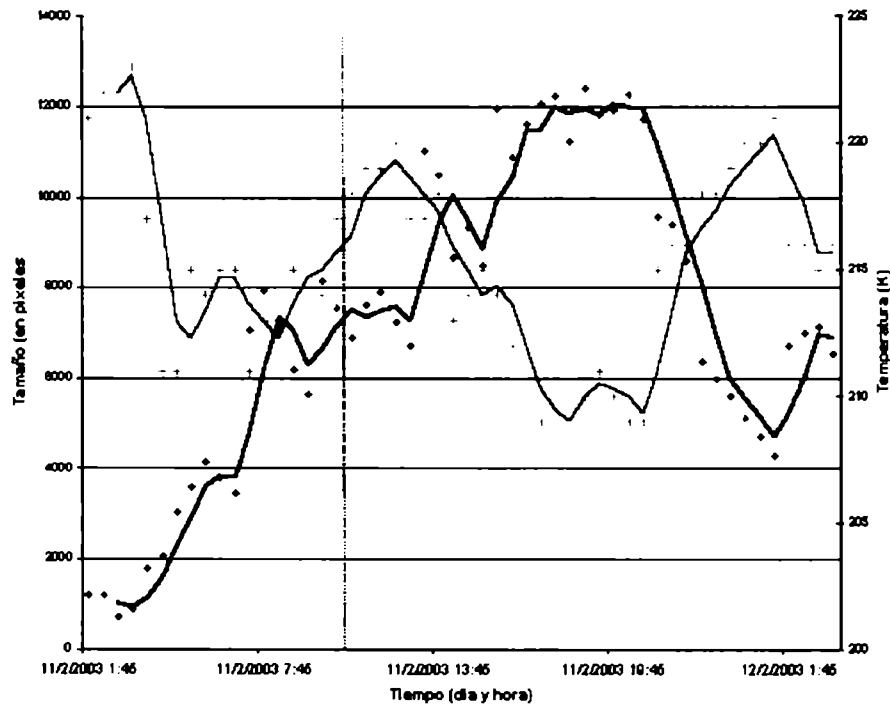


Figura 7.4: Evolución de la temperatura mínima (magenta, eje derecho) y el tamaño (azul, eje izquierdo) del SCM que afectó el sudoeste de Uruguay.

Lo más interesante de esta figura es observar que este SCM luego de separado del SCM principal, experimenta un fuerte enfriamiento de su núcleo: de 223 K a las 03:15 UTC a 211 K a las 04:15 UTC. Es decir, se produce un enfriamiento del orden de 12 grados por hora junto con una expansión del área que pasa de los 902 píxeles (14.400 km^2) a 2072 píxeles (32.000 km^2). No obstante este hecho de una notable actividad convectiva en el interior del sistema, este SCM no llega a desarrollar, durante el día en cuestión, ningún tope frío (temperaturas

por debajo de 210 K) y si lo hace durante el día siguiente luego de un periodo de calentamiento propio de la característica compleja de este tipo de SCM.

En la Figura 7.5 se muestra la evolución de la temperatura de brillo en 4 estaciones del oeste de la República Oriental del Uruguay que se muestran en la Figura 7.2: Bella Unión al norte, Mercedes, Egaña y Colonia al sudoeste. En la misma se puede observar que han actuado sobre esta región varios SCM a lo largo del día de acuerdo con la descripción realizada precedentemente.

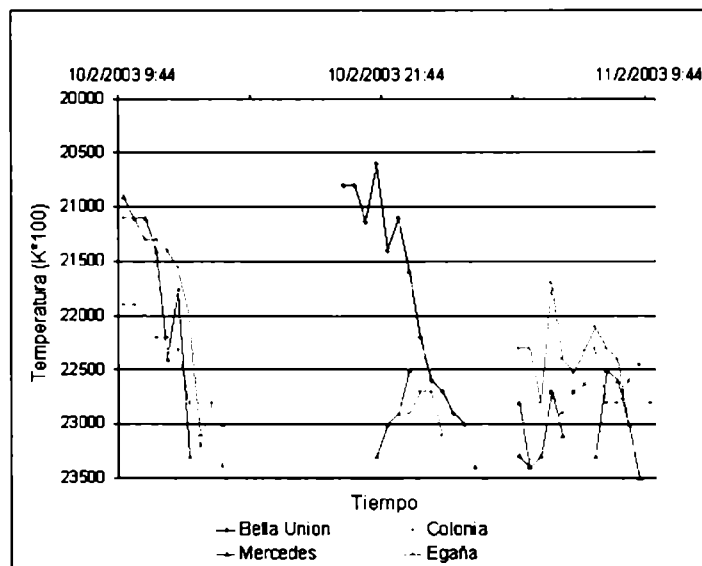


Figura 7.5: Evolución diaria de la temperatura de brillo sobre algunas estaciones del oeste del Uruguay.

Es de destacar que si bien el comportamiento de las tres estaciones situadas más al sur (Mercedes, Egaña y Colonia) es similar, los montos registrados en Egaña cuadruplican a los registrados en Colonia y Mercedes, mientras que si bien en Bella Unión fue el lugar donde se registraron las menores temperaturas, fue el lugar con menores precipitaciones de los cuatro sitios analizados. Estos hechos son importantes en el momento de utilizar el valor de la temperatura de tope de nube para estimar precipitación en superficie ya que, como se puede inferir a partir de este caso, la relación no es inequívoca. Por otro lado, el estudio de cada uno de los SCM a lo largo de su ciclo de vida puede brindar información adicional (sobre si se está intensificando o no) sumamente útil para incorporar a este tipo de modelos.

A partir del análisis de la Figura 7.6 se puede avanzar un poco más. Si se observan los fenómenos significativos existentes en la estación meteorológica de Mercedes a lo largo del día, existe una clara relación entre el tipo de fenómenos significativos y la temperatura de tope de brillo estimada por el satélite. Durante la primera parte del día se observan tormentas con lluvia moderada, directamente relacionadas con el gran sistema que se observa en la Imagen 1 y posteriormente, a partir de las 03:00UTC, se presenta la lluvia continua débil que luego se intensifica.

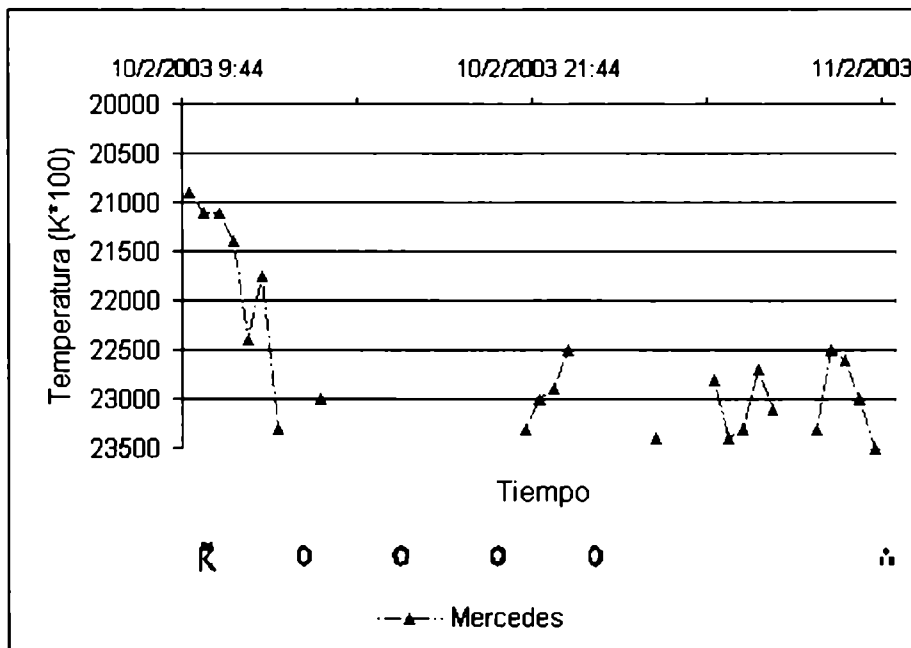


Figura 7.6: Evolución de la temperatura de brillo sobre la estación Mercedes y el tiempo significativo asociado. La escala de tiempo es común para ambas series.

Esta evolución tiene un claro correlato en todas las estaciones de la región: si se analiza el tiempo significativo en las estaciones del área metropolitana de Buenos Aires, que poseen mediciones horarias, se puede observar un comportamiento similar al observado sobre la costa uruguaya del río de la Plata (Figura 7.7). Los fenómenos de lluvia intensa y muy intensa se observan en las estaciones de Aeroparque y Observatorio Buenos Aires a partir de las 02:00 UTC. Es decir, en todas las estaciones de toda la región del Río de la Plata existe una buena relación cualitativa entre los fenómenos de tiempo significativo y los SCM que afectaron a la región.



Figura 7.7: Evolución de los fenómenos de tiempo significativo para las estaciones del área metropolitana de Buenos Aires.

7.3. LOS EVENTOS DE LOS DIAS 26 Y 27 DE ENERO DE 2003 – REGION IGUAZU

Al igual que en el caso anterior, durante los días 26 y 27 de enero de 2003 se produjeron importantes precipitaciones sobre la región definida como IGU. Como se puede observar en la Figura 7.8 los mayores montos se produjeron sobre el este de la mencionada región (cuenca alta del río Iguazú) con valores superiores a 100 mm en algunas estaciones de la mencionada zona, mientras que hacia el oeste los montos acumulados estuvieron, en su gran mayoría, por debajo de los 25 mm. En la estación Telémaco Borba (50.62° W, 24.33° S) se registró el máximo de precipitación con 123.8 mm en 24 horas. Cabe recordar que lo normal mensual para esta época del año es de alrededor de 170 mm.

Es de destacar también que existe una superposición entre la región de máxima precipitación y la zona de vigilancia del radar de Morro de Igreja ($r = 400$ km en línea punteada de la Figura 7.8) por lo que sería posible plantear alguna relación cualitativa entre la reflectividad y los valores de temperatura de brillo observada por el satélite.

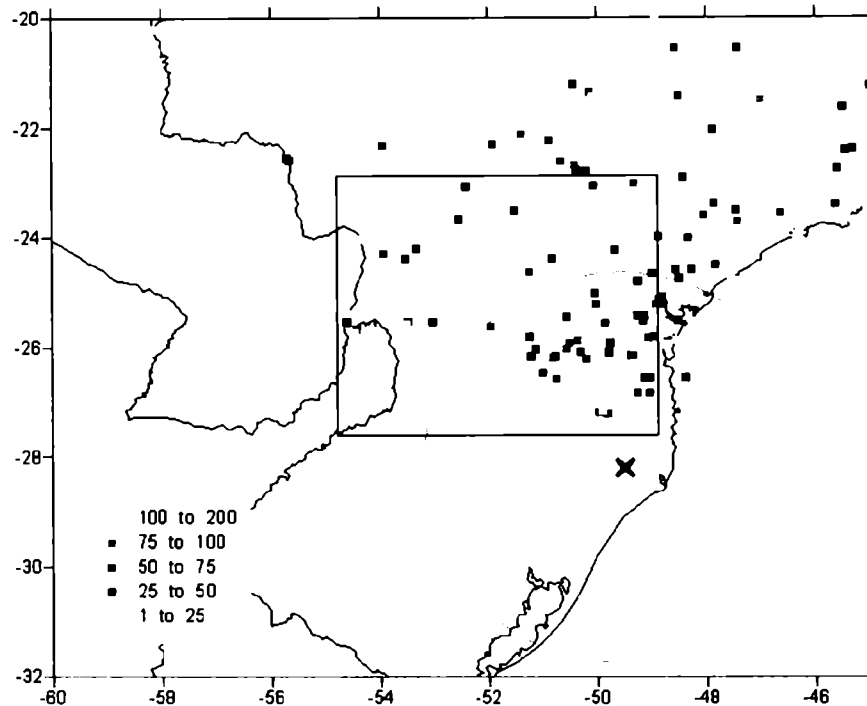


Figura 7.8: Precipitación acumulada en cada estación correspondiente al día pluviométrico 26 de enero de 2003. El rectángulo negro representa la región IGU definida anteriormente mientras que la línea punteada violeta representa un radio de 400 km alrededor del radar de Morro da Igreja.

7.3.1. Análisis de las trayectorias de los SCM

En esta sección, al igual que en el caso de estudio anterior sobre la región URU, se analizarán las trayectorias de algunos SCM que actuaron sobre la región y su relación con los fenómenos de tiempo significativo observados en las estaciones disponibles de la red meteorológica.

En la Figura 7.9 (columna izquierda) se observa la temperatura de brillo de imágenes seleccionadas correspondientes a los días 26 y 27 de enero de 2003 entre las 12:45 UTC y las 10:15 UTC del día siguiente. Junto con la información radiométrica se incluyó, en alguna de estas imágenes, la trayectoria de algunas familias que actuaron sobre la región de estudio. En la misma figura en la columna derecha se muestra la imagen de reflectividad del radar situado en Morro da Igreja más cercana al horario de la imagen de satélite, con el objeto de realizar una comparación cualitativa entre los ecos observados por el radar y la temperatura de brillo estimada a través del canal 4 del satélite GOES.

En la Imagen 7 correspondiente a las 12:45 UTC se observa la presencia de un gran SCM que cubre el norte de la región con dos núcleos fríos bien definidos: uno de ellos sobre el

limite entre Paraguay y Brasil (fuera de la zona de estudio) y el otro algo menos intenso sobre el limite norte de la misma. Sobre la región común con el radar meteorológico se observan temperaturas del orden de los 225 K, que se corresponde un pequeño eco en la imagen de radar (Imagen 8). En la siguiente secuencia, correspondiente a las 18:45 UTC, se puede observar al mismo sistema convectivo en el momento de su máxima extensión. El área cubierta por la isolinia de 210 K (topes fríos) es también máxima aunque esta distribuida en varias regiones. Una de estas regiones se encuentra sobre el norte de la zona de cobertura del radar sobre el cual se observan un conjunto de ecos coincidentes con la distribución de la temperatura de brillo observada por el satélite.

En el horario de las 02:45 UTC del día 27/2 se puede observar que el sistema anteriormente descrito esta en proceso de disipación, mientras que nuevos sistemas comienzan a formarse a partir de los fragmentos del anterior. En color rojo se observa la trayectoria del centro de masa de uno de ellos que comenzará a desarrollarse para alcanzar su máxima extensión durante el día 27 en horas de la tarde. En la imagen de radar correspondiente a la hora más cercana se observa una configuración de ecos espacialmente coincidentes con los que se observa a través del satélite.

Por ultimo, a las 10:05 UTC los núcleos más activos del sistema convectivo (similar a un tres invertido por su forma) se encuentran al noreste de la estación Curitiba coincidentes nuevamente con los máximos ecos observados en la imagen de radar.

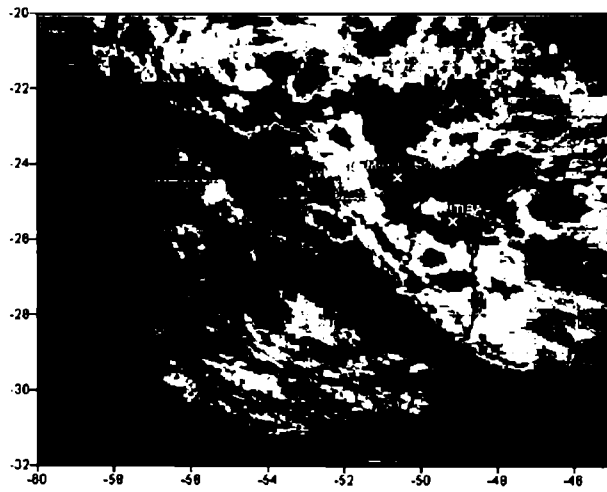


Imagen 7: Día 26/1/2003 – Hora 12:45UTC



Imagen 8: Día 26/1/2003 – Hora 12:37UTC

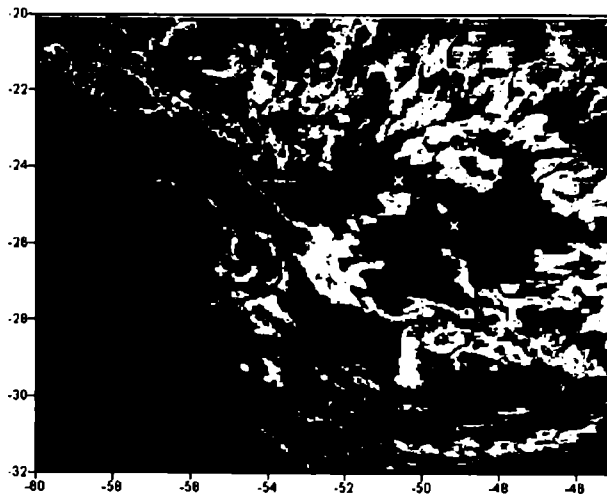


Imagen 9 Día 26/1/2003 – Hora 18:45UTC



Imagen 10 Día 26/1/2003 – Hora 18:37UTC

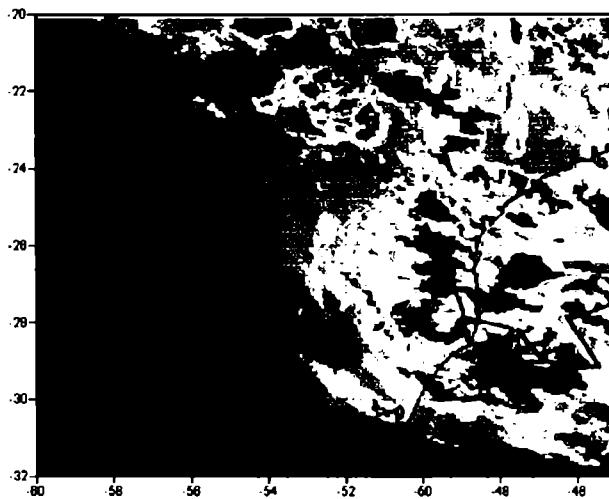


Imagen 11 Día 27/1/2003 – Hora 02:45UTC



Imagen 12 Día 27/1/2003 – Hora 02:37UTC

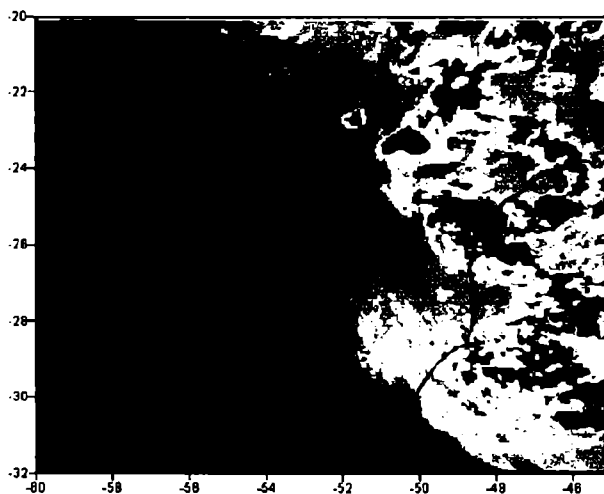


Imagen 13 Día 27/1/2003 – Hora 10:15UTC



Imagen 14 Día 27/1/2003 – Hora 10:37UTC



Figura 7.9: Evolución de los SCM correspondientes a los días 26 y 27 de enero de 2003.

Continuando con el análisis, en la Figura 7.10 se puede observar la evolución temporal del SCM presente en la Figura 7.9 - Imagen 7. Este sistema convectivo tiene su nacimiento a partir de un proceso de separación, pero luego comienza a intensificarse. En este caso se observa que en la estación Telémaco Borba (donde se observó el máximo de precipitación) fue afectada solo por esta familia durante el día en cuestión y, por lo tanto, existe una

relación unívoca entre la cobertura nubosa y la precipitación. Los puntos son los datos medidos y la línea corresponde a un promedio móvil de 3 datos. El intervalo de tiempo entre datos es de media hora.

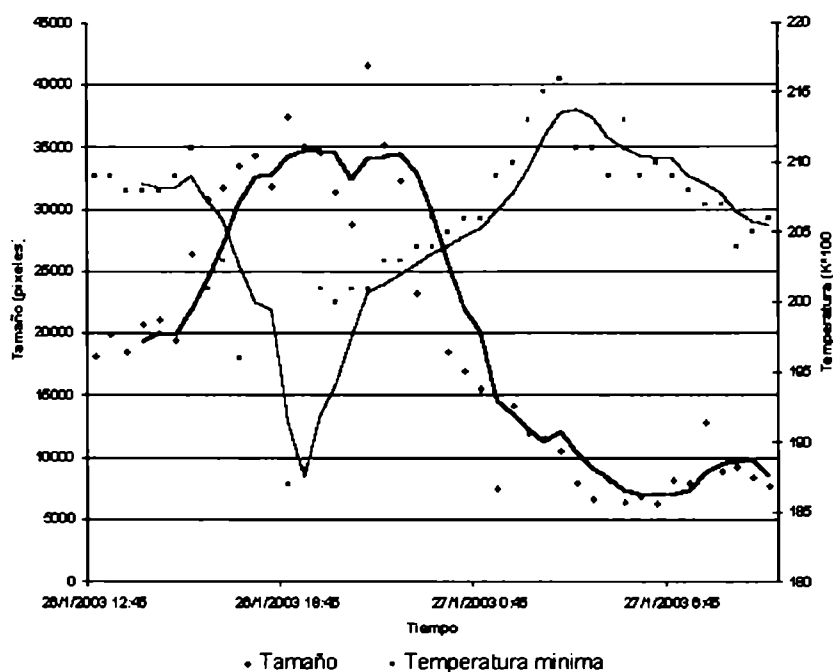


Figura 7.10: Evolución de la temperatura mínima (magenta, eje derecho) y el tamaño (azul, eje izquierdo) del SCM que afectó el norte de la región IGU.

Al igual que en el caso anterior, existe una fuerte expansión (producto, en algunos casos, de fusiones con otros sistemas convectivos periféricos) y un marcado descenso de la temperatura mínima hasta alcanzar el máximo desarrollo en horas de la tarde. Este hecho coincide con lo expresado en el capítulo 4 sobre la evolución diurna media de la expansión y el área cubierta por SCM en toda la región de la cuenca del Plata.

No obstante, cuando se observa la evolución temporal de la temperatura de brillo en la estación considerada, se puede ver que en ninguna imágenes la temperatura de los píxeles sobre la estación es inferior a los 210 K (Figura 7.11)

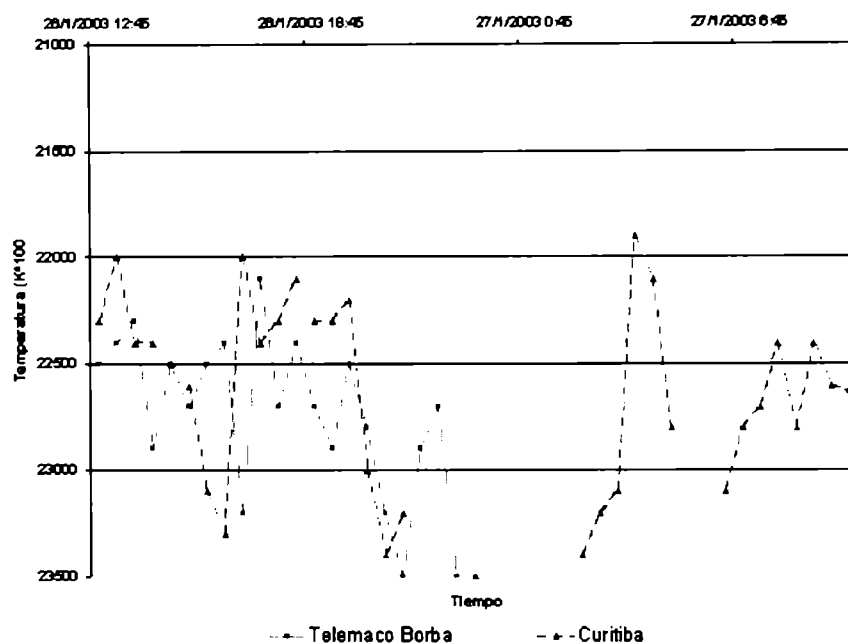


Figura 7.11: Evolución diaria de la temperatura de brillo sobre algunas estaciones de la región IGU. De la misma manera que en el caso anterior no es posible establecer una relación unívoca entre la temperatura de tope de nube y la precipitación observada por pluviómetros ya que mientras en la estación Telémaco Borba superaba los 100 mm (trazo lleno), en la estación Curitiba (trazo discontinuo) los valores observados apenas superaban los 30 mm.

En este último caso, sólo se registraron lloviznas durante el día 26 hasta las 00:00 UTC del día 27 para luego pasar a lluvia débil durante el día 27.

7.4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos para ambos casos se discuten algunos rasgos comunes y no entre ambos eventos. En primer lugar, el entorno sinóptico asociado a cada situación es diferente: mientras en el primer caso (URU) se trató de un sistema de baja presión producto de una ciclogénesis, en el segundo caso la presencia de un frente estacionario sobre el norte de la cuenca del Plata fue el causante de los eventos extremos de precipitación. Por otro lado, el comportamiento de los SCM más grandes, en ambos casos, tienen un crecimiento hasta la maduración durante las horas de la tarde (Imagen 4 e Imagen 9 de las Figura 7.3 y Figura 7.9 respectivamente) para luego comenzar un proceso de disipación en fragmentos que, también en ambos casos, produce un regeneramiento de algunos de estos sistemas

durante la madrugada. En el caso URU, esta fue una de las causas de las precipitaciones ocurridas sobre las estaciones de la costa del Río de la Plata, mientras que los ecos más grandes (en magnitud y extensión) también se observan en la región del norte de Curitiba durante la madrugada del día 27 (Figura 7.9 - Imagen 12 e Imagen 14) en concordancia con la presencia de topes relativamente más fríos.

Por otro lado, existe una buena correspondencia entre la temperatura de brillo observada en algunas estaciones de ambas áreas y los fenómenos de tiempo significativo. No obstante, la relación entre precipitación acumulada y temperatura de brillo no es del todo directa. Se puede observar, también en ambos casos, que estaciones con evoluciones temporales de la temperatura semejantes acumulan montos de lluvia muy diferentes. Entre los factores que pueden influir en esta situación puede nombrarse la diferente naturaleza de los sensores: mientras en el caso del satélite se trata de una medida media areal sobre una región de 16 km² donde además pueden existir posibles errores en la navegación de la imagen (geocodificación); en el caso del pluviómetro se trata de un círculo de pocos centímetros cuadrados de superficie midiendo un parámetro cuya variabilidad espacial es muy alta.

Es por ello, que las futuras líneas de investigación deben integrar todos los datos disponibles (radar, satélite y pluviógrafos) para mejorar la estimación de la distribución areal de la precipitación en diferentes escalas de tiempo, especialmente, las más pequeñas.

8. RESUMEN, CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS

8.1. RESUMEN

El propósito de este trabajo tuvo desde el comienzo del mismo dos objetivos: el primero de ellos, que podríamos definir como el "objetivo tecnológico", fue el desarrollo de un algoritmo para el seguimiento y evolución de SCM a través de imágenes de satélite que permitiera, además, la generación de imágenes virtuales que puedan ser utilizadas tanto en el caso de falta de información como así también como herramienta de pronóstico a muy corto plazo. Este primer objetivo fue plenamente satisfecho ya que no solamente el algoritmo desarrollado (técnica ForTRACC) ha sido la base para el desarrollo del resto de la tesis, sino que también esta siendo usada como una herramienta operativa para el seguimiento en tiempo real de los SCM en Sudamérica (<http://moara.cptec.inpe.br>).

El segundo objetivo fue la aplicación de esta técnica para la caracterización estadística de algunas propiedades físicas de los SCM y estudiar su evolución a lo largo de su ciclo de vida de aquellos sistemas que afectaron al sudeste de Sudamérica durante los veranos de 2000-2001, 2001-2002 y 2002-2003. A partir de la base de datos de los SCM (familias) que se generó para esta primera etapa, se incursionó en la caracterización de aquellos SCM que produjeron precipitaciones extendidas e intensas en algunas regiones seleccionadas en la cuenca del Plata. Por otro lado, y complementando el análisis anterior, se estudió el entorno en gran escala asociado a estos eventos para determinar el tipo de ambiente en que se desarrollan este tipo particular de SCM. Por último, se presentó el estudio del ciclo de vida de dos casos particulares ocurridos en la región con el objeto de discutir las posibles semejanzas y diferencias con el conjunto general y la posible aplicación de estos conocimientos a los diferentes algoritmos de estimación de precipitación por satélite existentes.

8.2. CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS

El desarrollo de un software para la detección y monitoreo de distintos rasgos morfológicos y radiativos, en forma automática, usando imágenes del infrarrojo térmico de satélites geoestacionarios, resultó una herramienta eficaz para la generación de una base estadística de las variables que definen los rasgos previamente mencionados.

La aplicación de este software a un conjunto de imágenes de satélite que comprende tres veranos (2000-2001, 2001-2002 y 2002-2003) generó una base de datos que contiene la siguiente información: (1) Tamaño del SCM a lo largo de su ciclo de vida (definido por la isoterma de 235 K) y su variación temporal, (2) identificación de los SCM con temperaturas por debajo de 210 K y área cubierta por la mencionada isoterma, (3) temperatura mínima del SCM a lo largo de su ciclo de vida y su variación temporal (tasa de calentamiento / enfriamiento), (4) excentricidad e inclinación, (5) velocidad de desplazamiento del centro de masa, entre otros.

Del análisis de esta información se obtienen numerosas conclusiones de las cuales se extraen las que se consideran más significativas: (1) resultó adecuado analizar por separado y comparar las características y comportamiento de los SCM-STF y los SCM-CTF; (2) para el subconjunto SCM-STF, el tiempo de vida medio para el fue de 3,4 horas, mientras que el tiempo de vida medio para el subconjunto SCM-CTF es algo superior a las 5 horas; (3) los elementos del conjunto SCM-CTF es más probable que alcancen una mayor extensión areal y, como quedo expresado anteriormente, un periodo de vida más largo; (4) el nacimiento de los SCM-STF estaría altamente relacionado con la orografía y los fenómenos de calentamiento local, mientras que en el subconjunto SCM-CTF estaría más relacionado con la dinámica de la circulación en capas bajas; (5) en lo que respecta al estudio del ciclo diurno, es notable la influencia del calentamiento diurno solar sobre el comportamiento de todas las variables: se observa un máximo de actividad convectiva (mayor cantidad de píxeles delimitados por la isoterma de 235 K) sobre el final de la tarde (luego de la mayor insolación) acompañado por un decrecimiento de la temperatura mínima de los topes nubosos. Es durante el horario de la mayor insolación es que se observa los valores de expansión más altos a lo largo del día. Este hecho se hace más evidente en el conjunto SCM-CTF. (6) A partir del estudio de la tasa de expansión y enfriamiento durante las primeras etapas del ciclo de vida, se observa que cuanto mayor es la expansión inicial, mayor es el tiempo de vida del SCM; mientras que sucede lo mismo con la variación de la temperatura mínima (mayor enfriamiento, mayor tiempo de vida). (7) Del estudio de la marcha estacional de la temperatura mínima y cobertura nubosa definida por el umbral de 210 K se obtiene una alta correlación entre ambas variables, mientras que esta última esta altamente correlacionada con la precipitación media mensual de toda la región.

Del conjunto total se seleccionó el verano 2002-2003 para el cual se contó, además, con los datos de precipitación en dos regiones seleccionadas de la Cuenca del Plata. En cada una

de estas regiones, y a partir de observar más de 75 mm en alguna estación o tener un área superior a los 25.000 km² con precipitaciones superiores a 25 mm, se catalogó a cada día de este periodo como evento lluvioso o no lluvioso. Por otro lado, una vez identificados estos días, se seleccionaron las familias para las cuales se detectaron precipitaciones en superficie durante alguna etapa de su vida.

Entre las conclusiones de este estudio se transcriben a continuación aquellas que son más importantes: (1) A partir de un análisis de la temperatura de brillo media de aquellas imágenes correspondientes a los días en los cuales se produjeron precipitaciones extendidas e intensas, se puede observar una correspondencia de un mínimo de temperatura de brillo sobre cada una de las áreas de estudio. (2) En la región IGU, la trayectoria media de los SCM es noroeste – sudeste, mientras que en la región URU es, durante las primeras etapas de vida del sistema, hacia el este para luego girar hacia el noreste. (3) Los SCM de gran extensión areal son los que producen precipitaciones de las características citadas en la definición de evento lluvioso. (4) el área convectiva (cantidad de píxeles por debajo de los 210 K) es mayor en el caso de eventos lluviosos que en los no lluviosos mientras que, con respecto a la excentricidad, no se observan marcadas diferencias entre ambos eventos. (5) En lo que respecta a la evolución temporal, existe una mayor tasa de expansión y el enfriamiento durante las primeras etapas del ciclo de vida en aquellos SCM que producen precipitaciones extendidas e intensas en comparación con aquellos que no las producen.

Para los casos citados previamente, se hizo un análisis de la situación sinóptica media en la cual se desarrollaron estos eventos. El campo medio obtenido indica que los MCS se desarrollaron en coincidencia o en el sector cálido de un frente en superficie. El resto de las condiciones son similares a las obtenidas por otros autores (Velasco y Fritsch, 1987; Torres, 2003) entre las que se puede citar la advección de humedad, el giro anticiclónico del viento con la altura (advección cálida) y la fuerte divergencia en los niveles más altos de la troposfera.

Por último, el análisis de dos casos particulares muestra que el comportamiento de los SCM más grandes, en ambos casos, tienen un crecimiento hasta la maduración durante las horas de la tarde para luego comenzar un proceso de disipación en fragmentos que, también en ambos casos, produce un regeneramiento de algunos de estos sistemas durante la madrugada. En el caso URU, esta fue una de las causas de las precipitaciones ocurridas sobre las estaciones de la costa del Río de la Plata, mientras que los ecos más grandes (en

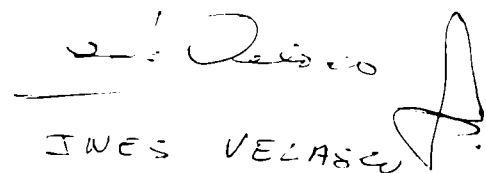
magnitud y extensión) también se observan en la región del norte de Curitiba durante la madrugada del día 27 en concordancia con la presencia de topes relativamente más fríos. No obstante, la relación entre precipitación acumulada y temperatura de brillo no es del todo directa. Se puede observar, también en ambos casos, que estaciones con evoluciones temporales de la temperatura semejantes acumulan montos de lluvia muy diferentes. Es por ello que es necesario dirigir los esfuerzos al estudio de otras características de los SCM (en particular las tasas de expansión y enfriamiento) para tener una mejor relación entre la precipitación y la temperatura de brillo observada por satélite.

Como perspectiva de este trabajo, será necesario trabajar sobre como integrar esta nueva información del ciclo de vida de los SCM con otros tipos de datos (radar, pluviómetros) y como estas características físicas de los SCM (como, por ejemplo, las mencionadas tasas de expansión y enfriamiento) afectan la eficiencia de la precipitación.

Por otro lado, y dado que este software es fácilmente adaptable para trabajar con otros umbrales de temperatura de brillo, también se hace necesario experimentar con otros valores de temperatura en la determinación de sistemas convectivos y como esto influye en los resultados. Por ultimo, y como fue planteado en la introducción, la clasificación de SCM asociados a eventos particulares (por ejemplo, jet en capas bajas) son aplicaciones naturales que puede tener en el futuro este trabajo.



DANIEL VILA



JWES VELASCO

9. BIBLIOGRAFÍA

- Adler, R.F. and A.J. Negri, 1988: A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall. *J. Appl. Meteor.*, **27**, 30-51.
- Bonner W. D., 1968: Climatology of the Low Level Jet. *Mon. Wea. Rev.*, **96**, 833-850.
- Carvalho L., and Jones C., 2001: A Satellite Method to Identify Structural Properties of Mesoscale Convective Systems Based on the Maximum Spatial Correlation Tracking Technique (MASCOTTE). *J. Appl. Meteor.*, **40**, 1683-1701
- Chen, S., R.A. Houze Jr., B. E. Mapes, 1996: Multiscale Variability of Deep Convection In Relation to Large-Scale Circulation in TOGA COARE. *J. Atmos. Sci.*, **53**, 1380–1409.
- Cotton, W. R. and Anthes R. A., 1989a: Storm and Cloud Dynamics, *Academic Press*, 880 pp.
- _____, M. S. Lin, R. L. McAnelly y C. J. Trembach, 1989b: A composite model of mesoscale convective complexes. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 765-783.
- De Leonibus L., Rosci P., Zauli F., 1998: Nefodina: A tool for automatic detection of severe convective phenomena. *SAF Training Workshop - Nowcasting and Very Short Range Forecasting*, 148-157.
- Doyle M. and Barros V., 2002, Midsummer Low-Level Circulation and Precipitation in Subtropical South America and Related Sea Surface Temperature Anomalies in the South Atlantic. *J. Climate*, **15**, 3394-3410.
- Duvel, P. J., 1989: Convection over Tropical Africa and the Atlantic Ocean during Northern Summer. Part I: Interannual and Diurnal Variations, *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 2782–2799.
- Ferraro, R. R., F. Weng, N. C. Grody, and A. Basist, 1996: An eight-year (1987-1994) time series of rainfall, clouds, water vapor, snow cover, and sea ice derived from SSM/I measurements, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **77**, 891-905.

- George, J. J., 1960: Weather Forecasting for Aeronautics, *Academic Press*, 673 pp.
- Guedes R. and Silva Dias M. A., 1985: The Observed Synoptic Scale Structure in the Presence of Mesoscale Convective Complexes over South America. Second Meeting of Brazil-USA Cooperative Program on the Role of Convection in the Amazonian Region, INPE, SJC.
- Houze, R.A., 1977: Structure and Dynamics of a Tropical squall-line system. *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1540-1567.
- _____, and Betts, A.K., 1981: Convection in GATE. *Rev. Geophys. Space Phys.*, **19**, 541-576.
- _____, 1982: Cloud Clusters and Large Scale Vertical Motions in the Tropics, *J. Meteor. Soc. Japan*, **60**, 396-410.
- _____, 1989a: Observed structure of Mesoscale Convective Systems and Implication for Large Scale Heating, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **115**, 425-461.
- _____, Rutledge S.A., Biggerstaff M.I., et Smull B. F., 1989b: Interpretation of Doppler weather data displays in Mid-Latitude Mesoscale Convective Systems. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **70**, 608-619.
- _____, 1993: Cloud Dynamics. *International Geophysics Series*, **53**. Academic Press.
- Johnson, R. H., 1984: Partitioning Tropical Heat and Moisture Budgets into Cumulus and Mesoscale Components: Implications for Cumulus Parameterization. *Mon. Wea. Rev.*, **112**, No. 8, 1590-1601.
- _____, and Houze R.A., 1987: Precipitation Cloud Systems of the Asian Monsoon. *Monsoon Meteorology*, *Oxford University Press*, 298-356.
- Joyce, R., Janowiak, J., Huffman, G.. 2001: Latitudinally and Seasonally Dependent Zenith-Angle Corrections for Geostationary Satellite IR Brightness Temperatures. *J. Appl. Meteor.*, **40**, 689-703.
- Kummerow, C., J. Simpson, O. Thiele, W. Barnes, A. T. C. Chang, E. Stocker, R. F. Adler, A. Hou, R. Kakar, F. Wentz, P. Ashcroft, T. Kozu, Y. Hong, K. Okamoto, T.

- Iguchi, H. Kuroiwa, E. Im, Z. Haddad, G. Huffman, B. Ferrier, W. S. Olson, E. Zipser, E. A. Smith, T. T. Wilheit, G. North, T. Krishnamurti, K. Nakamura, 2000: The Status of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) after Two Years in Orbit. *Journal of Applied Meteorology*. Vol. **39**, No. 12, pp. 1965–1982.
- Laing, A. G., J. M. Fritsch, 1993a: Mesoscale Convective Complexes over the Indian Monsoon Region, *J. Climate*, **6**, 911–919.
- _____, J. M. Fritsch, 1993b: Mesoscale Convective Complexes in Africa. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 2254–2263.
- _____, J. M. Fritsch, 2000: The Large-Scale Environments of the Global Populations of Mesoscale Convective Complexes. *Mon. Wea. Rev.*, **128**, 2756–2776.
- Laurent, H.; Machado L.A.T.; Morales C.; Durieux, L., 2002: Characteristics of Amazonian Mesoscale Convective Systems Observed from Satellite and radar during the WETAMC/LBA Experiment, *J. Geophys. Res.*, **107**, (D20), 8054, doi:10.1029/2001JD000337
- Leary, Colleen A., Robert A. Houze, Jr., 1979: The Structure and Evolution of Convection in a Tropical Cloud Cluster. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **36**, 437–457.
- Lichtenstein E. R., 1980, La depresión del Noroeste Argentino. *Tesis de Doctorado*. FCEN – UBA.
- Liebmann, B., G. N. Kiladis, J. A. Marengo, T. Ambrizzi, and J. D. Glick, 1999: Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic convergence zone. *J. Climate*, **12**, 1877–1891.
- Machado, L. A. T., J. P. Duvel y Desbois M., 1993: Diurnal Variations and Modulation by Easterly Waves of the Size Distribution of Convective Cloud Clusters over West Africa and Atlantic Ocean. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 37-49.
- _____, y W. B. Rossow, 1993: Structural Characteristics and Radiative Properties of Tropical Cloud Clusters. *Mon. Wea. Rev.*, **121**, 3234-3260.

- _____, W. B. Rossow, R. L. Guedes y A. W. Walker, 1998: Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. *Mon. Wea. Rev.*, **126**, 1630-1654.
- _____, Laurent, H.. 2004: The Convective System Area Expansion over Amazonia and its Relationships with Convective System Life Duration and High-Level Wind Divergence. *Mon. Wea. Rev.*, **132**, 714-725.
- Maddox, R. A., 1980: Mesoscale Convective Complex, *Bull. Amer. Met. Soc.*, **61**, 1374-1387.
- _____, 1983: Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes. *Mon. Wea. Rev.*, **111**, 1475-1493.
- Mapes B. E., Houze R.A. Jr, 1992: An Integrated View of 1987 Australian Monsoon and its Mesoscale Convective Systems. Part I: Horizontal structure, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **118**, 927-963.
- Mathon V. and H. Laurent, 2001. Life cycle of the Sahelian mesoscale convective cloud systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **127**, 377-406.
- Miller, D., J. M. Fritsch, 1991: Mesoscale Convective Complexes in the Western Pacific Region. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 2978-2992.
- Miller, S. W., P. A. Arkin, and R. J. Joyce, 2000: A combined microwave/infrared rain rate algorithm, *Int. J. Remote Sens.*, **22**, 3285-3307.
- Mohr, K. I., E. J. Zipser, 1996: Mesoscale Convective Systems Defined by Their 85-GHz Ice Scattering Signature: Size and Intensity Comparison over Tropical Oceans and Continents, *Mon. Wea. Rev.*, **124**, 2417-2437.
- Morel C., 2001 : Caractérisation objective des systèmes convectifs européens a partir de leur suivi dans l'imagerie satellitaire. *Thèse de docteur de l'Université Paul Sabatier - Toulouse III*
- Nogues - Paegle, J., and K. C. Mo, 1997: Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Mon. Wea. Rev.*, **125**, 279-291.

- Orlanski I., 1975: A rational division of scales for Atmospheric Processes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **56**, 527-530.
- Peak, J.E. et Tag, P.M., 1994: Segmentation of Satellite using Hierarchical Thresholding and Neural Networks, *J. Appl. Meteor.*, **33**, 605-616.
- Riosalido R., Carretero O., Elizaga F. and Martin F., 1998: An Experimental Tool for Mesoscale Convective Systems Nowcasting. *SAF Training Workshop - Nowcasting and Very Short Range Forecasting*, 127-135.
- Rossow W. B., Schiffer R. A., 1991: ISCCP Cloud Data Products. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **72**, 2-20.
- Silva Dias M.A. F., S. Rutledge, P. Kabat, P.L. Silva Dias, C. Nobre, G. Fish, A. J. Dolman, E. Zipser, M. Garstang, A. Manzi, J. D. Fuentes, H. Rocha, J. Marengo, A. Plana-Fattori, L. Sá, R. Alvalá, M.O. Andreae, P. Artaxo, R. Gielow, L. Gatti, 2001 - Cloud and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon Region, *Journal of Geophysical Research – Atmospheres - LBA special issue*.
- Simonelli, S., 2000: Modelo Estadístico de Pronóstico de Convección para la Zona Norte de la Provincia de Mendoza. *Tesis de doctorado. FCEyN-UBA*.
- Torres, J. C., 2003: Sistemas Convectivos en Mesoescala Altamente Precipitantes en el Norte y Centro de Argentina. *Tesis de doctorado. FCEyN-UBA*
- _____, Nicolini M. 2002: A composite of Mesoscale Convective Systems over Southern South America and its Relationship to Low-Level Jet Events. *VAMOS / CLIVAR / WCRP Conference on South American low-level jet*. Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, 5-7 February 2002.
- Turk, F. J., J. Hawkins, E. A. Smith, F. S. Marzano, A. Mugnai, and V. Levizzani, 2000: Combining SSM/I, TRMM and infrared geostationary satellite data in a near-realtime fashion for rapid precipitation updates: advantages and limitations, *Proc. The 2000 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference*, 452-459.

- Velasco, I. y J.M. Fritsch, 1987: Mesoscale convective complexes in the Americas. *J. Geoph. Res.*, **92**, 9591-9613.
- _____, y Necco G., 1980: Valores Medios, Extremos y Desviaciones Estandar de Datos Aerológicos de la República Argentina. Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Departamento de Meteorología.
- Vicente G. A., R. A. Scofield, and W. P. Menzel, 1998: The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **79**, 1883-1898.
- Vila D. A., Velasco I. Machado L.A.T. and Goniadzki D., 2000: Cloud-Top Characteristics Documentation: Test of an Automated Method, *Preprints of the Sixth International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography*,
- _____, Machado L.A.T., 2002: Shape and Radiative Properties of Convective Systems Observed from Infrared Satellite Images, *Accepted for publication in the International Journal of Remote Sensing*.
- _____, R. A. Scofield, C. Davenport, 2002: Satellite Rainfall Estimation over South America: Evaluation of Two Major Events, *16th Conference on Hydrology, American Meteorological Society, Orlando, Florida*, 33-36.
- Virji, H., 1981: A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 599–610.
- Weisman, M. L. and Klemp, 1982: The dependence of Numerically simulated Convective Storms on vertical Wind Shear and Boyancy, *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 504 - 520.
- _____, 1992: The Role of Convectively Generated Rear-Inflow Jets in the Evolution of Long-Lived Mesoconvective Systems, *J. Atmos. Sci.*, **49**, 1826–1847.
- Williams, M., R. A. Houze, Jr., 1987: Satellite-Observed Characteristics of Winter Monsoon Cloud Clusters, *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 505–519.
- Wolter, K., 1987: The Southern Oscillation in surface circulation and climate over the tropical Atlantic, Eastern Pacific, and Indian Oceans as captured by cluster analysis. *J. Climate Appl. Meteor.*, **26**, 540-558.

Capítulo 9: Bibliografía

Woodley, W.L., C. G. Griffith, J. S. Griffin, S. C. Stromatt, 1980: The Inference of GATE Convective Rainfall from SMS-1 Imagery. *J. Appl. Meteor.*, **19**, 388–408.

Zipser, E. J., 1977: Mesoscale and Convective-scale downdrafts as distinct components of squall line structure , *Mon. Wea. Rev.*, **105**, 1568-1589.

_____, 1994: Deep Cumulonimbus Cloud Systems in the Tropics with and without Lightning, *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 1837–1851.

ANEXO 1

DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS RADIATIVOS Y MORFOLÓGICOS DE UN SCM.

Las parámetros radiativos y morfológicos de cada sistema convectivo (SCM) calculados a partir de la información de la temperatura de brillo obtenida a través de las imágenes de satélite se presentan en la siguiente tabla:

DATOS BÁSICOS	
Día y hora UTC de la imagen	
Numero de sistema	
Tamaño del SCM (en píxeles)	
Umbral de temperatura para la identificación de los SCM	
Umbral de temperatura para la identificación de los topes fríos incluidos en los SCM	
DATOS DE POSICIÓN (*)	PARÁMETROS RADIATIVOS (**)
Posición del centro de masa del SCM	Temperatura media del SCM
Posición ponderada del centro de masa del SCM	Temperatura mínima del SCM
Posición del píxel de temperatura mínima	Temperatura mínima utilizando un retículo de 9 píxeles
Posición del extremo sur del SCM	Gradiente medio espacial
Posición del extremo norte del SCM	Desvío estándar de las temperaturas de brillo
Posición del extremo este del SCM	Histograma de la temperatura de brillo, de cada SCM, cada 2 grados
Posición del extremo oeste del SCM	
(*) en latitud y longitud	(**) Todas las unidades están expresadas en K
INFORMACIÓN SOBRE TOPES FRÍOS	PARÁMETROS MORFOLOGICOS
Numero de topes fríos (como clusters fríos) incluidos en cada SCM	Correlación espacial entre los píxeles de un SCM respecto a un sistema cartesiano
Tamaño medio de los topes fríos	Excentricidad
Tamaño de los tres mayores topes fríos	Fragmentación
Posición de los tres mayores topes fríos	Inclinación
Temperatura media de los topes fríos	

Anexo 1: Definición de los parámetros radiativos y morfológicos

A continuación se realiza una breve descripción sobre la metodología de cálculo de cada uno de estos parámetros:

- *Posición del centro de masa del SCM*: es calculada como el promedio espacial (tanto en ordenadas como en abcisas) de todos los puntos pertenecientes al SCM
- *Posición ponderada del centro de masa del SCM*: es calculada como el promedio espacial (tanto en ordenadas como en abcisas) ponderada por la temperatura de los píxeles. Este valor se encuentra más desplazado hacia los píxeles con menores temperaturas con respecto al parámetro anterior. La ponderación es realizada a través de la siguiente ecuación:

$$I = \sum_{k,l \in CS} w(k,l) \qquad w(k,l) = T_0 - T(k,l) + 1$$

$$XLATW = \frac{\sum_{k,l \in CS} LAT(k,l) * w(k,l)}{I} \qquad XLONW = \frac{\sum_{k,l \in CS} LON(k,l) * w(k,l)}{I}$$

- *Inclinación y excentricidad*: representan la excentricidad y la inclinación del SCM con respecto a la horizontal. Este procedimiento está basado en una representación en el plano cartesiano de todos los puntos del SCM. Luego de la aplicación de la metodología de cuadrados mínimos (de donde se obtiene el coeficiente de correlación espacial entre los píxeles de un SCM), se genera una recta y su recta ortogonal, las cuales serán los nuevos ejes de inercia del SCM. Luego, los puntos (LAT_i , LON_i) son proyectados en un nuevo sistema cartesiano (xx_i , yy_i) (Machado et al, 1998)

$$\begin{aligned} xx_i &= LON_i \cos \beta + LAT_i \sin \beta \\ yy_i &= LON_i \sin \beta + LAT_i \cos \beta \\ \beta &= \tan^{-1} \alpha \end{aligned}$$

donde

$$\alpha = \frac{(N \sum LAT_i LON_i - \sum LAT_i \sum LON_i)}{N \sum LAT_i^2 - (\sum LAT_i)^2}$$

el valor β representa la inclinación del SCM.

La excentricidad es calculada a partir de alguna de las siguientes ecuaciones:

$$\varepsilon = \frac{|xx(max) - xx(min)|}{|yy(max) - yy(min)|}$$

$$\varepsilon = \frac{|yy(max) - yy(min)|}{|xx(max) - xx(min)|}$$

donde $xx(max)$, $xx(min)$, $yy(max)$ e $yy(min)$ representan las posiciones extremas en el nuevo sistema cartesiano. A partir de esta doble definición, se escogerá el valor de $\varepsilon \leq 1$. Con esta definición, un círculo perfecto tiene una excentricidad igual a 1.

- *Temperatura media*: es calculada como el promedio de la temperatura de brillo de todos los píxeles pertenecientes a un sistema dado:

$$T = \frac{1}{N} \sum T_{i,j}$$

- *Temperatura mínima utilizando un retículo de 9 píxeles*: a partir de la determinación de la posición del píxel con menor temperatura mínima de un dado SCM (i,j), se realiza el promedio de la temperatura de los píxeles que rodean al píxel dado, incluyendo este.

$$T_{\min 9} = \frac{1}{9} \sum_{i-1, i+1} \sum_{j-1, j+1} T_{i,j}$$

- *Gradiente medio espacial del SCM y desvío estándar de las temperaturas de brillo*: representan medidas de la variabilidad interna de la temperatura de brillo de los SCM. La primera representa el gradiente medio espacial del sistema convectivo:

$$Avg|\nabla T_{ir}(i,j)| = \frac{1}{N} \left\{ \frac{\sum |T_{ir}(k,l) - T_{ir}(i,j)|/d}{M} \right\}$$

donde N es el número de píxeles del SCM, d es la distancia en kilómetros desde el píxel (i,j) hasta el píxel (k,l) , M es el número de píxeles cuya distancia desde el píxel (i,j) es menor o igual a 0.5 grados.

- *Desvío estándar de las temperaturas de brillo*: esta variable representa el desvío estándar de las temperaturas de brillo de un dado sistema convectivo y es calculada a través de la siguiente ecuación:

$$va_T_{ir} = \frac{\left\{ \sum T_{ir}^2(i,j) - \frac{(\sum T_{ir}(i,j))^2}{N} \right\}^{\frac{1}{2}}}{N}$$

Una descripción más detallada de algunos de estos parámetros puede ser encontrada en: Machado et al., 1998 y Vila & Machado, 2002.

ANEXO 2

A. CONJUNTO DE IMÁGENES EXISTENTES.

A continuación se presenta un cuadro sintético sobre la disponibilidad de imágenes del periodo considerado. En este caso, dicha disponibilidad se obtiene considerando todas las imágenes existente en un día pluviométrico dado, es decir, desde las 12 UTM del día anterior a las 12 UTM del día de la fecha. Cada tabla representa la cantidad de imágenes disponibles para cada día y el máximo paso de tiempo existente entre imágenes consecutivas para el día dado. Cada una de las tres tablas representa la información para cada uno de los años. El sombreado verde indica que el máximo de tiempo entre 2 imágenes consecutivas es menor que 3 horas, mientras que los naranjas corresponden a $\Delta t \leq 4$ horas. Los días sin sombreado corresponden a aquellos cuyo tiempo entre imágenes consecutivas sea mayor a 4 horas. Cabe recordar que si $\Delta t > 3$ horas (6 imágenes), el algoritmo generara un nuevo comienzo de todas las familias.

Fecha	Cantidad	Max Delta (hr)	Fecha	Cantidad	Max Delta (hr)	Fecha	Cantidad	Max Delta (hr)
01/12/2000	26	5.5	01/01/2001	33	2	01/02/2001	33	2
02/12/2000	35	2	02/01/2001	33	2	02/02/2001	34	2
03/12/2000	35	2	03/01/2001	33	2.5	03/02/2001	20	9
04/12/2000	34	2	04/01/2001	32	2	04/02/2001	28	2.5
05/12/2000	30	2	05/01/2001	27	3	05/02/2001	30	2.5
06/12/2000	21	10.5	06/01/2001	21	3	06/02/2001	20	10.5
07/12/2000	32	2	07/01/2001	20	4.5	07/02/2001	28	2
08/12/2000	29	2	08/01/2001	21	4.5	08/02/2001	28	2.5
09/12/2000	32	2	09/01/2001	12	11	09/02/2001	22	9
10/12/2000	31	2	10/01/2001	25	2.5	10/02/2001	32	2.5
11/12/2000	34	2	11/01/2001	31	2	11/02/2001	29	2.5
12/12/2000	26	6	12/01/2001	31	2.5	12/02/2001	31	2
13/12/2000	18	12.5	13/01/2001	31	2.5	13/02/2001	19	8
14/12/2000	32	2.5	14/01/2001	19	10.5	14/02/2001	29	2
15/12/2000	29	2.5	15/01/2001	35	2	15/02/2001	28	2.5
16/12/2000	33	2	16/01/2001	29	2.5	16/02/2001	25	6
17/12/2000	34	2	17/01/2001	31	2.5	17/02/2001	20	10.5
18/12/2000	31	2.5	18/01/2001	33	2	18/02/2001	27	2.5
19/12/2000	32	2.5	19/01/2001	31	2	19/02/2001	23	5
20/12/2000	25	7.5	20/01/2001	35	2	20/02/2001	23	5
21/12/2000	26	3.5	21/01/2001	32	2	21/02/2001	20	6
22/12/2000	22	4.5	22/01/2001	20	9.5	22/02/2001	23	3
23/12/2000	29	2	23/01/2001	35	2	23/02/2001	28	2.5
24/12/2000	31	2	24/01/2001	33	2.5	24/02/2001	22	7.5
25/12/2000	19	9	25/01/2001	35	2	25/02/2001	13	12.5
26/12/2000	28	3	26/01/2001	33	2	26/02/2001	24	3.5
27/12/2000	33	2	27/01/2001	36	2	27/02/2001	23	3.5
28/12/2000	30	2	28/01/2001	33	2.5	28/02/2001	23	3.5
29/12/2000	32	2	29/01/2001	32	2	Total imágenes	2518	
30/12/2000	30	2	30/01/2001	31	2			
31/12/2000	33	2.5	31/01/2001	18	9			

Anexo 2: Conjunto de imágenes existentes y red de estaciones

Fecha	Cantidad	Max Delta (hr)	Fecha	Cantidad	Max Delta (hr)	Fecha	Cantidad	Max Delta (hr)
01/12/2001	0	24.5	01/01/2002	17	13	01/02/2002	0	24.5
02/12/2001	0	24.5	02/01/2002	17	13.5	02/02/2002	0	24.5
03/12/2001	2	23.5	03/01/2002	8	9.5	03/02/2002	0	24.5
04/12/2001	33	2	04/01/2002	6	5.5	04/02/2002	0	24.5
05/12/2001	24	6	05/01/2002	28	3	05/02/2002	0	24.5
06/12/2001	22	8	06/01/2002	29	2.5	06/02/2002	0	24.5
07/12/2001	39	2	07/01/2002	29	2.5	07/02/2002	0	24.5
08/12/2001	23	4	08/01/2002	29	5	08/02/2002	0	24.5
09/12/2001	24	6.5	09/01/2002	25	4	09/02/2002	0	24.5
10/12/2001	27	3	10/01/2002	32	2	10/02/2002	14	11.5
11/12/2001	31	2	11/01/2002	32	2.5	11/02/2002	23	4.5
12/12/2001	18	12	12/01/2002	27	3.5	12/02/2002	24	4.5
13/12/2001	34	2	13/01/2002	31	2	13/02/2002	24	4.5
14/12/2001	32	3	14/01/2002	18	6	14/02/2002	23	4.5
15/12/2001	18	9.5	15/01/2002	27	5	15/02/2002	25	4.5
16/12/2001	31	3	16/01/2002	35	2	16/02/2002	16	6
17/12/2001	35	2	17/01/2002	26	3	17/02/2002	8	8.5
18/12/2001	26	5.5	18/01/2002	25	5	18/02/2002	4	14
19/12/2001	31	2	19/01/2002	23	7	19/02/2002	9	7.5
20/12/2001	30	4.5	20/01/2002	21	10.5	20/02/2002	10	12.5
21/12/2001	34	2	21/01/2002	31	2.5	21/02/2002	15	9
22/12/2001	19	10.5	22/01/2002	32	2	22/02/2002	21	4.5
23/12/2001	32	2	23/01/2002	19	11.5	23/02/2002	15	8.5
24/12/2001	31	3	24/01/2002	30	2.5	24/02/2002	15	7.5
25/12/2001	19	9	25/01/2002	35	2	25/02/2002	21	4.5
26/12/2001	12	13	26/01/2002	30	3	26/02/2002	19	4.5
27/12/2001	21	10.5	27/01/2002	15	13	27/02/2002	17	4.5
28/12/2001	22	10.5	28/01/2002	0	24.5	28/02/2002	17	4.5
29/12/2001	17	11.5	29/01/2002	0	24.5	Total imágenes		1736
30/12/2001	26	4	30/01/2002	0	24.5			
31/12/2001	28	3.5	31/01/2002	0	24.5			

Fecha	Cantidad	Max Delta (hr)	Fecha	Cantidad	Max Delta (hr)	Fecha	Cantidad	Max Delta (hr)
01/12/2002			01/01/2003	13	5	01/02/2003	15	8
02/12/2002	36	2	02/01/2003	12	9	02/02/2003	29	3
03/12/2002	33	2.5	03/01/2003	32	3	03/02/2003	29	2.5
04/12/2002	36	2.5	04/01/2003	29	3	04/02/2003	30	5
05/12/2002	18	5	05/01/2003	29	3.5	05/02/2003	28	2.5
06/12/2002	29	4	06/01/2003	35	2.5	06/02/2003	35	2
07/12/2002	12	7.5	07/01/2003	33	2	07/02/2003	38	2
08/12/2002	7	9	08/01/2003	34	2.5	08/02/2003	34	2
09/12/2002	7	8	09/01/2003	37	2	09/02/2003	33	4.5
10/12/2002	6	13.5	10/01/2003	37	2	10/02/2003	37	2
11/12/2002	15	8.5	11/01/2003	32	3	11/02/2003	36	2.5
12/12/2002	19	3	12/01/2003	29	5	12/02/2003	35	2.5
13/12/2002	19	13	13/01/2003	31	2.5	13/02/2003	35	2.5
14/12/2002	35	2	14/01/2003	29	2.5	14/02/2003	31	3.5
15/12/2002	33	2.5	15/01/2003	14	5.5	15/02/2003	17	6
16/12/2002	25	2	16/01/2003	14	4	16/02/2003	32	2.5
17/12/2002	31	3	17/01/2003	27	3	17/02/2003	32	3.5
18/12/2002	33	4	18/01/2003	32	2.5	18/02/2003	28	3
19/12/2002	26	6	19/01/2003	34	2	19/02/2003	27	2.5
20/12/2002	22	5.5	20/01/2003	35	2	20/02/2003	31	4.5
21/12/2002	36	2	21/01/2003	33	2	21/02/2003	30	2
22/12/2002	33	3.5	22/01/2003	22	9.5	22/02/2003	19	4.5
23/12/2002	21	3.5	23/01/2003	32	2.5	23/02/2003	21	5
24/12/2002	8	6	24/01/2003	36	2	24/02/2003	18	13
25/12/2002	36	2	25/01/2003	33	2	25/02/2003	16	7.5
26/12/2002	32	2	26/01/2003	30	3.5	26/02/2003	22	3.5
27/12/2002	36	2	27/01/2003	36	2	27/02/2003	30	3.5
28/12/2002	32	4	28/01/2003	35	2	28/02/2003	30	4
29/12/2002	33	3.5	29/01/2003	27	2.5	Total imágenes		2479
30/12/2002	30	2	30/01/2003	35	2.5			
31/12/2002	20	8	31/01/2003	33	2.5			

Anexo 2: Conjunto de imágenes existentes y red de estaciones

B. RED DE ESTACIONES EN SUPERFICIE

Para cada una de las regiones seleccionadas denominadas IGU (54° 47' W – 48° 53' W, 22° 52' S – 27° 36' S) y URU (59° W - 53° W, 30° S – 35° S) se presenta a continuación la red de estaciones en superficie que fue utilizada para el análisis del capítulo 5. Los valores de latitud y longitud están expresados en grados y décimas de grado.

REGION URU

Numero	Estacion	Longitud	Latitud	Numero	Estacion	Longitud	Latitud
2426	AGRACIADA	-58.23	-33.8	2887	585 E. MET. PRADO	-56.2	-34.97
2095	CARITAS	-58.22	-33.17	1734	ACHAR	-56.18	-32.45
1672	430 E.MET. PAYSANDU	-58.08	-32.33	1086	CHARQUEADA	-56.17	-30.65
2145	490 E.MET. MERCEDES	-58.05	-33.27	1440	VALLE EDEN	-56.18	-31.85
2598	CASUPA	-58.02	-34.17	2889	580 E. MET. CARRASCO	-56.02	-34.85
1283	360 E.MET. SALTO	-57.98	-31.45	1405	370 E. MET. TACUAREMBO	-55.96	-31.7
2774	560 E.MET. COLONIA	-57.86	-34.47	1220	TRANQUERAS	-55.76	-31.2
1502	QUEBRACHO	-57.85	-31.33	1444	CUCHILLA DE OMBU	-55.7	-31.83
2289	PALMITAS	-57.8	-33.52	2583	545 E. MET. FLORIDA	-55.67	-34.1
1105	BELEN	-57.78	-30.8	1523	PASO DE LOS NOVILLOS	-55.67	-31.98
1858	450 E.MET. YOUNG	-57.63	-32.72	1875	LA PALOMA	-55.57	-32.73
2337	EGAÑA	-57.62	-33.62	1147	350 E.MET. RIVERA	-55.62	-30.92
1176	PALOMAS	-57.58	-31.07	1224	PASO ATAQUES	-55.35	-31.23
1013	315 E. MET. BELLA UNION	-57.58	-30.2	2876	PAN DE AZUCAR	-55.22	-34.8
1321	LAURELES	-57.53	-31.52	2073	CERRO CHATO	-55.18	-33.12
1040	TOMAS GOMENSORO	-57.472	-30.42	2826	MATAOJO	-55.12	-34.6
1766	PASO DE LA CRUZ	-57.37	-32.57	2549	BARRIGA NEGRA (POLANCO)	-55.07	-33.93
1092	BALTASAR BRUM	-57.32	-30.73	1880	CUCHILLA DEL CARMEN	-55.03	-32.73
1880	GUICHON	-57.2	-32.35	1379	MOYONES	-55	-31.83
1232	VALENTIN (P.BAZZINI)	-57.2	-31.3	2029	ISLA PATRULLA	-54.96	-33.03
2611	COMCHILLAS	-57.13	-34.23	2879	SAN CARLOS	-54.92	-34.82
2154	MARINCHO	-57.13	-33.25	2662	CUFFE	-54.77	-34.23
1909	LAS FLORES (GRECCO)	-57.05	-32.78	2725	CORONILLA	-54.73	-34.37
1182	COLONIA LAVALLEJA	-57.03	-31.1	1454	VICHADERO	-54.72	-31.8
2438	PUNTAS DE SAUCE	-57.02	-33.83	2457	PIRARAJA	-54.7	-33.75
1019	BERNABE RIVERA	-56.95	-30.28	2179	500 E.MET. TREINTA Y TRES	-54.63	-33.38
1159	SEQUEIRA	-56.98	-31.03	1793	FRAILE MUERTO	-54.53	-32.53
2486	PINTOS (SAN GREGORIO)	-56.83	-33.88	2272	JOSE P.VARELA	-54.5	-33.47
1294	PASO POTRERO	-56.83	-31.47	2804	565 E.MET. ROCHA	-54.33	-34.48
1772	CUCHILLA DE NAVARRO	-56.82	-32.56	2416	LASCANO	-54.22	-33.68
2707	550 E. MET. SAN JOSE	-56.72	-34.35	1709	440 E. MET. MELO	-54.22	-32.37
2009	PUEBLO CENTENARIO	-56.65	-32.98	1537	PUEBLO I. NOBLIA	-54.15	-31.98
2812	LIBERTAD	-56.63	-34.63	1798	ARROYO MALO	-53.97	-32.55
2206	530 E. MET. DURAZNO	-56.53	-33.37	2185	GRAL. E.MARTINEZ	-53.8	-33.2
1914	460 E.MET. P. DE LOS TOROS	-56.52	-32.82	1849	RIO BRANCO	-53.38	-32.62
2061	MOLLES (CARLOS REYLES)	-56.47	-33.06	2422	CHUY	-53.28	-33.7
1050	330 E.MET. ARTIGAS	-56.47	-30.45	2770	19 DE ABRIL	-54.05	-34.38

Anexo 2: Conjunto de imágenes existentes y red de estaciones

REGION IGU

ESTACION	PAIS	LONG	LAT	ESTACION	PAIS	LONG	LAT
CAMBARA (EST EXPERIMENTAL)	BRA	-50.03	-23.00	HOTEL CATARATAS - UHE	BRA	-54.43	-25.68
PARANAYAI	BRA	-52.43	-23.08	AGUAS DO YBRE (PCD INPE)	BRA	-52.93	-25.77
LONDRINA (EST AGRICLIMAT.)	BRA	-51.19	-23.30	LARA	BRA	-49.77	-25.78
PORTO PARAISO DO NORTE (PCD INPE)	BRA	-52.47	-23.32	LINE SEGRÉDO - RESERVATORIO	BRA	-52.10	-25.78
LONDRINA AIRPORT	BRA	-51.14	-23.33	MADUEIRA GAYAZONI-SIMEPAR	BRA	-51.27	-25.80
LONDRINA	BRA	-51.19	-23.38	RIBEIRAO DO RIO	BRA	-49.08	-25.82
MAPINGA	BRA	-51.98	-23.41	SÃO MATEUS DO SUL	BRA	-50.38	-25.87
MAPINGA-SE COPEL	BRA	-51.98	-23.45	PONTILHAS-RIO POTINGA	BRA	-50.52	-25.92
APUCARANA (FAZENDA LIBATURA)	BRA	-51.54	-23.51	SÃO BENTO	BRA	-49.74	-26.03
CHANDOTE	BRA	-52.33	-23.66	RAPHA DO ARIJA	BRA	-51.62	-26.03
ULHARAYMA	BRA	-53.28	-23.73	FURNOPOLIS (PCD INPE)	BRA	-50.59	-26.03
CANPO MOLURAO	BRA	-52.37	-24.04	FAZENDA MARACANA	BRA	-51.15	-26.03
CANPO MOLURAO (SIMEPAR)	BRA	-52.37	-24.05	PORTO PALMEIRINA	BRA	-52.63	-26.03
QUARA (PCD INPE)	BRA	-54.25	-24.07	DIVISA	BRA	-50.32	-26.08
MOLURAO-SIMEPAR	BRA	-52.33	-24.10	FOZ DO AREIA-SIMEPAR	BRA	-51.65	-26.08
BALSA DO SANTA MARIA (PCD INPE)	BRA	-53.73	-24.17	BARRA DO IRATIM-SOLAS	BRA	-51.92	-26.08
PORTO FORMOSA	BRA	-53.33	-24.20	RIO NEGRO 63667	BRA	-49.80	-26.10
JAGUARUNA-SE COPEL	BRA	-49.66	-24.23	PATO BRANCO	BRA	-52.68	-26.14
PALOTINA 83062	BRA	-53.98	-24.30	RIO NEGRO	BRA	-49.35	-26.14
TELEMACO BORBA	BRA	-50.68	-24.33	FRAGUOS (PCD INPE)	BRA	-49.38	-26.15
IVAI	BRA	-50.84	-24.39	PORTO UNIAO	BRA	-51.03	-26.16
URUNA ASSIS CHATEAUBRIAND	BRA	-50.54	-24.39	JARARACA	BRA	-50.78	-26.17
CANDIDO DE ABREU	BRA	-51.25	-24.63	PORTO VITORIA-SIMEPAR	BRA	-51.23	-26.17
TOLEDO-SIMEPAR	BRA	-53.78	-24.78	JARARACA II	BRA	-50.82	-26.20
PALMITAL	BRA	-52.22	-24.88	MAJOR VIEIRA	BRA	-50.20	-26.21
CASCAYEL-SIMEPAR	BRA	-53.23	-24.88	UNIAO DA VITORIA (PCD INPE)	BRA	-51.07	-26.23
SANTA HELENA	BRA	-54.31	-24.89	GAMPO ERE	BRA	-53.04	-26.28
LINE SGO JORGE - ALAGADOS - RESERVA	BRA	-50.06	-25.02	MATOS COSTA	BRA	-51.09	-26.28
PONTA GROSSA-SIMEPAR	BRA	-50.02	-25.22	JANGADA	BRA	-51.25	-26.37
GUARAPUAVA-SIMEPAR	BRA	-51.50	-25.35	GACADOR	BRA	-51.00	-26.44
SÃO MIGUEL DO IGUAÇU	BRA	-54.25	-25.35	PALMAS	BRA	-51.97	-26.47
PORTO SANTO ANTONIO-SIMEPAR	BRA	-53.10	-25.38	SÃO MIGUEL D'OESTE	BRA	-53.30	-26.47
FOZ DO IGUAÇU-SIMEPAR	BRA	-54.62	-25.40	PONTE SERRADA	BRA	-52.01	-26.52
CURITIBA/PACAGUEBI	BRA	-49.27	-25.41	FOZ DO CACHOEIRA-SIMEPAR	BRA	-50.75	-26.58
PIRAQUARA-FAC AGRONOMIA UFP	BRA	-49.13	-25.42	VIEIRA	BRA	-51.09	-27.00
CURITIBA (SIMEPAR)	BRA	-49.27	-25.43	CHAPECO (POC)	BRA	-52.37	-27.07
TRIZOIRA SOARES (EST. EXPER.)	BRA	-50.58	-25.45	ITAPIRANGA	BRA	-53.38	-27.10
IRATI	BRA	-50.64	-25.46	CHAPECO	BRA	-52.68	-27.11
CURITIBA/AFONSO PEN	BRA	-49.17	-25.51	NOVA ITA	BRA	-52.81	-27.15
FOZ DO IGUAÇU AIRPT	BRA	-54.59	-25.51	CURITIBANOS	BRA	-50.36	-27.17
BURDAS DO IGUAÇU-US STO OSORIO	BRA	-53.02	-25.58	IRAI (POC)	BRA	-53.29	-27.17
SALTO CASIAS-SIMEPAR	BRA	-53.48	-25.58	CONCORDIA	BRA	-51.59	-27.18
SALTO OSORIO	BRA	-53.03	-25.59	IRAI	BRA	-52.24	-27.18
S. CASIAS-SIMEPAR	BRA	-53.50	-25.59	CAMPOS NOYOS (CLIMEPH)	BRA	-51.12	-27.24
PORTO AMAZONAS (PC D INPE)	BRA	-49.98	-25.59	INO RAMOS	BRA	-51.54	-27.24
COLONIA VITORIA	BRA	-51.48	-25.59	ARDO BATISTA	BRA	-51.01	-27.38
GRUPEIRO DO IGUAÇU I	BRA	-53.11	-25.57	CERRO RAMOS	BRA	-51.19	-27.38
NOVA PRATA DO IGUAÇU-SIMEPAR	BRA	-53.52	-25.57	CAMPOS NOYOS	BRA	-51.21	-27.59
PORTO CAPANEAMA-SIMEPAR	BRA	-53.93	-25.57	LAGES (CLIMEPH)	BRA	-50.19	-27.49
FOZ DO IGUAÇU (OPIC)	BRA	-54.58	-25.57	SALTOS DEL GUARA	PAB	-54.32	-24.05
PORTO NEIRA	BRA	-54.58	-25.60	CIUDAD DEL ESTE	PAB	-54.60	-25.53
SANTA CLARA (PCD INPE)	BRA	-51.98	-25.65	IGUAZUGATARATAS	ARG	-54.47	-25.73
				BERNARDO DE IRIGOYEN	ARG	-53.65	-26.23