



Características Físicas dos Sistemas Convectivos de Mesoescala que Afetaram o Rio Grande do Sul em 2006
Physics Features of Mesoscale Convective Systems that Reached Rio Grande do Sul State in 2006

Cristiano Wickboldt Eichholz¹ & Cláudia Rejane Jacondino de Campos²

¹INPE, Programa de Pós-graduação em Meteorologia, C.P. 515,
12.227-010, São José dos Campos, São Paulo, Brasil,

²Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós-graduação em Meteorologia, C.P. 354,
96010-970, Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil

E-mails: cristiano.eichholz@cptec.inpe.br, cjcampos@ufpel.edu.br

Recebido em: 09/10/2013 Aprovado em: 04/12/2013

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2014_1_70_80

Resumo

Estudou-se as características físicas sazonais dos Sistemas Convectivos de Mesoescala que afetaram o Estado do Rio Grande do Sul-RS (SCM_{RS}) no ano de 2006, utilizando a técnica ForTrACC (Forecasting and Tracking of Active Cloud Clusters). Foram utilizadas imagens brutas do satélite GOES-12 (Geostationary Operational Environmental Satellite) do canal 4, com resolução espacial no seu ponto subsatélite de 4 km x 4 km e resolução temporal de ½ hora, do período de 01/01/2006 a 31/12/2006. Essas imagens foram fornecidas pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/CPTEC/INPE) e serviram como base de dados para a utilização da técnica ForTrACC. Os resultados mostraram que: i) a maioria dos SCM_{RS} ocorreu nos trimestres mais quentes do ano e apresentou tempo de vida entre 6 e 12h; ii) SCM_{RS} com maior tempo de vida cobriram áreas maiores; iii) SCM_{RS} maiores e mais longos foram observados em JAS (jul, ago, set); iv) os SCM_{RS} apresentaram as 3 fases do seu ciclo de vida distribuída ao longo do dia; v) os SCM_{RS} tiveram iniciação preferencial sobre o continente e vi) os SCM_{RS} apresentaram trajetória média preferencial de oeste para leste.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; ForTrACC; SCM

Abstract

It was studied the seasonal physics features of the Mesoscale Convective Systems that reached Rio Grande do Sul (RS) State (MCS_{RS}) in 2006, using ForTrACC tool (Forecasting and Tracking of Active Cloud Clusters). Channel 4 GOES-12 (Geostationary Operational Environmental Satellite) images from 2006 year, with 4 km x 4 km spatial resolution in the subsatellite point and ½ hour temporal resolution were used. These images were provided by DSA/CPTEC/INPE (Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) and were the data basis to the ForTrACC tool. The results showed that: i) most MCS_{RS} occurred in the warmest quarters and showed lifetime between 6 and 12h, ii) MCS_{RS} with higher lifetime covered larger areas, iii) the largest and most long MCS_{RS} were observed in JAS (Jul, Aug, Sep); iv) MCS_{RS} presented the three phases of their life cycle distributed throughout the day; v) MCS_{RS} had preferential initiation over the continent, and vi) MCS_{RS} presented mean preferential trajectory from west to east.

Keywords: remote sensing; ForTrACC; MCS

1 Introdução

Os Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM), que são constituídos por um aglomerado de nuvens convectivas e que apresentam área com contínua precipitação, que pode ser parcialmente estratiforme e parcialmente convectiva, possuem formas variadas (Houze, 1993; Machado & Rossow, 1993).

Nas últimas décadas o estudo desses SCM tem sido alvo de interesse de pesquisadores devido ao impacto em superfície causado pela sua passagem ou existência, que é normalmente associada à precipitação intensa, fortes rajadas de vento e granizo, que causam sérios danos nas regiões onde ocorrem.

Diversos estudos têm buscado analisar as características dos SCM que ocorrem no sul na América do Sul-AS (Nicolini *et al.*, 2002; Vila, 2004; Sakamoto, 2009). Esses estudos mostram que: o tamanho dos SCM está associado ao seu tempo de vida, ou seja, maiores SCM são os que apresentam maior duração; os SCM podem ocorrer durante todo ano, apresentando maior frequência no período quente (Outubro a Março); os SCM na sua maioria, apresentam duração entre 6 e 12h; a maioria dos SCM é detectada inicialmente no período da tarde (horário de máxima atividade convectiva no ciclo diurno sobre o continente) e um máximo secundário de formação é observado entre o fim da madrugada e o amanhecer; a fase madura dos SCM tem dois picos, um pela tarde e outro durante a noite ou primeiras horas da manhã; e a trajetória dos SCM que se originam a leste da Cordilheira dos Andes têm a tendência a apresentar deslocamento para leste, entre 25° e 40°S.

Apesar de os SCM serem responsáveis pela maior parte da precipitação da estação quente nas regiões tropicais e temperadas da América do Sul-AS (Velasco & Fritsch, 1987; Vila, 2004), contribuindo para a geração de condições de tempo severo, eles ainda não são bem previstos (Corfidi *et al.*, 1996). Monitorar o deslocamento e a evolução dos SCM é de grande importância para a previsão do tempo e de fenômenos meteorológicos adversos. Por isso, com o objetivo de se obter um melhor conhecimento do ciclo de vida dos SCM, assim como um melhor entendimento de suas características físicas e morfológicas, são desenvolvidas técnicas de acompanhamento dos mesmos. Dentre essas técnicas, pode-se citar o Forecasting and Tracking of Active Cloud Clusters - ForTrACC (Vila *et al.*,

2008), que utiliza limiares de tamanho e temperatura de brilho do topo das nuvens, nas imagens brutas do canal-4 do satélite GOES, para identificar e acompanhar os SCM.

Cabe ressaltar que a região onde o Rio Grande do Sul (RS) se localiza possui características ideais para o desenvolvimento de atividade convectiva e formação e manutenção de SCM (Vila, 2004). Isso porque essa região sofre a influência da passagem dos Sistemas Frontais (SF) e dos Jatos de Baixos Níveis (JBN), que transportam calor e umidade da Amazônia para o sul do Brasil (Cavalcanti *et al.*, 2009). Ressalta-se que o RS tem sua economia em grande parte baseada na agricultura, e que uma das causas de prejuízos e quebras de safras no Estado é a ocorrência de eventos com condição de tempo severo (granizo, enxurrada, vendaval, etc.), que estão associados aos SCM (<http://www.seplag.rs.gov.br/atlas/default.asp#>; <http://www.defesacivil.rs.gov.br>). Neste sentido, o estudo sobre as características dos SCM que afetam o RS é bastante relevante, uma vez que o melhor entendimento deste tipo de sistema permite a sua melhor previsão e por consequência a redução da vulnerabilidade aos danos causados pelas condições de tempo severo geradas por tais sistemas.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho foi estudar as características físicas sazonais dos SCM cuja gênese e manutenção ocorreu ao sul de 20°S, que apresentaram ciclo de vida de no mínimo 6 h, que tiveram nascimento espontâneo e dissipação normal e que afetaram o Rio Grande do Sul (27° a 34° S e 49° a 58° O) durante o ano de 2006, utilizando a técnica ForTrACC.

2 Material e Métodos

Foram utilizadas as imagens brutas do satélite GOES-12 (Geostationary Operational Environmental Satellite), do canal 4 (infravermelho termal), com resolução espacial em seu ponto subsatélite de 4 km x 4 km e resolução temporal de ½ hora, do período de 01/01/2006 a 31/12/2006. Esses dados foram fornecidos pela DSA/CPTEC/INPE (Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e serviram como base de dados para a utilização da técnica ForTrACC. Destaca-se que o ano de 2006 foi selecionado para este estudo por apresentar boa qualidade nos dados.

Para a seleção dos SCM foi utilizado o aplicativo ForTrACC no modo diagnóstico. Este aplicativo é um método de identificação e acompanhamento de SCM, que fornece informações sobre as características físicas e morfológicas dos SCM identificados, durante o seu ciclo de vida. Cabe ressaltar que cada SCM (ou família) detectado pelo ForTrACC tem seu ciclo de vida descrito pelo conjunto de características apresentadas por ele em cada instante, o qual corresponde a um membro do SCM (ou da família). O processo de identificação dos SCM pelo ForTraCC, utiliza imagens brutas do satélite GOES e é baseado em limiares de tamanho (150 pixels) e temperatura de brilho do topo das nuvens (235K para identificar os SCM e 210K para identificar as células convectivas imersas nos SCM). Segundo alguns estudos os limiares de temperatura de brilho do topo das nuvens utilizados neste estudo são aceitáveis para detectar nuvens associadas à convecção em diferentes regiões da AS permitindo assim, a detecção tanto do SCM quanto das células convectivas imersas nele (Laurent *et al.*, 2002; Machado & Laurent, 2004; Vila, 2004).

Inicialmente foram obtidas as características ao longo do ciclo de vida de todos os SCM identificados pelo ForTrACC em 2006, porém somente foram considerados nesse estudo aqueles SCM que: i) mantiveram seu centro de massa durante todo seu ciclo de vida abaixo de 20° S; ii) apresentaram ciclo de vida de no mínimo 6 h. Apesar de considerar SCM com ciclo de vida longo (um dos critérios para definir CCM (Complexo Convectivo de Mesoescala), por exemplo), não foi feita nenhuma classificação destes. Um dos critérios adotados por Maddox (1980) para identificar CCM foi considerado, o ciclo de vida mínimo de seis horas. Esse critério foi adotado porque além de SCM mais longos tenderem a cobrir áreas maiores (Nicolini *et al.*, 2002; Vila, 2004) eles podem causar eventos com precipitação intensa, fortes rajadas de vento e granizo (Silva Dias, 1987) podendo causar grandes impactos nas regiões onde atuam.; iii) apresentaram iniciação espontânea e dissipação normal, isto é, tanto no momento de iniciação quanto no de dissipação, não houve interação (fusão) com outros SCM nem a separação do SCM identificado. Porém, foi permitida a existência de fusões e separações durante o ciclo de vida de um determinado SCM, uma vez que de outra maneira, o conjunto de dados a analisar seria limitado. Esse critério foi o mesmo seguido por Vila (2004) para obter um conjunto de informações mais

homogêneo para estudar as características físicas dos SCM. Além disso, utilizando essa condição garante-se que o crescimento inicial dos SCM selecionados esteja associado à sua própria dinâmica interna (Machado & Laurent, 2004); e iv) afetaram o RS. Foi determinado que um SCM afetou o RS quando pelo menos um dos membros do SCM analisado, apresentava latitude e longitude que o localizava dentro da grade que cobre o RS, compreendida entre as latitudes de 27° a 34° S e as longitudes de 58° a 49° O. A partir deste ponto os SCM com as características citadas acima são mencionados como SCM que afetaram o RS (SCM_{RS}).

Após a seleção dos SCM_{RS} , os mesmos foram separados por trimestres que representam cada uma das estações do ano: período quente (jan-fev-mar, JFM), período temperado frio (abr-mai-jun, AMJ), período frio (jul-ago-set, JAS) e período temperado quente (out-nov-dez, OND). Não foram usados os trimestres astronômicos, que definem as estações do ano, para facilitar as análises com dados dentro do mesmo ano.

Em seguida analisou-se a distribuição sazonal para 2006: i) do total de SCM_{RS} ; ii) do tempo de vida (ou duração do ciclo de vida) dos SCM_{RS} , isto é, o tempo decorrido entre a iniciação e a dissipação de cada SCM_{RS} ; iii) do tamanho máximo ou área máxima coberta pelos SCM_{RS} em função do seu tempo de vida; iv) dos horários mais frequentes de nascimento, maturação e dissipação dos SCM_{RS} , considerando os períodos do dia como segue: madrugada (das 03:00 as 09:00 UTC), manhã (das 09:00 as 15:00 UTC), tarde (das 15:00 as 21:00 UTC) e noite (das 21:00 as 03:00 UTC); v) das regiões preferenciais de nascimento dos SCM_{RS} , cobrindo-se a área de estudo (27° a 34° S; 58° a 49° O) com uma malha regular de 2° X 2° e calculando-se a quantidade de SCM_{RS} em cada malha e vi) da trajetória média preferencial dos SCM_{RS} . Para isso foram utilizadas as latitudes e longitudes do primeiro e do último membro de cada SCM_{RS} , que trazem as informações e/ou as características apresentadas pelo SCM_{RS} no momento de sua iniciação e dissipação, respectivamente. Além disso, também foram utilizadas a latitude e a longitude do membro correspondente à maturação de cada SCM_{RS} , ou seja, aquele que apresenta a máxima extensão. Com as informações da posição de todos os SCM_{RS} em cada fase do seu ciclo de vida foi então construída a trajetória média dos SCM_{RS} em cada trimestre do período de estudo.

3 Resultados e Discussão

3.1 Distribuição sazonal dos SCM_{RS}

A distribuição sazonal para 2006 dos SCM cuja gênese e manutenção ocorreram ao sul de 20°S em função do tempo de vida e do tipo de geração e dissipação e a distribuição dos SCM_{RS} é mostrada na Tabela 1. Pode-se observar nesta tabela que foram detectados em 2006 pelo ForTrACC 47.342 SCM (ou famílias) que se formaram e se mantiveram ao sul de 20°S, sendo que destes, 1.389 apresentaram ciclo de vida de no mínimo 6 h e tiveram geração espontânea e dissipação normal. Dos 1.389 SCM apenas 105 afetaram o RS (7,56%). Cabe ressaltar que as análises que seguem a partir deste ponto levaram em conta apenas os 105 SCM_{RS}.

Ainda analisando a Tabela 1 pode-se observar que em 2006 os SCM_{RS} foram observados em todos os períodos do ano, porém, considerando os trimestres JFM e OND como períodos quentes e AMJ e JAS como períodos frios do ano, os resultados evidenciam maior ocorrência de SCM_{RS} nos períodos quentes (61%), do que nos períodos frios (39%).

TRIMESTRE	TEMPO DE VIDA ↓ 20°S			TIPO DE GERAÇÃO E DISSIPACÃO, < 6h ↓ 20°S		TIPO DE GERAÇÃO E DISSIPACÃO, ≥ 6h ↓ 20°S		↓ 20S, ≥ 6h, GE-DN, AFETARAM O RS
	TOTAL	< 6	≥ 6	GE-DN	OUTROS	GE-DN	OUTROS	
JFM	12.779	12.010	769	7.953	4.057	455	314	38
AMJ	10.787	10.268	519	7.157	3.111	313	206	22
JAS	12.196	11.731	465	8.447	3.284	263	202	19
OND	11.580	10.971	609	7.366	3.605	358	251	26
TOTAL	47.342	44.980	2.362	30.923	14.057	1.389	973	105

Tabela 1 Distribuição sazonal para 2006 do total de SCM cuja gênese e manutenção ocorreu abaixo de 20°S em função do tempo de vida (<6h ou ≥6h) e do tipo de geração e dissipação (geração espontânea-GE e dissipação natural-DN ou outros) e daqueles SCM que afetaram o RS (SCMRS).

O predomínio de SCM durante os períodos quentes do ano pode ser explicado pelo estabelecimento de condições ambientais favoráveis ao seu desenvolvimento, tais como, condições sinóticas de grande escala, influência da topografia e processos dinâmicos e termodinâmicos que ocorrem em suas proximidades (Cavalcanti *et al.*, 2009).

Em termos de grande escala, no verão, a Alta da Bolívia (AB, circulação quase-estacionária em altos níveis, dinamicamente ligada a um cavado sobre o nordeste do Brasil) e a Baixa do Chaco (BC, área de baixa pressão de origem termo-orográfica localizada entre o Paraguai e Bolívia) atuam no sentido de gerar convergência, movimentos ascendentes e aquecimento em baixos níveis, condições necessárias para desencadear a convecção. As principais características dos escoamentos em baixos níveis

(850 hPa) no verão na AS são a circulação da Alta do Atlântico Sul (AAS, associada à circulação média meridional da atmosfera, que surge devido a Célula de Hadley) e o JBN (escoamento de norte, a leste dos Andes), que contribuem para o transporte de calor e umidade da região amazônica para a região subtropical (Velasco & Fritsch, 1987; Vila, 2004; Marengo *et al.*, 2004). Além de transportar calor e umidade para a região sul da AS o JBN também gera turbulência por meio do cisalhamento do vento e participa ativamente como mecanismo de disparo da instabilidade potencial favorável para a formação de tempestades severas no Sul-Sudeste do Brasil, Norte da Argentina, Bolívia e Sul do Paraguai (Marengo *et al.*, 2004). Além disso, a variabilidade sazonal da insolação, que é maior nos períodos quentes e menor nos períodos frios, favorece a atividade convectiva em JFM e OND e, portanto, maior ocorrência de SCM nestes trimestres (Mattos, 2009).

3.2 Duração do Ciclo de Vida dos SCM_{RS}

A duração do ciclo de vida ou tempo de vida dos SCM_{RS} em cada trimestre de 2006 é mostrada na Figura 1. Pode-se observar que nos quatro trimestres de 2006 a maioria dos SCM_{RS} apresentou tempo de vida entre 6 e 12h (61,9 %, 65 SCM_{RS}), aqueles com tempo de vida entre 12 e 24h corresponderam a 28,6% do total detectado (30 SCM_{RS}) e 9,5 % dos sistemas (10 SCM_{RS}) tiveram duração superior a 24 horas.

Características semelhantes às encontradas neste estudo foram obtidas por Machado *et al.* (1998), Laurent *et al.* (2002) e Vila (2004) quando estudaram o ciclo de vida de SCM sobre as Américas, região de Sahel (África), sobre a região amazônica e sobre o sul da AS, respectivamente. Velasco & Fritsch (1987) afirmam que esta preferência dos SCM em apresentarem tempo de vida entre 6-12h é um reflexo do forte ciclo diurno da radiação e do tamanho característico dos JBN que alimentam os SCM.

Observou-se ainda que o tempo de vida médio dos SCM_{RS} em 2006 foi de aproximadamente 13,6 h com alguma variação entre os períodos quentes (OND: 15,2 h e JFM: 12,4 h) e os frios (AMJ: 11,7 h e JAS: 15 h). Comportamento semelhante foi observado por Durkee & Mote (2009) quando analisaram a duração média dos CCM sobre a região subtropical da AS, durante o período quente (outubro - maio) de 1998 a 2007, que foi de aproximadamente 14h.

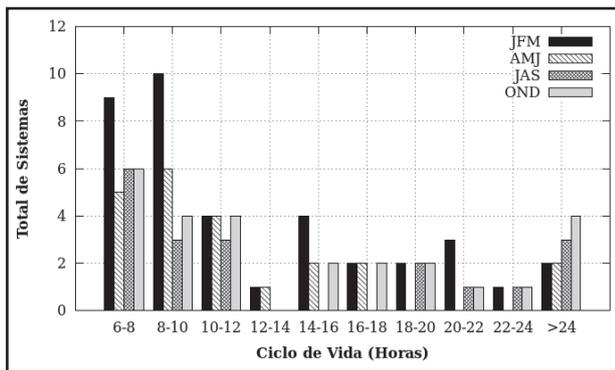


Figura 1 Tempo de vida dos SCM que afetaram o RS em 2006.

3.3 Tamanho Máximo dos SCM_{RS}

Analisou-se também para o ano de 2006, o tamanho máximo ou área máxima (em pixels, 1 pixel= $\sim 16\text{km}^2$) atingida pelos SCM_{RS} em função do seu tempo de vida (Figura 2 e Tabela 2). Pode-se observar que os SCM_{RS} com menor tempo de vida não chegam a ter grande extensão horizontal, por outro lado os SCM_{RS} com maior tempo de vida cobrem áreas maiores (Figura 2). Autores têm verificado uma relação entre o ciclo de vida dos SCM e seu tamanho (Velasco & Fritsch, 1987; Machado *et al.*, 1998; Vila, 2004), de forma que quanto maior for o tempo de vida do SCM maior tende a ser seu tamanho.

Também foi constatado que os maiores tamanhos médios dos SCM_{RS} foram observados em JAS ($\sim 382.947\text{km}^2$) e OND ($\sim 309.128\text{km}^2$) e, que os menores foram observados em JFM ($\sim 153.061\text{km}^2$) e AMJ ($\sim 109.917\text{km}^2$) (Tabela 2).

TRIMESTRE	$\geq 6\text{h}$	6-12h	12-24h	$> 24\text{h}$
JFM	153.061	86.723	250.690	281.376
AMJ	109.917	94.650	66.714	332.424
JAS	382.947	124.533	375.413	1.426.656
OND	309.128	67.114	313.920	1.146.592

Tabela 2 Tamanho médio (km²) sazonal dos SCM que atingiram o RS em 2006 em função da duração: com ciclo de vida maior ou igual a 6 horas, entre 6 e 12 h, entre 12 e 24h e com duração superior a 24 h.

Essas diferenças de duração (Figura 1, Tabela 2) e tamanho (Figura 2, Tabela 2) entre os SCM também foram detectadas por outros autores (Ashley *et al.* 2003; Siqueira, 2004). A hipótese sugerida por Ashley *et al.* (2003) para essas diferenças é que diferentes mecanismos dinâmicos podem causar grandes diferenças nos tamanhos e duração dos SCM. Tais processos incluem diferenças na circulação diurna que estão frequentemente relacionados à cobertura do solo e topografia (Laing & Frisch, 1997). Portanto não se pode ignorar o efeito da topografia nas circulações atmosféricas contribuindo para o levantamento das parcelas de ar e desestabilização do ambiente, tornando a atmosfera susceptível a convecção profunda (Sakamoto, 2009).

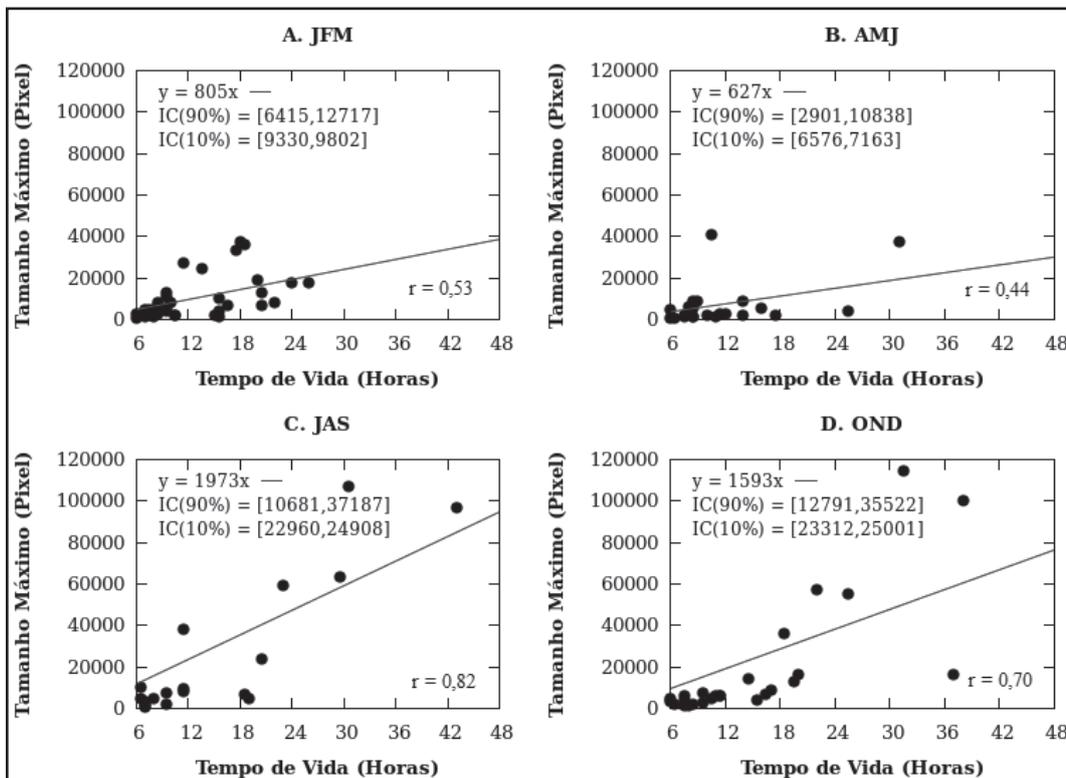


Figura 2 Tamanho máximo dos SCM que afetaram o RS em 2006 em função do seu tempo de vida. (A) JFM, (B) AMJ, (C) JAS e (D) OND. Os dados foram ajustados por mínimos quadrados e os intervalos de confiança (IC) são apresentados nos níveis de 90% e 10% do teste de t-student.

Além disso, segundo diversos autores, a propagação meridional da convecção na AS, gerada pela passagem de frentes frias e pelas incursões de ar frio das latitudes médias nos trópicos, contribui consideravelmente para a variabilidade total interdiurna da atividade convectiva e influi fortemente no regime de precipitação de diversas regiões do continente (Machado & Duvel, 1998; Vera & Vigliarolo, 2000).

Em geral os SCM que se formam na região deste estudo se desenvolvem durante a ocorrência de frentes frias, o que estimula a atividade convectiva de forma distribuída ao longo do dia. Segundo Siqueira & Machado (2004) em JAS (inverno austral) ocorrem dois tipos de frentes frias: as que exibem propagação quase-estacionária (com respeito à direção meridional) com a convecção nos subtropicais e/ou latitudes médias e as que organizam a atividade convectiva nos trópicos e propagam-se com a convecção em direção ao equador, as quais contribuem para pelo menos 50% da variabilidade total interdiurna da convecção nesta estação. Já em OND (primavera austral), segundo esses autores ocorrem penetrações de frentes frias que organizam a atividade convectiva nos trópicos e propagam-se com a convecção em direção ao equador, contribuindo para pelo menos 54% da variabilidade total interdiurna da convecção na AS durante esta estação. Portanto essa interação observada entre os SF e a convecção favorece a formação de SCM_{RS} maiores e mais longos em JAS e OND.

3.4 Horários mais Frequentes de Iniciações, Maturações e Dissipações dos SCM_{RS}

A análise sazonal dos horários mais frequentes de nascimentos, maturações e dissipações dos SCM_{RS} em 2006 (Figura 3) foi feita considerando os períodos do dia como segue: madrugada (das 03:00 as 09:00 UTC), manhã (das 09:00 as 15:00 UTC), tarde (das 15:00 as 21:00 UTC) e noite (das 21:00 as 03:00 UTC).

O comportamento do ciclo diurno da atividade convectiva dos SCM_{RS} em 2006, mostrado na Figura 3, indica que as 3 fases do ciclo de vida desses SCM podem ocorrer de forma distribuída ao longo do dia. Com algumas diferenças entre os quatro períodos do ano, conforme mostra a descrição a seguir.

Em JFM (Figura 3A) os SCM_{RS} apresentaram maior ocorrência de iniciação nos períodos da manhã e tarde; maturações e dissipação foram mais frequentes no período da noite. Em AMJ (Figura 3B), os SCM_{RS} apresentaram preferência de iniciação distribuída ao longo do dia, maturações mais frequentes no período da madrugada e dissipação no período da tarde. Em JAS os SCM_{RS} (Figura 3C) apresentaram iniciação e maturações mais frequentes no período da madrugada e o estágio de dissipação foi observado com mais frequência nos períodos da madrugada e manhã. Em OND (Figura 3D) os SCM_{RS} apresentaram iniciação mais frequente nos períodos da tarde e noite com pico na madrugada e maturações e dissipação mais frequente no período da tarde.

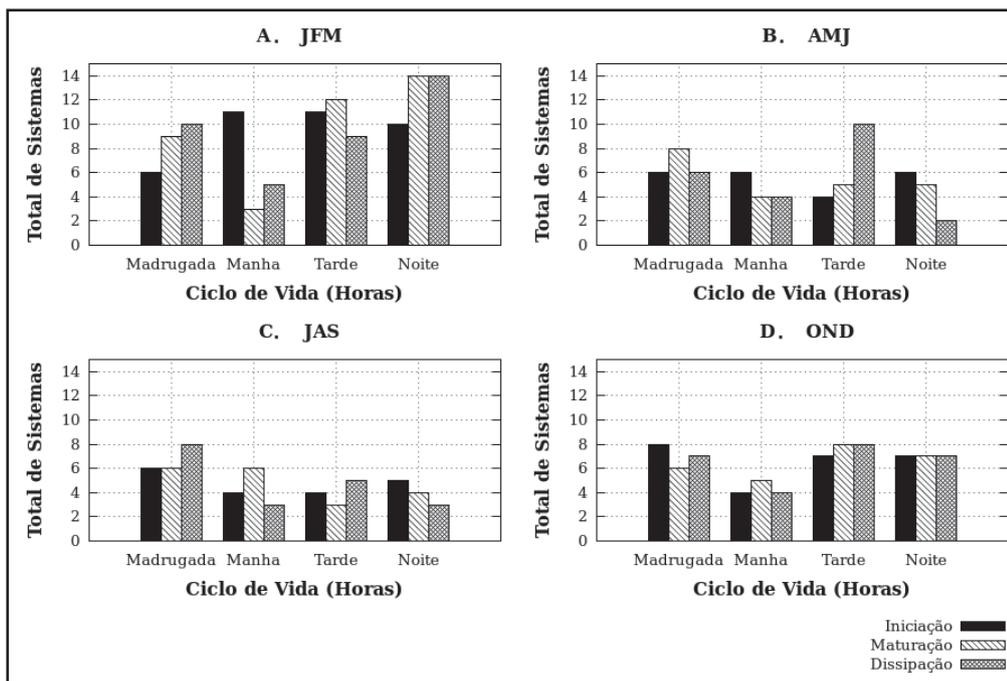


Figura 3 Distribuição dos horários preferenciais de iniciação (azul), maturações (verde) e dissipação (vermelho) dos SCM que afetaram o RS em 2006. (A) JFM, (B) AMJ, (C) JAS e (D) OND.

Observam-se diferenças sazonais nos horários de iniciação, maturações e dissipações dos SCM_{RS} ao se analisar os quatro períodos do ano. Isso se deve à diferença de insolação recebida em cada período do ano, ou seja, deve-se à variabilidade sazonal da insolação que é maior em JFM e OND e menor em AMJ e JAS. Isso faz com que os SCM_{RS} nos períodos frios iniciem seu ciclo de vida mais tarde do que aqueles observados nos períodos quentes, onde a atividade convectiva é favorecida (Mattos, 2009).

A iniciação ao entardecer e primeiras horas da noite (Silva Dias, 1987) indica que é necessário um mecanismo de modulação diurna para acionar esse gatilho desde que a atmosfera esteja condicionalmente estável do ponto de vista termodinâmico. Portanto, o aquecimento diurno parece ser um importante fator na formação dos SCM na região subtropical continental da AS (Sakamoto, 2009). Além disso, conforme mencionado por Velasco & Fritsch (1987) a convergência noturna no vale do Rio Paraná, fortalecida pelos ventos catabáticos dos Andes pode explicar a gênese dos SCM no período da noite. Associado a esse fato, segundo Romatschke *et al.* (2009), o forte cisalhamento do vento com ar úmido de leste nos baixos níveis limitado por ar seco de oeste acima, estimula a forte instabilidade e favorece a convecção na região de estudo. Nesse sentido, a existência de fluxo de ar úmido em baixos níveis e ar seco acima, em combinação com aquecimento diurno e forçantes topográficas e sinóticas levam à formação de SCM que podem ocorrer em diferentes horários do dia.

Com relação à fase de maturação, segundo Siqueira (2004), os SCM sobre os subtropicais/latitudes médias adquirem suas maiores porcentagens de cobertura de nuvens do tipo CCB (nuvens frias altas frequentemente associadas com a convecção) de forma distribuída ao longo do dia, exibindo horários de maturação principalmente no final da tarde, no início da noite e durante a madrugada. Este resultado está provavelmente relacionado com a forte atividade de frentes frias nos subtropicais e latitudes médias, favorecida pela intensa instabilidade baroclínica dessa região, o que acaba estimulando a atividade convectiva em diversos horários do dia sobre aquela região (Siqueira *et al.*, 2005).

A ocorrência de maturação no período da madrugada pode ser explicada pela variação diurna e noturna do resfriamento radiativo troposférico entre áreas cobertas de nuvens e as áreas vizinhas com céu claro (Gray & Jacobson Jr., 1977). Durante a noite o resfriamento atmosférico radiativo é maior

em condições de céu claro do que em áreas com nebulosidade. Assim, a divergência em baixos níveis seria menor em áreas com nebulosidade. Randall *et al.* (1991), por sua vez, sugerem que a estabilização em decorrência da absorção de radiação solar devido às nuvens tenderia a suprimir a convecção durante a tarde comparativamente ao período da madrugada.

Os resultados obtidos neste trabalho mostram um comportamento dos horários de iniciação, maturação e dissipação dos SCM_{RS} semelhante aos encontrados por outros autores ao estudarem as características dos SCM na AS (Velasco & Fritsch, 1987; Machado *et al.*, 1998; Vila, 2004; Siqueira, 2004; Sakamoto, 2009; Durkee & Mote, 2009). Cabe lembrar que as diferenças encontradas devem-se ao fato de que os SCM analisados neste estudo são aqueles que se formaram e se mantiveram durante o seu ciclo de vida ao sul de 20°S, apresentaram tempo de vida de no mínimo 6 h, tiveram geração espontânea e dissipação normal e que atingiram a grade que cobre o RS no ano de 2006.

3.5 Regiões Preferenciais de Nascimento dos SCM_{RS}

A distribuição geográfica dos nascimentos dos SCM_{RS} em 2006 é mostrada na Figura 4. Observa-se nessa figura que em todos os períodos do ano os nascimentos dos SCM_{RS} ocorrem dentro e em torno da grade que cobre o RS, com iniciação preferencial sobre o continente.

Pode-se notar que em JFM (Figura 4A) ocorrem dois máximos relativos de atividade convectiva bem definidos localizados no noroeste da Argentina e do RS. Em AMJ (Figura 4B), a região preferencial de nascimento dos SCM desloca-se para leste e observa-se um máximo relativo de atividade convectiva, localizado no Uruguai. Já em JAS (Figura 4C) a região mais frequente de ocorrência de SCM diminui, desloca-se mais para leste e um máximo relativo de atividade convectiva, localizado ao sul do Uruguai sobre o oceano é observado. Em OND (Figura 4D), assim como em JFM, também ocorrem dois máximos relativos de atividade convectiva bem definidos, localizados no noroeste da Argentina e norte do RS. Observa-se ainda que a região mais favorável para o nascimento de SCM, neste trimestre se desloca para oeste, conforme também havia verificado Velasco & Frisch (1987).

Os máximos relativos de atividade convectiva observados em JFM e OND, no norte do RS e nordeste da Argentina, parecem indicar uma alta

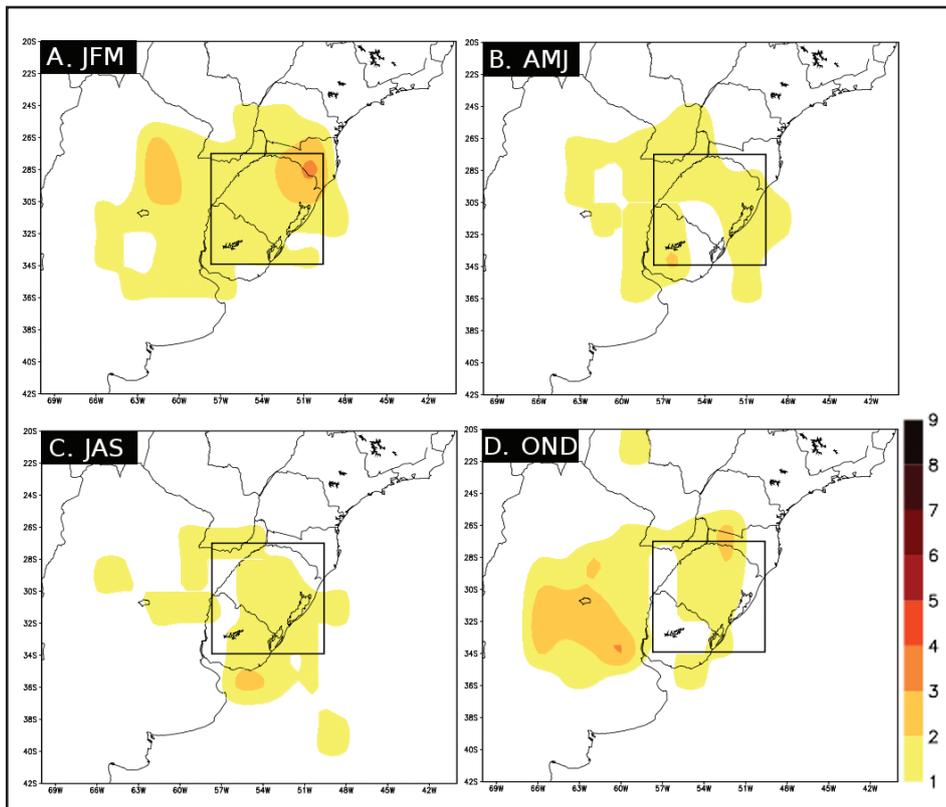


Figura 4 Distribuição geográfica sazonal dos nascimentos dos SCM que afetaram o RS em 2006. (A) JFM, (B) AMJ, (C) JAS e (D) OND.

relação entre a ocorrência de nascimentos de SCM e a topografia, que pode estar relacionado aos efeitos térmicos e orográficos que geram este tipo de sistemas. Em geral, o tipo de convecção que se produz nessas regiões é do tipo local e de pequena escala (Vila, 2004). Segundo Velasco & Fritsch, (1987) fatores de pequena escala como topografia e fontes de calor localizadas podem exercer importante papel para a definição da região mais provável de formação dos SCM.

Por outro lado, a frequência mensal e a distribuição espacial dos SCM sobre a AS são bem conectados a certos processos sinóticos e de mesoescala favoráveis ao seu desenvolvimento. Especificamente, os padrões de frequência e concentração dos SCM no Paraguai, norte da Argentina e sul do Brasil durante o verão são indicativos de estabilidade estática mínima comum nesta época do ano (Durkee & Mote, 2009). Também, o forte aquecimento diurno que ocorre sobre as regiões mais elevadas dos Andes pode gerar ondas de gravidade que se propagam em direção ao continente, estimulando a convecção nas regiões preferências de iniciação dos SCM (Mapes *et al.*, 2003).

Outro fator que justifica a ocorrência dos máximos de atividade convectiva em JFM e OND no

norte/nordeste da Argentina está relacionado com a região de saída o JBN onde há umidade e calor para a geração da convecção. No norte do RS a formação dos SCM pode ter como possíveis causadores a convergência noturna no vale do rio Paraná, o fluxo de umidade oceânica associado à circulação da AAS, as frentes frias e a Zona de Convergência do Atlântico Sul-ZCAS (Sakamoto, 2009).

Por outro lado, nos períodos frios (AMJ e JAS) os máximos relativos de atividade convectiva, mostram que a região favorável para ocorrência de SCM_{RS} fica ao sul da grade que cobre o RS sobre o Uruguai e o oceano, podendo estar associados à passagem mais frequente de frentes frias sobre a região nestes períodos. De acordo com Siqueira (2004) a propagação e a intensificação da convecção ocorrem ao longo das frentes frias que atingem a região, sendo que nos períodos frios (AMJ e JAS) elas contribuem fortemente para intensificação da convecção e, portanto para o desenvolvimento de SCM.

Outra característica observada foi a predominância de iniciações dos SCM_{RS} sobre o continente em comparação com o oceano, conforme pode ser observado na Figura 4. Esse comportamento também foi observado por Sakamoto (2009) ao analisar os SCM de longa duração (maior do que

6h) observados entre 15/12/2002 e 15/02/2003 durante o Experimento SALLJEX- South American Low-Level Jet Experiment. Segundo Doswell & Bosart (2001), essa predominância de SCM sobre o continente pode ser consequência da baixa capacidade térmica do solo em relação à água, que faz com que a temperatura sobre o continente se eleve mais rapidamente do que sobre o oceano, favorecendo o desenvolvimento de maior instabilidade potencial sobre a região continental. Além disso, como a superfície continental é mais irregular do que a oceânica, a topografia e o maior aquecimento podem ser gatilhos para a formação de maior número de SCM sobre o continente.

3.6 Trajetória Média Preferencial dos SCM_{RS}

A trajetória média preferencial seguida pelos SCM_{RS} em 2006 é mostrada na Figura 5. Pode-se notar que em todos os trimestres a trajetória média preferencial dos SCM_{RS} é de oeste para leste, semelhante à circulação de grande escala (Romatschke & Houze, 2010).

É possível observar que em JFM (linha preta) e AMJ (linha vermelha) as etapas de iniciação, maturação e dissipação dos SCM_{RS} ocorreram na média dentro da região de estudo sobre o continente. Nestes trimestres, na média a iniciação ocorreu no oeste do RS; a maturação ocorreu no sul e centro do RS e a dissipação ocorreu no leste e nordeste do RS, respectivamente. Em JAS (linha azul) as etapas de iniciação e maturação dos SCM_{RS} ocorreram na média dentro da região de estudo, sobre o continente a sudoeste do RS e sobre o oceano a sudeste da grade que cobre o RS, respectivamente. A etapa de dissipação ocorreu na média fora da área de estudo sobre o oceano a leste da grade que cobre o RS. Em OND (linha verde) as etapas de iniciação e dissipação dos SCM_{RS} ocorreram fora da região de estudo, sobre o continente a oeste da grade que cobre o RS e sobre o oceano a sudeste da grade que cobre o RS, respectivamente. A etapa de maturação ocorreu na média dentro da região de estudo no sudoeste do RS.

Cabe ressaltar que diferenças nas trajetórias de SCM estudados por diferentes autores podem ocorrer devido aos diferentes tamanhos de SCM selecionados, uma vez que a interação dos SCM com a circulação de grande escala difere em função do tamanho dos mesmos (Machado *et al.*, 1998). Apesar dessa ressalva, os resultados obtidos neste trabalho vão ao encontro daqueles encontrados

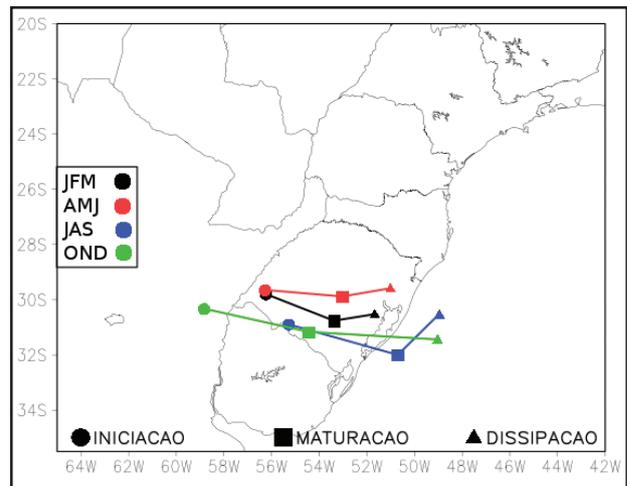


Figura 5 Trajetórias médias preferenciais sazonais dos SCM cuja gênese ocorreu abaixo de 20°S e que atingiram o RS em 2006.

por diversos autores (Velasco & Fritsch, 1987; Machado *et al.*, 1998; Vila, 2004; Siqueira, 2004; Sakamoto, 2009; Durkee & Mote, 2009, por exemplo), que mostraram que os SCM subtropicais sul-americanos tendem a se deslocar para leste desde sua gênese até sua dissipação. Isso ocorre porque o movimento do SCM é a soma de uma componente advectiva, dada pelo deslocamento médio das células convectivas, e uma componente de propagação, definida pela taxa de formação e localização de novas células (Bluestein & Jain, 1985). Quanto às células convectivas individuais imersas nos SCM, estas tendem a se mover a favor do fluxo médio na camada de nuvens. Contudo, a estrutura em mesoescala do SCM tende a se mover em direção oposta ao fluxo em baixos níveis que fornece ar quente e úmido (Corfidi *et al.*, 1996; Fritsch & Forbes, 2001). Além disso, segundo Romatschke & Houze (2010), o movimento para leste dos SCM é esperado em função dos fortes ventos de oeste que são observados em altitude na região.

Outro estudo que corrobora os resultados deste trabalho é o de Siqueira & Marques (2008), no qual foi analisado o deslocamento dos SCM sobre o sudeste do Brasil, no período de janeiro de 1998 a dezembro de 2000. Foi observado neste estudo que as trajetórias desenvolvidas pelos SCM foram predominantemente, do continente para o oceano, modulados por frentes frias e forçantes associados a contrastes térmicos e à estratificação atmosférica em grande escala. Um pequeno número de SCM desenvolveu trajetória inversa, isto é, do oceano para o continente, aparentemente modulados por influências termodinâmicas da região de estudo,

como a brisa marítima. Estes autores também observaram que a circulação predominantemente zonal acima de 500 hPa favorece o deslocamento zonal observado na maioria dos SCM, isso por que a influência dinâmica é mais forte do que influência termodinâmica na região de estudo.

4 Conclusões

As características físicas sazonais dos SCM cuja gênese e manutenção ocorreram ao sul de 20°S, que apresentaram ciclo de vida de no mínimo 6 h, que tiveram nascimento espontâneo e dissipação normal e que afetaram o RS (SCM_{RS}) em 2006, foram analisadas utilizando a técnica ForTrACC.

Pode-se concluir para o período de estudo que: i) os SCM_{RS} apresentaram maior número de ocorrência no período mais quente do ano; ii) a maioria dos SCM_{RS} apresentou tempo de vida entre 6 e 12h; iii) SCM_{RS} com maior tempo de vida cobriram áreas maiores; iv) os maiores e mais longos SCM_{RS} foram observados em JAS e OND; v) as 3 fases do ciclo de vida dos SCM_{RS} ocorreram de forma distribuída ao longo do dia; vi) os nascimentos dos SCM_{RS} ocorreram preferencialmente sobre o continente; vii) a trajetória média preferencial dos SCM_{RS} tende a ser de oeste para leste.

A variabilidade sazonal das características dos SCM_{RS}, bem como os mecanismos que podem contribuir para essas características, foi discutida neste trabalho, com a finalidade de se obter um melhor entendimento da atuação e das características deste tipo de sistema sobre o RS. Neste contexto, uma vez que os SCM influenciam de forma significativa as condições do tempo no RS, produzindo impactos em diversos setores da sociedade, sendo muitas vezes responsáveis por grandes prejuízos econômicos e também pela perda de vidas, os resultados obtidos neste estudo são de extrema importância, pois permitirão a utilização, por parte dos órgãos competentes, de medidas que reduzam a vulnerabilidade aos danos causados pelas condições de tempo severo geradas por tais sistemas.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

6 Referências

- Ashley, W.S.; Mote, T.L.; Dixon, P.G.; Trotter, S.L.; Powell, E.J.; Durkee, J.D. & Grundstein, A.J. 2003. Distribution of Mesoscale Convective Complex Rainfall in the United States. *Monthly Weather Review*, 131: 3003-3017.
- Bluestein, H.B. & Jain, M.H. 1985. Formation of Mesoscale Lines of Precipitation: Severe Squall Lines in Oklahoma during the spring. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 4: 1711-1732.
- Cavalcanti, I.F.A.; Ferreira, N.J.; Silva, M.G.A.J. & Silva Dias, M.A.F. *Tempo e Clima no Brasil*, São Paulo: Oficina de textos, 2009, 463 p.
- Corfidi, S.F.; Meritt, J.H. & Fritsch, J.M. 1996. Predicting the movement of mesoscale convective complexes. *Weather and Forecasting*, 11: 41-46.
- Doswell, C.A. & Bosart, L. F. 2001. Extratropical Synoptic-Scale Processes and Severe Convection. *Meteorological Monographs*, 28 (50): 27-69.
- Durkee, J.D. & Mote, T.L. 2009. A climatology of warm-season mesoscale convective complexes in subtropical South America. *International Journal of Climatology*. Disponível em: <<http://www3.interscience.wiley.com/journal/122267214/abstract>>. Acesso em: 24 fev. 2013.
- Fritsch, J.M. & Forbes, G.S. 2001. Mesoscale Convective Systems: Severe Convective Storms. *Meteorology Monographs*, 50: 323-356.
- Gray, W.M. & Jacobson Jr., R.W. 1977. Diurnal Variation of Deep Cumulus Convection. *Monthly Weather Review*, 105: 1171-1188.
- Houze, R.A., 1993. Mesoscale convective systems. In: HOUZE, R.A. (ed.). *Cloud dynamics*. Academic Press, Inc., v. 53, p. 334-404.
- Laing, A.G. & Fritsch, J.M. 1997. The global population of mesoscale convective complexes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123: 2254-2263.
- 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. *Journal of Geophysical Research*, 107 (D20): 8054.
- Machado, L.A.T. & Rossow, W.B., 1993. Structural characteristics and radiative of tropical cloud clusters. *Monthly Weather Review*, 121 (12): 3234-3260.
- Machado, L.A.T. & Duvel, J.P. 1998. Propagação meridional da convecção na América do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10, São José dos Campos-SP, 1998, *Anais*. São José dos Campos: INPE, 1998, CD-ROM.
- Machado, L.A.T.; Rossow, W.B.; Guedes, R.L. & Walker, A. W. 1998. Life cycle variations of mesoscale convective systems over the Americas. *Monthly Weather Review*, 126:1630-1654.
- Machado, L.A.T. & Laurent, H. 2004. The convective system area expansion over Amazonia and its relationships with convective system life duration and high-level wind divergence. *Monthly Weather Review*, 132 (4): 714-725.
- Maddox, R.A. 1980. An objective technique for separating macroscale and mesoscale features in Meteorological data. *Monthly Weather Review*, 108: 1108-1121.
- Mapes, B.E.; Warner, T.T. & Xu, M. 2003. Diurnal patterns of rainfall in northwestern South America. Part III: Diurnal gravity waves and nocturnal convection offshore. *Monthly Weather Review*, 131: 830-844.
- Marengo, J.A.; Soares W.R.; Saulo C. & Nicolini M. 2004.

- Climatology of the Low- Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP-NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. *Journal of Climate*, 17 (12): 2261- 2280.
- Mattos, E.V. 2009. *Relações das propriedades físicas das nuvens convectivas com as descargas elétricas*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, INPE, Dissertação de Mestrado, 244p.
- Nicolini, M.; Saulo, A.C.; Torres, J.C. & Salio, P. 2002. Enhanced precipitation over Southeastern South América related to strong low-level jet events during austral warm season. *Meteorologica, Special Issue for the South American Monsoon System*, 27: 59-69.
- Randall, D.; Harshvardan, A. & Dazlich, D.A. 1991. Diurnal Variability of the hydrologic cycle in a general circulation model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48: 40-62.
- Romatschke, U.; Medina, S.; Houze, R.A. & Rasmussen, K. 2009. Topographic and diurnal effects on tropical and subtropical convection in South America. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALPINE METEOROLOGY, 30, Rastatt-Germany, 2009. *Anais*. Rastatt: ICAM, 2009. Disponível em: <http://www.atmos.washington.edu/~ulli/RASTATT2009_Romatschke_et_al.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2012.
- Romatschke, U. & Houze, R.A. 2010. Extreme Summer Convection in South America. *Journal of Climate*, 23: 3761–3791.
- Sakamoto, M.S. 2009. *Sistemas Convectivos de Mesoescala observados na Região Subtropical da América do Sul durante o SALLJEX*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 243p.
- Silva Dias, M.A.F. 1987. Sistemas de mesoescala e previsão de tempo a curto prazo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2: 133-150.
- Siqueira, J.R. 2004. *Variabilidade interdiurna da convecção na América do Sul: a propagação meridional da convecção*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, INPE, Dissertação de Mestrado, 186 p.
- Siqueira, J.R. & Machado, L.A.T. 2004. Influence of the Frontal Systems on the Day-to- Day Convection Variability over South America. *Journal of Climate*, 17: 1754- 1766.
- Siqueira, J.R.; Rossow, W.B.; Machado, L.A.T.& Pearl, C. 2005. Structural Characteristics of Convective Systems over South America Related to Cold-Frontal Incursions. *Monthly Weather Review*, 133: 1045-1064.
- Siqueira, J. R. & Marques, V. S. 2008. Occurrence frequencies and trajectories of mesoscale convective systems over southeast Brazil related to cold frontal and non-frontal incursions. *Australian Weather Review*, 57: 345-357.
- Velasco, I. & Fritsch, J.M. 1987. Mesoscale convective complexes in the Americas. *Journal Geophysical Research*, 92: 9591-9613.
- Vera, C. S. & Vighiarolo, P. K. 2000. A diagnostic study of cold-air outbreaks over South America. *Monthly Weather Review*, 128(1): 3-24.
- Vila, D.A. 2004. *Sistemas convectivos precipitantes de mesoescala sobre Sudamerica: Ciclos de vida y circulación en gran escala asociada (Rainy mesoscale convective systems over South America: Life cycle and the associated large scale environment)*. Programa de Pós-graduação em Ciências. Faculdade de Ciências Exatas e Naturais, Universidade de Buenos Aires, Tese de doutorado, 132 p.
- Vila, D.A.; Machado, L.A.T.; Laurent, H. & Velasco, I. 2008. Forecast and Tracking the Evolution of Cloud Clusters (ForTraCC) Using Satellite Infrared Imagery: Methodology and Validation. *Weather and Forecasting*, 23: 233–245.