



**Análise das Variações de Descargas Atmosféricas
e de Precipitação Geradas por um Sistema Convectivo no Sudeste Brasileiro**
Analysis of Changes in Lightning and Precipitation
Generated by a Convective System in Southeastern Brazil

Luciana Cardoso Neta¹; Carina Klug Padilha Reinke²;
Eliton Lima de Figueiredo² & Roseli Gueths Gomes²

¹Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Meteorologia

Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Av. Ildefonso Simões Lopes, 2751, 96060-290, Pelotas, RS

²Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Meteorologia/Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas,
Av. Ildefonso Simões Lopes, 2751, 96060-290, Pelotas, RS

E-mails: lneta@gmail.com; carina.padilha@gmail.com; elitonlf@gmail.com; rggomes@ufpel.edu.br

Recebido em: 10/03/2014 Aprovado em: 29/09/2014

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2014_2_89_99

Resumo

Neste trabalho são analisadas as variações, no espaço e no tempo, das descargas atmosféricas e da precipitação em superfície provocadas por um sistema convectivo ocorrido na região sudeste do Brasil em outubro de 2007. Foram utilizadas imagens do satélite GOES-10 no canal infravermelho para identificar e rastrear o sistema, dados de descargas atmosféricas detectadas pela RINDAT e de precipitação em superfície de estações automáticas também foram utilizados. Logo após sua formação, este sistema evoluiu como um sistema linear, depois se transformou em um sistema quase circular para, após nova transição, entrar em processo de dissipação. Cada uma das fases de transição apresentou características únicas na evolução das descargas atmosféricas e da precipitação em superfície. A maioria das descargas atmosféricas foi negativa, com tendência a se posicionarem de maneira agrupada, enquanto que as positivas ocorreram de maneira mais espalhada.

Palavras-chave: tempestade, convecção profunda, descarga atmosférica, precipitação

Abstract

This work analyzes changes, in space and time, of lightning and surface precipitation generated by a convective system occurred in Southeastern Brazil on October 2007. Satellite imagery from the GOES-10 infrared were used to identify and track the system, cloud-to-ground lightning data from RINDAT network and surface precipitation from automatic stations were also used. After its formation, this system evolved as a linear system, then turned into a quasi circular system to, after a new transition, get into the dissipation process. Each transition phase presented unique features in the evolution of lightning and precipitation. Most cloud-to-ground lightning were negative, tending to be grouped as a cluster, while the positive occurred in a more scattered way.

Keywords: storm, deep convection, lightning, precipitation

1 Introdução

Os sistemas convectivos de mesoescala, ou simplesmente sistemas convectivos, são formados por combinações entre tempestades unicelulares, multicelulares e/ou supercelulares (Lin, 2007). Estes sistemas podem apresentar diversos formatos (desde lineares até circulares), tempos de vida (várias horas) e dimensões horizontais (da ordem da dezena até a centena de quilômetros) (Cotton & Anthes, 1989). De uma maneira bem simplificada, pode ser dito que eles passam pelos estágios de formação, maturação e dissipação. Cada um destes estágios apresenta características diferentes nas correntes ascendentes e descendentes de ar, precipitação e ventos em superfície (Lin, 2007). Normalmente, as descargas elétricas atmosféricas ocorrem em associação a estes sistemas, porque para haver a geração e separação de cargas dentro das nuvens convectivas, é necessária a existência de fortes correntes ascendentes (da ordem de 10m/s) e presença de gelo nas camadas mais altas (Dotzek *et al.*, 2005). Assim, este favorecimento de geração e acúmulo de cargas elétricas (positivas e negativas) em partes localizadas dentro das nuvens, gera um campo elétrico. Eventualmente, se a intensidade deste campo elétrico for superior à rigidez dielétrica do ar, ocorre uma faísca – é a descarga atmosférica (Rakov & Uman, 2003).

A formação de sistemas convectivos na região Sudeste do Brasil é frequente ao longo do ano, mas acentua-se nos meses de primavera e verão (Minuzzi *et al.*, 2010). Este aumento da convecção foi colocado em evidência por diversos autores (Cecil *et al.*, 2005, Zipser *et al.*, 2006, Romatschke & Houze, 2010, 2013) com dados obtidos pelo satélite TRMM (*Tropical Rainfall Mission Measuring*). Cecil *et al.* (2005) mostraram que a ocorrência de descargas atmosféricas e de precipitação é bastante elevada no Brasil, comparando-se com outras regiões do globo, principalmente nas regiões sul e sudeste. Zipser *et al.* (2006) mostraram que esta elevação se torna mais acentuada nos meses quentes, de outubro a março. Romatschke & Houze (2013) detalharam características das precipitações de verão sobre a América do Sul bem como do tipo de sistema meteorológico produtor das mesmas. Na região onde o Sudeste do Brasil se insere, os autores encontraram que a maioria da precipitação está associada a sistemas convectivos, cuja formação é modulada, principalmente, pelo aquecimento solar e pela orografia.

De acordo com a literatura (Dotzek *et al.*, 2005; Rakov & Uman, 2003; Lang & Rutledge,

2002), as cargas negativas normalmente estão localizadas perto da base da nuvem, em regiões com temperaturas entre -10°C e -20°C , enquanto que as cargas positivas são onde as temperaturas estão próximas a -40°C , ou seja, em níveis mais elevados dentro das nuvens. Este é o chamado modelo dipolo clássico. Entretanto, pode haver uma inversão no posicionamento destas cargas dentro da nuvem, gerando o chamado modelo dipolo invertido. Dado que somente os íons negativos se deslocam, se a descarga elétrica ocorrer da nuvem para o solo tem-se uma descarga do tipo nuvem-solo ou descarga negativa. Se, ao contrário, a descarga ocorrer do solo para a nuvem, tem-se uma descarga atmosférica do tipo solo-nuvem ou descarga positiva. As descargas que ocorrem dentro da própria nuvem são chamadas de descargas intranuvem.

Diversos autores colocaram em evidência o predomínio de descargas negativas em sistemas convectivos (Goodman & MacGorman, 1986; Rutledge *et al.*, 1990; MacGorman & Burgess, 1994; Tessendorf *et al.*, 2007), principalmente nos estágios de desenvolvimento. As descargas positivas tenderam a ocorrer em maior quantidade nos períodos de dissipação destes sistemas e nas regiões estratiformes. Na maioria dos CCM (Complexos Convectivos de Mesoescala) analisados por Goodman & MacGorman (1986), as descargas negativas ocorreram nas áreas com menor temperatura de topo nas imagens de satélite. Orville *et al.* (1987), Goodman *et al.* (1988) e Dotzek *et al.* (2005) também encontraram maior atividade elétrica nas regiões com topos mais frios de nuvens convectivas. Nas linhas de instabilidade analisadas por Parker *et al.* (2001) e Rutledge & MacGorman (1988), as descargas negativas se localizaram preferencialmente nas regiões com convecção profunda, enquanto que as positivas ocorreram na parte estratiforme.

Estudos relacionando a quantidade de descargas detectadas com variações de área dos sistemas convectivos, também foram realizados por vários autores. Makowski *et al.* (2013) analisaram 30 sistemas convectivos, com dados de descargas intranuvem e nuvem-solo, e verificaram que, na maioria destes, a quantidade máxima de descargas/minuto ocorreu entre 1 e 2 horas antes da área máxima dos sistemas ser atingida. Parker *et al.* (2001), com dados de descargas nuvem-solo, também verificaram que o máximo de descargas ocorreu antes do máximo tamanho dos sistemas convectivos analisados. Tadesse & Anagnostou (2009) e Mattos & Machado (2011) encontraram que a maior ocorrência de

descargas nos estágios iniciais de desenvolvimento dos sistemas analisados estava associada com a intensificação da atividade convectiva, favorecida pelas fortes correntes ascendentes presentes.

Além de descargas atmosféricas, sistemas convectivos também podem causar precipitação em superfície. Gungl & Krider (2006) fizeram este tipo de estudo para nove sistemas isolados, Holle *et al.* (1994) para vinte, Peipgrass *et al.* (1982) para dois, Kempf & Krider (2003) para um, Lang & Rutledge (2002) para onze, dentre outros trabalhos. Comparando os resultados encontrados por estes vários autores, há muita disparidade entre a quantidade de precipitação e a de descargas produzidas pelos sistemas analisados, inclusive para aqueles estudados com igual base experimental, observados na mesma região geográfica e época do ano. Entretanto, é importante conhecer os diferentes modelos de ocorrência de descargas atmosféricas e de precipitação em sistemas convectivos, porque variações no tempo e no espaço das descargas poderiam ser usadas como indicadores quantitativos da precipitação.

Para o Brasil, mais especificamente para a região Sudeste, alguns autores realizaram estudos envolvendo diferentes aspectos relacionados à ocorrência das descargas, precipitação e sistemas convectivos. Machado *et al.* (2009) e Zepka *et al.* (2013) propuseram métodos de previsão de descargas atmosféricas baseados em imagens de satélite e em modelagem atmosférica, respectivamente. Mattos & Machado (2011) realizaram um estudo sobre a ocorrência de descargas e formação de nuvens convectivas. Foi observada uma grande incidência de descargas atmosféricas devido à formação de célula convectiva (ou sistema convectivo) causado pela incursão de sistemas frontais ou de brisas. Em algumas cidades do estado, efeitos orográficos e de urbanização potencializaram os valores de descargas encontrados. Cardoso Neta & Gomes (2013) analisaram um sistema convectivo ocorrido no estado de Minas Gerais que provocou mais de 400 mm de precipitação ao longo das 15 horas de duração. A maior parte desta precipitação (80%) ocorreu entre a maturação e a dissipação do sistema quando, ao contrário, a atividade elétrica do sistema estava praticamente inexistente.

Desafios adicionais, associados a processos evolutivos diferenciados dos sistemas convectivos, aumentam a complexidade de estudos envolvendo descargas atmosféricas e precipitação. Keighton *et al.* (1991) analisaram uma tempestade que se

formou em Oklahoma, em maio de 1981. Após sua formação como tempestade multicelular, se transformou em uma tempestade supercelular e, depois, em uma linha de instabilidade. Durante o tempo em que aquele sistema foi monitorado ocorreram duas transições, ambas com formação tornádica. A atividade elétrica foi avaliada com a superposição das descargas negativas sobre imagens de radar. Os autores mostraram que a geração das descargas foi mais eficiente nos níveis médios, com correlação positiva entre a taxa de descargas e a área das células convectivas. Assim, quanto maior a célula, maior a região com geração de cargas e, portanto, mais eficiente o processo de separação das mesmas devido às correntes ascendentes. Weiss *et al.* (2008) também analisaram uma tempestade multicelular com grande complexidade na estrutura elétrica. Os autores identificaram quatro setores que apresentaram diferentes distribuições horizontais e verticais das cargas elétricas durante sua evolução. Estes setores foram coincidentes com aqueles de maiores valores de refletividade. Estudos sobre mudanças nas distribuições espaciais e temporais das descargas atmosféricas em sistemas convectivos ocorridos no Brasil são poucos. Esta é a abordagem pretendida neste trabalho.

Durante o mês de outubro de 2007, vários sistemas convectivos se formaram na região Sudeste devido a processos de convecção local, ou seja, sem associação a sistemas meteorológicos de grande escala (Cardoso Neta, 2013). Dentre estes, o sistema em estudo se destacou não pelos maiores valores de descargas ou de precipitação provocados, mas sim, pelos períodos de transformação nos quais, tanto as taxas de descargas quanto a precipitação em superfície apresentaram evoluções peculiares.

Assim, o objetivo principal deste trabalho é o de analisar as características das descargas elétricas atmosféricas e da precipitação em superfície associadas ao sistema convectivo observado no final do mês de outubro de 2007, na região sudeste. O início deste sistema ocorreu perto de 16:00UTC do dia 30, na divisa entre os estados de São Paulo e Minas Gerais, e sua dissipação ocorreu aproximadamente às 5:00UTC do dia 31, no Triângulo Mineiro.

2 Materiais e Métodos

2.1 Rede de Detecção de Descargas Elétricas Atmosféricas

Para estudar o comportamento espacial e temporal das descargas atmosféricas geradas pelo

sistema em estudo, foram utilizados dados da RINDAT (Rede Integrada Nacional de Detecção de Descargas Atmosféricas). Esta rede é composta por 24 sensores, cujas localizações são mostradas na Figura 1. Esta figura também mostra o modelo de eficiência de detecção das descargas atmosféricas, desenvolvido por Naccarato & Pinto Jr. (2008). O sistema convectivo a ser analisado neste trabalho ocorreu onde a eficiência de detecção é igual ou superior a 90%.

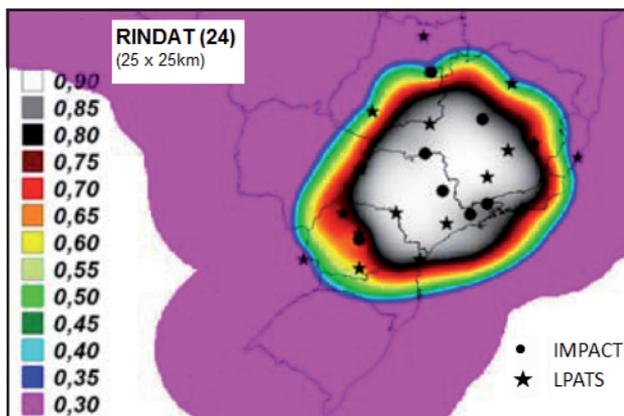


Figura 1 Localização dos 24 sensores da RINDAT e modelo de eficiência de detecção (Naccarato & Pinto Jr., 2008).

Os sensores da RINDAT detectam descargas que atingem o solo, para as quais são geradas informações de localização geográfica (latitude e longitude), tempo de ocorrência (hora, minuto, segundo e milissegundo), polaridade (positiva ou negativa) e intensidade da corrente elétrica (kA, quiloAmpere).

2.2 Dados de Estações Meteorológicas de Superfície

Dados de estações automáticas meteorológicas de superfície, vinculadas ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) foram utilizados para avaliar a precipitação provocada pelo sistema convectivo analisado. Estes dados são registrados minuto a minuto e transferidos automaticamente, a cada hora, até uma central de processamento. Foram selecionadas 8 estações localizadas no estado de Minas Gerais para o estudo da precipitação associada ao evento em análise.

2.3 Imagens de Satélite Geoestacionário

Imagens de satélite geoestacionário da série GOES (*Geostationary Operational Environmen-*

tal Satellite), realçadas no canal infravermelho, foram utilizadas para a identificação do sistema convectivo, a partir do valor de temperatura de brilho T_R do topo das nuvens. Na literatura não há um valor específico a ser utilizado, mas precisa ser escolhido de maneira a assegurar que a parcela de ar encontra-se, pelo menos, na média troposfera (em torno de 5 km de altura), pois esta condição indica a existência de correntes ascendentes fortes que, por sua vez, são indispensáveis para a formação das tempestades. Para a América do Sul, Machado *et al.* (1998) utilizaram dois limiares, um para identificar os sistemas convectivos e outro para identificar áreas de convecção profunda, observadas no interior dos sistemas convectivos.

Neste trabalho, para a identificação dos sistemas convectivos foi utilizado o limiar $T_R < -30^\circ\text{C}$, que indica topo das nuvens em torno de 8 a 9 km de altura (Machado *et al.*, 1998). Para identificar as áreas com convecção profunda, foi utilizado o limiar $T_R < -50^\circ\text{C}$ que indica topo das nuvens em torno de 12 a 13 km de altura. As imagens utilizadas foram obtidas junto ao Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE, <http://satellite.cptec.inpe.br/home/>) cuja escala de cores do realce inicia no valor de -30°C e segue até -80°C , com incrementos de -10°C . Estas imagens têm resolução de 4 km e disponibilidade temporal de 15 minutos. Eventualmente, podem ocorrer falhas de 30 minutos até algumas horas.

2.3 Metodologia

O procedimento adotado para acompanhamento do sistema convectivo (desde sua formação até seu término) e das descargas geradas por ele foi o seguinte:

- inicialmente, foi separada a sequência de imagens de satélite nas quais o sistema convectivo foi identificado, desde sua formação até seu término. Sobre estas imagens, foram sobrepostas todas as descargas atmosféricas detectadas pela RINDAT durante 10 minutos (5 minutos antes até 5 minutos depois do horário de cada imagem).

b) Em seguida, o sistema convectivo foi colocado em evidência por uma área retangular, definida imagem por imagem, em função de sua posição e de seu tamanho.

c) Foram, então, armazenadas as seguintes informações: tempo, posição (latitude e longitude) e polaridade (negativa ou positiva) de cada descarga detectada na área retangular.

d) Nos horários em que não havia imagens de satélite disponíveis, as descargas foram dispostas sobre uma imagem artificial e as descargas associadas ao sistema foram distinguidas das demais usando as coordenadas da área retangular definida na imagem anterior. O intervalo de tempo máximo admitido para o preenchimento artificial entre imagens de satélite reais foi de três horas, como utilizado por Machado *et al.* (1998) e Carvalho & Jones (2001). Como o intervalo de tempo entre imagens de satélite sucessivas foi de 15 minutos, no máximo, foi admitida a composição de 12 imagens artificiais consecutivas. No caso do sistema convectivo em estudo, um total de 15 imagens artificiais foram compostas das quais 8 foram consecutivas. Estas foram no período de dissipação, já próximo ao término do sistema (nos horários entre 2:30 e 4:15UTC, inclusive).

e) Para a obtenção das distribuições temporal e espacial da precipitação em superfície produzida pelo sistema, as coordenadas da área retangular (definidas a partir das imagens de satélite) foram utilizadas para fazer a correspondência entre a localização do sistema relativamente às das estações automáticas, hora por hora. Com isto, ficou assegurado que determinado valor de precipitação foi devido ao sistema convectivo em estudo.

3 Resultados e Discussões

A sequência de imagens de satélite que mostra a evolução do sistema convectivo em estudo, com a sobreposição das descargas, é mostrada na Figura 2. Nesta figura, os pontos em verde indicam a localização das descargas negativas e os pontos em vermelho, a das descargas positivas. Com duração total de aproximadamente de 13 horas, o

desenvolvimento deste sistema começou com a formação de várias células convectivas alinhadas, constituindo um sistema linear (Figura 2A). Este aspecto linear durou cerca de 1 hora, entre 16:00 e 17:00UTC, período no qual houve aumento significativo tanto da área da nebulosidade quanto da intensidade da atividade convectiva, principalmente na metade sul (Figura 2B). A partir de então, o sistema passou por transformações e se fundiu com outros sistemas menores. Este período de mudanças durou cerca de 2 horas, entre 17:00 e 19:00UTC. Perto de 18:00UTC (Figura 2C), ocorreu o número máximo de descargas atmosféricas detectadas/10 minutos (223). Destas mudanças, resultou um sistema quase circular (Figura 2D), que assim permaneceu entre 19:00 e 20:00UTC, quando houve uma diminuição na quantidade de descargas detectadas, apesar da convecção ainda apresentar caráter profundo (em cerca de 75% da nebulosidade a $T_R < -50^\circ\text{C}$ na imagem) e aumento da área. Makowski *et al.* (2013) e Parker *et al.* (2001) também verificaram, para os sistemas convectivos analisados, que a quantidade máxima de descargas ocorreu antes da área máxima.

Entre 20:00 e 22:00UTC, o sistema passou por mais um período de mudanças. Progressivamente, este foi perdendo o seu aspecto quase circular e a intensidade da atividade convectiva, principalmente na sua metade sul, onde não havia mais descargas detectadas. As 102 descargas detectadas/10 minutos, perto de 21:15UTC, foram na metade norte (Figura 2E). As descargas positivas ocorreram de maneira espalhada, enquanto que as descargas negativas ocorreram de maneira mais agrupada, mas sempre onde a convecção tinha caráter profundo. O posicionamento preferencial das descargas negativas nas regiões com convecção profunda também foi encontrado nos Complexos Convectivos de Mesoescala analisados por Goodman & MacGorman (1986) e nas Linhas de Instabilidade estudadas por Parker *et al.* (2001) e Rutledge & MacGorman (1988). A diminuição na quantidade de descargas detectadas foi mais acentuada a partir de 23:00UTC (Figura 2F), quando ainda faltavam 6 horas para a dissipação total deste sistema. A última descarga provocada por este sistema ocorreu perto de 3:30UTC.

A descrição feita anteriormente, baseada na Figura 2, é complementada com os resultados mostrados na Figura 3, onde são mostradas as variações temporais das descargas (negativas e positivas) e da precipitação em superfície. As partes listradas indicam os períodos de transição,

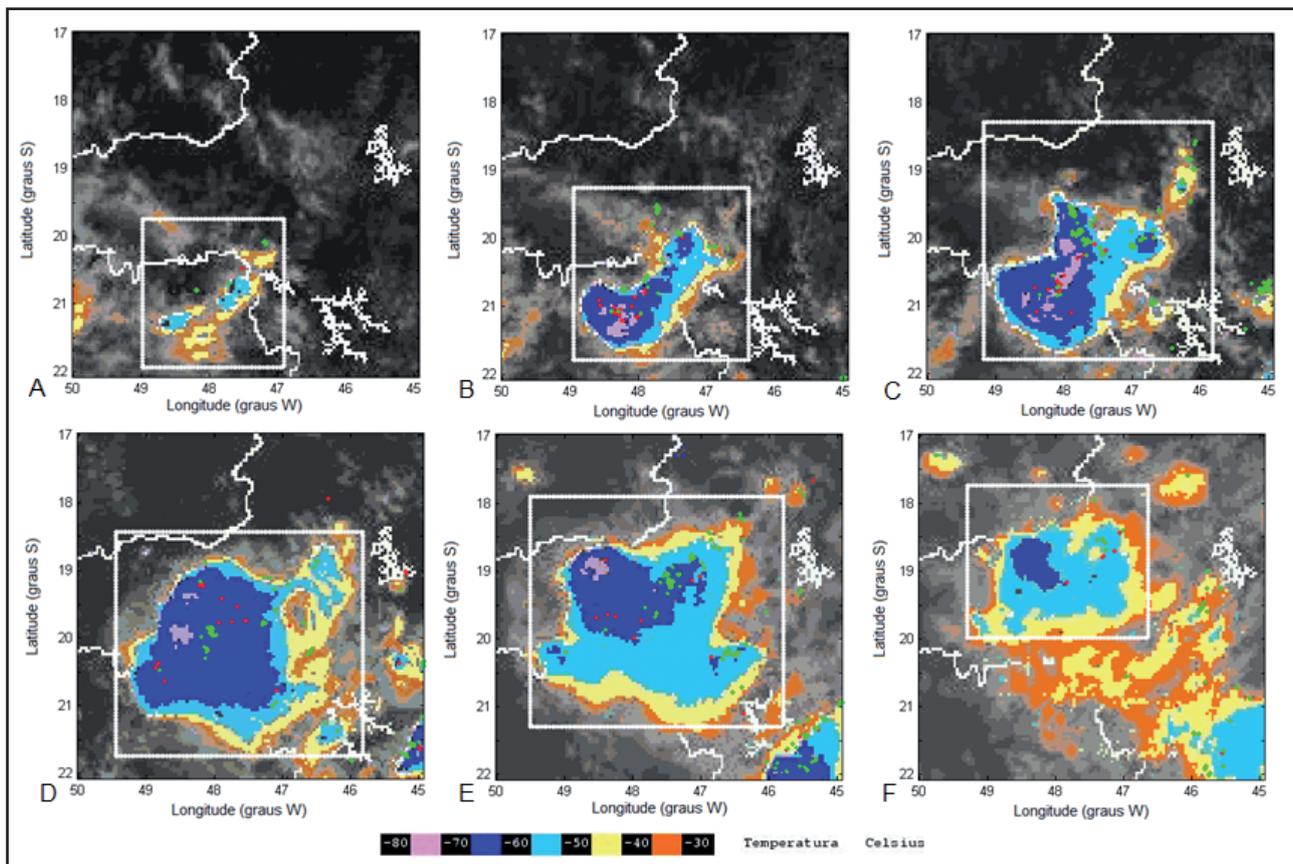


Figura 2 Sobreposição das descargas atmosféricas em fragmentos de imagens de satélite, no dia 30/10/2007. As descargas plotadas correspondem ao total detectado em 10 minutos (5 minutos antes até 5 minutos depois do horário de cada imagem). As descargas negativas estão indicadas pelos pontos em verde e, as positivas, pelos pontos em vermelho. O sistema convectivo em estudo está destacado pelos retângulos nos horários: (A) 16:15UTC com 9 descargas, (B) 17:15UTC com 67 descargas, (C) 18:00UTC com 223 descargas, (D) 19:30UTC com 107 descargas, (E) 21:15 com 102 descargas, (F) 23:00UTC com 13 descargas.

ambos com duração aproximada de 2 horas, nos quais o sistema passou pelas mudanças comentadas anteriormente. Foi visto que no primeiro período de transição, o sistema passou de sistema linear para quase circular e, no segundo, de sistema quase circular para um formato indefinido, até entrar em processo de dissipação.

As descargas detectadas nos dois períodos de transição apresentaram evoluções bem distintas (Figura 3A). No primeiro, nota-se que houve um aumento rápido e acentuado no número de descargas/10min e, no segundo, os valores foram aproximadamente constantes. Entre a formação do sistema e a ocorrência do pico de descargas (perto de 18:00UTC) transcorreram apenas 2 horas, período durante o qual, de 9 passou para 223 o número de descargas/10min. Este rápido aumento na taxa de descargas nas horas iniciais de formação ocorreu simultaneamente ao também rápido aumento de área da nebulosidade (conforme visto nas Figura

2A-2C) e nos maiores valores de precipitação acumulada (em 1 hora) em superfície (Figura 3B). No caso do sistema em estudo, o valor máximo de 223 descargas/10min ocorreu perto de 18:00UTC, o que correspondeu a mais que o dobro da taxa de descargas minutos antes.

Enquanto sistema quase circular, a precipitação acumulada em superfície e as taxas de descarga diminuíram bastante. A precipitação sequer atingiu 1 mm e as taxas de descargas diminuíram de 130 para 53 descargas/10min. Em seguida, entre 20:00 e 21:45UTC quando houve o segundo período de transição, precipitação e taxas de descargas aumentaram novamente. Estas últimas ficaram em torno 100 descargas/10min e a precipitação acumulada nestas (quase) 2 horas atingiu 11 mm. Passado este período, as taxas de descargas diminuíram significativamente e, depois de 23:00UTC, os valores não ultrapassaram 15 descargas/10min.

Durante o tempo de vida deste sistema, ocorreram mais descargas negativas que positivas. Somente nas horas finais é que as poucas descargas que ocorreram foram positivas. O predomínio de descargas negativas é comum ao longo do ciclo de vida de sistemas convectivos, como também encontraram Goodman & MacGorman (1986), MacGorman & Burgess (1994) e Tessendorf *et al.* (2007), com tendência de maior ocorrência das descargas positivas nos períodos de dissipação dos mesmos.

As distribuições espaciais das descargas e da precipitação em superfície geradas pelo sistema em estudo são mostradas na Figura 4. Inicialmente, as descargas foram acumuladas em 4 períodos consecutivos de igual duração, definidos em função do tempo total de vida do sistema, mostrado na Figura 4A. Nesta figura, as cruzes indicam a localização das descargas em cores diferentes para evidenciar a sequência cronológica de acumulação.

As descargas em amarelo indicam as que ocorreram nas primeiras 3h15min, seguidas das descargas em verde, vermelho e preto, sucessivamente, a partir das 16:00UTC do dia 30 (horário de formação do sistema em estudo) até 5:00UTC do dia 31 (término do sistema). Ainda, nesta figura foram plotadas as isolinhas de precipitação total em superfície, campo este mostrado em detalhes na Figura 4B. A elipse foi inserida para destacar as regiões que serão discutidas mais adiante no texto.

Na fase inicial, vê-se que as descargas (em amarelo, Figura 4A) estão alinhadas com a nebulosidade do sistema linear formado neste período, no nordeste do estado de São Paulo. Com a transformação do formato do sistema, de linear para quase circular, a disposição espacial das descargas também mudou, uma vez que passaram a ficar mais espalhadas dentro da área onde houve registro de precipitação. É perceptível o deslocamento do sistema na direção noroeste, pelo posicionamento

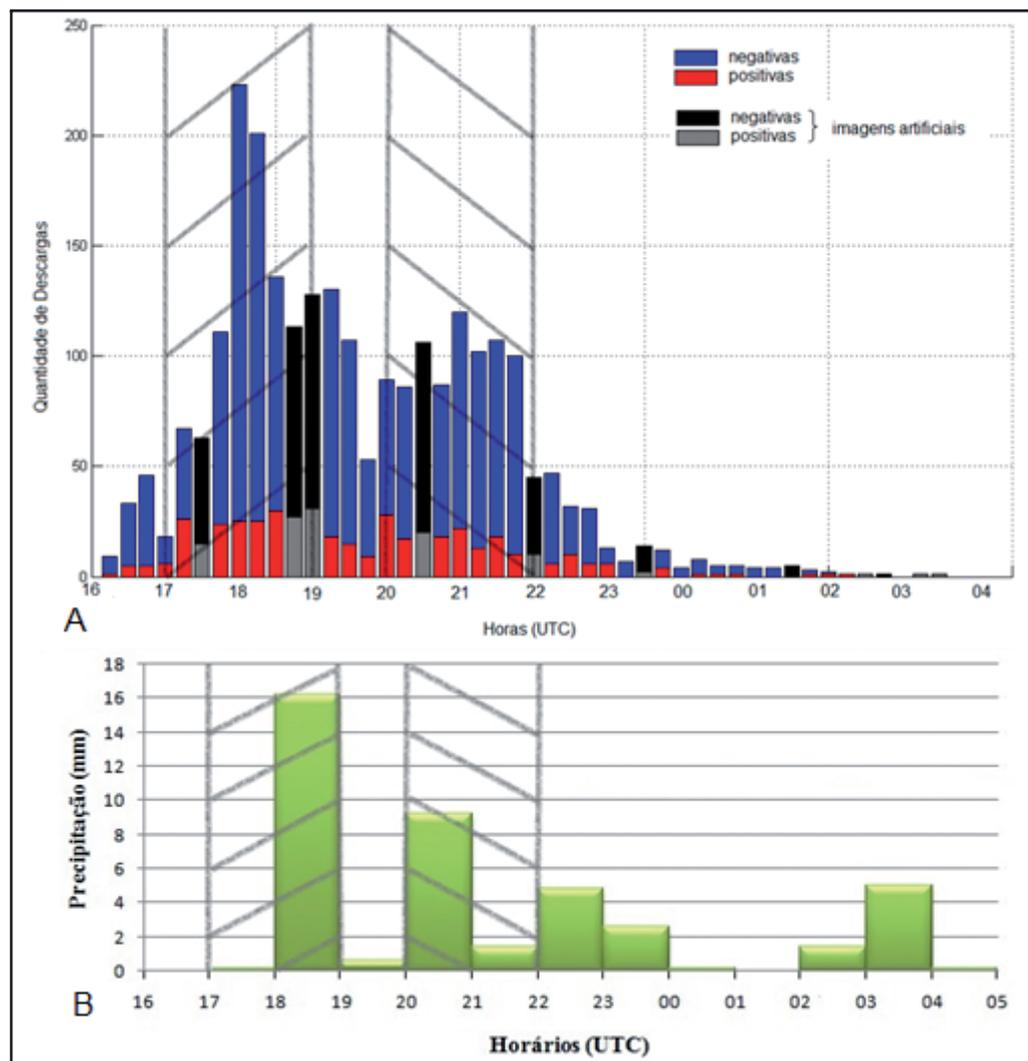


Figura 3 Distribuição temporal (A) das descargas atmosféricas (negativas e positivas) detectadas em intervalos de 10 minutos e (B) da precipitação em superfície acumulada durante uma hora, ao longo do tempo de vida do sistema convectivo ocorrido nos dias 30 e 31 de outubro de 2007. As colunas listradas indicam os períodos nos quais o sistema em estudo passou por processos de transição.

das descargas nos períodos sucessivos. Também, o ciclo de vida do sistema se manifesta na distribuição espacial, na medida em que há menor quantidade de descargas plotadas a partir de 22:30UTC no Triângulo Mineiro.

Apesar do sistema convectivo em análise e as descargas geradas por ele terem sido rastreados individualmente nas imagens de satélite, não foi possível evitar a disposição das descargas geradas por outros sistemas menores na área compreendida entre 17°S e 22°S e entre 50°W e 45°W, porque nela foram plotadas todas as descargas detectadas durante as 13 horas de vida do sistema em estudo. As descargas posicionadas no canto superior esquerdo foram geradas pelo sistema que aparece no canto superior esquerdo das imagens de satélite mostradas na Figura 2. As descargas localizadas no canto inferior direito e aquelas centradas em 19,5°S/46°W e 21,5°S/47°W foram geradas por vários sistemas pequenos, observados no sul e sudoeste de Minas Gerais, em horários diferentes durante o tempo de vida do sistema em estudo. A formação/dissipação continuada destes pequenos sistemas, desde o início do sistema em estudo, provocou o aspecto aparentemente desorganizado da distribuição das descargas nestas regiões.

A precipitação total gerada pelo sistema em estudo foi obtida com os dados das 8 estações automáticas localizadas dentro da área ocupada pela

nebulosidade do sistema, hora por hora. O campo apresentado na Figura 4B resulta da interpolação destes dados. A relação de estações, com os respectivos totais de precipitação, é mostrada na Tabela 1. O total de precipitação em superfície provocado por este sistema foi de 42 mm, dos quais 17,8 mm ocorreram na estação de Sacramento (19,88°S/47,43°W) e 13,2 mm na estação Conceição das Alagoas (19,99°S/48,15°W). A precipitação ocorrida nestas duas estações correspondeu a 74% do total de chuva associado ao sistema. Nas outras estações, menos que 4 mm foram registrados.

Nº	Nome das Estações	Precipitação (mm)
1	Sacramento	17,8
2	Conceição das Alagoas	13,2
3	Formiga	3,2
4	Dores do Indaiá	2,4
5	Araxá	2,0
6	Passos	1,6
7	Patrocínio	1,6
8	Uberlândia	0,2
	Total	42,0

Tabela 1 Relação das oito estações automáticas, localizadas no estado de Minas Gerais, com os respectivos totais de precipitação em superfície (mm), acumulados no período entre 16:00UTC do dia 30/10/2007 e 05:00UTC do dia 31/10/2007.

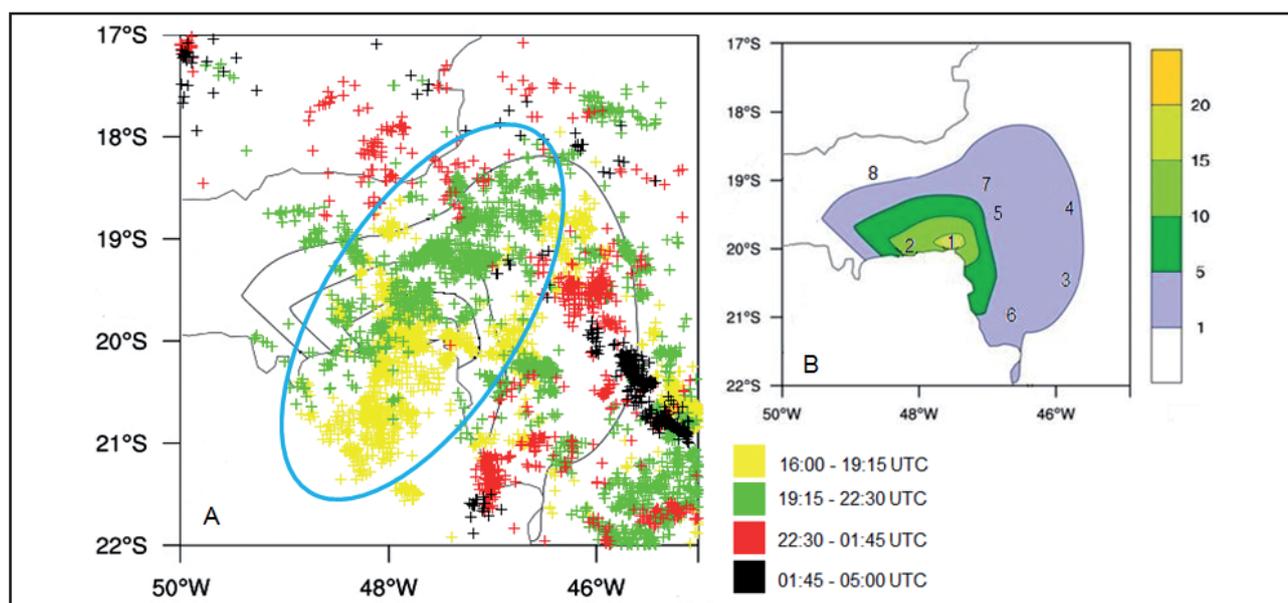


Figura 4 (A) Descargas acumuladas em quatro períodos consecutivos de 3h15min, (indicadas pelas cruzes nas cores amarelo, verde, vermelho e preto) e isoietas (linhas), (B) total de precipitação (mm) em superfície, acumulada entre 16:00UTC do dia 30/10/2007 e 05:00UTC do dia 31/10/2007. A elipse coloca em evidência as áreas onde mais descargas ocorreram em associação ao sistema em estudo.

A Figura 5 mostra a densidade das descargas detectadas durante todo o tempo de vida deste sistema convectivo, considerando uma escala espacial adotada foi de $0,2^\circ$ de latitude por $0,2^\circ$ de longitude (o que corresponde a uma grade com resolução horizontal de aproximadamente $20\text{km} \times 20\text{km}$, equivalente a uma área de 400km^2). As descargas Na Figura 5A é mostrada uma visão no plano, onde as letras C e S indicam as localizações das estações automáticas Conceição das Alagoas e Sacramento, respectivamente.

A elipse, também inserida na Figura 4A, coloca em evidência as áreas onde mais descargas ocorreram em associação ao sistema em estudo. Duas regiões se destacaram por apresentar os valores mais elevados de densidade: uma perto de Conceição das Alagoas e outra a nordeste desta última. Em perspectiva (Figura 5B), foram detectados valores de 200 e 150 descargas/ 400km^2 , respectivamente. Pela posição destas descargas, estas ocorreram na primeira metade do ciclo de vida do sistema, em sua maioria (visto na Figura 4A). Ainda, nota-se que este segundo máximo de densidade de descargas ocorreu em uma área onde a precipitação, por interpolação, foi inferior a 5 mm (ver Figura 4B). Por outro lado, na estação de Sacramento pouco mais de 50 descargas/ 400km^2 foram detectadas, apesar de ter sido o local onde mais precipitou. Mattos & Machado (2011) encontraram valores máximos de densidade das descargas relacionados com maiores taxas de expansão das áreas dos sistemas, compatível com o encontrado neste caso de estudo.

A variação temporal dos totais horários de descargas e de precipitação é mostrada na Figura 6. Observa-se que a maior quantidade de descargas ocorreu na primeira metade do ciclo de vida, com dois valores máximos. Este resultado é compatível com o fato de que, nas etapas iniciais de evolução das tempestades, as correntes ascendentes são mais intensas e conduzem as parcelas de ar para os níveis mais altos. O primeiro pico nas descargas, 2 horas após a formação do sistema, ocorreu no período de transição de sistema linear para quase circular e é coincidente com o pico em precipitação em superfície. Estes valores foram máximos absolutos. O segundo pico nas descargas, ocorreu no período em que o sistema apresentava formato quase circular, 4 horas após a formação do sistema e 1 hora depois de ter havido o segundo pico de precipitação.

Em horário próximo da formação do sistema convectivo, descargas foram detectadas em superfície, mas nenhuma precipitação ocorreu. Contrariamente, após a segunda transição o sistema entrou em fase de dissipação quando um total de 14,4 mm de precipitação foi observado, mas a quantidade de descargas detectadas foi desprezível. Rutledge & MacGorman (1988), na linha de instabilidade analisada, encontraram coincidência entre o pico de precipitação convectiva (estimada com dados de refletividade) com o pico de descargas negativas. Ainda naquele trabalho, o pico de descargas positivas ocorreu 1 hora depois do pico de precipitação estratiforme.

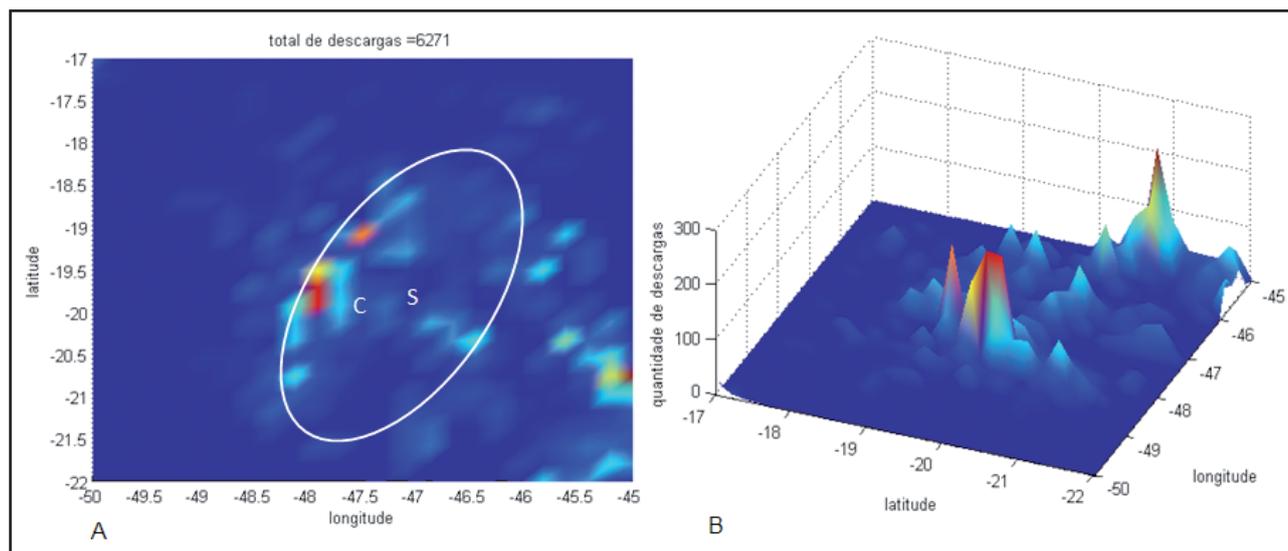


Figura 5 (A) Densidade das descargas/ 400km^2 , detectadas durante o tempo de vida do sistema em estudo, ou seja, no período entre 16:00UTC do dia 30/10/2007 e 05:00UTC do dia 31/10/2007. A letra C indica a localização da estação meteorológica automática de superfície de Conceição das Alagoas e a letra S da estação de Sacramento. A elipse coloca em evidência onde ocorreram mais descargas em associação ao sistema em estudo. (B) Visão tridimensional do campo mostrado na Figura 5A.

O intervalo de tempo entre o término da atividade elétrica e o do sistema foi de 7 horas, muito maior que aquele entre a sua formação e os primeiro e segundo picos de descargas (de 2 e 4 horas, respectivamente). Para os 10 CCM analisados por Goodman & MacGorman (1986), a atividade elétrica foi mínima nas últimas 7 horas, ou seja, naquele estudo, o aumento e a diminuição na quantidade de descargas foram simétricos em relação ao ciclo de vida dos CCM. Esta simetria não foi observada no presente estudo.

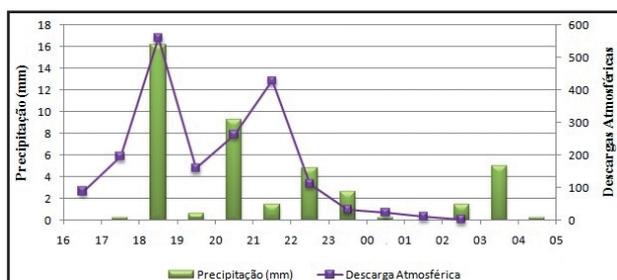


Figura 6 Distribuição temporal das descargas atmosféricas (linha) e da precipitação em superfície (barras), ambas acumuladas em uma hora, associadas ao sistema convectivo ocorrido entre 16:00UTC do dia 30/10/2007 e 05:00UTC do dia 31/10/2007.

4 Conclusões

Sabe-se que a quantidade de descargas atmosféricas detectadas é influenciada pela microfísica e dinâmica de sistemas convectivos. Assim, mudanças na atividade elétrica ajudam a indicar mudanças nos processos internos, dentro das tempestades. Na literatura, a estrutura elétrica documentada em sistemas convectivos é diferente caso a caso, e até mesmo dentro de um único sistema, como foi o caso apresentado neste estudo.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à Empresa Furnas e ao Instituto Nacional de Meteorologia pela concessão dos dados utilizados neste trabalho.

6 Referências

Cardoso Neta, L. 2013. *Características das Descargas Nuvem-Solo e da Precipitação em Superfície Associadas a Sistemas Convectivos Ocorridos na Região Sudeste do Brasil*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, Dissertação de Mestrado, 170p.

- Cardoso Neta, L. & Gomes, R.G. 2013. Precipitation on the surface and cloud-to-ground lightning during a storm in southeastern Brazil. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LIGHTNING PROTECTION, 12, Belo Horizonte, 2013. *Resumos Expandidos*. Belo Horizonte. CD-ROM.
- Carvalho, L.M.V. & Jones, C. 2001. A Satellite Method to Identify Structural Properties of Mesoscale Convective Systems Based on the Maximum Spatial Correlation Tracking Technique (MASCOTTE). *Journal of Applied Meteorology*, 40: 1683-1701.
- Cecil, D.J.; Goodman, S.J.; Boccippio, D.J.; Zipser, E.J. & Nesbitt, S.W. 2005. Three Years of TRMM Precipitation Features. Part I: Radar, Radiometric, and Lightning Characteristics. *Monthly Weather Review*, 133(3): 543-566.
- Cotton, W.R. & Anthes, R.A. 1989. *Storm and Cloud Dynamics*. Academic Press, San Diego, Califórnia. 884p.
- Dotzek, N.; Rabin, R.M.; Carey, L.D.; MacGorman, D.R.; McCormick, T.L.; Demetriades, N. W.; Murphy, M. J. & Holle, R. L. 2005. Lightning Activity Related to Satellite and Radar Observations of a Mesoscale Convective System over Texas on 7-8 April 2002. *Atmospheric Research*, 76: 127-166.
- Goodman, S.J. & MacGorman, D.R. 1986. Cloud-to-Ground Lightning Activity in Mesoscale Convective Complexes. *Monthly Weather Review*, 114(12): 2320-2328.
- Goodman, S.J.; Buechler, D.E.; Wright, P.D.; Rust, W.D. 1988. Lightning and Precipitation History of a Microburst-Producing Storm. *Geophysical Research Letters*, 15: 1185-1188.
- Gungle, B. & Krider, E. P. 2006. Cloud-to-Ground Lightning and Surface Rainfall in Warm-Season Florida Thunderstorms. *Journal of Geophysical Research*, 111: D19203, doi:10.1029/2005JD006802.
- Holle, R.L.; Watson, A.I.; López, R.E.; MacGorman, D.R.; Ortiz, R. & Otto, W.D. 1994. The Life Cycle of Lightning and Severe Weather in a 3-4 June 1985 PRE-STORM Mesoscale Convective System. *Monthly Weather Review*, 122(8): 1798-1808.
- Keighton, S.J.; Blustein, H.B. & MacGorman, D.R. 1991. The Evolution of a Severe Mesoscale Convective System: Cloud-to-Ground Lightning Location and Storm Structure. *Monthly Weather Review*, 119(7): 1533-1556.
- Kempf, N.M. & Krider, E.P. 2003. Cloud-to-Ground Lightning and Surface Rainfall during the Great Flood of 1993. *Monthly Weather Review*, 131(6): 1140-1149.
- Lang, T. J. & Rutledge, S. A. 2002. Relationships Between Convective Storm Kinematics, Precipitation, and Lightning. *Monthly Weather Review*, 130 (10): 2492-2506.
- Lin, Y-L. 2007. *Mesoscale Dynamics*. New York, EUA. Cambridge University Press, 627p.
- Machado, L.A.T.; Lima, W.F.A.; Pinto Jr., O. & Morales C.A. 2009. Relationship Between Cloud-to-Ground Discharge and Penetrative Clouds: A Multi-Channel Satellite Application. *Atmospheric Research*, 93: 304-309.
- 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(6): 1630-1654.
- MacGorman, D.R. & Burgess, D.W. 1994. Positive Cloud-to-Ground Lightning in Tornadoic Storms and Hailstorms. *Monthly Weather Review*, 122(8): 1671-1697.
- Makowski, J.A.; MacGorman, D. R. ; Biggerstaff, M. I. & Beasley, W. H. 2013. Total Lightning Characteristics

- Relative to Radar and Satellite Observations of Oklahoma Mesoscale Convective Systems, *Monthly Weather Review*, 141(5): 1593-1611.
- Mattos, E.V. & Machado, L.A.T. 2011. Cloud-to-Ground Lightning and Mesoscale Convective Systems. *Atmospheric Research*, 99: 377-390.
- Minuzzi, R.B.; Sedyama, G.C.; Barbosa, E.M. & Melo Jr., J.C.F. 2010. Climatologia do Comportamento do Período Chuvoso da Região Sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 22(3): 338-344.
- Naccarato, K.P. & Pinto Jr., O. 2008. The Third Generation Relative Detection Efficient Model for the Brazilian Lightning Detection Network (BRASILDat). In: INTERNATIONAL LIGHTNING DETECTION CONFERENCE, 20, Tucson, Arizona, USA, 2008. *Resumos Expandidos*, Tucson, Arizona, CD-ROM.
- Orville, R.E.; Wwisman, R.A.; Pyle, R.B.; Henderson, R.W. & Orville Jr., R.E. 1987. Cloud-to-Ground Lightning Flash Characteristics from June 1984 through May 1985, *Journal of Geophysical Research*, 92(D5): 5640-5644.
- Parker, M.D.; Rutledge, S.A. & Johnson, R.H. 2001. Cloud-to-Ground Lightning in Linear Mesoscale Convective Systems. *Monthly Weather Review*, 129(5): 1232-1242.
- Peipgrass, M.V.; Krider, E.P. & Moore, C.B. 1982. Lightning and Surface Rainfall During Florida Thunderstorms. *Journal of Geophysical Research*, 87: 11193-11201.
- Rakov, V.A. & Uman, M.A. 2003. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge. Cambridge University Press, 850p.
- Romatschke, U. & Houze Jr., R.A. 2013. Characteristics of Precipitating Convective Systems Accounting for the Summer Rainfall of Tropical and Subtropical South America. *Journal of Hydrometeorology*, 14: 25-46.
- Romatschke, U. & Houze Jr., R.A. 2010. Extreme Summer Convection in South America. *Journal of Climate*, 23: 3761-3791.
- Rutledge, S.A. & MacGorman D.R. 1988. Cloud-to-Ground Lightning Activity in the 10-11 June 1985 Mesoscale Convective System Observed During the Oklahoma-Kansas PRE-STORM Project. *Monthly Weather Review*, 116(7): 1393-1408.
- Rutledge, S.A.; Lu, C. & MacGorman D.R. 1990. Positive Cloud-to-Ground Lightning in Mesoscale Convective Systems. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 47(17): 2085-2100.
- Tadesse, A. & Anagnostou, E.N. 2009. Characterization of Warm Season Convective Systems over US in Terms of Cloud-to-Ground Lightning, Cloud Kinematics, and Precipitation. *Atmospheric Research*, 91: 36-46.
- Tessendorf, S.A.; Rutledge, S.A. & Wiens, K.C. 2007. Radar and Lightning Observations of Normal and Inverted Polarity Multicellular Storms from STEPS. *Monthly Weather Review*, 135(11): 3682-3706.
- Weiss, S.A.; Rust, W.D.; MacGorman, D.R.; Bruning, E.C. & Krehbiel, P.R. 2008. Evolving Complex Electrical Structures of the STEPS 25 June 2000 Multicell Storm. *Monthly Weather Review*, 136(2): 741-756.
- Zepka, G.S.; Pinto Jr. O. & Saraiva, A.C.V. 2013. Lightning Forecasting in Southeastern Brazil Using the WRF Model. *Atmospheric Research*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.008>.
- Zipser, E.J.; Cecil, D.J.; Liu, C.; Nesbitt, S.W. & Yorty, D.P. 2006. Where are the Most Intense Thunderstorms on Earth? *Bulletin of the American Meteorology Society*, 87: 1057-1071.