



**Estudo de Caso de Sistemas Convectivos de Mesoescala Intensos
Ocorridos entre os Dias 02 e 03 de Janeiro de 2013 no Estado do Rio de Janeiro:
Características Estruturais e Termodinâmicas**

Case Study of Intense Mesoscale Convective Systems Occurred between 02 and 03
January 2013 in the State of Rio de Janeiro: Structural and Thermodynamic Characteristics

José Ricardo Siqueira & Valdo da Silva Marques

Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Laboratório de Meteorologia,

Rodovia Amaral Peixoto, km 163, Av. Brennand, S/N, Cx. Postal: 119562, 27910-970 Imboassica. Macaé, Estado do Rio de Janeiro

E-mail: siqueirajricardo@gmail.com; valdosmarques@gmail.com

Recebido em: 30/09/2015 Aprovado em: 31/03/2016

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2016_2_57_76

Resumo

Neste estudo são apresentadas e analisadas as características estruturais e termodinâmicas de Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) intensos que ocorreram sobre o Estado do Rio de Janeiro entre os dias 02 e 03/01/2013. Estes SCM tiveram como consequências grandes enchentes e deslizamentos de terra nas regiões metropolitana e serrana do Estado do Rio de Janeiro, com perdas materiais e econômicas de grande monta, dezenas de feridos, e duas perdas fatais. Foram utilizadas imagens brutas do canal 4 do Geostationary Operational Environmental Satellite, o método Forecasting and Tracking of Active Cloud Clusters, imagens do radar do Pico do Couto, dados meteorológicos de superfície e reanálises do National Center for Environmental Predictions. As análises de satélite mostraram que os SCM estudados foram estimulados por uma frente fria que passava pelo litoral sul fluminense no dia 02/01/2013. O SCM que atingiu as regiões metropolitana e serrana do Estado do Rio de Janeiro iniciou-se às 01:15 UTC do dia 03/01, adquiriu dinâmica própria e deslocou-se para leste a uma velocidade média de cerca de 11 m/s, percorrendo cerca de 150 km entre 01:15 UTC e 14:45 UTC do dia 03/01. Este sistema atingiu a região serrana do Estado do Rio de Janeiro com máxima intensidade na madrugada do dia 03 em Xerém, no município de Duque de Caxias. O SCM também apresentou cerca de 23200 km² de área total (170 km de extensão) e 5600 km² de área convectiva máxima, nuvens de topos frios (< 200 K), excentricidades acima de 0,7 (semicircular), refletividades de radar “fortes”, e 224,6 mm de precipitação acumulada em Xerém. Exceto pelo tamanho, suas características foram semelhantes às dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) descritos na literatura. As análises termodinâmicas mostraram forte convergência de umidade e muita instabilidade atmosférica no Rio de Janeiro, contribuindo para a formação desta tempestade severa. Também foram observados padrões de circulação similares aos dos eventos de CCM descritos na literatura, com Jato de Baixos Níveis no sudeste da América do Sul e Jato de Altos Níveis nos subtropicais.

Palavras-chave: sistema convectivo de mesoescala; GOES; radar

Abstract

This paper presents an analysis of the structural and thermodynamic characteristics of intense Mesoscale Convective Systems (MCS) that occurred in the State of Rio de Janeiro between 02 and 03 January 2013. These MCS caused floods and landslides in Metropolitan and Mountain Regions of Rio de Janeiro, with material and economic losses, dozens injured, and two fatal human losses. The analyzes were made using Geostationary Operational Environmental Satellite images in infrared spectrum (channel 4), the Forecasting and Tracking of Active Cloud Clusters method, images from radar at Pico do Couto, meteorological data from surface stations, and reanalyzes from National Center for Environmental Predictions. Results from satellite showed that the studied MCS were stimulated by a cold front that moved over southern of the State of Rio de Janeiro on 02 January. The MCS that reached Metropolitan and Mountain Regions of Rio de Janeiro initiated at 01:15 UTC of 03 January, acquired its own dynamic, and moved eastward with a mean velocity of around 11 m/s, travelling around 150 km between 01:15 UTC and 14:45 UTC of 03 January. This system reached the mountain region of the State of Rio de Janeiro with maximum intensity in the early morning at Xerem, Duque de Caxias. The MCS had a maximum total area of around 23200 km² (170 km in extension) and maximum convective area of around 5600 km², very cold cloud tops (< 200 K), eccentricities > 0,7 (semicircle), radar reflectivities “strong”, and a total rainfall of 224,6 mm in Xerem (from surface stations). Except by the MCS extension, its characteristics were similar to the Mesoscale Convective Complexes (MCC) studied in the literature. The thermodynamic and circulation fields showed strong moisture convergence and atmospheric instabilities over State of Rio de Janeiro, contributing to the formation of this severe storm. We have also observed circulation patterns similar to the ones found in MCC events described in the literature, with a Low Level Jet over Southeast South America and a High Level Jet in the subtropics.

Keywords: mesoscale convective system; GOES; radar

1 Introdução

Os sistemas convectivos de mesoescala (SCM) são sistemas meteorológicos responsáveis por condições de tempo adversas, ocasionando grande impacto social e econômico em diversas regiões do Brasil. Estes sistemas são constituídos por um aglomerado de nuvens convectivas e apresentam área com precipitação intensa e contínua que é parcialmente estratiforme e parcialmente convectiva, fortes rajadas de vento, e granizo (Zipser, 1977; Maddox, 1983; Houze, 1993; Houze, 2004). Além disto, os SCM são de difícil previsão, o que justifica ainda mais o estudo dos mesmos. Monitorar o deslocamento e a evolução dos SCM é de grande importância para a previsão do tempo e de fenômenos meteorológicos adversos, pois isto proporciona um melhor conhecimento do ciclo de vida dos SCM e das suas características físicas e morfológicas. Por todas as razões descritas acima, as regiões metropolitana e serrana do Estado do Rio de Janeiro também têm sofrido drasticamente com a ocorrência desses sistemas ao longo dos anos.

Diversos tipos de SCM têm sido estudados com a finalidade de determinar o seu tamanho médio e o seu horário preferencial de iniciação e maturação (Velasco & Fritsch, 1987; Machado & Rossow, 1993; Machado et al., 1998; Nicolini *et al.*, 2002; Vila & Machado, 2004; Zipser *et al.*, 2004; Siqueira *et al.*, 2005, Siqueira *et al.*, 2010; entre outros). Estes estudos mostraram que o tamanho médio dos SCM está associado ao seu tempo de vida, com os sistemas maiores apresentando uma maior duração. A maioria dos SCM tem sido detectada entre o final da tarde e o início da noite (horário de máxima atividade convectiva no ciclo diurno sobre a América do Sul), e entre o fim da madrugada e o amanhecer (máximo secundário).

O objetivo deste trabalho foi analisar as características estruturais e termodinâmicas de SCM intensos que ocorreram no Estado do Rio de Janeiro entre os dias 02 e 03 de janeiro de 2013. Estes sistemas tiveram como consequências grandes enxurradas, enchentes e deslizamentos de terra, causando perdas materiais expressivas, dezenas de feridos, e duas perdas fatais nas regiões serrana e metropolitana do Estado (principalmente no município de Duque de Caxias).

2 Dados e Metodologia

Foram utilizadas cinco séries de dados no presente trabalho, para o período de 02/01/2013 a 04/01/2013. A primeira série consiste nas temperaturas de brilho do canal 4 (infravermelho termal) do Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES-13), com resolução espacial em seu ponto subsatélite de 4 km x 4 km e resolução temporal de 30 minutos. Esses dados foram disponibilizados pelo Setor de Recepção de Imagens de Satélites do Laboratório de Meteorologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense (LAMET/UENF), em Macaé-RJ. A segunda série de dados refere-se às imagens do Radar Doppler (MAXCAPPI 400 km) do Ministério da Aeronáutica, que está posicionado no Pico do Couto, em Petrópolis-RJ. As imagens de radar possuem uma resolução espacial de 1 km x 1 km e foram obtidas no site da Rede de Meteorologia do Comando da Aeronáutica (REDEMET), para cada 30 minutos. A terceira série de dados consiste nos dados diários de precipitação e temperatura na superfície que são medidas por estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), em Duque de Caxias-RJ e Petrópolis-RJ. A quarta série refere-se aos diagramas termodinâmicos provenientes das sondagens do Aeroporto Internacional do Galeão, RJ (22,81° S; 43,25° W), para as 00 e 12 UTC. A última série de dados consiste nas reanálises do National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR), com resolução espacial de 2,5° x 2,5° e resolução temporal de 6 horas (00, 06, 12 e 18 UTC), conforme Kalnay et al. (1996). Neste caso, foram utilizados os campos de vento, temperatura, umidade específica, umidade relativa e velocidade vertical (omega) nos níveis de 1000, 850, 700, 500 e 200 hPa, e o campo de pressão na superfície.

Primeiramente, foram analisadas as imagens do canal 4 do satélite GOES-13 com o intuito de identificar os SCM estudados sobre o Estado do Rio de Janeiro no instante das suas formações. Após esta análise objetiva (manual) das imagens de satélite, foi utilizada a versão diagnóstica do método Forecasting and Tracking of Active Cloud Clusters ForTrACC para adquirir um melhor detalhamento do ciclo de vida e das características morfológicas e radiativas dos SCM.

Segundo Vila *et al.* (2008), o ForTrACC é um método automático que monitora e descreve as características dos SCM através do seu ciclo de vida utilizando imagens infravermelho dos satélites geoestacionários. Os principais elementos que compõem este método são: 1) uma rotina de detecção e agrupamento ('clusters') utilizando um limiar de temperatura de brilho, 2) uma rotina para o cálculo dos diversos parâmetros estatísticos e morfológicos dos sistemas encontrados na etapa anterior (Machado *et al.*, 1998; Vila & Machado, 2004), 3) uma rotina de acompanhamento baseada na superposição de áreas entre imagens sucessivas, que permite a construção das trajetórias dos sistemas ao longo de seu ciclo de vida, dispostos em "famílias" (Laurent *et al.*, 2002), e 4) uma rotina de geração de imagens virtuais ou sintéticas utilizadas para cobrir os horários de imagens faltantes (esta última etapa não foi necessária neste trabalho). Foi utilizado o limiar de temperatura de brilho de 235 K para definir cada SCM, bem como o limiar de 210 K para definir as células convectivas mais intensas imersas em cada SCM. Estes valores são exatamente os mesmos empregados no método ForTrACC (Vila *et al.*, 2008). As principais características estruturais dos SCM geradas pelo método ForTrACC que foram utilizadas neste trabalho são: trajetória, raio efetivo (raio do SCM assumido como circular), extensão (diâmetro efetivo), excentricidade, área total, área convectiva, fração convectiva, temperaturas de brilho média e mínima, velocidade média, e taxas de precipitação média e máxima estimadas pela técnica Autoestimador (Vicente *et al.*, 1998).

Em conjunto com as imagens de satélite, foram utilizadas as imagens do Radar Doppler no Pico do Couto para avaliar as taxas de precipitação produzidas pelos SCM estudados ao longo dos seus ciclos de vida. Também foram construídas séries temporais das taxas de precipitação diárias a partir dos dados das estações meteorológicas do INMET para todo o mês de Janeiro de 2013, com o intuito de verificar o impacto dos SCM sobre a precipitação mensal nos municípios de Duque de Caxias e Petrópolis.

Posteriormente, foram utilizados os diagramas termodinâmicos provenientes das observações do Galeão e as reanálises do NCEP com o intuito de analisar as características termodinâmicas e de circulação atmosférica associadas à ocorrência

dos SCM estudados. Os principais campos extraídos das observações do Galeão foram os perfis de: temperatura, temperatura do ponto de orvalho, temperatura potencial equivalente e temperatura potencial equivalente saturada, e os índices de instabilidade atmosférica (K, Total-totals, Levantamento, CAPE, entre outros). Os principais campos extraídos do NCEP foram: vento horizontal em 850 e 200 hPa, temperatura em 1000 hPa, umidades relativa e específica em 1000 hPa, velocidade vertical em 500 hPa e 700 hPa, divergência de umidade específica em 1000 hPa, e perfis verticais de vento em Xerém. Desta forma, foi possível avaliar a importância desses parâmetros em termos de ambiente favorável ao crescimento e à intensificação dos SCM.

3 Resultados e Discussões

3.1 Características estruturais dos SCM

A Figura 1 mostra a imagem infravermelho realçada (canal 4) do satélite GOES-13 para a América do Sul, no horário das 02:45 UTC do dia 03/01/2013. É possível observar no sul fluminense temperaturas de brilho muito frias (≤ 210 K), sendo um indicativo das tempestades severas que atingiram o Estado do Rio de Janeiro entre os dias 02 e 03/01, bem como a passagem de uma frente fria pelo sudeste do Brasil neste período. Notam-se também as atividades da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), da Alta da Bolívia (AB) e do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) sobre o continente, e a inexistência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) neste período.

Na Figura 2 são ilustradas as tempestades severas em uma sequência de imagens infravermelho realçadas do satélite GOES-13, para os dias 02 e 03/01/2013. Nesta sequência de imagens observa-se a passagem de uma frente fria sobre o Atlântico Sul (na altura dos Estados de São Paulo e do Rio de Janeiro), bem como vários núcleos convectivos formando-se sobre o sul do Estado de Minas Gerais, o leste do Estado de São Paulo e o sul fluminense a partir do final da tarde do dia 02/01. A atividade convectiva no Estado do Rio de Janeiro intensificou-se no período noturno e perdeu intensidade no final da tarde do dia 03/01. Aparentemente, a passagem da frente fria e o intenso ciclo diurno da convecção sobre as regiões

mencionadas (típico do verão austral) contribuíram para a formação destas tempestades severas. O forte impacto das frentes frias sobre a organização da nebulosidade convectiva e o regime de precipitação da região tropical do Brasil durante os meses de verão também já foi destacado por diversos autores (Garreaud & Wallace, 1997; Siqueira *et al.*, 2005; Siqueira & Marques, 2010; entre outros).

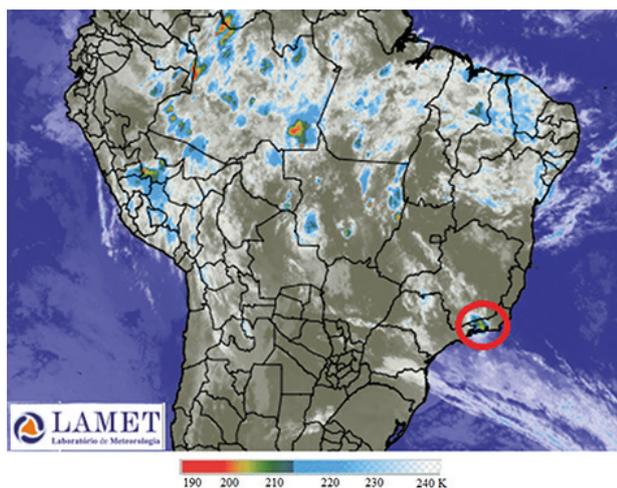


Figura 1 Imagem do canal 4 do satélite GOES-13 mostrando as tempestades severas que atingiram o Estado do Rio de Janeiro no dia 03/01/2013, às 02:45 UTC.

As trajetórias e horários de todos os SCM que foram detectados sobre o Estado do Rio de Janeiro entre os dias 02 e 03/01/2013 aplicando a técnica ForTraCC às temperaturas de brilho do canal 4 do satélite GOES-13 são apresentadas na Figura 3. Um total de quatro SCM foi identificado neste período, sendo que as suas fases de iniciação, maturação e dissipação são definidas pelo horário da primeira detecção do sistema, pelo horário em que o sistema atingiu sua maior fração convectiva, e pelo horário da última detecção do sistema, respectivamente. O SCM 1 iniciou sua atividade no sul do Estado de Minas Gerais às 17:45 UTC do dia 02/01, deslocou-se para sudoeste e intensificou-se no extremo leste do Estado de São Paulo às 23:15 UTC do dia 02/01. A sua dissipação ocorreu às 00:15 UTC do dia 03/01, em local muito próximo ao da fase de maturação. O tempo de vida do SCM 1 foi de aproximadamente 7 horas. O SCM 2 iniciou sua atividade no litoral sul fluminense às 18:45 UTC do dia 02/01, e deslocou-se para nordeste intensificando-se e dissipando-se na divisa dos Estados de São Paulo e Rio de Janeiro às 19:15 UTC do dia 02/01. Embora este sistema tenha ocorrido simultaneamente com o SCM 1, o

seu tempo de vida foi de apenas 3 horas. Não há registro de danos causados pelos SCM 1 e 2 sobre as suas regiões de ocorrência.

O SCM 3 detectado no Estado do Rio de Janeiro iniciou-se no sul fluminense próximo à divisa com o Estado de São Paulo por volta das 01:15 UTC do dia 03/01 (pouco após a dissipação do SCM 1, conforme a Figura 3). Sua maturação ocorreu próximo ao local anterior por volta das 02:15 UTC, seguida de dissipação próximo à Região dos Lagos em torno das 14:45 UTC do dia 03/01. Este sistema deslocou-se sempre para leste, teve um tempo de vida de aproximadamente 14 horas, e foi responsável pelos danos observados nas regiões metropolitana e serrana do Estado do Rio de Janeiro no dia 03/01. O SCM 4 iniciou sua atividade na região metropolitana do Estado do Rio de Janeiro (Duque de Caxias) às 16:15 UTC (pouco após a dissipação do SCM 3), deslocou-se para nordeste e intensificou-se na região serrana do Estado do Rio de Janeiro às 18:15 UTC do dia 03/01. Posteriormente, este sistema deslocou-se para leste e dissipou-se próximo à Região dos Lagos, às 20:45 UTC do dia 03/01. O seu tempo de vida aproximado foi de apenas 5 horas, e não há registro de danos causados por este sistema.

A Tabela 1 mostra as frações convectivas e as áreas convectivas dos quatro SCM que atingiram o Estado do Rio de Janeiro entre os dias 02 e 03/01/2013 nas suas fases de iniciação, maturação e dissipação, que foram estimadas pelo método ForTraCC. Observa-se que os SCM 1 e 3 (SCM 2 e 4) possuem frações e áreas convectivas elevadas (muito pequenas), sendo caracterizados por forte nebulosidade convectiva (nebulosidade estratiforme, sobretudo o SCM 4). Nota-se também que a atividade convectiva no SCM 1 é mais intensa entre a maturação e a dissipação, enquanto a atividade do SCM 3 é mais intensa entre a iniciação e a maturação. Este último resultado, adicionado à proximidade geográfica entre o SCM 1 em sua fase de dissipação e o SCM 3 em sua fase de iniciação (Figura 3), sugere que o SCM que causou os eventos extremos nas regiões metropolitana e serrana do Estado do Rio de Janeiro (SCM 3) pode ter sido uma continuidade do SCM 1. Também é importante salientar que a técnica ForTraCC identifica um mesmo sistema no tempo “t” e nas imagens sucessivas “t + 1t” baseando-se no critério de máxima superposição da área dos sistemas em imagens sucessivas. É adotado

Estudo de Caso de Sistemas Convectivos de Mesoescala Intensos
Ocorridos entre os Dias 02 e 03 de Janeiro de 2013 no Estado do Rio de Janeiro: Características Estruturais e Termodinâmicas
José Ricardo Siqueira & Valdo da Silva Marques

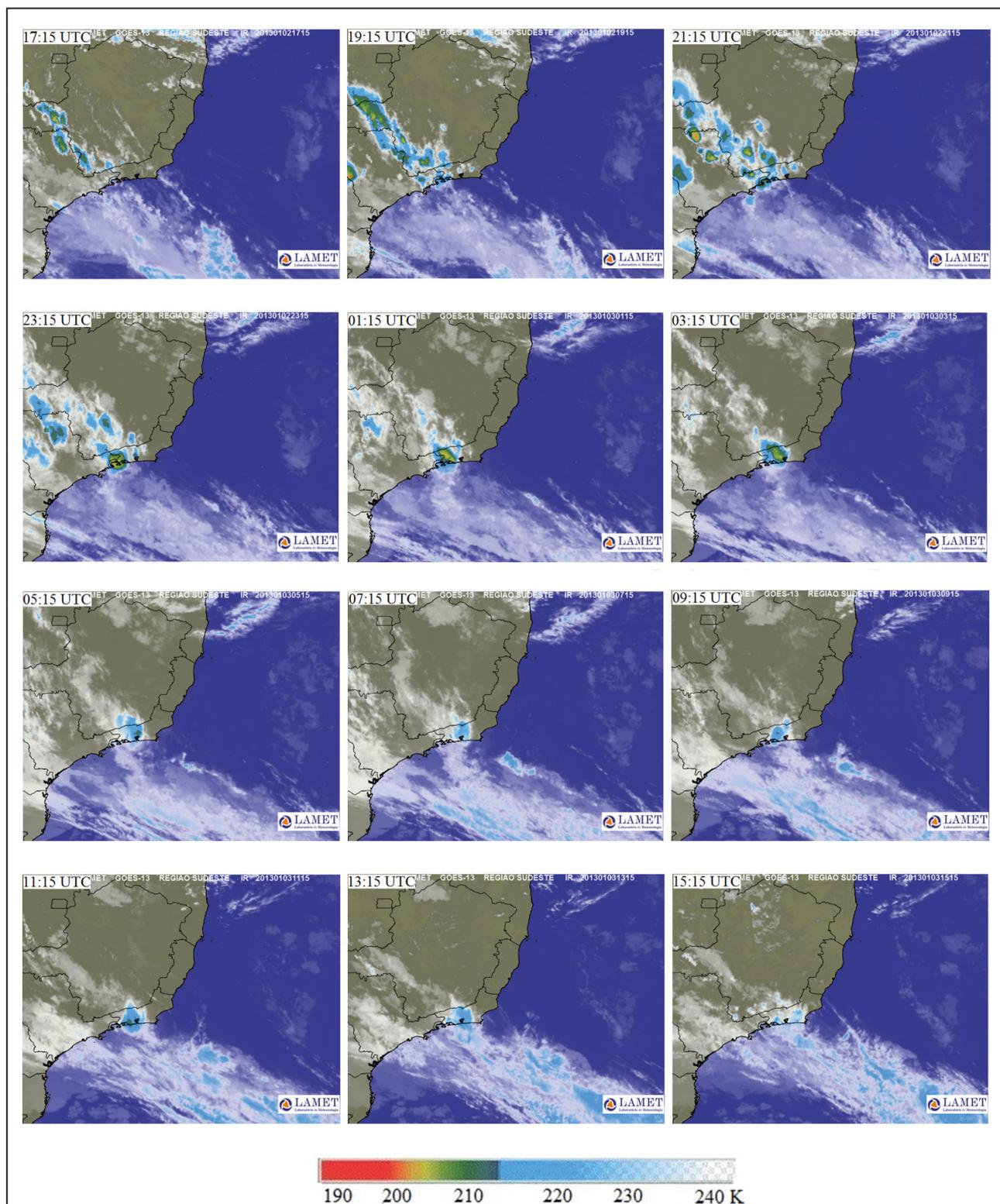


Figura 2 Imagem setorizada do canal 4 do satélite GOES-13 mostrando as tempestades severas que atingiram o Estado do Rio de Janeiro entre os dias 02 e 03/01/2013.

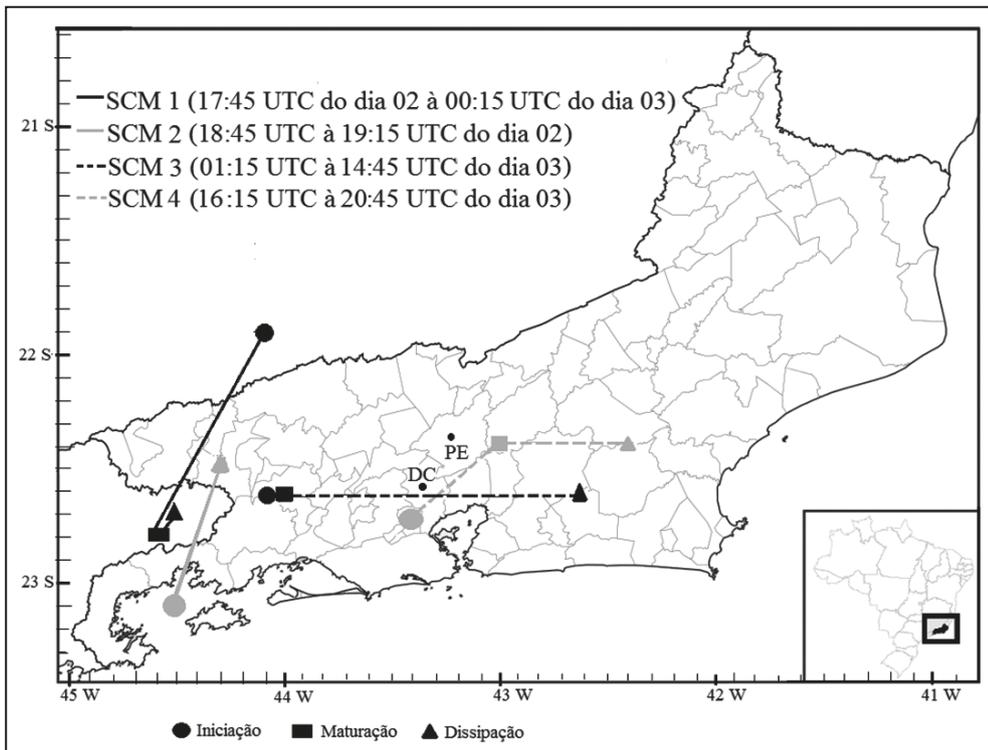


Figura 3 Trajetórias e horários dos quatro SCM identificados sobre o Estado do Rio de Janeiro entre os dias 02 e 03/01/2013 aplicando a técnica ForTraCC às temperaturas de brilho do canal 4 do satélite GOES-13.

um número mínimo de pixels para considerar a continuidade do SCM, atualmente de 150 pixels (equivalente a uma área de aproximadamente 2.400 km²) para um $l t = 30$ minutos (Vila *et al.*, 2008). Se a superposição for menor, tal como aparentemente ocorreu entre o SCM 1 e o SCM 3, o sistema não é considerado como sendo o mesmo sistema no tempo anterior.

SCM	Fração e área convectiva do SCM		
	Iniciação	Maturação	Dissipação
1	0,0% (0 km ²)	35,9% (7504 km ²)	25,6% (5904 km ²)
2	4,5% (176 km ²)	4,5% (176 km ²)	2,9% (336 km ²)
3	24,3% (5632 km ²)	33,3% (6528 km ²)	0,0% (0 km ²)
4	0,0% (0 km ²)	0,2% (0,1 km ²)	0,0% (0 km ²)

Tabela 1 Fração convectiva e área convectiva (em parênteses) dos quatro SCM que atingiram o Estado do Rio de Janeiro entre 02 e 03/01/2013 estimadas pelo método ForTraCC utilizando limiares de temperatura de brilho de 235 K (para o SCM) e 210 K (para as células convectivas do SCM).

A evolução temporal das principais propriedades físicas do SCM que atingiu as regiões metropolitana e serrana do Estado do Rio de Janeiro (SCM 3), que foram estimadas pela aplicação da técnica ForTraCC, é ilustrada na Figura 4. A evolução das áreas do SCM mostra um primeiro máximo de área total do SCM de aproximadamente 23200 km²

às 01:00 UTC do dia 03/01/2013, equivalente a uma extensão horizontal de 170 km (escala meso-b de comprimento). A área total decai ligeiramente e atinge um segundo máximo pouco antes das 04:00 UTC do dia 03, e decai cerca de 50% entre as 04:00 e 09:00 UTC. Um terceiro máximo de área total (ligeiramente inferior ao segundo) é observado às 13:00 UTC do dia 03. Para a área convectiva do SCM, nota-se a existência de um único máximo de área, com aproximadamente 5.600 km², sendo atingido às 02:00 UTC do dia 03 (quase 2 horas antes do segundo máximo de área total). Isto equivale a uma extensão horizontal de 85 km. A área convectiva se mantém elevada entre 01:00 UTC e 03:00 UTC do dia 03, reduz-se em cerca de 50% da área máxima até as 04:00 UTC, e praticamente inexistente após este horário. Esta defasagem entre os instantes de maior área convectiva e de maior área total do SCM é consistente com Garreaud & Wallace (1997).

A evolução das temperaturas de brilho do SCM 3 mostra temperaturas de brilho média e mínima mais frias entre 01:00 e 03:00 UTC do dia 03 (< 220 K e < 200 K, respectivamente), comprovando a existência de nuvens com forte desenvolvimento vertical (topos mais frios) e grande potencial para provocar precipitação e tempestades severas neste

período (Figura 4). Ambas as temperaturas elevam-se consideravelmente após as 03:00 UTC, indicando fraca atividade convectiva do SCM após a sua maturação apesar do terceiro máximo de área total identificado às 13:00 UTC (provavelmente uma grande cobertura de nuvens estratiformes pouco antes da dissipação do SCM). Observa-se também que o SCM atinge suas menores temperaturas de brilho média e mínima num mesmo instante (às 02:00 UTC do dia 03), seguido de um ligeiro aumento na área total do SCM. Este resultado é consistente com os resultados da literatura, onde se afirma que durante a sua etapa de formação, o SCM alcança um máximo resfriamento e logo se expande na fase de maturação (Machado & Rossow, 1993; Vila & Machado, 2004).

A evolução da excentricidade do SCM 3 mostra valores sempre próximos ou superiores a 0,7, sendo ainda maiores no período de maior atividade convectiva do sistema (Figura 4). Este resultado caracteriza o SCM estudado como sendo um sistema semicircular. Analisando a evolução da velocidade

média do SCM, nota-se que o seu centro de massa (CM) moveu-se geralmente a 5-10 m/s (18-36 km/h, respectivamente) no período de maior atividade convectiva (Figura 4), e a aproximadamente 20 m/s (72 km/h) pouco antes de se dissipar. Deste modo, o SCM percorreu uma distância de quase 150 km entre o sul fluminense e a Região dos Lagos, passando pela baixada e pela serra fluminense. A evolução das taxas de precipitação produzidas pelo SCM estimadas pelo método Autoestimador mostra taxas médias com máximos em torno de 18 mm/h, sendo sempre superiores a 15 mm/h no período de maior atividade convectiva do sistema (Figura 4). Essas taxas foram inferiores a 5 mm/h nos instantes subsequentes. As taxas de precipitação máximas do SCM foram superiores a 70 mm/h no período de maior atividade convectiva, comprovando a forte precipitação produzida por este SCM. Também são verificados dois máximos menores entre 35-40 mm/h no período da manhã, e taxas inferiores a 10 mm/h pouco antes da dissipação do SCM.

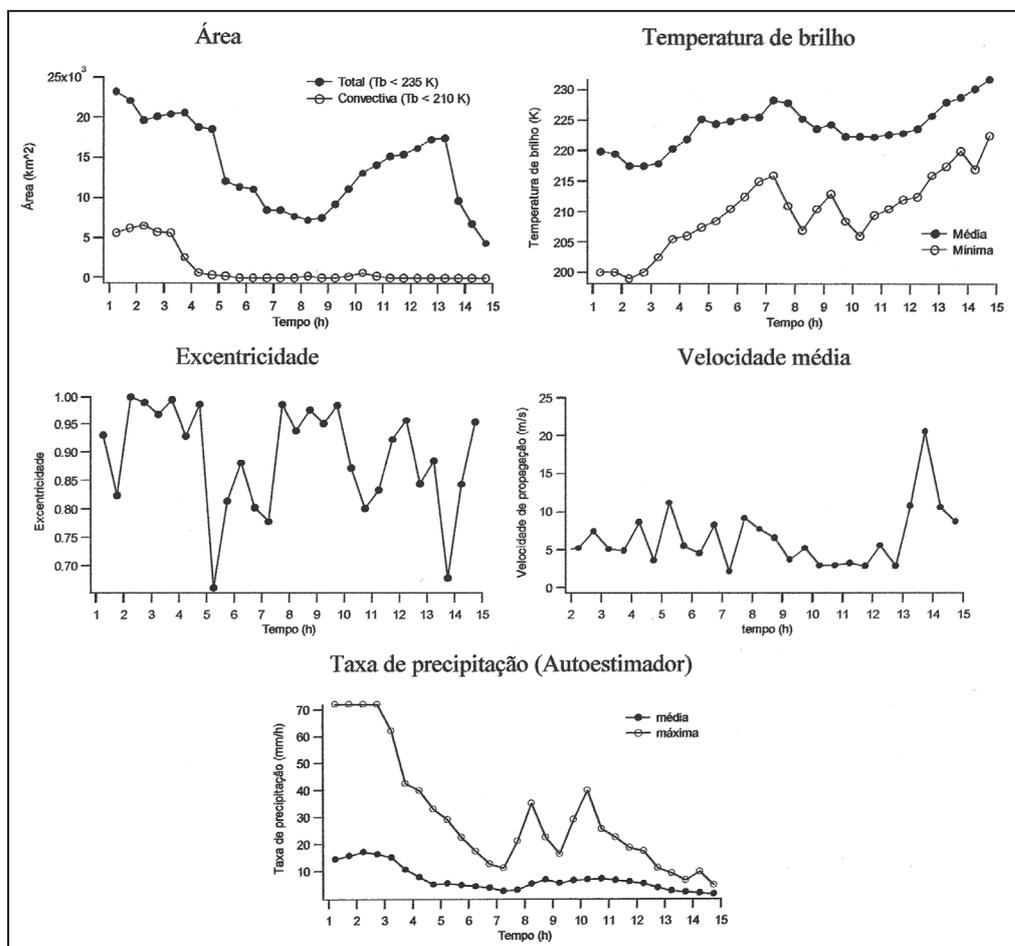


Figura 4 Evolução temporal das principais propriedades físicas do SCM que atingiu as regiões metropolitana e serrana do Estado do Rio de Janeiro entre 01:15 UTC e 14:45 UTC do dia 03/01/2013 estimadas pela aplicação do método ForTraCC às temperaturas de brilho do canal 4 do satélite GOES-13.

Com o intuito de verificar se o SCM que atingiu as regiões metropolitana e serrana do Estado do Rio de Janeiro pode ser classificado como um Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM), optou-se por realizar uma nova detecção dos SCM que atingiram o Estado do Rio de Janeiro entre os dias 02 e 03/01/2013. Para tanto, foi aplicada à técnica ForTraCC os mesmos limiares de temperatura de brilho utilizados por Maddox (1980). Os resultados desta aplicação são resumidos na Tabela 2. Nota-se que o novo SCM detectado com os limiares de Maddox (1980) apresenta características relativamente similares ao SCM detectado utilizando os limiares anteriores, com exceção do horário da fase de maturação (1 hora mais tarde) e do tempo de vida do sistema (1 hora mais longo). Observa-se também que este novo SCM atende aos seguintes critérios: hábito noturno, tempo de vida mínimo de 6 horas, e excentricidade superior a 0,7. Contudo, o novo SCM não satisfaz aos critérios de tamanho exigidos: TAMANHO A (região com temperaturas inferiores a 241 K e com uma área de 100.000 km²), TAMANHO B (núcleo frio com temperaturas inferiores a 221K e com uma área de 50.000 km²), INÍCIO (definições de tamanho A e B satisfeitas), DURAÇÃO (definições de tamanho A e B permanecem durante um período de 6 horas), e MÁXIMA EXTENSÃO (região definida em A alcançar máximo tamanho). Assim, apesar da sua grande extensão, do seu tempo de vida longo e da sua forte intensidade, verifica-se que o SCM estudado não pode ser classificado como um CCM.

Propriedade física do SCM	Fase do ciclo de vida do SCM		
	Iniciação	Maturação	Dissipação
Tempo (h)	01:15 UTC	03:15 UTC	15:45 UTC
Localização do centro de massa	22,5° S; 44,2° W	22,5° S; 43,9° W	23,7° S; 42,3° W
Excentricidade	0,79	0,98	0,99
Área total do SCM	30128 km ²	24096 km ²	31280 km ²
Área convectiva do SCM	11680 km ²	12912 km ²	64 km ²

Tabela 2 Principais propriedades físicas do SCM que atingiu as regiões metropolitana e serrana do Estado do Rio de Janeiro entre 02 e 03/01/2013 estimadas pelo método ForTraCC utilizando os limiares de temperatura de brilho de Maddox (1980) [241 K, para o SCM; e 221 K, para as células convectivas do SCM].

A Figura 5 mostra as imagens do radar meteorológico do Pico do Couto (MAXCAPPI 400 km) para as 17:00 UTC do dia 02/01/2013 até às 15:00 UTC do dia 03/01/2013, em que foram registradas as maiores taxas de precipitação sobre

o Estado do Rio de Janeiro associadas aos SCM estudados. Observam-se refletividades fortes (>45 dBz) no sul fluminense a partir das 23:00 UTC do dia 02, indicando grande conteúdo de água líquida na célula de tempestade associada à atividade do SCM 1 que se formou nesta região (Figura 3). Posteriormente, os mesmos valores de refletividade são observados nas regiões metropolitana e serrana do Estado do Rio de Janeiro entre 01:00 UTC e 5:00 UTC do dia 03, associados à atividade do SCM 3. As imagens também revelam que essas duas regiões foram as mais castigadas pela forte chuva que atingiu grande parte do Estado (produzida pelo SCM 3), ocasionando os graves transtornos já descritos neste trabalho. Estas medidas de precipitação são consistentes com as temperaturas de brilho médias e mínimas mais frias e com a área convectiva elevada do SCM 3 na sua fase de maturação (Figura 4). Entre as 05:00 UTC e as 15:00 UTC do dia 03, observam-se somente refletividades moderadas e fracas (< 45 dBz) sobre as regiões citadas, indicando a existência de precipitação estratiforme associada ao SCM 3 após a sua maturação. Este último resultado também é consistente com as temperaturas de brilho mais quentes do SCM 3, que foram verificadas após a sua maturação (Figura 4).

Na Figura 6 é ilustrada a precipitação medida pela estação do INMET em Xerém entre 17:00 UTC do dia 02/01/2013 e 16:00 UTC do dia 03/01/2013. Segundo os dados da estação, a tempestade intensificou-se por volta das 22:00 UTC do dia 02 naquela localidade (com taxas de até 35,4 mm/h), perdeu intensidade entre 00:00 UTC e 02:00 UTC do dia 03, intensificou-se novamente entre 02:00 UTC e 06:00 UTC do dia 03 (com taxas de até 32 mm/h), e desintensificou-se no período da manhã do dia 03. Estas estimativas são consistentes com as áreas total e convectiva elevadas e com as temperaturas de brilho mais frias do SCM 3 verificadas neste mesmo período (Figura 4). Os dados da estação também mostram altas taxas de precipitação entre 12:00 UTC e 13:00 UTC do dia 03 (de até 32 mm/h), que ocorreram pouco antes do SCM 3 se dissipar às 14:45 UTC. Este último resultado é consistente com o terceiro máximo de área total do SCM 3 identificado anteriormente (Figura 4). Ressalta-se ainda que a precipitação acumulada na localidade de Xerém para o dia 03 foi consideravelmente alta, totalizando aproximadamente 219,2 mm. No município de Petrópolis, a precipitação acumulada

Estudo de Caso de Sistemas Convectivos de Mesoescala Intensos
Ocorridos entre os Dias 02 e 03 de Janeiro de 2013 no Estado do Rio de Janeiro: Características Estruturais e Termodinâmicas
José Ricardo Siqueira & Valdo da Silva Marques

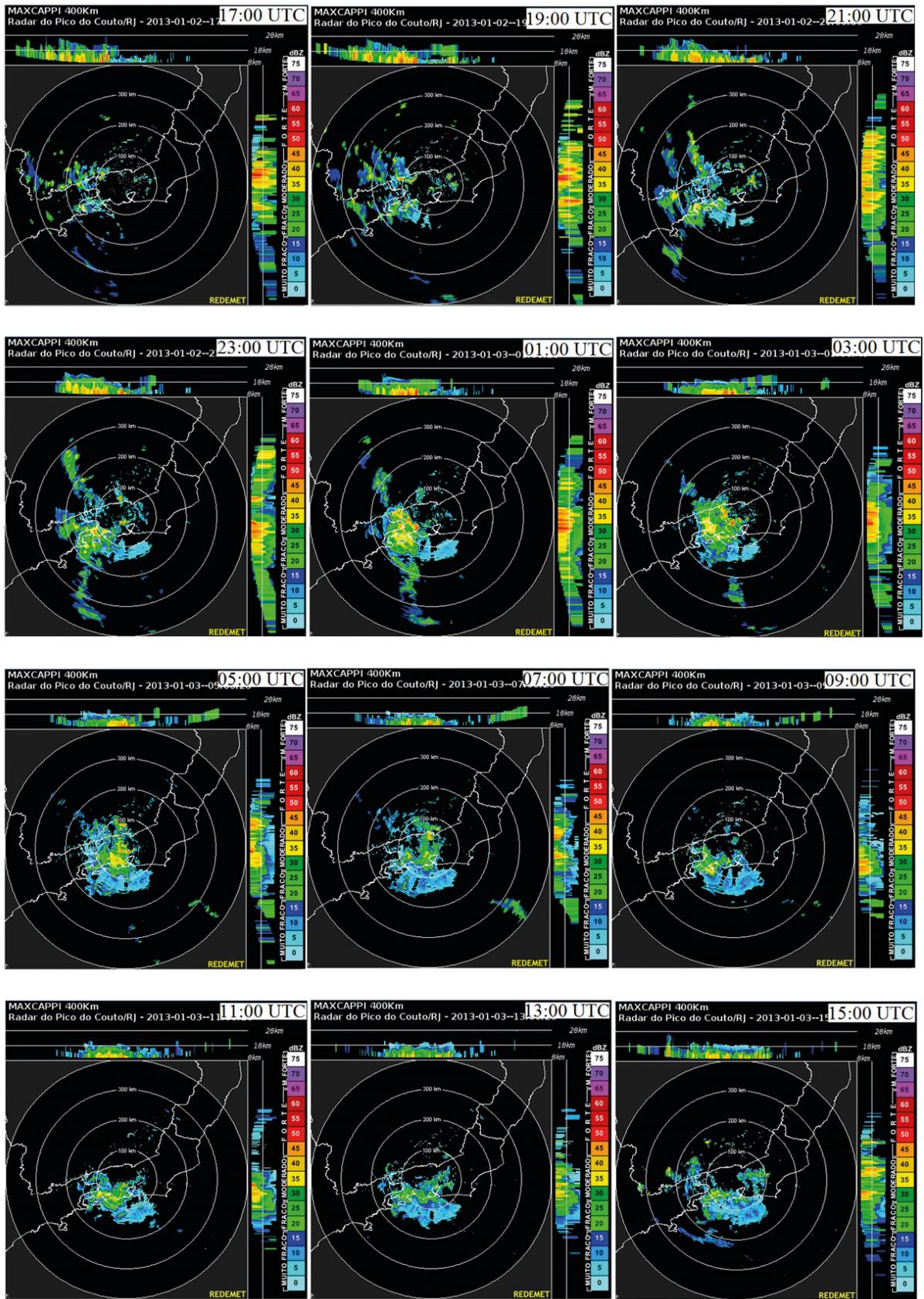


Figura 5 Imagens do radar do Pico do Couto (MAXCAPPi400 km) entre 02 e 03/01/2013.

medida pela estação do INMET foi de 62 mm no dia 03, conforme mostra a Figura 7. Nota-se que esta precipitação foi a segunda maior registrada naquele município durante todo o mês de Janeiro de 2013.

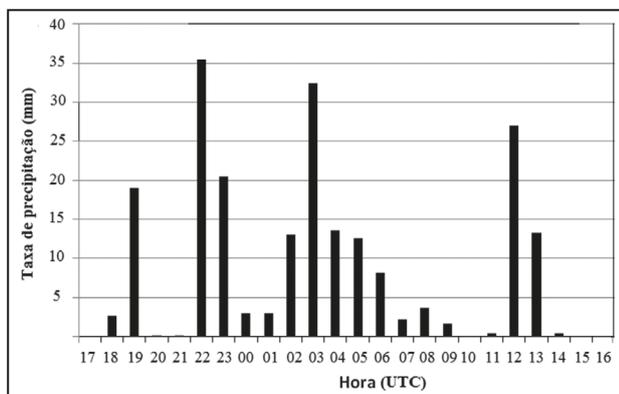


Figura 6 Precipitação medida na estação do INMET em Xerém/Duque de Caxias entre as 17:00 UTC do dia 02 e as 16:00 UTC do dia 03/01/2013.

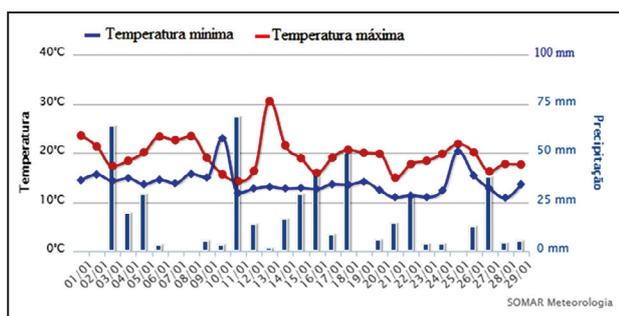


Figura 7 Precipitação e temperatura medidas na estação do INMET em Petrópolis para o mês de janeiro de 2013.

3.2 Características Termodinâmicas

A Figura 8 mostra os resultados das sondagens efetuadas a partir da estação Galeão (83746) entre as 00 Z do dia 02/01/2013 e as 00 Z do dia 04/01/2013. Esta estação é representativa da área onde se desenvolveu o SCM estudado. Nota-se às 00 Z do dia 02 que a atmosfera já se mostrava com instabilidade potencial, possuindo uma camada relativamente úmida entre a superfície e o nível de 700 hPa encimada por uma ampla camada seca desde este nível até os limites superiores da atmosfera, registrados pela sondagem feita até 100 hPa. Esta situação se agravou no dia seguinte, conforme se observa na sondagem das 12 Z do dia 02, quando se registrou um aumento da umidade na baixa troposfera até o nível de 600 hPa. Neste horário, a camada seca se manteve presente nos níveis médios e altos da atmosfera.

Na sondagem noturna das 00 Z do dia 03, observa-se pela Figura 8 que a camada quente e úmida se fortaleceu próximo à superfície e se estendeu até o nível de 350 hPa, com 100% de umidade desde a superfície até 700 hPa. Às 12 Z do dia 03, a camada de saturação de umidade se estendeu desde a superfície até cerca de 600 hPa. Às 00 Z do dia 04, as condições atmosféricas permanecem em situação de instabilidade, mas com formação de nuvens em camadas: 1) camada saturada entre 950 hPa e 750 hPa, 2) camada com pouca umidade entre 750 hPa e 550 hPa, e 3) camada saturada entre 500 hPa e 550 hPa. Desta forma, verifica-se que as sondagens dos dias 02 e 03/01/2013 mostram um ambiente atmosférico extremamente favorável ao desencadeamento da convecção profunda, com muita umidade na baixa troposfera e forte redução de umidade acima de 700 hPa (no início da tempestade) e de 200 hPa (no final da tempestade). Observa-se também que houve forte cisalhamento do vento nos baixos níveis da atmosfera durante a tempestade (Figura 8). Segundo Machado & Silva Dias (1990), as condições termodinâmicas mais favoráveis para a ocorrência de tempestades severas incluem valores elevados de umidade na camada limite atmosférica acoplados a uma inversão de subsidência do ar em 500 hPa. Os resultados das sondagens apresentados neste trabalho foram coerentes com Machado & Silva Dias (1990).

Objetivando verificar com maior exatidão o comportamento termodinâmico da atmosfera durante o evento estudado, realizou-se uma análise dos principais índices de instabilidade atmosférica que foram extraídos das sondagens na estação do Galeão. Os índices são apresentados na Tabela 3 para as 00 Z do dia 02 até as 00 Z do dia 04/01/2013, e estes foram avaliados com base nos valores limite adotados por Silva Dias (2008), que são específicos para a sua utilização na previsão da convecção profunda sobre a região da estação do Galeão. Nota-se que todos estes índices atingiram os limiares prescritos para que houvesse alta probabilidade de ocorrência de tempestade severa. A base e o topo das nuvens formadas no SCM estudado puderam ser estimadas pelos níveis de condensação por levantamento adiabático (NCL), de convecção livre (NCE) e de equilíbrio (NE). O NCL esteve muito baixo durante o evento, indicando que a base das nuvens entre as 12 Z do dia 02 e as 00 Z do dia 03 formou-se entre os níveis de 908,3 hPa e 959 hPa.

Estudo de Caso de Sistemas Convectivos de Mesoescala Intensos
 Ocorridos entre os Dias 02 e 03 de Janeiro de 2013 no Estado do Rio de Janeiro: Características Estruturais e Termodinâmicas
 José Ricardo Siqueira & Valdo da Silva Marques

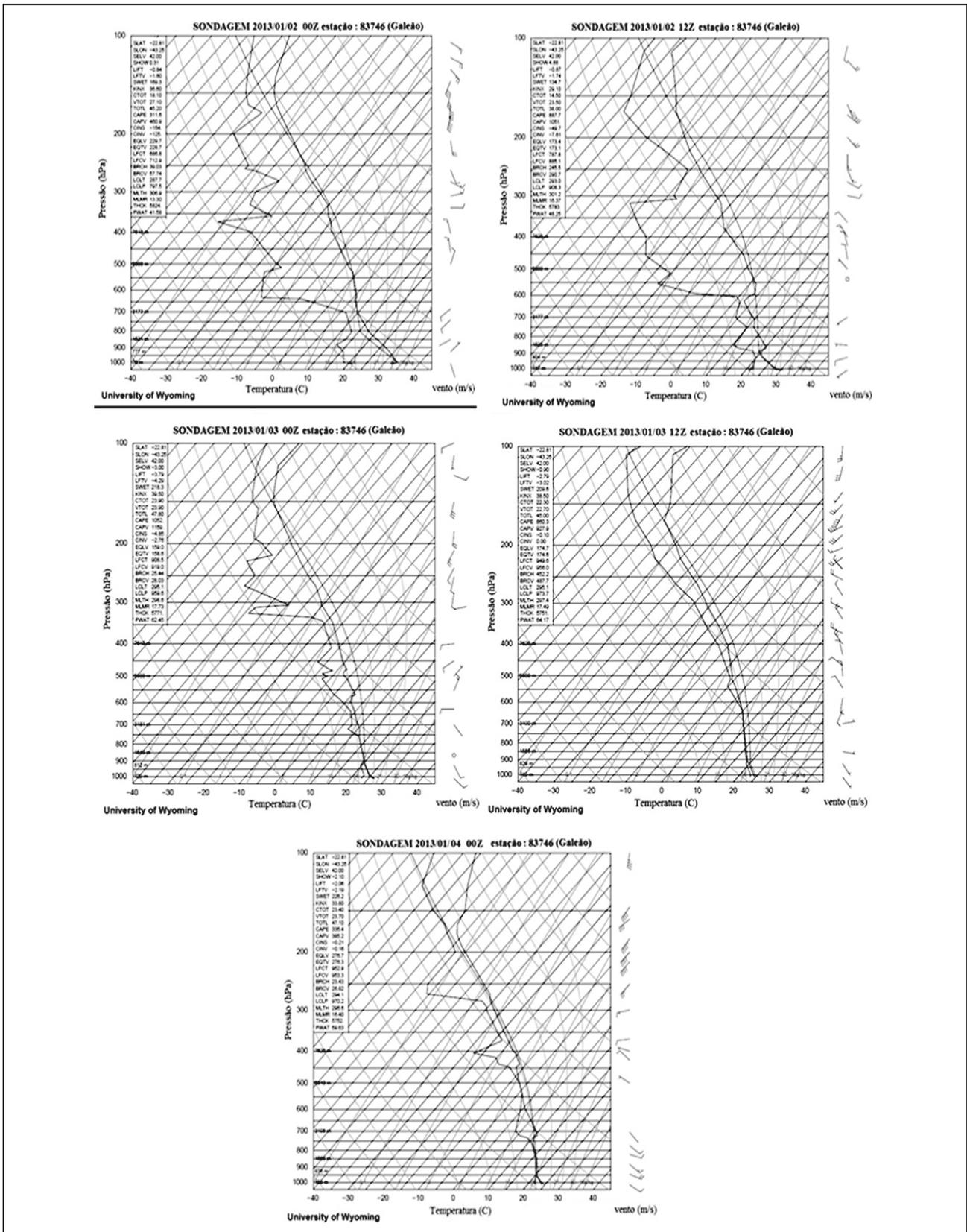


Figura 8 Resultados das sondagens realizadas na estação do Galeão (22,81° S; 43,25° W) para as 00 e 12Z dos dias 02 e 03/01/2013, e as 00 Z do dia 04/01/2013.

Analisando o NE fornecido na Tabela 3, nota-se que o topo de nuvem mais alto do SCM situou-se em torno de 159 hPa, sendo indicativo de nuvens de forte desenvolvimento vertical. Estes resultados são coerentes com os encontrados por Sousa & Karam (2014), que analisaram um SCM semelhante ocorrido na região metropolitana do Rio de Janeiro entre 17 e 18/03/2013. O NCE formou-se entre 787,9 hPa e 908,5 hPa, indicando que houve muita energia potencial disponível para a manutenção da convecção profunda. Às 00 Z do dia 03/01/2013 também são observados valores dos índices K (IK), Showalter (IS) e CAPE compatíveis com a forte atividade convectiva desenvolvendo-se no Estado do Rio de Janeiro pouco antes do SCM ter sido detectado nas imagens GOES. Neste instante, notam-se IK elevado (39,5), IS negativo (-3) e CAPE elevado (1159), apresentando condições amplamente favoráveis à ocorrência de tempestades sobre o Estado do Rio de Janeiro (60-90% de probabilidade, segundo o IK). Já os índices Total-Totals (ITT) e de Levantamento (IL) são compatíveis com o nível de instabilidade atmosférica observado no mesmo horário anterior, sendo o ITT próximo de 50 (48) e o IL negativo (-3,8).

A Figura 9 mostra os perfis verticais de temperatura potencial (Θ), temperatura potencial equivalente (Θ_e) e temperatura potencial equivalente saturada (Θ_{es}) estimados com base nas sondagens do Galeão, para as 00 Z do dia 02/01/2013 até as 00 Z do dia 04/01/2013. A variação da temperatura potencial é relacionada com a variação da energia

estática seca ($C_p T + gz$), onde C_p é o calor específico do ar à pressão constante, T é a temperatura, g é aceleração da gravidade, e z é a altura. Pela Figura 9, nota-se que a temperatura potencial aumenta quase linearmente com a altura entre a superfície e as proximidades da tropopausa, o que é compatível com os valores obtidos por vários pesquisadores para o cinturão tropical (por exemplo, Marques, 1981). Já a temperatura potencial equivalente é relacionada com a energia estática úmida. Quando a atmosfera está saturada, a temperatura potencial equivalente é medida pela temperatura potencial equivalente saturada. A temperatura potencial está relacionada com a energia estática seca pela expressão abaixo:

$$\frac{c_p T}{\theta} d\theta = d(c_p T + gz), \text{ ou}$$

$$\frac{c_p T}{\theta} \cdot \frac{d\theta}{dz} = \frac{d}{dz} (c_p T + gz).$$

Desta forma, um acréscimo de energia estática seca com a altura implica em $d\theta/dz > 0$, ou seja, a atmosfera permanece estável para um processo seco. Com a introdução da energia devida ao calor latente, a relação anterior será reescrita em termos da temperatura potencial equivalente, sendo dada por (Marques, 1981):

$$\frac{c_p T}{\theta_e} \cdot \frac{d\theta_e}{dz} = \frac{d}{dz} (c_p T + gz + Lq),$$

onde L é o calor latente de vaporização, e q é a umidade específica. Assim, pode-se estabelecer como critério de instabilidade para um processo úmido:

Índice	Dia 02/01/2013		Dia 03/01/2013		Dia 04/01/2013
	00 Z	12Z	00 Z	12 Z	00 Z
IL (°C)	-1,6	-0,9	-3,8	-2,8	-2,1
IK (°C)	36,6	29,1	39,5	38,5	33,8
IS – Showalter (°C)	0,3	4,9	-3,0	-0,9	-2,1
ITT – Totals (°C)	45,2	48,0	47,8	45,0	47,1
CAPE _{TV} (J.kg ⁻¹)	460,9	1051,0	1159,0	927,9	385,2
NCL (hPa)	797,5	908,3	959,7	873,8	970,3
NCE (hPa)	680,8	787,9	908,5	949,6	952,9
NE (hPa)	229,7	173,1	159,0	174,6	276,7

Tabela 3 Principais índices de instabilidade observados na estação do Galeão (22,81° S; 43,25° W) entre as 00 Z do dia 02 e as 00 Z do dia 04/01/2013.

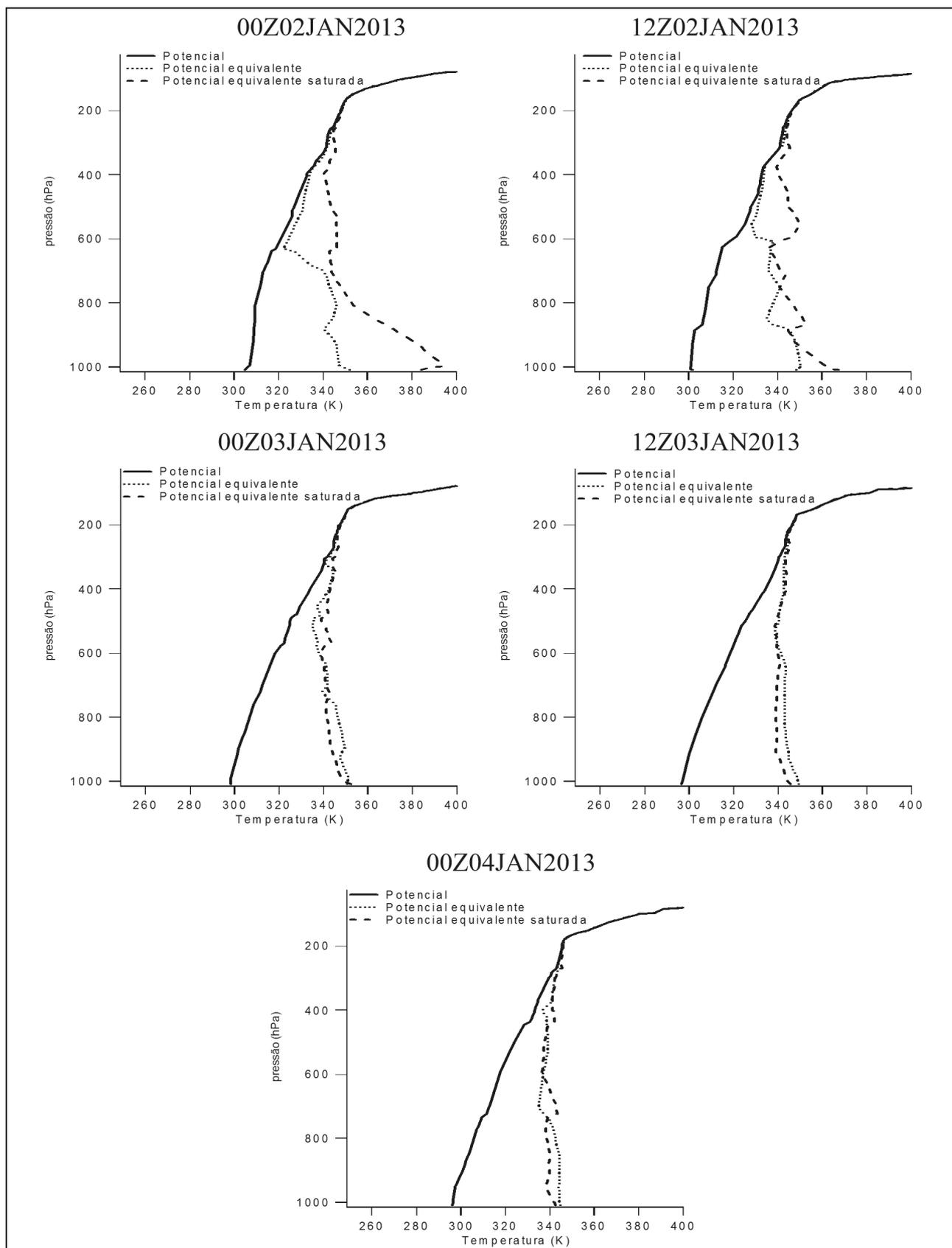


Figura 9 Perfis verticais das temperaturas potenciais seca, equivalente e equivalente saturada obtidos a partir das sondagens realizadas na estação do Galeão (22,81° S; 43,25° W) para as 00 e 12 Z dos dias 02 e 03/01/2013, e as 00 Z do dia 04/01/2013.

$$\frac{d}{dz}(c_p T + gz + L.q) > 0 \Rightarrow \text{estável};$$

$$\frac{d}{dz}(c_p T + gz + L.q) = 0 \Rightarrow \text{neutro}; \text{ e}$$

$$\frac{d}{dz}(c_p T + gz + L.q) < 0 \Rightarrow \text{instável}.$$

Analisando a Figura 9 com base no critério de instabilidade descrito acima, nota-se para as 00 Z do dia 02/01/2013 que a atmosfera apresenta-se potencialmente instável entre a superfície e cerca de 700 hPa (com uma camada úmida entre 800 e 700 hPa), e potencialmente neutra acima deste nível até cerca de 200 hPa (com uma camada relativamente seca). Às 12 Z do dia 02, a baixa troposfera torna-se intercalada por camada relativamente úmida próxima à superfície encimada por uma camada seca em níveis médios da troposfera. Neste mesmo horário, verifica-se a atmosfera potencialmente instável para processos úmidos. Às 00 Z e 12 Z do dia 03 e às 00 Z do dia 4, nota-se uma atmosfera praticamente saturada desde a superfície até os altos níveis da troposfera, e instável para processos úmidos. Durante a ocorrência do SCM, há uma forte mistura de umidade na vertical levando à diminuição do gradiente vertical de temperatura potencial equivalente. Deste modo, registra-se uma predominância de ar úmido próximo à saturação na coluna atmosférica desde a superfície até aproximadamente 250 hPa, favorecendo a instabilidade potencial.

Os resultados da Figura 9 explicam do ponto de vista da energia estática úmida quais as condições favoráveis para a ocorrência de convecção profunda. Os perfis termodinâmicos gerados na área de influência onde ocorreu o SCM estudado mostraram forte instabilidade condicional nos dias 02 e 03/01/2013, indicando as condições necessárias para a formação do intenso SCM ocorrido na baixada e serra fluminense. Para completar esta análise, é preciso verificar também as condições dinâmicas que forçaram o movimento vertical ascendente considerando a forçante orográfica quando o SCM atingiu as escarpas da serra do mar, na altura de Xerém (análise seguinte).

Nas Figuras 10 e 11 são ilustrados os campos de vento em 850 hPa e 200 hPa, respectivamente, para as 18 Z do dia 02/01/2013, 00 Z do dia 03/01/2013 e 18 Z do dia 03/01/2013. Quando conjugada com a análise das imagens de satélite e de radar (Figs. 2 e 5), a análise dos campos de vento em 850 hPa mostra que o SCM se formou na borda de uma frente fria sobre o litoral do Estado do Rio de Janeiro a partir do dia 02/01/2013, adquirindo movimento próprio independente da descontinuidade frontal (Fig. 10). O SCM deslocou-se durante o dia 03/01/2013 em direção às áreas da baixada fluminense até atingir as escarpas da serra do Mar nas proximidades da localidade de Xerém, onde produziu os maiores volumes de chuva. Observa-se também a presença de um Jato de Baixos Níveis (JBN) transportando ar quente e úmido na região subtropical da América do Sul, que parece contribuir muito pouco para o SCM estudado devido à sua distância em relação ao evento. A análise dos campos de vento em 200 hPa mostra a existência de um Jato de Altos Níveis (JAN) estendendo-se das latitudes médias até os subtropicais, próximo à região de ocorrência do SCM estudado (Figura 11). Ressalta-se que os padrões de circulação atmosférica observados durante a ocorrência do SCM estudado são muito semelhantes aos identificados por Silva Dias (1987) durante a ocorrência dos CCM sobre a região subtropical da América do Sul.

Os campos de temperatura do ar em 1000 hPa são mostrados na Figura 12 para as 18 Z do dia 02/01/2013, 00 Z do dia 03/01/2013 e 18 Z do dia 03/01/2013. Observa-se um gradiente horizontal de temperatura no sentido sul-norte durante o evento, com um cavado sobre o litoral e uma crista sobre o oceano Atlântico adjacente entre o estados do Rio de Janeiro e Rio Grande do Sul, variando entre 291 K (18° C) e 300 K (27°C.) Este padrão, que persiste durante todo o evento com uma ligeira variação na forma das isotermas, é consistente com o avanço do sistema baroclínico que atingiu o Estado do Rio de Janeiro entre os dias 02 e 03/01/2013 e originou o SCM estudado.

Na Figura 13 são ilustrados os campos de umidade relativa em 1000 hPa para as 18 Z do dia 02/01/2013, 00 Z do dia 03/01/2013 e 18 Z do dia 03/01/2013. Observam-se valores elevados de umidade relativa (80-90%) durante todo o evento, indicando que houve umidade suficiente para estabelecer as

Estudo de Caso de Sistemas Convectivos de Mesoescala Intensos
Ocorridos entre os Dias 02 e 03 de Janeiro de 2013 no Estado do Rio de Janeiro: Características Estruturais e Termodinâmicas
José Ricardo Siqueira & Valdo da Silva Marques

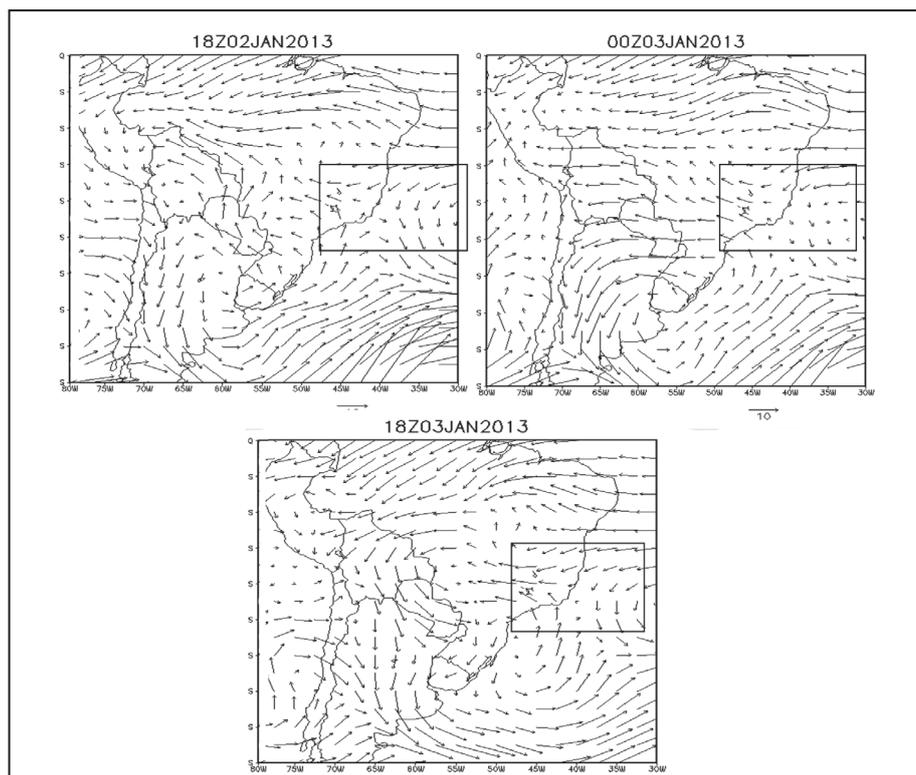


Figura 10 Campos de vento no nível de 850 hPa obtidos a partir das reanálises do NCEP para as 18 Z do dia 02/01/2013, 00 Z do dia 03/01/2013 e 18 Z do dia 03/01/2013.

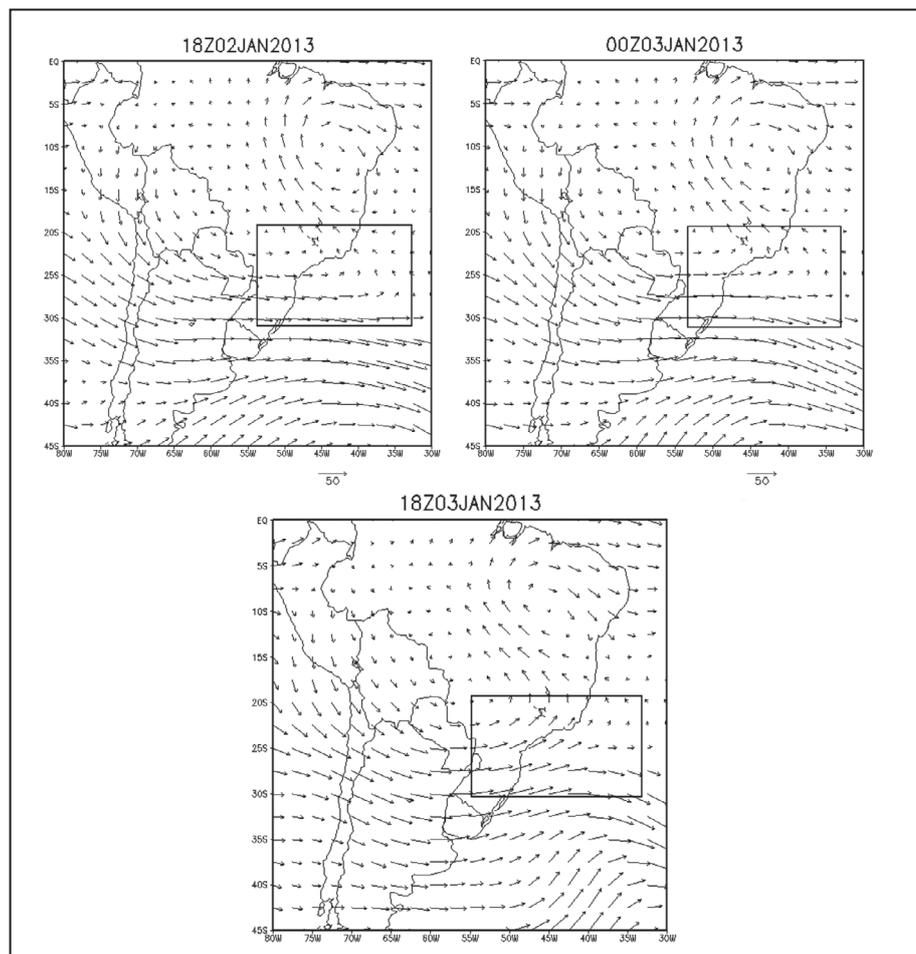


Figura 11 Campos de vento no nível de 200 hPa obtidos a partir das reanálises do NCEP para as 18 Z do dia 02/01/2013, 00 Z do dia 03/01/2013 e 18 Z do dia 03/01/2013.

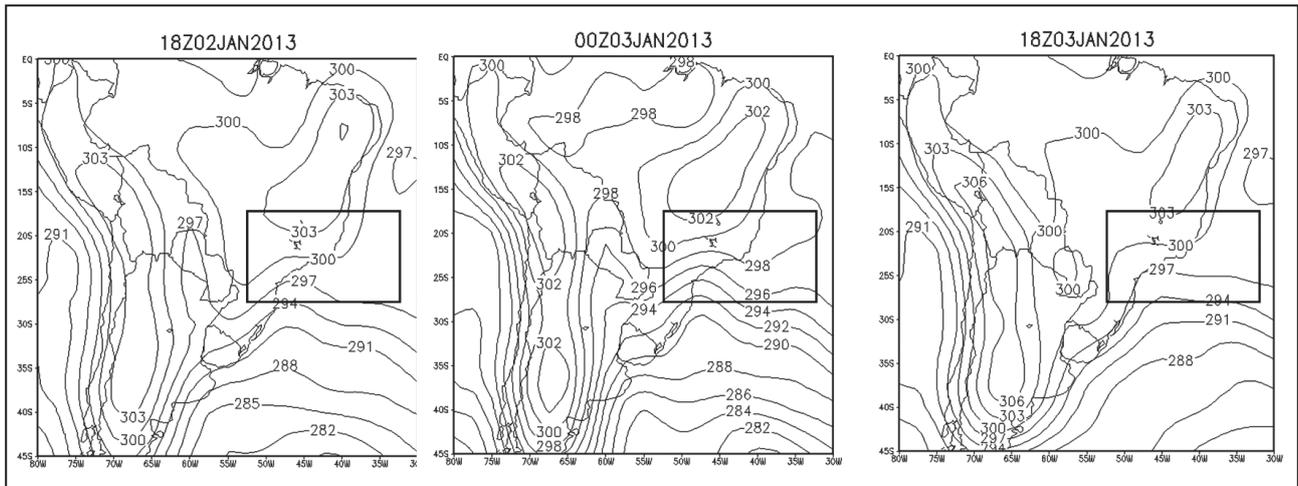


Figura 12 Campos de temperatura do ar no nível de 1000 hPa obtidos a partir das reanálises do NCEP para as 18 Z do dia 02/01/2013, 00 Z do dia 03/01/2013 e 18 Z do dia 03/01/2013.

condições necessárias para a convecção profunda. Analisando os campos de divergência de umidade em 1000 hPa para os mesmos horários anteriores, que são ilustrados na Figura 14, nota-se forte convergência de umidade nos baixos níveis sobre o estado do Rio de Janeiro durante todo o evento (valores altamente negativos), favorecendo a atividade convectiva na região do SCM estudado. Este resultado, associado à temperatura potencial equivalente consideravelmente mais quente sobre o Estado do Rio de Janeiro (Figura 9) e aos índices K e LI (Tabela 3), é indicativo de um ambiente convectivamente instável e bastante favorável à ocorrência de tempestades associadas a este SCM (com alto nível de previsibilidade).

Os campos de velocidade vertical nos níveis de 500 hPa e 700 hPa são mostrados na Figura 15 para as

18 Z do dia 02/01/2013, 00 Z do dia 03/01/2013 e 18 Z do dia 03/01/2013. Em ambos os níveis, observam-se valores negativos praticamente em todo o evento, revalando forte movimento ascendente das parcelas de ar na média troposfera. Este resultado também confirma a ocorrência de convecção profunda sobre a região do estudo. Analisando os perfis de vento horizontal na localidade de Xerém para os mesmos horários anteriores, conforme mostra a Figura 16, nota-se que às 18 Z do dia 02 o vento é de sudoeste próximo à superfície e gira para sudeste entre 850 hPa e 500 hPa. Este padrão é mantido até o nível de 400 hPa, seguido de forte componente meridional de sul e fraca componente zonal de leste até 100 hPa (circulação de sul-sudeste). Às 00 Z do dia 03, a circulação é de sul até 600 hPa, girando para circulação de norte entre 600 hPa e 350 hPa e

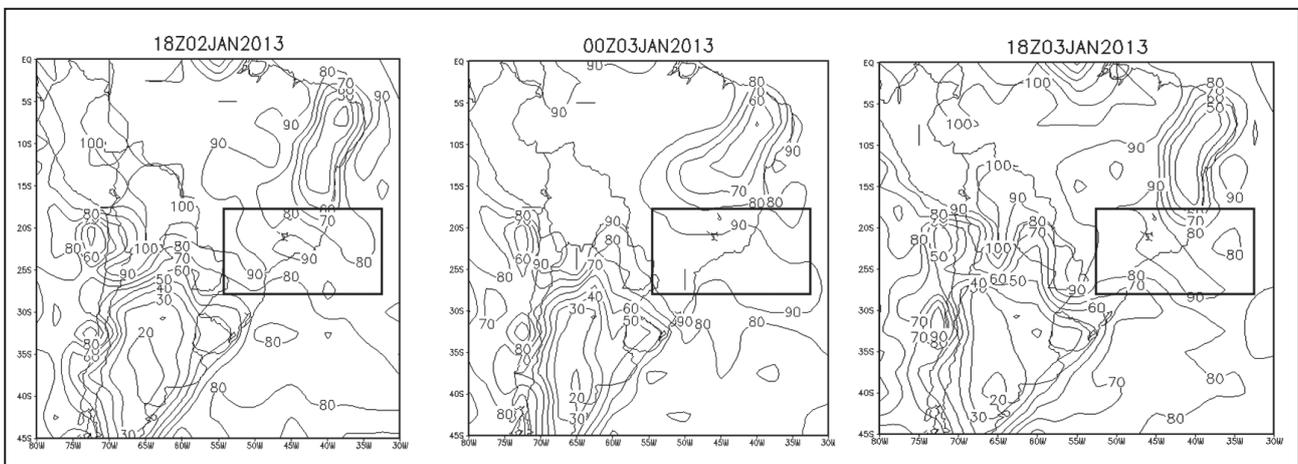


Figura 13 Campos de umidade relativa no nível de 1000 hPa obtidos a partir das reanálises do NCEP para as 18 Z do dia 02/01/2013, 00 Z do dia 03/01/2013 e 18 Z do dia 03/01/2013.

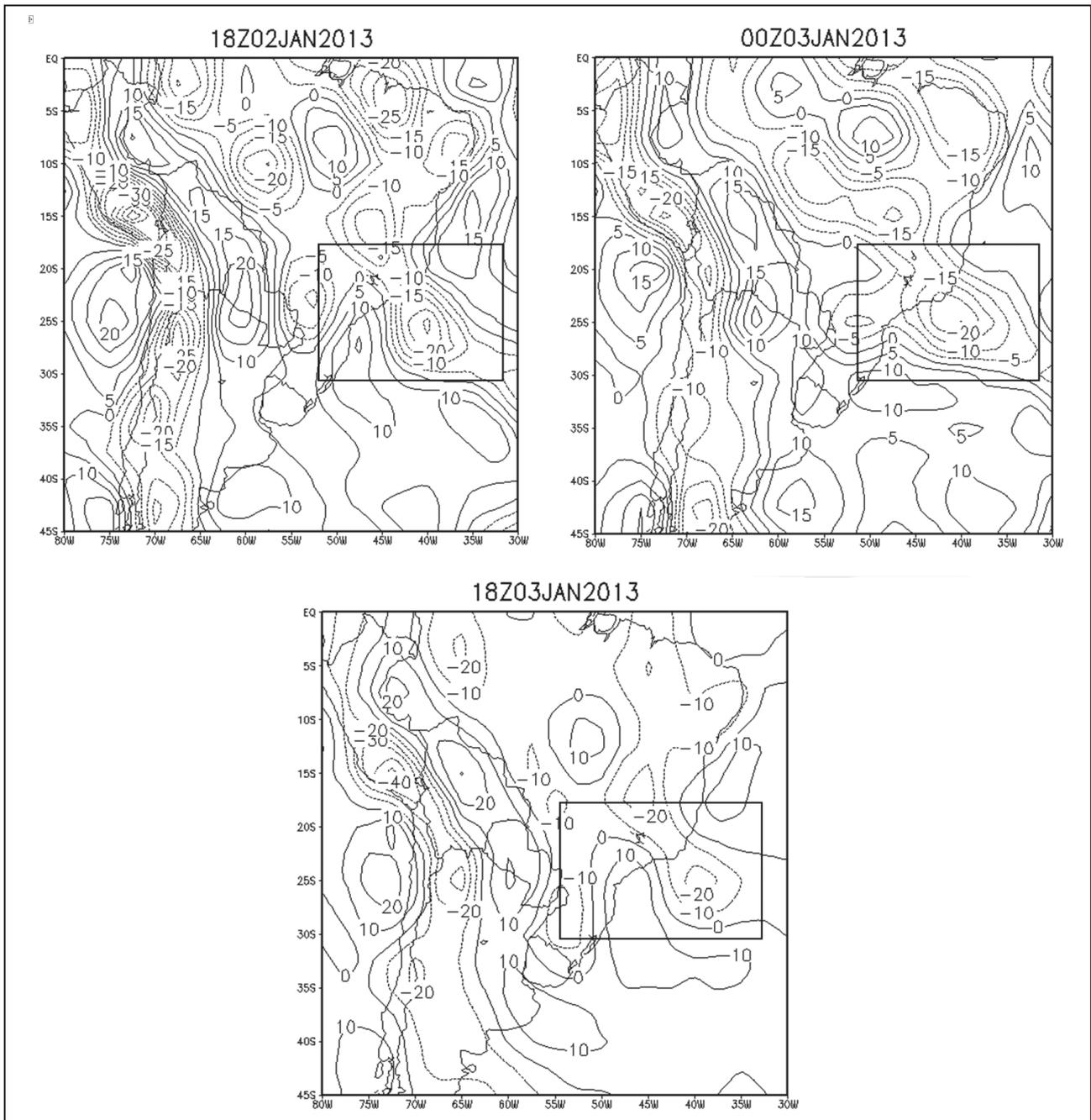


Figura 14 Campos de divergência de umidade no nível de 1000 hPa obtidos a partir das reanálises do NCEP para as 18 Z do dia 02/01/2013, 00 Z do dia 03/01/2013 e 18 Z do dia 03/01/2013.

retornando à circulação de sul acima deste último nível. Às 18 Z do dia 03, observa-se uma circulação na direção sul-sudeste desde a superfície até o nível de 600 hPa, girando para circulação de noroeste, ou seja, com um forte cisalhamento vertical. Estas condições complementam as condições favoráveis à convecção profunda e reforçam as condições favoráveis para a formação do SCM estudado.

4 Conclusões

Neste trabalho foi apresentada uma análise diagnóstica das características estruturais e termodinâmicas de SCM intensos que ocorreram sobre o Estado do Rio de Janeiro entre os dias 02 e 03/01/2013, utilizando imagens GOES, o método ForTrACC, imagens de radar, dados meteorológicos de superfície e reanálises do NCEP/NCAR.

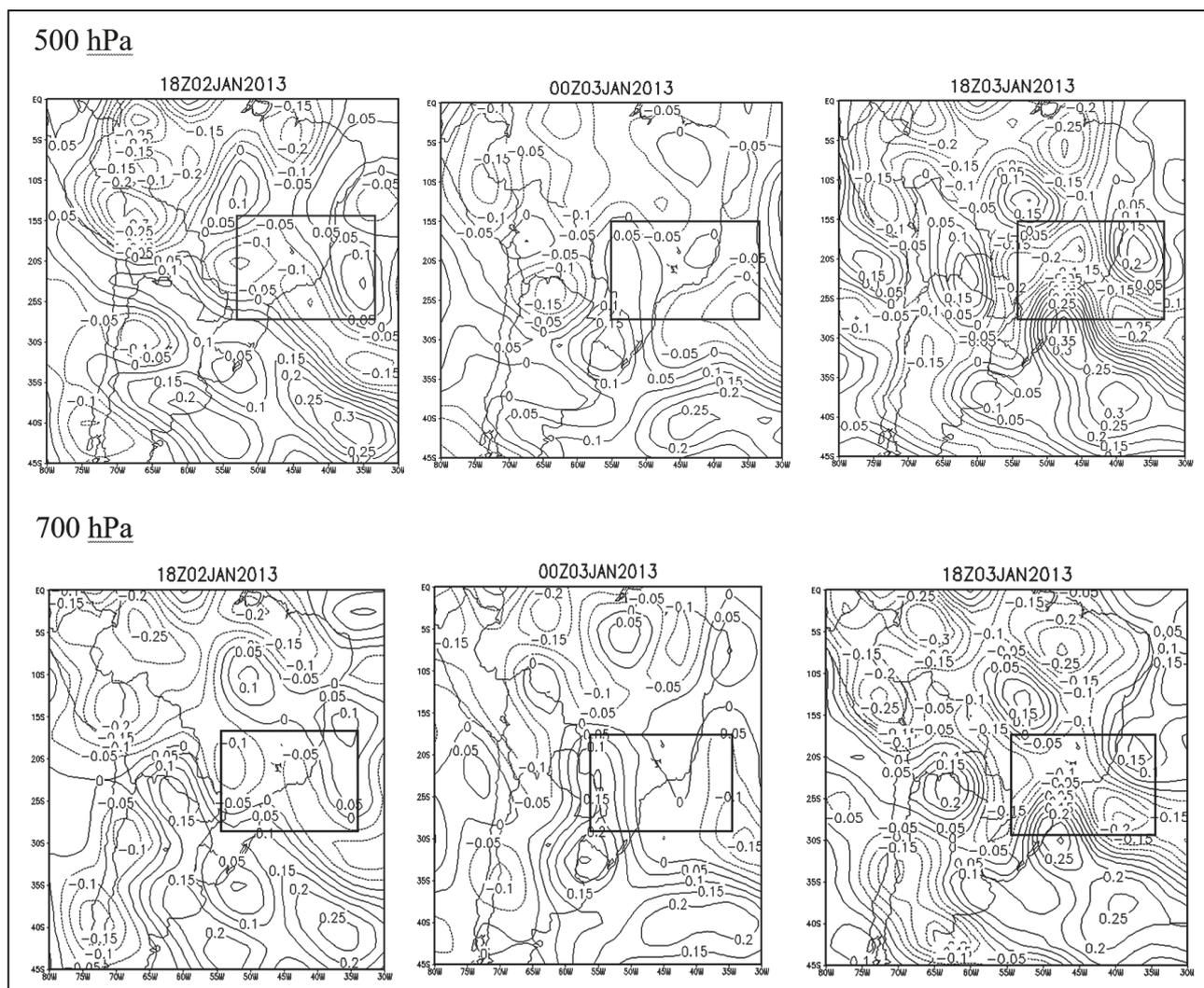


Figura 15 Campos de velocidade vertical (omega) nos níveis de 500 hPa e 700 hPa obtidos a partir das reanálises do NCEP para as 18 Z do dia 02/01/2013, 00 Z do dia 03/01/2013 e 18 Z do dia 03/01/2013.

Um total de quatro SCM foi detectado nas imagens de satélite durante o período acima, sendo que o SCM 1 e o SCM 3 (SCM 2 e SCM 4) foram de alta (muito baixa) intensidade. Concluiu-se que o SCM 3 foi uma continuidade do SCM 1, pois a dissipação do SCM 1 (ainda intenso nesta fase do ciclo de vida) ocorreu próxima ao sul fluminense cerca de uma hora antes da iniciação do SCM 3 sobre esta mesma região. O SCM 3 foi o sistema responsável por grandes enchentes e deslizamentos de terra nas regiões metropolitana e serrana do Estado do Rio de Janeiro, causando perdas materiais e econômicas de grande monta, dezenas de feridos, e duas perdas fatais.

As análises de satélite mostraram que o SCM 3, assim como os demais sistemas detectados, foi estimulado pela passagem de uma frente fria sobre o litoral sul fluminense no dia 02/01/2013. Este sistema caracterizou-se por: i) tempo de vida longo; ii) áreas total e convectiva extensas; iii) nuvens com forte desenvolvimento vertical (topos frios); e iv) taxas de precipitação elevadas sobre as regiões metropolitana e serrana fluminense (confirmadas por imagens de radar e por dados de superfície).

Também ficou evidenciado que o SCM responsável pelos danos nas regiões metropolitana e serrana fluminense teve um comportamento semelhante aos modelos conceituais de evolução

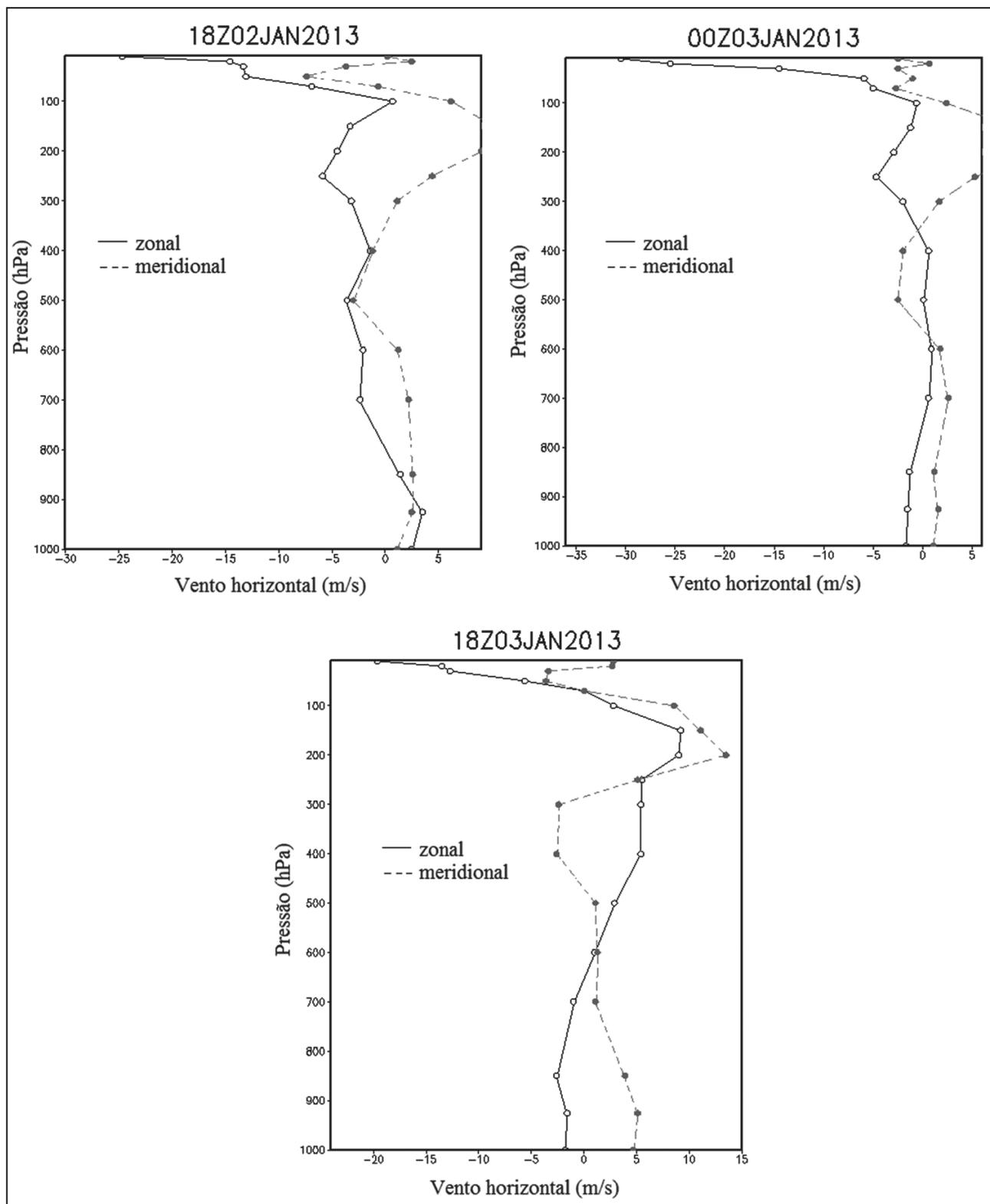


Figura 16 Perfis verticais de vento zonal e meridional em Xerém/Duque de Caxias (22,5° S, 43,2° W) obtidos a partir das reanálises do NCEP para as 18 Z do dia 02/01/2013, 00 Z do dia 03/01/2013 e 18 Z do dia 03/01/2013.

de sistemas de mesoescala (Machado & Rossow, 1993; Vila & Machado, 2004). Neste caso, o SCM apresentou intensa convecção seguida de queda de temperatura de brilho, para depois se expandir ligeiramente após a sua maturação. Exceto pelo seu tamanho, as características deste sistema foram similares às dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM) descritos por Maddox (1980), tais como: i) hábito noturno; ii) forma semicircular; e iii) tempo de vida acima de 6 horas.

As análises termodinâmicas mostraram forte convergência de umidade e muita instabilidade atmosférica no Estado do Rio de Janeiro durante a ocorrência dos SCM estudados, contribuindo para organizar a convecção profunda juntamente da incursão frontal no litoral sul fluminense e da topografia da região serrana do Estado do Rio de Janeiro. As análises dos índices de instabilidade confirmaram os resultados acima e apresentaram condições amplamente favoráveis à ocorrência das tempestades severas que atingiram o Estado do Rio de Janeiro, pouco antes do seu início (60-90% de probabilidade). Foram observados padrões de circulação similares aos dos eventos de CCM descritos por Silva Dias (1987), com um Jato de Baixos Níveis no sudeste da América do Sul (que aparente contribuiu muito pouco para o evento devido à sua distância em relação ao mesmo), bem como um Jato de Altos Níveis nos subtropicais.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (CCT/UENF) pelo suporte financeiro. Os autores também agradecem à Defesa Civil do Município de Duque de Caxias pelo fornecimento dos dados sobre a catástrofe ocorrida em Xerém entre os dias 2 e 3 de janeiro de 2013, que ensejou o presente Artigo

6 Referências

Garreaud, R.D. & Wallace, J.M. 1997. The diurnal march of convective cloudiness over the Americas. *Monthly Weather Review*, 125: 3157-3171.
Houze, R.A. 1993. *Cloud dynamics*. Academic Press. 573p.
Houze, R.A. 2004. Mesoscale convective systems. *Reviews of Geophysics*, 42: 1-43.

Kalnay, E.; Kanamitsu, M.; Kistler, R.; Collins, W.; Deaven, D.; Gandin, L.; Iredell, M.; Saha, S.; White, G.; Woollen, J.; Zhu, Y.; Chelliah, M.; Ebisuzaki, W.; Higgins, W.; Janowiak, J.; Mo, K.C.; Ropelewski, C.; Wang, J.; Leetmaa, A.; Reynolds, R.; Jenne, R. & Joseph, D. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77: 437-471.
Machado, L.A.T. & Silva Dias, M.A.F. 1990. Análise de uma tempestade severa sobre a cidade de São Paulo: Um exemplo de interações entre diferentes escalas de movimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 6, Salvador, 1990. *Resumos expandidos*, Salvador, SBMET, CD-ROM.
Machado, L.A.T. & Rossow, W.B. 1993. Structural characteristics and radiative properties of tropical cloud clusters. *Monthly Weather Review*, 121: 3234-3260.
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.
Maddox, R.A. 1980. An objective technique for separating macroscale and mesoscale features in Meteorological data. *Monthly Weather Review*, 108: 1108-1121.
Maddox, R.A. 1983. Large-scale meteorological conditions associated with midlatitude, mesoscale convective complexes. *Monthly Weather Review*, 111: 1475-1493.
Nicolini, M.; Saulo, A.C.; Torres, J.C. & Salio, P. 2002. Enhanced precipitation over Southeastern South America related to strong low-level jet events during austral warm season. *Meteor. Special Issue for the South Amer. Monsoon System*, 27: 59-69.
Silva Dias, M.A.F. 1987. Sistemas de mesoescala e previsão de tempo em curto prazo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2: 133-150.
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. 2010. Structural characteristics of mesoscale convective systems over southeast Brazil related to cold frontal and non-frontal incursions. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal*, 60: 49-62.
Sousa, F.B.B. & Karam, H.A. 2014. Análise da estrutura termodinâmica associada ao desenvolvimento de tempestade ocorrida entre 17 e 18 de março de 2013 no estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 37: 17-26.
Velasco, I. & Fritsch, J.M. 1987. Mesoscale convective complexes in the Americas. *Journal of Geophysical Researches*, 92: 9591-613.
Vicente, G.A.; Scofield, R.A. & Menzel, P.A. 1998. The operational GOES infrared rainfall estimation technique. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79: 1883-1898.
Vila, D. & Machado, L.A.T. 2004. Shape and radiative properties of convective systems observed from infrared satellite images. *International Journal of Remote Sensing*, 25: 4441-4456.
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.
Zipser, E.J. 1977. Mesoscale and convective-scale downdrafts as distinct components of squall-line circulation. *Monthly Weather Review*, 105: 1568-1589.
Zipser, E.J.; Salio, P. & Nicolini, L.P. 2004. Mesoscale convective systems activity during SALLJEX and the relationship with SALLJ events. *CLIVAR Exchanges*, 9: 14-18.