Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>

Eventos Recentes de Chuva Intensa na Cidade do Rio de Janeiro: Análise Sinótica

Lucas Alberto Fumagalli Coelho¹, André Becker Nunes²

¹ Mestrando em Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, Av. Engenheiro Ildefonso Simões Lopes, 2751, Pelotas - RS, e-mail: lucasfumagalli@gmail.com. (autor correspondente). ² Prof. Dr. do Programa de Pós-graduação em Meteorologia na Universidade Federal de Pelotas (PPGMET/UFPEL), e-mail: beckernunes@gmail.com.

Artigo recebido em 01/12/2019 e aceito em 24/05/2020

RESUMO

Três eventos recentes de chuva intensa ocorreram na cidade do Rio de Janeiro-RJ no primeiro semestre dos anos de 2018 e 2019, e somados causaram cerca de duas dezenas de mortes. Os pluviômetros do Sistema Alerta Rio mostraram que a precipitação acumulada superou o limiar de 100 milímetros em 24 horas nos três casos. Eventos como estes causam inundações, e deslizamento de terra, e são documentados desde o século XIX. Mesmo após a criação de centros de monitoramento em anos recentes as chuvas intensas continuam causando vítimas fatais no município do Rio de Janeiro. Neste trabalho foram identificados os mecanismos de escala sinótica que atuaram durante os eventos recentes de chuva intensa. Uma variedade de padrões foi encontrada, no entanto alguns sistemas meteorológicos foram comuns a todos os eventos, tais como o deslocamento de um cavado de latitudes médias no escoamento zonal de oeste, vórtices ciclônicos de médios e altos níveis; difluência do vento em nível superior; interação entre o Cavado do Nordeste, a Alta da Bolívia e os sistemas transientes do fluxo zonal básico; baixa pressão, circulação ciclônica e elevada umidade relativa do ar sobre a zona costeira do Sudeste do Brasil em baixos níveis; a presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul e frentes frias que criam acentuado gradiente de temperatura nos níveis inferiores, mesmo durante o verão.

Palavras-chave: Vórtices ciclônicos de altos níveis; Zona de convergência do Atlântico Sul; Ciclones Subtropicais.

Recent Heavy Rainfall Events in the City of Rio De Janeiro: Synoptic Analysis

ABSTRACT

Three recent heavy rainfalls events happened in the city of Rio de Janeiro-RJ in the first half of 2018 and 2019, and together caused about two dozen deaths. The Sistema Alerta Rio's rain gauges showed that the accumulated precipitation exceeded the 100 mm threshold in 24 hours in all three cases. Events like these cause flash floods, landslides, and have been documented since the 19th century. Even after the establishment of monitoring centers in recent years heavy rainfalls continue to cause fatalities at the city of Rio de Janeiro. In this paper we identified the synoptic scale mechanisms that operated during the heavy rainfall's events. A variety of patterns were found, however some meteorological systems were common to all events, such as the displacement of a mid-latitude trough in the west flow, upper tropospheric cyclonic vortices; upper level wind diffluence; interaction between the Cavado do Nordeste, the Bolivian High and the transient systems of the basic zonal flow; low pressure, cyclonic flow and high moisture at low levels on the coastal zone of southeastern Brazil; the presence of the South Atlantic Convergence Zone and cold fronts that creates a great temperature gradient at lower levels, even during summer.

Keywords: Upper tropospheric cyclonic vortex; South Atlantic Convergence Zone; Subtropical Cyclones.

Introdução

Os desastres naturais urbanos são potencializados pelo crescimento da população, ocupação desordenada, alterações no uso do solo e mudanças climáticas, e podem estar relacionados a tempestades severas que causam inundações e deslizamentos de terra (Seluchi et al., 2016). A cidade do Rio de Janeiro (CRJ), com uma

população estimada em quase 7 milhões de habitantes (IBGE, 2019), tem uma infraestrutura urbana considerada inadequada para acomodar inundações causadas por chuvas intensas. Os deslizamentos de terra ocorridos no município de Niterói-RJ em abril de 2010, e os que ocorreram em sete municípios da Região Serrana do Rio de

Janeiro (RSRJ) em janeiro de 2011, são considerados um marco na mudança de proteção, prevenção e resposta aos desastres naturais no Brasil (Dereczynski et al., 2017). Estes eventos levaram a criação do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) em 2012. Os deslizamentos de terra são os eventos mais perigosos em função do maior número de perdas humanas que acarretam (Seluchi et al., 2016).

A costa atlântica da América do Sul entre as latitudes de 20°S - 35°S, uma região densamente povoada, é propensa a ocorrência de eventos extremos. A região é fortemente frontogenética (Satyamurty e Mattos, 1989), e a ciclogênese é favorecida devido gradientes horizontais de temperatura do ar em superfície entre o continente e o oceano, e a confluência das correntes do Brasil e das Malvinas (Gan e Rao, 1991; Reboita et al., 2009). Além disso a divergência de massa que ocorre corrente abaixo dos cavados em nível superior contribui para o desenvolvimento dos sistemas de pressão. Estes sistemas, como anticiclones e ciclones em superfície, e cristas e cavados em altos níveis, são encontrados frequentemente nesta faixa de latitude. Eles alteram as condições do tempo à medida que respondem aos mecanismos físicos das forçantes da teoria quasigeostrófica: advecção de temperatura para os sistemas de pressão em baixos níveis, advecção de vorticidade para sistemas em altitude, atrito com a superfície e aquecimento diabático. Quando dinâmicos os sistemas de pressão podem se estender da superfície até altos níveis, e sua fase de desenvolvimento pode ser identificada pela estrutura vertical (Bluestein, 1993). Além disso, na América do Sul em geral, existem sistemas de pressão de altos níveis característicos, como Alta da Bolívia (AB) (Lenters e Cook, 1999) e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) tropicais e subtropicais (Satyamurty et al., 1998), que podem ocorrer simultaneamente (Nunes, 2017). Estes sistemas interagem e podem contribuir para ocorrência de eventos extremos.

Durante a estação quente, quando o Sistema de Monção Sul-Americano está bem organizado, ocorre um expressivo transporte horizontal de umidade e calor da região amazônica para o Sudeste do Brasil (SEBR). Nesse ambiente se desenvolve a Zona de Convergência do Atlântico Sul (SACZ), que desempenha um papel importante no regime de precipitação do SEBR (Silva et al., 2018). Pristo et al. (2018) identificaram o verão (44%) e outono (31%) como sendo as estações preferenciais para a ocorrência

de eventos de chuva intensa (ECI) no município do Rio de Janeiro.

Muitos dos ECI no estado do Rio de Janeiro (ERJ) estão associados a presença da ZCAS. Outros são causados por sistemas frontais (Seluchi e Chou, 2009; Dereczynski et al., 2008), por sistemas convectivos (SC) isolados (Silva et al., 2018), ou ainda por uma interação entre estes sistemas (Moura et al., 2013). Na planície fluminense, por exemplo, a precipitação mensal acumulada é maior quando há ocorrência conjunta de ZCAS, zona de convergência de umidade (ZCOU) e FF (Oliveira-Júnior et al., 2019). Silva et al. (2018) mostraram que 48% das chuvas fortes que causam inundações na RSRJ estão associadas a ZCAS, 28% a FF e 24% a SC isolados. Segundo os autores, inundações associadas à ZCAS são caracterizadas pela disponibilidade vertical de umidade e por componentes dinâmicos, este segundo com maior eficiência para a precipitação em eventos de FF, e inundações associadas a SC isolados ocorrem principalmente em função do aquecimento diurno e elevada umidade do ar. Nos três casos os autores observaram transporte contínuo de umidade entre a região amazônica e o estado do Rio de Janeiro (ERJ), seguido de uma mudança na direção do vento, sugerindo que até mesmo o desenvolvimento de SC isolados pode estar associado a FF em latitudes médias. Silva et al. (2017) analisaram uma tempestade que causou um acumulado de chuva superior a 100 mm na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, e mostraram que havia acoplamento vertical entre um centro de convergência de fluxo de umidade em baixos níveis e um centro de divergência de fluxo de massa em nível superior, com fraco cisalhamento do vento. Segundo os autores, a interação entre um cavado de nível superior e o ar quente em baixos níveis favoreceu a formação de um pequeno sistema de baixa pressão em 850 hPa que garantiu energia cinética para o levantamento do ar, e mencionam que uma atmosfera úmida não é capaz de produzir fortes tempestades, a não ser que estes mecanismos dinâmicos estejam presentes.

Na literatura são encontradas diferentes metodologias para determinar um evento de chuva intensa (ECI) (Nunes e Pereira, 2017). Liebmann et al. (2001) identificaram os dias em que as chuvas no estado de São Paulo acumularam 12% ou mais do total climatológico do período chuvoso, e consideraram estes eventos como ECI. Em trabalhos voltados para o sul do Brasil, Da Silva e Nunes (2011), Nunes e Da Silva (2013) e Pereira e Nunes (2018) identificaram ECIs de acordo com o histórico de inundações de cada cidade. Santos et al. (2016) e Da Silva et al. (2020) são exemplos de

trabalhos que empregaram o Índice de Chuva Padronizada na identificação de eventos extremos de precipitação para diferentes regiões do Brasil. Dereczynski et al. (2008) utilizaram o limiar de 100 mm dia⁻¹ para caracterizar um ECI e encontraram uma frequência anual média de 1,5 eventos na CRJ entre 1997 a 2006. Dolif e Nobre (2012) encontraram média de 2,9 eventos anuais entre 2000 e 2010; Dereczynski et al. (2017) pesquisaram ECI na CRJ a partir de notícias em jornais, que compreende o período de 1881 a 1996, e encontraram uma média de 1,3 ECI ano⁻¹ na CRJ com acumulado de 100 mm ou mais. Já Pristo et al. (2018) definem ECIs como eventos em que o percentil 95 do acumulado de 15 minutos ocorre no mesmo dia em que o percentil 95 do acumulado diário é alcançado.

Pesquisas na área da meteorologia sinótica são importantes para a sociedade pois permitem identificar os mecanismos que levam a ocorrência de eventos extremos, e podem ser aplicadas por meteorologistas envolvidos em previsão operacional, onde o monitoramento de certas variáveis na estrutura da atmosfera pode ajudar a detectar a potencialidade de um ECI, contribuindo para uma previsão assertiva e com antecedência desses eventos, auxiliando a tomada de decisão por parte de governos e centros operacionais (Teixeira e Satyamurty, 2007); Silva et al., 2017; Silva et al., 2018; Palenzuela et al., 2019).

Neste trabalho estudamos três ECI recentes que ocorreram na CRJ entre os primeiros semestres de 2018 e 2019. O caso 1 (ECI-1) ocorreu entre 14 e 15 de fevereiro de 2018 e resultou em quatro vítimas; no caso 2 (ECI-2), entre 06 e 07 de fevereiro de 2019, ocorreram seis mortes; o caso 3 (ECI-3), entre 08 a 09 de abril de 2019, foi o mais intenso, persistente e causou dez mortes. O objetivo do estudo foi analisar o ambiente destes ECIs recentes em escala sinótica, frente à hipótese de que uma situação atmosférica particular, que apresente os recursos apropriados, está associada à ocorrência de ECIs na CRJ.

Material e métodos

Os ECIs foram identificados em dados de 33 pluviômetros do Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro (www.alertario.rio.rj.gov.br/download/dados-pluviometricos/), localizados conforme mostrado na Tabela 1. Os dados estavam disponíveis em acumulados de 15 minutos, 1 hora e 24 horas, para o período entre janeiro de 2018 e abril de 2019. Os dias em que o limiar de 100 mm acumulados em 24 horas ocorreu foram selecionados como ECI.

A nebulosidade associada aos eventos foi observada por meio de imagens realçadas do canal 13 do satélite GOES Leste, disponibilizadas pela Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE).

A análise sinótica dos casos foi feita por interpretação de campos meteorológicos da quinta geração da reanálise do European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) Atmospheric Reanalyses of the Global Climate (ERA5), desenvolvida no Copernicus Climate Change Service - Climate Data Store (CDS) (Hersbach et al., 2019). Os dados de reanálise possuem resolução espacial de 0.25° de latitude, 0.25° de longitude e intervalo de tempo de 1 hora. Foram gerados campos de linha de corrente e magnitude do vento em 250 hPa, velocidade vertical (ω) em 500 hPa, altura do geopotencial em 500 hPa e pressão ao nível médio do mar, umidade relativa do ar e linha de corrente em 850 hPa, e temperatura do ar em 850 hPa.

Resultados e discussão

Descrição dos casos

Comum aos três eventos de chuva intensa foi a intensidade máxima da precipitação, que ocorreu no intervalo entre 21z e 03z. No primeiro caso, entre 14 e 15 de fevereiro de 2018 (ECI-1) o acumulado máximo de precipitação em 15 minutos foi de 48,4 mm na estação Rio Centro e 41,6 mm na estação Grajaú-Jacarepaguá, ambas localizadas na zona sul do município do Rio de Janeiro. Um acumulado máximo superior a 30 mm em 15 minutos ocorreu em 30% dos pluviômetros. No segundo caso, entre 06 e 07 de fevereiro de 2019 (ECI-2), o acumulado máximo foi de 39,0 mm no Vidigal e 38,0 mm no Rio Centro, com 18% dos pluviômetros com máximos acima de 30 mm em 15 minutos. O caso de 08 a 09 de abril de 2019 (ECI-3) teve acumulado em 15 minutos de 34,8 mm no pluviômetro da Barrinha e 31,4 mm no Recreio e Rio Centro, sendo estes os pluviômetros com acumulado superior a 30 mm em 15 minutos. No ECI-1 foi observado chuva de menor intensidade antes no dia anterior e horas antes do evento, o que não foi observado nos demais casos, e no ECI-3 a chuva persistiu até o dia seguinte com um máximo secundário as 9Z (Figura 1). O caso de fevereiro 2018 apresentou precipitação intensa mais abrangente, e os eventos de 2019 tiveram seus máximos concentrados próximos da costa, na zona Sul da CRJ. O ECI-3 foi o que registrou os maiores acumulados em 24 horas, superando 300 mm em 7 dos 33 pluviômetros, com média entre eles de 190,4 mm. A distribuição espacial dos máximos de precipitação em acumulados de 15 minutos, 1 hora e 24 horas são mostrados na Figura 2.

Estação	Latitude	Longitude	Estação	Latitude	Longitude
Alto da Boa Vista	-22.9658	-43.2783	Jardim Botânico	-22.9728	-43.2239
Anchieta	-22.8269	-43.4033	Laranjeiras	-22.9406	-43.1875
Mendanha	-22.8569	-43.5411	Madureira	-22.8733	-43.3389
Bangu	-22.8803	-43.4658	Penha	-22.8444	-43.2753
Barrinha	-23.0085	-43.2997	Piedade	-22.8918	-43.3101
Rio Centro	-22.9772	-43.3915	Recreio	-23.0100	-43.4406
Campo Grande	-22.9036	-43.5619	Rocinha	-22.9858	-43.2450
Copacabana	-22.9864	-43.1894	Santa Cruz	-22.9094	-43.6844
Est. Grajaú	-22.9256	-43.3158	Santa Teresa	-22.9317	-43.1964
Grajaú-Jacarepaguá	-22.9222	-43.2675	São Cristóvão	-22.8967	-43.2217
Grande Méier	-22.8906	-43.2781	Saúde	-22.8961	-43.1879
Grota Funda	-23.0144	-43.5214	Sepetiba	-22.9689	-43.7117
Guaratiba	-23.0503	-43.5947	Tijuca	-22.9319	-43.2217
Ilha Governador	-22.8181	-43.2103	Tijuca/Muda	-22.9328	-43.2433
Irajá	-22.8269	-43.3369	Urca	-22.9558	-43.1667
Cidade de Deus	-22.9456	-43.3628	Vidigal	-22.9925	-43.2331
Tanque	-22.9125	-43.3647			

Tabela 1. Localização geográfica dos pluviômetros do Alerta Rio.

Quanto à nebulosidade, no caso de 2018 (ECI-1) foi identificada a atuação da ZCAS, observada pela faixa de nuvens entre a Bacia Amazônica e o Atlântico Sul (Satyamurty et al., 1998; Liebmann et al., 1999; Carvalho et al., 2002). O sistema atuou por mais de dez dias. A Figura 3a mostra a situação da ZCAS no momento aproximado do ECI-1. A ZCAS interagiu com uma FF em latitudes subtropicais, de modo semelhante ao exposto por Moura et al. (2013) e Seluchi et al. (2016). Um sistema convectivo de

mesoescala (SCM) se desenvolveu no Oceano Atlântico, próximo do litoral dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, e sobre a Baía de Guanabara (Figura 3a). As características físicas deste sistema, quanto aos critérios de tamanho e forma, são semelhantes aos descritos por Maddox (1980) como sendo um Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM), embora com duração menor do que o proposto pelo autor. No caso de fevereiro de 2019 (ECI-2) também havia uma faixa de nuvens entre a Amazônia e o SEBR, com SCM (Figura 3b), mas não foi caracterizada a ZCAS.

Figura 1. Maior valor da precipitação acumulada no intervalo de 15 minutos durante os eventos de chuva intensa entre 14 e 15 de fevereiro de 2018 (a), 06 e 07 de fevereiro de 2019 (b), e entre 08 e 09 de abril de 2019 (c).

No caso de abril de 2019 (ECI-3) havia uma zona de convergência de umidade em direção ao SEBR, que acompanhou o deslocamento de uma FF entre o sul e o sudeste do Brasil, como nos outros casos. Esta zona de convergência teve duração de cinco dias. Oliveira-Júnior et al. (2019) sugerem a definição de ZCOU quando a banda de nuvens for semelhante à ZCAS, mas com duração de três dias. A partir do quarto dia pode ser caracterizada como ZCAS. Segundo os autores, a partir do momento em que a ZCAS começa a se dissipar, mas ainda há uma banda de nuvem organizada, volta receber o nome de ZCOU. Assim, este caso também poderia ser considerado um caso de ZCAS. Independente da persistência da ZCOU ou ZCAS, a zona de convergência de umidade é um recurso presente em todos os casos, e sua localização geográfica oscilou entre mais a sul no ECI-1, e mais a norte no ECI-3 (Figura 3). Diferente dos outros casos, no ECI-3 houve predomínio de nuvens estratiformes ERJ e na CRJ. Silva et al. (2017) analisaram um conjunto de

dados de radiossonda e mostraram que durante uma tempestade na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, o índice de energia potencial convectiva disponível (CAPE) e de levantamento (LI) foram os mais expressivos quando comparados a um caso em que havia previsão de chuva, mas o evento não ocorreu. Silva et al. (2018) mostraram que os índices CAPE e LI são importantes para verificar a eficiência da chuva em casos de SCM, mas que os valores modestos de CAPE e LI, verificados em eventos de ZCAS e FF, ajudam a explicar a precipitação estratiforme que pode ocorrer em eventos de chuva que levam a inundações na RSRJ. O calor e a umidade favorecem a convecção na RSRJ, mas a convecção profunda não é um recurso necessário para que ocorra um ECI (Seluchi et al., 2016). No entanto a umidade elevada e o vento de sul em baixos níveis, quando perpendicular à costa do RJ, contribuem para aumentar a convergência de umidade sobre a RSRJ (Andrade et al., 2015).

Figura 2. Máxima precipitação acumulada nos pluviômetros do Alerta Rio em intervalos de 15 minuto, 1 hora e 24 horas, durante os eventos de chuva intensa de 14 e 15 de fevereiro de 2018 (a), 06 e 07 de fevereiro de 2019 (b), e 08 e 09 de abril de 2019 (c), no município do Rio de Janeiro-RJ.

Figura 3. Imagens do canal 13 do satélite GOES-Leste durante os eventos de chuva intensa na cidade do Rio de Janeiro, às 02h de 15 de fevereiro de 2018 (a), 22h de 06 de fevereiro de 2019 (b), e 23h50 de 08 de abril de 2019 (c). Horário expresso em Hora Universal Coordenada (UTC).

Análise sinótica do evento 1

Na madrugada anterior ao evento de 14 e 15 de fevereiro de 2018 (ECI-1), havia um cavado em latitudes médias, compondo uma onda baroclínica em altos níveis (Keyser e Shapiro, 1986; Bluestein e Spehger, 1995). O cavado era confluyente (Figura 4a) e esteve associado ao desenvolvimento de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis do tipo Palmén - VCAN (Palmén e Nagler, 1949) (Figura 4b). A circulação do VCAN interagiu com a circulação anticiclônica em torno da AB, causando difluência do vento em altos níveis sobre o ERJ (Figura 4a, 4b, 4c). Segundo Lima et al. (2010), ECI no SEBR podem estar associados a presença de um cavado de latitudes médias em altos níveis, e a intensificação da circulação em torno da AB.

Em 500 hPa o cavado apresentava inclinação horizontal positiva (Figura 5a, 5b), característica associada a menor velocidade vertical ascendente (MacDonald, 1976; Glickman et al., 1977; Cossetin et al., 2016). O VCAN também foi observado em 500 hPa (Figura 5c, 5d). Em particular, a Figura 5a mostra um centro de baixa pressão de escala sub sinótica em superfície, localizado ao sul do ERJ, e a norte do VCAN de latitude média. Esta região está próxima da área de difluência observada sobre o ERJ (Figura 4). Foi observado movimento ascendente em 500 hPa, inicialmente a sudeste do centro de baixa pressão de superfície (Figura 5a), junto de uma isóbara fechada no nível de 500 hPa (Figura 5c). Estas

características podem indicar o desenvolvimento do SCM observado na Figura 3a.

Em baixos níveis havia elevada umidade relativa do ar (Figura 6a, b), e o jato de baixos níveis (JBN) encontrava-se ausente. Lima et al. (2010) mostraram que o JBN enfraquecido é uma condição que favorece a convergência da umidade do oceano Atlântico e da Amazônia para o SEBR. Esta condição também foi observada por Rocha et al. (2019) que analisaram um período caracterizado por chuva acima da média no SEBR durante a estação seca.

Um vórtice ciclônico em 850 hPa estava localizado na costa do SEBR, próximo do ERJ (Figura 6a, 6b), praticamente em fase com um centro de baixa pressão em superfície (Figura 6c). Silva et al. (2018) identificaram um centro de baixa pressão próximo da costa do estado do ERJ em casos de inundações associadas a ZCAS na RSRJ, semelhante ao que é mostrado na Figura 6a, 6b. Outra característica mencionada pelos autores, semelhante no ECI-1, são as duas regiões de circulação anticiclônica, entre a Argentina e o Sul do Brasil, e no Oceano Atlântico tropical, que contribuem para convergência do vento em baixos níveis sobre a costa do SEBR (Figura 6a, 6b).

Em superfície uma FF associada a um cavado na região costeira do SEBR, e uma massa de ar frio em latitudes médias, contribuíram para aumentar o gradiente meridional de temperatura (Figura 6c, 6d), que pode estar associado a intensificação do cavado de nível superior, semelhante ao que foi observado por Lima et al. (2010).

Figura 4. Campo de linha de corrente (contorno) e magnitude do vento (sombreado, em m s^{-1}) no nível de 250 hPa durante o ECI-1 às 0Z (a) e 18Z (b) de 14 de fevereiro de 2018, e às 02Z (c) e 18Z (d) de 15 de fevereiro de 2018.

Figura 5. Campo de altura geopotencial em 500 hPa (contorno grosso, em intervalos de 50 mgp), pressão ao nível médio do mar (contorno fino, em intervalo de 3 hPa) e velocidade vertical (ω) em 500 hPa (sombreado, em Pa s^{-1}) durante o ECI-1 às 12Z de 14 de fevereiro de 2018 (a), e às 03Z (b), 08Z (c) e 15Z (d) de 15 de fevereiro de 2018.

Figura 6. Campo de umidade relativa do ar em 850 hPa (sombreado, em %) e linha de corrente em 850 hPa (contorno), durante o ECI-1 às 18Z de 14 de fevereiro de 2018 (a), e às 02Z de 15 de fevereiro de 2018 (b). Campo de temperatura em 850 hPa (sombreado, em °C) e pressão ao nível médio do mar (contornos pretos, em intervalo de 2 hPa) às 12Z de 14 de fevereiro de 2018 (c) e 2Z de 15 de fevereiro de 2018 (d).

Análise sinótica do evento 2

Antes do evento de 06 e 07 de fevereiro de 2019 (ECI-2), o jato subtropical (JS) estava sobre o estado de São Paulo, próximo da latitude de 20°S, com a AB a noroeste (Figura 7a, 7b). Lima et al. (2010) mencionam o JS próximo da latitude de 20°S em ECI no SEBR, e um padrão de bloqueio em situações em que há ZCAS. No ECI-2 a ZCOU era observada (Figura 9a, 9b) e por ter persistido por cinco dias, conforme Oliveira-Júnior et al. (2019), pode ser caracterizada como ZCAS. A circulação entre o JS e o jato polar (JP) apresentava característica de bloqueio do tipo dipolo (Nascimento e Ambrizzi, 2002), contornando um

VCAN (Figura 7a, 7b), mas se desfez porque a crista e o cavado deixaram de estar horizontalmente em fase (Figura 8). O cavado era difluente e isso implicou no seu deslocamento para latitudes menores (Figura 7b) conforme Bluestein (1993). Na noite do evento a CRJ encontrava-se sob a região de difluência do cavado de altos níveis (Figura 7c), com forte movimento vertical ascendente (Figura 8c). Foi observado que o cavado em médios e altos níveis primeiro se intensificou (Figura 8c, 8d) e passou a contribuir para a queda da pressão atmosférica em superfície na costa do SEBR (Figura 9c, 9d). O cavado ainda era observado na manhã seguinte ao evento, (Figura 7d), mas não foram mais observadas chuvas intensas na CRJ (Figura 1b).

O movimento vertical ascendente, esperado corrente abaixo do eixo do cavado em altos níveis (Djuric, 1969), era fraco enquanto havia a configuração semelhante ao padrão de bloqueio (Figura 8a), mas à medida que o cavado em 500 hPa se intensificou, o movimento vertical ascendente também foi intensificado (Figura 8b, 8c). Segundo Lima et al. (2010), em ECI no SEBR ocorrem anomalias negativas do movimento vertical que indicam forte movimento ascendente sobre a região.

Em baixos níveis um centro de baixa pressão estava localizado entre o estado de São Paulo e o oceano Atlântico, próximo da costa. Nota-se pequenos vórtices de circulação ciclônica

de fraca intensidade nesta região (Figura 9a). No momento do ECI-2 um desses vórtices havia sido deslocado para mais próximo da costa do ERJ (Figura 9b), denotando uma situação de baixa pressão e elevada umidade relativa do ar (Figura 6b). O JBN não foi observado, condição que favoreceu a convergência de umidade da Amazônia para o SEBR (Lima et al., 2010; Rocha et al., 2019). Em latitudes médias uma massa de ar frio associada a um cavado já afastado do continente (Figura 9c), encontrava-se no setor norte de um anticiclone de superfície, entre a região Sul do Brasil e oceano Atlântico (Figura 9c, 9d).

Figura 7. Campo de linha de corrente (contorno) e magnitude do vento (sombreado, em m s^{-1}) no nível de 250 hPa durante o ECI-2 às 0Z (a) e 12Z (b) de 06 de fevereiro de 2019, e às 02Z (c) e 12Z (d) de 07 de fevereiro de 2019.

Figura 8. Campo de altura geopotencial em 500 hPa (contorno grosso, em intervalos de 50 mgp), pressão ao nível médio do mar (contorno fino, em intervalo de 3 hPa) e velocidade vertical (ω) em 500 hPa (sombreado, em Pa s^{-1}) durante o ECI-2 às 03Z (a) e 15Z (b) de 06 de fevereiro de 2019, e às 00Z (c) e 18Z (d) de 07 de fevereiro de 2019.

Análise sinótica do evento 3

Antes do evento de 08 e 09 de abril de 2019 (ECI-3), um VCAN do tipo Palmer (Palmer, 1951) em 250 hPa, estava localizado entre o Sudeste e o Nordeste do Brasil (Figura 10a). Este VCAN é conhecido como VCAN do Nordeste Brasileiro (NeB) (Virji, 1981; Gan e Kousky, 1986). Ao mesmo tempo, o sistema interagiu com um anticiclone localizado corrente abaixo no oceano Atlântico, próximo da costa nordeste do Brasil, com a AB corrente acima e com um cavado em latitudes médias (Figura 10a, 10b). Conforme Reboita et al. (2017), VCANS tropicais no NeB

podem se formar associados ao escoamento atmosférico corrente abaixo da AB e à FF, uma condição considerada característica do período entre a primavera e o outono austral. Estes sistemas tem uma vida aproximada de sete dias. Lima et al. (2010), encontraram anomalias do vento de nível superior que indicam um vórtice ciclônico na costa nordeste do Brasil em ECI no SEBR. No caso aqui analisado, o VCAN do NeB perdeu intensidade antes do ECI-3, mas contribuiu para estabelecer uma difluência sobre o ERJ ao interagir com a AB e com a FF (Figura 10c, 10d). Além disso, uma região com ventos fracos em altos níveis foi identificada entre a bacia amazônica e o SEBR, e pode estar associada ao estabelecimento de uma

ZCOU, verificada também pela faixa de movimento vertical ascendente sobre o SEBR (Figura 11a, 11b), e pelo campo de umidade relativa do ar em 850 hPa (Figura 12a, 12b) que denota valores elevados de umidade.

O movimento vertical a leste do cavado em 500 hPa acompanhou o deslocamento do sistema para leste, e favoreceu o movimento ascendente sobre o Rio de Janeiro durante o ECI-3 (Figura 11).

Figura 9. Campo de umidade relativa do ar em 850 hPa (sombreado, em %) e linha de corrente em 850 hPa, durante o ECI-2 às 12Z de 06 de fevereiro de 2019 (a), e às 02Z de 07 de fevereiro de 2019 (b). Campo de temperatura em 850 hPa (sombreado, em °C) e pressão ao nível médio do mar (contornos pretos, em intervalo de 2 hPa) às 12Z de 06 de fevereiro de 2019 (c) e às 0Z de 07 de fevereiro de 2019 (d).

Em baixos níveis um centro de baixa pressão era observado no litoral do SEBR (Figura 12 a - d) e a defasagem entre este centro de baixa pressão e o cavado em 500 hPa, indicava que o sistema estava em desenvolvimento (Figura 11a-d). A circulação ciclônica em 850 hPa (Figura 12a) na região costeira impactada pela Corrente do Brasil (Figura 12a), e coincidiu com um centro de

baixa pressão em superfície (Figura 12c). Como nos outros casos analisados, um pequeno vórtice ciclônico foi notado sobre o ERJ durante o ECI-3, com elevada umidade relativa do ar sobre toda a região costeira. O JBN não foi identificado durante o ECI-3. A circulação de nordeste entre o Paraguai e o Sul do Brasil estava associada a um anticiclone localizado entre a Argentina e o Oceano Atlântico,

que contribuía para convergência do vento em baixos níveis sobre a costa do SEBR.

Diferente dos outros casos, o ECI-3 apresentou maior gradiente de pressão em torno de um centro de baixa pressão no oceano Atlântico subtropical, que denota uma ciclogênese devido uma isóbara fechada no campo de pressão ao nível médio do mar (Gan e Rao, 1991) (Figura 12c, 12d). Conforme Evans e Braun (2012) o litoral da região sudeste é uma região propensa a formação de ciclones subtropicais (CS), além de ser uma das três regiões mais propensas a ciclogênese na América do Sul (Reboita et al., 2009). CS possuem núcleo quente na baixa troposfera e núcleo frio no topo, o que concorda com o observado na Figura

12c, 12d, onde um núcleo quente encontra-se junto do centro do sistema de baixa pressão. O campo de temperatura mostra uma massa de ar frio a sudoeste do centro de baixa pressão, o que reforça a possibilidade de se tratar de um CS, uma vez que estes são híbridos e combinam características de ciclones extratropicais e tropicais em seu desenvolvimento (Guishard et al., 2009). Este sistema de baixa pressão permaneceu atuando em baixos níveis ao longo do dia do ECI-3 (Figura 12d), com a ZCOU, identificada nas figuras 12a, 12b, fornecendo calor e umidade para o sistema subtropical (Figura 12c, d), mantendo o sistema com intensidade no Atlântico.

Figura 10. Campo de linha de corrente (contorno) e magnitude do vento (sombreado, em m s^{-1}) no nível de 250 hPa durante o ECI-3 às 00Z (a) e 12Z (b) de 08 de abril de 2019, e às 02Z (c) e 12Z (d) de 09 de abril de 2019.

Figura 11. Campo de altura geopotencial em 500 hPa (contorno grosso, em intervalos de 50 mgp), pressão ao nível médio do mar (contorno fino, em intervalo de 3 hPa) e velocidade vertical (ω) em 500 hPa (sombreado, em Pa s^{-1}) durante o ECI-3 às 00Z (a) e 12Z (b) de 08 de abril de 2019, e às 09Z (c) e 18Z (d) de 09 de abril de 2019.

Conclusões

O objetivo deste trabalho foi identificar características sinóticas de três eventos recentes de chuva intensa que ocorreram no município do Rio de Janeiro nos primeiros semestres de 2018 e de 2019. Somados os eventos resultaram em 20 vítimas fatais. A partir destas análises foram encontradas semelhanças, como por exemplo a intensidade máxima da precipitação no período noturno, entre 00Z e 02Z, com uma taxa de precipitação superior a 30 mm em 15 minutos, e mais de 300 mm em 24 horas em alguns pluviômetros do Alerta Rio. Diferenças entre os eventos também foram notadas: no evento de fevereiro de 2018 (ECI-1) um sistema convectivo

de mesoescala se desenvolveu sobre a Baía de Guanabara, com tamanho e forma semelhante aos complexos convectivos de mesoescala, embora com duração menor do que o proposto pela literatura. Nos casos de fevereiro de 2019 (ECI-2) e de abril de 2019 (ECI-3) o desenvolvimento vertical das nuvens foi menor, mas este não foi um fator limitador às chuvas intensas.

Em escala sinótica as semelhanças entre os eventos podem ser resumidas como:

- O estabelecimento da ZCAS nos ECI-1 e ECI-2 e de uma ZCOU no ECI-3, sua interação com FFs que de forma mais ou menos organizadas encontravam-se no oceano Atlântico, próximo da costa da América do Sul. Em superfície as FFs estavam associadas

a gradientes horizontais de temperatura em latitudes subtropicais e médias, indicando a contribuição da instabilidade baroclínica para o ambiente sinótico. Dois anticiclones, um entre a Argentina e oceano Atlântico, e outro no oceano Atlântico tropical, podem ter contribuído para convergência do vento em baixos níveis, mantendo a umidade na costa do SEBR.

- Em baixos níveis pequenos vórtices ciclônicos de fraca intensidade na costa do SEBR recebiam umidade proveniente da ZCAS ou ZCOU. Estes pequenos sistemas denotam a

convergência de umidade em baixos níveis. A ausência do JBN verificada é um mecanismo que pode ter favorecido a convergência de umidade para a região.

- Em nível superior a interação entre a circulação em torno da Alta da Bolívia, dos cavados transientes de latitudes médias, e para o evento de abril de 2019 em torno de VCAN do NeB, favoreceu difluência no escoamento sobre o estado do Rio de Janeiro, fornecendo suporte dinâmico aos eventos de chuva intensa.

Figura 12. Campo de umidade relativa do ar em 850 hPa (sombreado, em %) e linha de corrente em 850 hPa, durante o ECI-3 às 08Z de 08 de abril de 2019 (a), e às 09Z de 09 de abril de 2019 (b). Campo de temperatura em 850 hPa (sombreado, em °C) e pressão ao nível médio do mar (contornos pretos, em intervalo de 2 hPa) às 08Z de 08 de abril de 2019 (c) e 08Z de 09 de abril de 2019 (d).

Algumas características não foram comuns aos três eventos:

- Nos casos de verão de 2018 e 2019 os cavados de latitudes médias se desprenderam do escoamento zonal e formaram um VCAN do tipo Palmén, que teve sua intensificação associada aos gradientes horizontais de temperatura em baixos níveis das latitudes subtropicais.
- No evento de fevereiro de 2018 uma isóbara fechada em 500 hPa entre o VCAN subtropical e o SEBR pode estar relacionada ao desenvolvimento do SCM observado nas imagens de satélite.
- No evento de fevereiro de 2019 a inclinação horizontal negativa do eixo do cavado em altos níveis, em latitudes subtropicais, esteve associado a maior velocidade vertical ascendente no ERJ.
- No evento de abril de 2019 um centro de baixa pressão em superfície, partindo de próximo da costa do SEBR para o Atlântico Sul, apresentou características de ciclone subtropical.

Os resultados apresentados mostraram condições dinâmicas de escala sinótica que podem favorecer a ocorrência de chuvas intensas, mas devido diferenças encontradas entre os eventos, principalmente em menor escala, um conjunto de situações deve ser considerado. Neste caso o modelo WRF pode ser usado para melhorar o entendimento da contribuição de mesoescala, e para a previsão da precipitação intensa sugere-se o uso da microfísica de Thompson et al. (2004). A influência do Oceano Atlântico, em especial da Corrente do Brasil, e de outros campos sinóticos, podem fornecer informações relevantes para o entendimento destes eventos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio e financiamento à pesquisa, e ao Alerta Rio da prefeitura do Rio de Janeiro pela concessão dos dados.

Referências

- Andrade, K.M., Pinheiro, H.R., Dolif, G., 2015. Evento extremo de chuva no Rio de Janeiro: Análise sinótica, previsão numérica e comparação com eventos anteriores. *Ciência e Natura* [online] 37. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5902/2179460X16236>. Acesso: 16 abr. 2020.
- Bluestein, H.B., 1993. Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume II: *Coelho, L. A. F.; Nunes, A. B.*

- Observations and Theory of Weather Systems. Oxford, Oxford University Press, 594p.
- Bluestein, H.B., Spehger, D.A., 1995. The dynamics of an upper-level trough in the baroclinic westerlies: analysis based upon data from a wind profiler network. *Monthly Weather Review* [online] 123. Disponível: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123%3C2369:TDOAUL%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123%3C2369:TDOAUL%3E2.0.CO;2). Acesso: 17 abr. 2020.
- Carvalho, L.M.V., Jones, C., Liebmann, B., 2002. Extreme Precipitation Events in Southeastern South America and Large-Scale Convective Patterns in the South Atlantic Convergence Zone. *Journal of Climate* [online] 15. Disponível: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015%3C2377:EPEISS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015%3C2377:EPEISS%3E2.0.CO;2). Acesso: 17 abr. 2020.
- Cossetin, F., Nunes, A.B., Teixeira, M.S., 2016. Análise do movimento vertical sob duas configurações de altos níveis da troposfera. *Ciência e Natura* [online] 38. Disponível: <https://dx.doi.org/10.5902/2179460X20281>. Acesso: 17 abr. 2020.
- Da Silva, D.F., Lima, M.J.S., Souza Neto, P.F., Gomes, H.B., Silva, F.D.S., Almeida, H.R.R.C., Costa, R.L., Pereira, M.P.S. 2020. Caracterização de eventos extremos e de suas causas climáticas com base no índice padronizado de precipitação para o leste do Nordeste. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 449-464. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p449-464>
- Da Silva, G.C., Nunes, A.B., 2011. Análise de eventos extremos de precipitação no leste de Santa Catarina: Estudo de tendência. *Ciência e Natura* [online] 33. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5902/2179460X9432>. Acesso: 18 abr. 2020.
- Dereczynski, C.P., Oliveira, J.S., Machado, C.O., 2008. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia* [online] 24. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000100003>. Acesso: 18 abr. 2020.
- Dereczynski, C.P., Calado, R.N., Barros, A.B., 2017. Chuvas extremas no município do Rio de Janeiro, histórico a partir do século XIX. *Anuário do Instituto de Geociências* [online] 40. Disponível: http://dx.doi.org/10.11137/2017_2_17_30. Acesso: 18 abr. 2020.
- Djuric D., 1969. Note on estimation of vertical motion by the omega equation. *Monthly Weather Review* [online] 97. Disponível: <https://doi.org/10.1175/1520->

- [0493\(1969\)097%3C0902:NOEOVM%3E2.3.C](#)
[O;2](#). Acesso: 18 abr. 2020.
- Dolif, G., Nobre, C., 2012. Improving extreme precipitation forecasts in Rio de Janeiro, Brazil: Are synoptic patterns efficient for distinguishing ordinary from heavy rainfall episodes?. Atmospheric Science Letters [online] 13. Disponível: <https://doi.org/10.1002/asl.385>. Acesso: 18 abr. 2020.
- Evans, J.L., Braun, A., 2012. A climatology of subtropical cyclones in the South Atlantic. Journal of Climate [online] 25. Disponível: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00212.1>. Acesso: 18 abr. 2020.
- Gan, M.A., Kousky, V.E., 1986. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico sul. Revista Brasileira de Meteorologia 1, 19-28.
- Gan, M.A., Rao, V.B., 1991. Surface cyclogenesis over South America. Monthly Weather Review 119, 1293-1302. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119%3C1293:SCOSA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119%3C1293:SCOSA%3E2.0.CO;2).
- Glickman, T., Macdonald, N.J., Sanders, F., 1977. New findings and the apparent relationship between convective activity and the shape of 500 mb troughs. Monthly Weather Review 105, 1060-1061. Disponível: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1977\)105%3C1060:NFATAR%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1977)105%3C1060:NFATAR%3E2.0.CO;2). Acesso: 18 abr. 2020.
- Guishard, M.P., Evans, J.L., Hart, R. E., 2009. Atlantic Subtropical Storms. Part II: Climatology. Journal of Climate [online] 22. Disponível: <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2346.1>. Acesso: 18 abr. 2020.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Horányi, A., Sabater, J.M., Nicolas, J., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci C., Dee, D., 2019. Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5. ECMWF Newsletter 159, 17-24. DOI: <https://doi.org/10.21957/vf291hehd7>.
- Keyser, D., Shapiro, M.A., 1986. A review of the structure and dynamics of upper-level frontal zones. Monthly Weather Review [online] 114. Disponível: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1986\)114%3C0452:AROTSA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1986)114%3C0452:AROTSA%3E2.0.CO;2). Acesso: 18 abr. 2020.
- Lenters, J.D., Cook, K.H., 1999. Summertime precipitation variability over South America, role of the large-scale circulation. Monthly Weather Review [online] 127. Disponível: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127%3C0409:SPVOSA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127%3C0409:SPVOSA%3E2.0.CO;2). Acesso: 18 abr. 2020.
- Liebmann, B., Kiladis, G.N., Marengo, J.A., Ambrizzi, T., Glick, J.D., 1999. Submonthly convective variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone. Journal of Climate [online] 12. Disponível: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012%3C1877:SCVOSA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012%3C1877:SCVOSA%3E2.0.CO;2). Acesso: 18 abr. 2020.
- Liebmann, B., Jones, C., 2001. Interannual variability of daily extreme precipitation events in the state of São Paulo, Brazil. Journal of Climate [online] 14. Disponível: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014%3C0208:IVODEP%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014%3C0208:IVODEP%3E2.0.CO;2). Acesso: 18 abr. 2020.
- Lima, K.C., Satyamurty, P. Fernández, J.P.R., 2010. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in Southeast Brazil. Theoretical and Applied Climatology [online] 101. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0207-9>. Acesso: 25 abr. 2020.
- Macdonald, N.J., 1976. On the apparent relationship between convective activity and the shape of 500 mb troughs. Monthly Weather Review [online] 104. Disponível: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1976\)104%3C1618:OTARBC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1976)104%3C1618:OTARBC%3E2.0.CO;2). Acesso: 18 abr. 2020.
- Maddox, R.A. 1980. Mesoscale convective complexes. Focus on Forecasting 61, 1374-1387.
- Moura, C.R.W., Escobar, G.C.J., Andrade, K.M., 2013. Padrões de circulação em superfície e altitude associados a eventos de chuva intensa na região metropolitana do Rio De Janeiro. Revista Brasileira de Meteorologia [online] 28. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300004>. Acesso: 18 abr. 2002.
- Nascimento, E.L., Ambrizzi, T., 2002. The influence of atmospheric blocking on the Rossby wave propagation in Southern Hemisphere winter flows. Journal of the Meteorological Society of Japan [online] 80. Disponível: <https://doi.org/10.2151/jmsj.80.139>. Acesso: 18 abr. 2020.
- Nunes, A.B., Da Silva, G.C., 2013. Climatology of extreme rainfall events in eastern and northern Santa Catarina State, Brazil: Present and future climate. Revista Brasileira de Geofísica [online]. Disponível: <http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v31i3.314>. Acesso: 18.abr. 2020.

- Nunes, A. B., Pereira, R. S., 2017. Estimativa de eventos de precipitação com potencial para alagamentos urbanos no Rio Grande do Sul, in: NUNES, A.B., MARIANO, G.L. (ed.), Meteorologia em Tópicos, Volume 4. Clube dos Autores, pp. 273-313.
- Nunes, A.B., 2017. Estudo de caso de sistemas meteorológicos em altos níveis sobre a América do Sul: Análise sinótica. Anuário do Instituto de Geociências [online] 40. Disponível: https://doi.org/10.11137/2017_1_70_82. Acesso: 19 abr. 2020.
- Oliveira-Júnior, F.F., Caúla, R.H., Gois, G., Teodoro, P.E., Junior, C.A.S., Santiago, D.B., Correia Filho, W.J.F., 2019. Meteorological systems influences rainfall in Seropédica. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 6. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.6.p2141-2151>. Acesso: 28 abr. 2020.
- Palmén, E., Nagler, K.M., 1949. The formation and structure of a large-scale disturbance in the westerlies. Journal of Meteorology [online] 6. Disponível: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1949\)006%3C0228:TFASOA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1949)006%3C0228:TFASOA%3E2.0.CO;2). Acesso: 19 abr. 2020.
- Palmer, C.E., 1951. On high-level cyclones originating in the tropics. Transactions of American Geophysics Union [online] 32. Disponível: <https://doi.org/10.1029/TR032i005p00683>. Acesso: 18 abr. 2020.
- Palenzuela, Y.G., Teixeira, M.S., Toledo, D.R., Correia, M.F., 2018. Influência da escala sinótica na evolução de um evento de precipitação extrema na cidade de Pelotas - RS em janeiro de 2009. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 12. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.5.p1770-1783>. Acesso: 28 abr. 2020.
- Pereira, R.S., Nunes, A.B., 2018. Estudo climático dos eventos de precipitação associados a alagamentos urbanos no estado do Rio Grande do Sul. Revista Brasileira de Geografia Física 11, 2010-2017. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.6.p2010-2017>.
- Pristo, M.V.J., Dereczynski, C.P., Souza, P.R., Menezes, W.F., 2018. Climatologia de chuvas intensas no Município do Rio de Janeiro. Revista Brasileira de Meteorologia 33, 615-630. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-7786334005>.
- Reboita, M.S., Campos, B., Santos, T., Gan, M.A., Carvalho, V.S.B., 2017. Análise sinótica e numérica de um VCAN no Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 10. Disponível: <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20170004>. Acesso: 01 mai. 2020.
- Reboita, M.S., Rocha, R.P., Ambrizzi, T., Sugahara, S., 2009. South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). Climate Dynamics 35, 1331-1347. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0668-7>.
- Rocha, F.P., Silva, W.L., Ribeiro, B.Z., 2019. Synoptic analysis of a period with above-normal precipitation during the dry season in Southeastern Brazil. Advances in Research [online] 19. Disponível: <https://doi.org/10.9734/air/2019/v19i630138>. Acesso: 28 abr. 2020.
- Santos, S. R., Sansigolo, C.A., Santos, A.P.P. 2016. Dinâmica temporal em múltiplas escalas de tempo dos eventos secos e chuvosos no Sudeste do Brasil. Revista Brasileira de Geografia Física 9, 1292-1300. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.5.p1292-1300>.
- Satyamurty, P., Mattos, L.F., 1989. Climatological lower tropospheric frontogenesis in the midlatitudes due to horizontal deformation and divergence. Monthly Weather Review 117, 1355-1364. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1355:CLTFIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1355:CLTFIT>2.0.CO;2).
- Satyamurty, P., Nobre, C., Silva Dias, P. L., 1998. South America, in: KAROLY, D.J., VICENT, D.G. (eds.), Meteorology of the Southern Hemisphere. American Meteorological Society, pp. 119-139.
- Seluchi, M.E., Chou, S.C., 2009. Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. Theoretical and Applied Climatology, 98, 66-77. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-008-0101-x>.
- Seluchi, M.E., Beu, C.M.L., Andrade, K.M., 2016. Características das frentes frias com potencial para provocar chuvas intensas na região serrana de Rio De Janeiro. Revista Brasileira de Climatologia 18, 361-376. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v18i0.45369>.
- Silva, F.P., Da Silva, M.G.A.J., Rotunno Filho, O.C., Pires, G.D., Sampaio, R.J., Araújo, A.A.M., 2018. Synoptic thermodynamic and dynamic patterns associated with Quitandinha River flooding events in Petropolis, Rio de Janeiro (Brazil). Meteorology and Atmospheric Physics [online] 131. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0609-2>. Acesso: 08 mai. 2020.
- Silva, F.P., Rotunno Filho, O.C., Sampaio, R.J., Dragaud, L.C.D.V., Araújo, A.A.M., Da Silva, M.G.A.J., Pires, G.D., 2017. Evaluation of atmospheric thermodynamics and dynamics during heavy-rainfall and no-rainfall events in

the metropolitan area of Rio de Janeiro, Brazil. Meteorology and Atmospheric Physics [online] 131.

Disponível:

<https://doi.org/10.1007/s00703-017-0570-5>.

Acesso: 07 mai. 2020.

Teixeira, M.S., Satyamurty, P., 2007. Dynamical and synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in Southern Brazil. Monthly Weather Review 135, 598-617. DOI: <https://doi.org/10.1175/MWR3302.1>.

Thompson, G. Rasmussen, R.M. Manning, K., 2004. Explicit forecasts of winter precipitation

using an improved bulk microphysics scheme. Part I: description and sensitivity analysis. Monthly Weather Review 132, 519-542. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2004\)132%3C0519:EFOWPU%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2004)132%3C0519:EFOWPU%3E2.0.CO;2).

Virji, H., 1981. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. Monthly Weather Review 109, 599-610. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109%3C0599:APSOST%3E2.0](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109%3C0599:APSOST%3E2.0)