



Análise Hidrometeorológica Associada a Dois Eventos Extremos de Cheia Ocorridos na Bacia do Rio Pavuna, Estado do Rio de Janeiro, Brasil
Hydrometeorological Analysis in Two Extreme Flood Events Occurred in Pavuna River Basin, Rio de Janeiro State, Brazil

Marcelo Negreiros de Araújo Junior¹; Fabricio Polifke da Silva¹ & Gisele Dornelles Pires¹

¹Universidade Iguazu – UNIG, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas, Grupo Engenharia e Sociedade.
Avenida Abílio Augusto Távora, 2134 - Jardim Nova Era, 26275-580, Nova Iguaçu, Rio de Janeiro, Brasil
E-mails: marcelo_fernandesneg@outlook.com; briciopolifke@gmail.com; unigengenharia@gmail.com

Recebido em: 10/09/2018 Aprovado em: 15/02/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_1_146_157

Resumo

Eventos hidrometeorológicos extremos são responsáveis por causar grandes perdas socioeconômicas em todo o mundo. Os impactos associados a estes eventos podem ser mitigados através de medidas preventivas oriundas principalmente de pesquisas científicas que visem fornecer ferramentas de base para os sistemas de monitoramento e alerta operacionais. Neste contexto, este trabalho procurou caracterizar as condições atmosféricas conducentes à formação de chuvas associadas a dois eventos extremos de transbordamento do rio Pavuna (Estado do Rio de Janeiro), ocorridos em 30 de dezembro de 2013 e 16 de janeiro de 2014, assim como avaliar o padrão espacial das nuvens sobre sua bacia e os acumulados de chuva que favoreceram as variações de nível d'água observadas. Através da análise de indicadores dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera, verificou-se a presença concomitante de energia, umidade e gatilhos dinâmicos em diferentes níveis da atmosfera caracterizando cenários favoráveis à formação da precipitação em ambos os eventos. A partir das imagens de radar e dados pluviométricos foi possível verificar que a precipitação ocorreu de forma mais distribuída sobre a bacia do rio Pavuna para o evento de dezembro de 2013. Para o evento de janeiro de 2014, entretanto, verificou-se uma distribuição mais localizada da precipitação sobre a bacia, assim como maiores valores de refletividade e taxas de chuva sobre o seu exutório. Utilizando os dados pluviométricos medidos em três pontos da bacia do rio Pavuna foi possível verificar que, apesar das maiores taxas de chuva observadas sobre o exutório da bacia no segundo evento hidrometeorológico, os maiores acumulados pluviométricos foram observados no primeiro evento analisado favorecendo o maior registro de nível d'água observado.

Palavras-chave: cheias; chuvas intensas; eventos extremos; indicadores atmosféricos; Rio de Janeiro; rio Pavuna

Abstract

Hydrometeorological extreme events are responsible for large socioeconomic losses worldwide. The impacts related to these events can be mitigated through preventive measures derived mainly from scientific research aimed at providing basic tools for operational forecasting and alert systems. In this context, this work sought to characterize the atmospheric conditions leading to the formation of rainfall associated with two extreme events of Pavuna River flooding (Rio de Janeiro State), occurred on December 30th, 2013 and January 16th, 2014, as well as to evaluate the spatial pattern of clouds over Pavuna River basin and the accumulated rainfall related to the changes of water level observed. The dynamic and thermodynamic atmospheric indicators showed a concomitant presence of energy, moisture and dynamic triggers at different levels characterizing environment scenarios favorable to the formation of precipitation in both events. From the radar images and rainfall gauge data it was possible to verify that the precipitation occurred spatially more distributed over the Pavuna River basin for the event of December 2013. For the event of January 2014, however, there was a more localized distribution of rainfall was observed over the basin, as well as higher values of reflectivity and rainfall rates over the common outlet. Using the rainfall data measured at three points in the Pavuna River basin, it was possible to verify that, despite the higher rainfall rates observed over common outlet exudation in the second hydrometeorological event, the highest rainfall accumulations were observed in the first event analyzed, favoring a higher observed.

Keywords: floods; heavy rains; extreme events; atmospheric indicators; Rio de Janeiro; Pavuna River

1 Introdução

Eventos de cheias são considerados um dos desastres naturais mais destrutivos e representam uma ameaça constante à vida e à economia, principalmente em áreas com ocupação desordenada e sem saneamento básico, onde a ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos pode favorecer também a proliferação de doenças (Dahri & Abida, 2017). Segundo o relatório do Escritório das Nações Unidas para Redução de Risco de Desastres (UNISDR, 2015), durante os anos de 1995 e 2004, 560.000 pessoas foram afetadas pelas inundações na América do Sul e nos anos seguintes, entre 2005 e 2014, o número de pessoas afetadas aumentou para 2,2 bilhões, uma elevação quase quatro vezes em relação ao período anterior. Nesse contexto, o Brasil foi o único país da América do Sul entre os 10 países mais afetados por desastres do tipo inundação, com 51 milhões de pessoas afetadas.

Marcelino (2008) corrobora que fenômenos hidrometeorológicos extremos associados a altas taxas de precipitação nas escalas horária e diária representam uma porcentagem significativa da ocorrência de desastres naturais em todo o mundo. O autor ainda destaca que é praticamente impossível erradicar tais fenômenos e que se pode, até mesmo, afirmar que a sociedade nunca alcançará tal êxito, visto que a formação das nuvens e precipitação faz parte da geodinâmica terrestre, sendo responsável pela manutenção dos ecossistemas, abastecimento das fontes hídricas naturais, entre outros. Nesse sentido, as ações humanas devem ser direcionadas para a caracterização e operacionalização de medidas preventivas que possam reduzir as possíveis consequências associadas à ocorrência de eventos de chuvas e cheias (Brandão, 1997; Alcántara-Ayala, 2002; Sausen *et al.*, 2009; Ballesteros *et al.*, 2011; Castro, 2012).

Como uma medida de prevenção e monitoramento dos eventos hidrometeorológicos extremos, Nascimento (2005) propõe a implementação de uma estratégia operacional para a previsão destes eventos extremos de possível aplicação no Brasil. Em sua estratégia, o autor sugere a sinergia de análises de dados atmosféricos em diferentes estágios de criti-

cidade. Inicialmente, é proposto o cálculo de parâmetros dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera (também chamados de “ingredientes atmosféricos”) visando, de forma objetiva, caracterizar as condições meteorológicas conducentes ao desenvolvimento de chuvas intensas. Posteriormente, sugerem-se análises da atmosfera em curto prazo (nowcasting) utilizando principalmente dados de sensoriamento remoto, como, por exemplo, dados de radar, satélites e descargas elétricas, com a finalidade de identificar a reposta hidrológica à ocorrência da precipitação (Silva Dias, 2000; Hallak & Filho, 2012; Tavares & Mota, 2012; Silva *et al.*, 2017; Silva *et al.*, 2018).

Os parâmetros termodinâmicos expressam as propriedades térmicas presentes no perfil vertical e horizontal da atmosfera (Teixeira & Satyamurti, 2006; Silva *et al.*, 2016). Já os indicadores dinâmicos estão associados ao comportamento da circulação dos ventos em diferentes níveis da atmosfera, correntemente associados aos padrões de circulações meteorológicas sinóticas e de mesoescala (Nascimento, 2005; Hallak & Filho, 2012). Operacionalmente, tais parâmetros são interpretados em um procedimento dicotômico para o diagnóstico e previsão de chuvas intensas, isto é, se um conjunto de ingredientes atmosféricos estiver presente em um dado momento do dia, espera-se o desenvolvimento de chuvas intensas dentro do horizonte esperado (Silva *et al.*, 2018). Por outro lado, na ausência destes parâmetros, seria então, improvável o desenvolvimento das chuvas severas no período analisado.

A análise dos indicadores dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera assume grande importância principalmente nas condições atmosféricas pertinentes à formação das nuvens e precipitação. Entretanto, na ocorrência destes fenômenos meteorológicos as informações obtidas por radares meteorológicos possuem significativa relevância para o monitoramento hidrometeorológico, pois permitem identificar os sistemas atmosféricos atuantes e informar, quase que em tempo real (nowcasting), sobre suas estruturas e seu desenvolvimento no tempo e no espaço (Almeida, 2002). Concomitantemente, a utilização de dados observacionais, associada às informações obtidas por radares meteorológicos, pode favorecer um melhor entendimento entre os acumulados de

precipitação e as variações dos níveis d'água (nível dos rios) associados aos eventos de cheias, principalmente em bacias que possuem uma boa distribuição de rede de monitoramento.

O rio Pavuna possui área de contribuição com influência das regiões da Baixada Fluminense e Metropolitana do Estado do Rio de Janeiro. Tais regiões, principalmente a Baixada Fluminense, sofrem grandes perdas materiais e econômicas anuais devido às recorrentes ocorrências de eventos de cheias (Carneiro, 2008). Esses eventos são causados principalmente pela ocorrência de chuvas severas e a ocupação desordenada e irregular do solo nas margens próximas dos cursos d'água. Assim, em eventos de chuvas intensas, o aumento do escoamento superficial, devido à remoção da cobertura vegetal e ao consequente aumento da impermeabilização do solo, favorece uma elevação e aceleração dos picos de cheia sobre a região e um número crescente de vítimas afetadas (Mayoral, 2017).

Diante do exposto, esta pesquisa buscou avaliar o comportamento de indicadores termodinâmicos e dinâmicos associados à formação de chuvas que favoreceram a ocorrência de chuvas e transbordamento do rio Pavuna (RJ) em um primeiro estágio de análise. Em um segundo estágio de análise, buscou-se, utilizando dados de radar e dados de chuva e nível d'água, entender a resposta das variações do rio Pavuna à ocorrência da precipitação sobre a sua área de contribuição hidrográfica. Para a realização das análises foram escolhidos dois eventos extremos de transbordamento do rio Pavuna. Espera-se através desta minuciosa análise incentivar pesquisas

que visem fornecer informações funcionais para as equipes de monitoramento operacional (meteorologistas, hidrólogos, defesas civis, entre outros), assim como, fomentar a geração de novas ferramentas para a emissão de alertas e, conseqüentemente, a gestão do risco de desastres.

2 Dados e Metodologia

O rio Pavuna possui sua área de contribuição nas cidades do Rio de Janeiro, Mesquita, Nilópolis e São João de Meriti (Figura 1). Esse rio é monitorado pela estação hidrometeorológica chamada CET-Meriti pertencente ao Sistema de Alerta de Cheias do Instituto Estadual do Ambiente (INEA, 2018) e realiza a medição da chuva e do nível d'água em um intervalo temporal de 15 (quinze) minutos. Para a identificação dos eventos de cheia foi realizada uma busca ao banco de dados hidrometeorológicos e a partir de uma cota pré-estabelecida pelo INEA, foi possível identificar todos os eventos de transbordamento ocorridos entre 2008 e 2018. No decorrer do período analisado foram identificadas 37 ocorrências nas quais o nível do rio Pavuna ultrapassou a cota de transbordamento. Dentre os eventos identificados, optou-se inicialmente por analisar as condições hidrometeorológicas presentes em dois eventos extremos nos quais o nível do rio Pavuna ultrapassou o nível d'água de 5 (cinco) metros, que ocorreram respectivamente nos dias 30/12/2013 (primeiro evento) e 16/01/2014 (segundo evento). Os demais eventos de transbordamento ocorridos entre 2008 e 2018 estiveram abaixo deste valor de corte.

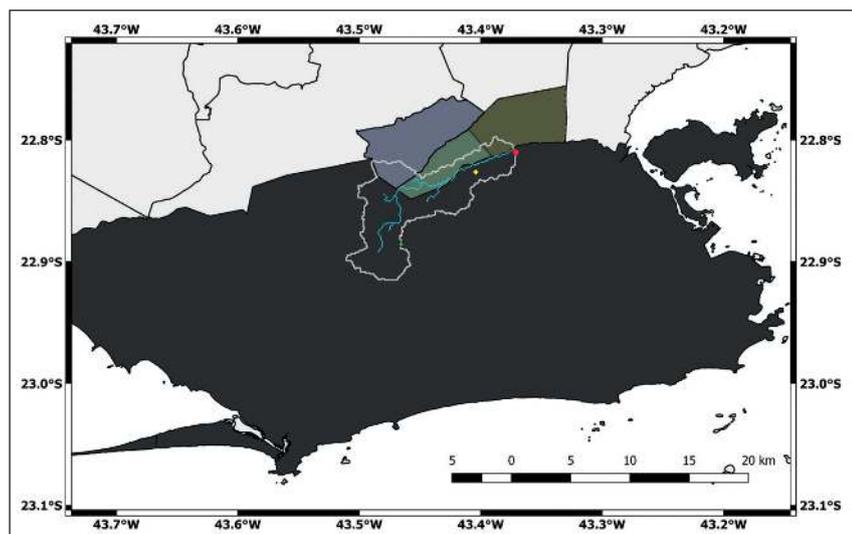


Figura 1 Bacia (delineada em branco) do rio Pavuna (em azul) e estações CET Meriti (círculo em vermelho), Anchieta (em amarelo) e Bangu (em verde). Os municípios do Rio de Janeiro (preto), Mesquita (cinza), Nilópolis (verde) e São João de Meriti (marrom) encontram-se destacados.

Além da precipitação coletada pela estação CET Meriti, são também utilizados os dados pluviométricos das estações Anchieta e Bangu (círculos amarelo e verde respectivamente na Figura 1), pertencentes ao Sistema Alerta Rio (<http://alertario.rj.gov.br/>), localizadas na bacia do rio Pavuna com a finalidade de obter um melhor entendimento da reposta das variações do nível do rio em relação às chuvas observadas no interior da bacia.

Fez-se também uma consulta ao Boletim Climanalise disponibilizado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC, 2018) para a caracterização dos sistemas meteorológicos que favoreceram a ocorrência da precipitação associada a estes dois eventos de cheias. Para avaliar as características dinâmicas e termodinâmicas da atmosférica associadas à formação das nuvens e precipitação foram também utilizadas as imagens do radar meteorológico do Sumaré, pertencente ao sistema de monitoramento Alerta Rio para analisar o padrão espacial da refletividade sobre a bacia do rio Pavuna e os dados da nova reanálise do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECWMF, 2018a), chamada ERA 5 (ECWMF, 2018b). Optou-se pela utilização dos dados do ERA 5 por apresentar uma resolução espacial de 31 km e resolução temporal horária.

Uma variedade de parâmetros termodinâmicos e dinâmicos (Tabela 1) calculados a partir de dados de sondagem e modelos numéricos, assim como variáveis associadas ao estado da atmosfera (temperatura do ar a 2 m (T2M); umidade específica em 850 hPa (UBN) e 500 hPa (UMN)) têm sido utilizados operacionalmente nas últimas décadas (Silva Dias, 2000; Nascimento, 2005; Lima, 2005; Mourão, 2007; Hallak & Filho, 2012; Silva *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2018) e também são devidamente avaliados nesse estudo. Nas fórmulas apresentadas na Tabela 1, T e Td, ambos medidos em graus centígrados (°C), caracterizam a temperatura do ar ambiente e a temperatura do ponto de orvalho, respectivamente, enquanto que os números subscritos referem-se aos níveis isobáricos (hPa) nos quais foram medidos. Tp refere-se à temperatura da parcela levantada da superfície até 500 hPa,; Tvp e Tv (também em °C) referem-se, respectivamente, às temperaturas virtuais

de uma parcela de ar e de seu ambiente circundante; LFC representa o nível de convecção livre; e o LNB fornece seu nível de equilíbrio. As interpretações físicas destas variáveis são apresentadas a seguir.

Variável	Fórmula
K	$K = (T_{850} + Td_{850}) - (T_{700} - Td_{700}) - T_{500}$
TT	$TT = (T_{850} + Td_{850}) - 2 * T_{500}$
Lapse-Rate	$LR = - \frac{\partial T_{700/500}}{\partial Z}$
Convective Potential Available Energy	$CAPE = g \int_{LFC}^{LNB} \frac{T_{vp}(z) - T_v(z)}{T_v(z)} dz$
Lifted index	$LI = T_{500} - T_{p_{500}}$
Água Precipitável	$AP = \frac{1}{\rho g} \int_{1000}^{100} w dp$
Convergência dos Ventos	$CV = \left(\frac{\partial u_{850}}{\partial x} + \frac{\partial v_{850}}{\partial y} \right) < 0$
Divergência dos Ventos	$DV = \left(\frac{\partial u_{250}}{\partial x} + \frac{\partial v_{250}}{\partial y} \right) > 0$
Ômega	$OM = \frac{\partial p_{500}}{\partial z}$

Tabela 1 Indicadores dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera analisados neste trabalho.

A energia disponível para convecção, do inglês *convective available potential energy* (CAPE), é uma medida vertical da quantidade de energia de uma parcela de ar ao ascender na atmosfera. É calculada pela diferença entre a temperatura virtual da parcela de ar ($T_{vp}(z)$) e a temperatura virtual da atmosfera circundante ($T_v(z)$) a partir do LFC até LNB. O parâmetro CAPE estima a energia e a força das velocidades ascendentes dentro de uma tempestade e também representa uma medida de “área positiva” no diagrama SkewT/logP (Nascimento, 2005). Na interpretação da CAPE, também é necessário avaliar qualitativamente a distribuição vertical

de energia em toda a atmosfera (Nascimento, 2005; Silva *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2017). Neste caso, o *lifted index* (LI), calculado pela diferença de temperatura entre uma parcela levantada (T_{vp500}) e o ar circundante (T_{v500}) em 500 hPa (Galway, 1956), pode expressar uma medida de extensão horizontal da CAPE (Nascimento, 2005).

O índice K (George, 1960) representa as condições convectivas favoráveis em ambientes úmidos, entre a baixa e a média troposfera, perfil típico de regiões tropicais. O cálculo do índice Total Total (TT) é realizado de forma semelhante ao índice K, sem considerar, entretanto a depressão atmosférica em 700 hPa (Miller, 1972). Se uma massa de ar for quente e úmida, os índices K e TT caracterizarão padrões e interpretações semelhantes. Por outro lado, se existir uma camada seca em 700 hPa, o TT apresenta uma melhor resposta à instabilidade termodinâmica (Silva Dias, 1987). A taxa de variação vertical da temperatura do ar, ou do inglês *lapse-rate* (LR), entre 700 hPa e 500 hPa representa uma estimativa da energia na atmosfera, de modo que quanto maior for os resultados de LR mais favorável a atmosfera se encontra para a formação de tempestades e chuvas intensas (Nascimento, 2005).

O conteúdo de água precipitável (AP), do inglês *precipitable water*, é a integral vertical da razão de mistura do vapor d'água. Esse indicador expressa a quantidade de água (em altura ou em massa), que poderia ser obtida se todo o vapor de água contido numa coluna de atmosfera de secção transversal horizontal unitária se condensasse e precipitasse. O movimento vertical ascendente, também chamado ômega, em 500 hPa (OM), convergência (CV) dos ventos em 850 hPa e divergência (DV) dos ventos em 250 hPa representam alguns dos mecanismos, ou gatilhos, dinâmicos essenciais e necessários para fornecer movimento ascendente do ar e a formação de tempestades e chuvas intensas na presença de instabilidade termodinâmica (Tajbakhsh *et al.*, 2012).

3 Resultados

3.1 Indicadores Atmosféricos

Os dois eventos hidrometeorológicos extremos (com valores de nível acima de 5 (cinco) metros) ocorreram respectivamente nos dias 30/12/2013 (primeiro evento) e 16/01/2014 (segundo evento).

Com o objetivo de categorizar os sistemas meteorológicos associados às chuvas e cheias nestes dois dias foi realizada uma consulta à base de dados do Boletim Climanálise do CPTEC (2018). Através deste levantamento, verificou-se a configuração da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) no dia 16/01/2014. Entretanto, não havia informações relacionadas à classificação de sistemas atmosféricos de grande escala no Estado do Rio de Janeiro no dia 30/12/2013, o que sugere que neste dia a origem das nuvens e precipitação foi formada por áreas de instabilidade localizadas.

Com a finalidade de realizar uma análise comparativa entre as condições termodinâmicas e dinâmicas favoráveis ao desenvolvimento das nuvens e precipitação para os dois dias de transbordamento do rio Pavuna, escolheu-se o ponto de grade da reanálise ERA 5 sobre a estação CET Meriti para avaliar a evolução temporal dos indicadores atmosféricos começando 12 horas antes da precipitação e seis horas após o seu início, um período total de 18 horas. A Figura 2 mostra a evolução temporal para o evento do dia 30/12/2013 (linha azul claro) e 16/01/2014 (linha azul). A linha vertical preta caracteriza o início da chuva.

A variável T2M (Figura 2A) revela um comportamento temporal associado ao aquecimento da superfície algumas horas antes do início da precipitação nos níveis mais baixos da atmosfera nos dois eventos de chuva. Os índices CAPE (Figura 2B) e LI (Figura 2C) não apresentaram valores significativos para o dia 30/12/2013. Para o dia 16/01/2014, entretanto, verificam-se condições termodinâmicas concomitantemente favoráveis ao desenvolvimento convectivo com um aumento da CAPE (aproximadamente 2000 J/kg) e diminuição do LI (em torno de -5 °C) poucas horas antes o início da precipitação. Valores mais significativos da CAPE acompanhados de LI negativo caracterizam um perfil vertical atmosférico com “área positiva ampla” no diagrama termodinâmico, indicando um ambiente efetivamente favorável a intensas acelerações verticais e chuvas intensas (Foss, 2011).

A evolução temporal dos índices K (Figura 2D), TT (Figura 2E) e LR (Figura 2F) mostra um

comportamento semelhante destes indicadores, com uma suave diminuição após o início da precipitação para os dois dias analisados. As Figuras 2D e 2E também revelam valores significativos dos índices K e TT (ou seja, acima de 30°C e acima de 40°C respectivamente) poucas horas antes do início da precipitação. Entretanto, no dia 16/01/2014 uma maior amplitude do índice TT é observada em relação ao índice K sugerindo a presença de uma camada mais fria nos níveis médios da atmosfera, logo favorável à formação de tempestades mais severas neste dia. Simultaneamente, observa-se uma maior amplitude de LR entre 700 hPa e 500 hPa em 16/01/2014 em relação ao dia 30/12/2013, caracterizando a forte dependência dos índices TT e LR aos valores mais baixos de temperatura do ar em 500 hPa (Nascimento, 2005).

UBN (Figura 2G), UMN (Figura 2H) e AP (Figura 2I) revelam um expressivo aumento algumas horas antes da precipitação caracterizando a importância da disponibilidade de umidade condutente à formação da chuva na estrutura vertical da atmosfera. Maiores valores de UMN (Figura 2H) são observados no dia 30/12/2013 em relação ao dia 16/01/2014 corroborando a diferença observada entre os índices K (Figura 2D) e TT (Figura 2E), isto é, maiores valores de umidade favorecem um menor resfriamento da atmosfera devido à liberação de calor latente, associada à mudança de fase da água. Uma análise comparativa entre os índices termodinâmicos previamente analisados e os indicadores de umidade mostra que no dia 30/12/2013 a atmosfera apresentava um maior aquecimento em superfície (Figura 2A) e uma maior disponibilidade de umidade na coluna atmosférica. Para o dia 16/01/2014, entretanto, verifica-se uma maior disponibilidade de energia termodinâmica (Figuras 2B-2E) no perfil atmosférico e uma maior disponibilidade de umidade nos baixos níveis antes do início da precipitação (Figuras 2F-2I).

CV (Figura 2J) e DV (Figura 2K) caracterizam os princípios gerais da continuidade de massa e movimentos verticais com valores negativos de CV (convergência) nos baixos níveis da atmosfera e valores positivos de DV (divergência) nos níveis superiores ocorrendo em horários próximos aos registros

de precipitação para ambos os eventos (Lackmann & Yablonsky, 2004; Silva *et al.*, 2016). Valores mais negativos de OM (Figura 2L) são observados para o dia 16/01/2014 em relação ao dia 30/12/2013, coincidindo com os maiores valores de CAPE (Figura 2B) e LI (Figura 2C), configurando um cenário atmosférico favorável para o deslocamento vertical de parcelas de ar na atmosfera e, conseqüentemente, a formação de nuvens e chuvas.

3.2 Análise Hidrometeorológica

As Figuras 3 e 4 mostram as imagens de refletividade medidas pelo radar meteorológico do Sumaré georreferenciadas e vetorizadas para a bacia do rio Pavuna entre 19h30 e 21h30 do dia 31/12/2013 e entre 18h30 e 20h30 do dia 16/01/2014, respectivamente. A região em cinza denota uma das “áreas cegas” existentes nas imagens do radar devido à localização (no alto da Serra da Carioca, dentro do Parque Nacional da Tijuca) do radar e a topografia da cidade do Rio de Janeiro (<http://alertario.rio.rj.gov.br/radar-meteorologico-do-sumare/informacoes/>). Segundo critério estabelecido por diversos autores (Hagen *et al.*, 2000; Parker & Johnson, 2000; Goudenhoofd & Delobbe, 2009), valores de refletividade acima de 40 dBZ indicam a presença de expressiva atividade convectiva e, conseqüentemente, altas taxas de precipitação (Wilson & Brandes, 1979; Kumar *et al.*, 2011). A partir da Figura 3A, verifica-se no início da noite do dia 30/12/2013 e próximo à localização da estação CET Meriti (Figura 1) a presença de valores significativos de refletividade (entre 20 dBZ e 45 dBZ), assim como a sua distribuição a partir das 20h ao longo da bacia do rio Pavuna.

Um padrão semelhante de refletividade é observado para o dia 16/01/2014 (Figura 4) em comparação ao dia 30/12/2014. Entretanto, no início da noite (Figura 4C e Figura 4D) verificam-se maiores valores de refletividade (45 dBZ) sobre a região onde está localizada a estação CET Meriti (ao norte da bacia). No dia 30/12/2014 valores significativos (acima de 40 dBZ) de refletividade também foram observados sobre a bacia, porém de forma mais localizada em relação ao dia 16/01/2014. Para o restante da bacia, observa-se uma menor distribuição espacial da refletividade em relação ao observado no dia

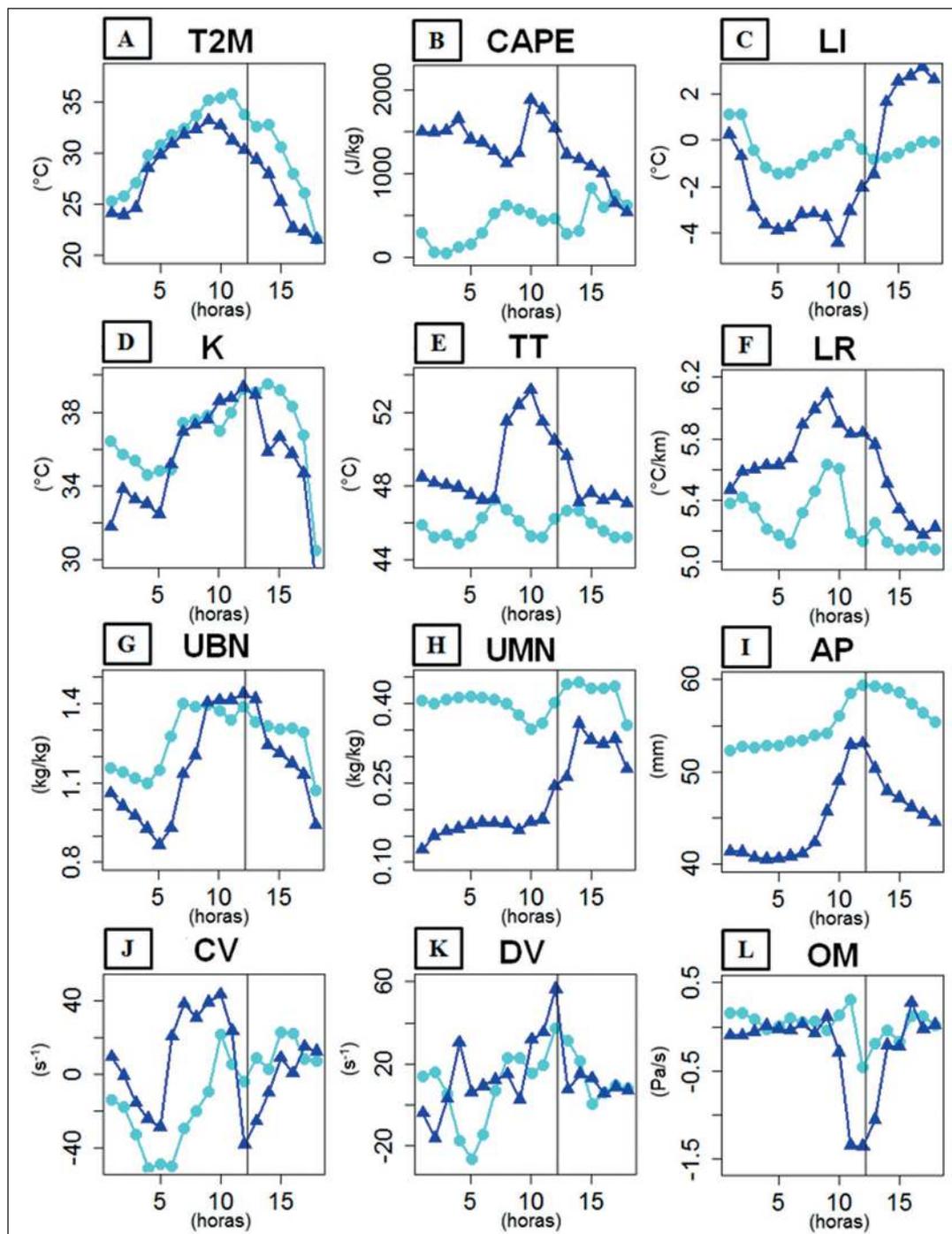


Figura 2 Evolução temporal dos indicadores dinâmicos e termodinâmicos analisados. A linha vertical preta indica o início da precipitação, a linha em azul clara (escuro) representa o evento ocorrido em 30/12/2013 (16/01/2014).

30/12/2013 (Figura 3). Tal configuração mostra que, baseado nos dados de refletividade, a chuva ocorreu de forma mais intensa (altas taxas de precipitação) ao norte da bacia do rio Pavuna em 16/01/2014. No dia 30/12/2013 também seriam esperadas taxas acentuadas de precipitação sobre a bacia, porém de forma mais pontual em relação ao dia 16/01/2014.

Para avaliar a resposta do rio Pavuna às chuvas ocorridas em sua bacia, além de analisar os dados de precipitação coletados pela estação CET Meriti, foram também considerados os dados pluviométricos medidos pelas estações Anchieta e Bangu (Figura 1) com a finalidade de melhor caracterizar a estimativa

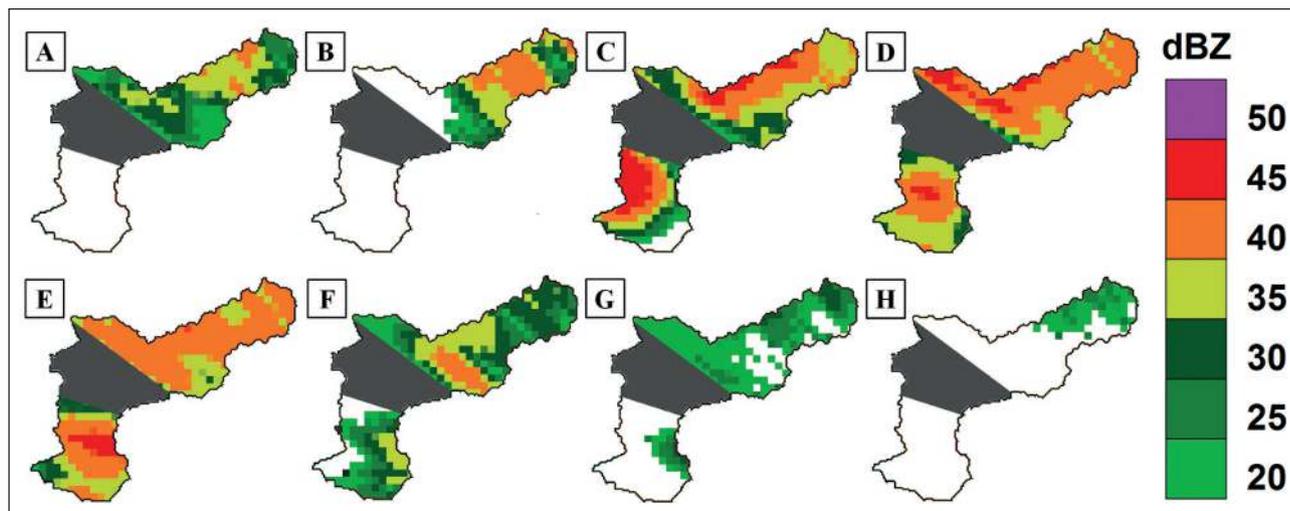


Figura 3 Imagens do radar do Sumaré georreferenciadas e recortadas mostrando a refletividade (dBZ) sobre a bacia do rio Pavuna às A. 19h30; B. 19h45; C. 20h00; D. 20h15; E. 20h30; F. 20h45; G. 21h00; H. 21h15 do dia 30/12/2013.

da contribuição da chuva na bacia. As Figuras 5 e 6 ilustram os cotogramas construídos para os eventos de cheias ocorridos nos dias 30/12 e 16/01. Os dados de precipitação coletados pelas três estações podem ser observados através dos gráficos de barras e as variações de nível do rio Pavuna podem ser verificadas através da linha em preto. A cota de transbordamento é representada pela linha em vermelho, ou seja, 3,2 metros.

Através das Figuras 5 e 6, verifica-se uma rápida elevação do nível do rio Pavuna após o início das chuvas. Em 30/12/2013, verifica-se que o rio Pa-

vuna saiu do estágio de normalidade (sem grandes variações) às 19h45, ultrapassou a cota de transbordamento às 20h15 e atingiu um valor máximo (6,02 m) às 21h30. No dia 16/01/2014, um comportamento semelhante é observado, entre 18h30 e 20h15, quando novamente o rio Pavuna saiu de um estágio de normalidade e atingiu um valor máximo (5,69 m) de transbordamento. Para ambos os dias, observa-se que o intervalo temporal entre o início da precipitação e o pico máximo observado foi de aproximadamente 01h45. Tal comportamento caracteriza um dos principais desafios relacionados à emissão de avisos

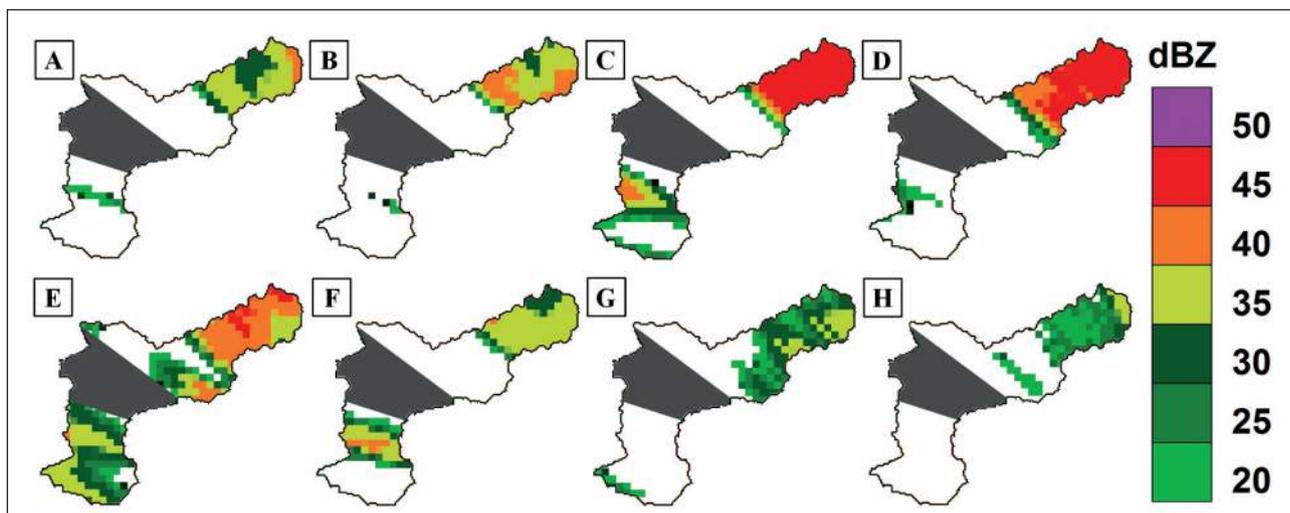


Figura 4 Imagens do radar do Sumaré georreferenciadas e recortadas para a bacia do rio Pavuna às A. 18h30; B. 18h45; C. 19h00; D. 19h15; E. 19h30; F. 19h45; G. 20h00; H. 20h15 do dia 16/01/2014.

de cheias para rios com rápida resposta às chuvas (do inglês, flash floods), isto é, devido ao curto intervalo de tempo entre a ocorrência da precipitação e a resposta do rio, muitas vezes, as defesas civis e agentes governamentais não conseguem atuar de forma considerável para mitigar os danos associados a ocorrência destes eventos hidrometeorológicos.

A partir dos dados de precipitação presentes nos cotagramas (Figuras 5 e 6), verifica-se que os acumulados pluviométricos na estação CET Meriti (Figura 7A) antecedentes ao pico de nível observado foram relativamente menores no dia 30/12/2013

(aproximadamente 42,2 mm) em comparação ao dia 16/01/2014 (aproximadamente 66,0 mm). Entretanto, no dia 30/12/2013, observa-se um maior nível máximo em relação ao dia 16/01/2014 caracterizando outras contribuições para a elevação do rio Pavuna, além da precipitação observada somente na estação CET Meriti, como se pôde verificar através da distribuição espacial dos dados de refletividade sobre a bacia em ambos os eventos (Figuras 3 e 4). Para isso, foram gerados os acumulados pluviométricos (soma) das estações CET Meriti, Anchieta e Bangu (Figura 1) com a finalidade de avaliar a

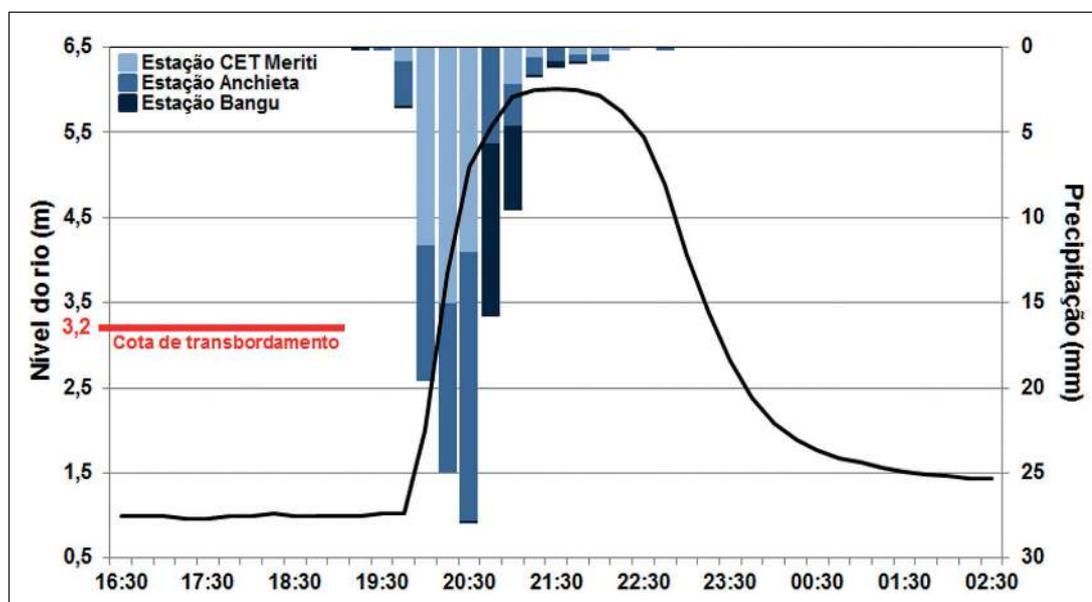


Figura 5 Cotagrama do rio Pavuna para entre às 16h30 do dia 30/12/2013 e 02h30 do dia 31/12/2013. As barras representam os dados de chuvas coletados pelas estações CET Meriti, Anchieta e Bangu. As variações dos dados de nível são representadas pela linha em preto e a cota de transbordamento pela linha em vermelho.

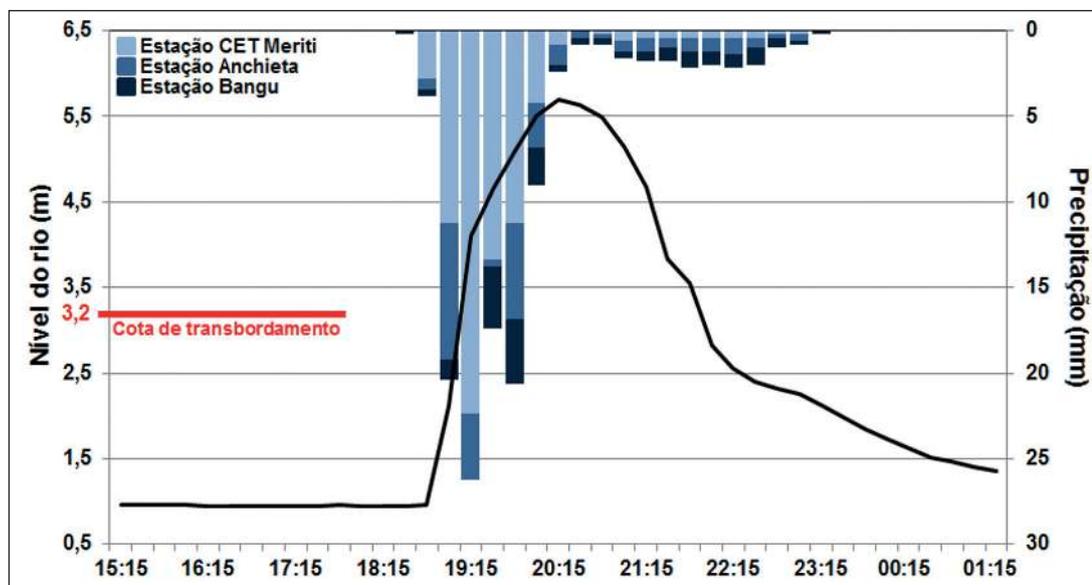


Figura 6 Cotagrama do rio Pavuna para entre às 15h15 do dia 16/01/2014 e 01h15 do dia 17/01/2014. As barras representam os dados de chuvas coletados pelas estações CET Meriti, Anchieta e Bangu. As variações dos dados de nível são representadas pela linha em preto e a cota de transbordamento pela linha em vermelho.

contribuição da precipitação coletada nestas três estações para os dois eventos de transbordamento analisados (Figura 7B).

Através de uma análise conjunta dos dados de chuva observados nas estações CET Meriti, Anchieta e Bangu (Figura 7B) verifica-se que o acumulado pluviométrico associado à elevação máxima do rio Pavuna foi de aproximadamente 103,4 mm no dia 30/12/2013 e de 99,8 mm no dia 16/01/2014. Tais volumes mostram que no primeiro evento de transbordamento houve um maior acumulado pluviométrico sobre a bacia em relação ao segundo evento analisado, ao contrário da análise considerando somente os dados coletados pela estação CET Meriti (Figura 7A). Tais acumulados (Figura 7B) caracterizam, inicialmente, uma melhor resposta da variação do nível do rio Pavuna em relação às chuvas, onde no primeiro evento de cheia (quadrados em azul claro na Figura 7) os maiores volumes de chuva favoreceram uma maior elevação do nível d'água em relação ao segundo evento de cheia (círculos em azul na Figura 7).

4 Conclusões

Neste trabalho, uma análise hidrometeorológica para dois eventos extremos de chuva e transbordamento do rio Pavuna (RJ) foi realizada. Avaliou-se a evolução temporal de indicadores dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera, distribuição espacial da refletividade sobre a bacia do rio e as relações entre os acumulados de precipitação e as variações dos níveis d'água observados.

Utilizando os dados da reanálise ERA 5 foram calculados e avaliados doze parâmetros dinâmicos e termodinâmicos presentes começando doze horas antes do começo da precipitação e seis horas após o início da mesma. Em ambos os eventos analisados, verificou-se a presença concomitante da disponibilidade de energia, umidade e gatilhos dinâmicos para a formação das altas taxas de chuva observada. Para o evento ocorrido em 30/12/2013 foi possível observar maiores taxas de aquecimento em superfície e umidade em relação ao dia 16/01/2014 (T2M, UBN, UMN e AP). Entretanto, para o segundo evento analisado, verificou-se uma maior disponibilidade de

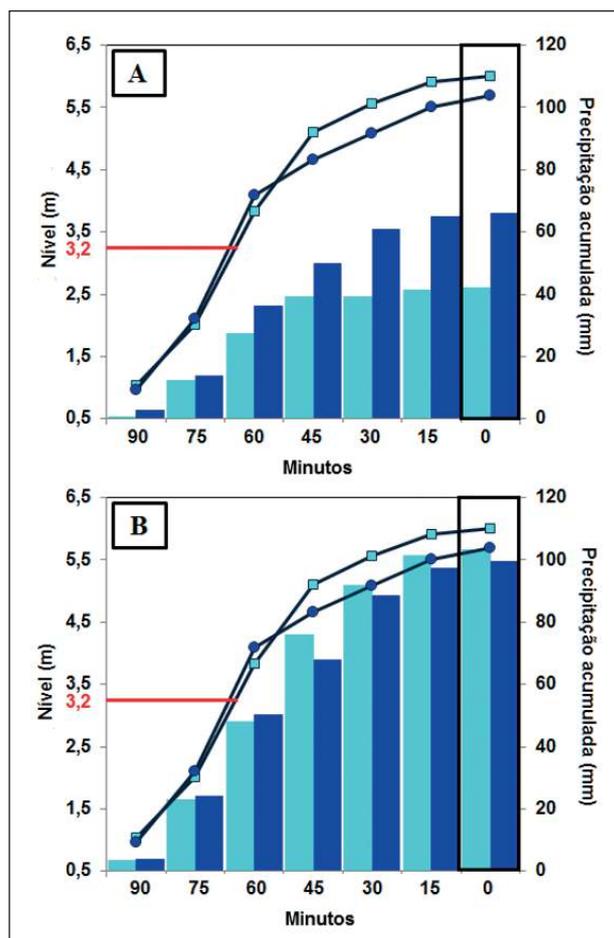


Figura 7 Acumulados pluviométricos e nível do rio Pavuna no momento (minuto 0) e antecedentes (variando entre 15 e 90 minutos) às ocorrências de transbordamento (retângulo delimitado em preto) em 30/12/2013 (quadrados e barras em azul claro) e 16/01/2014 (círculos e barras em azul escuro) para estação A. CET Meriti; B. nas estações (soma) CET Meriti, Bangu e Anchieta. A linha em vermelho caracteriza a cota de transbordamento.

energia na estrutura vertical da atmosfera (CAPE, LI, K, TT e LR) em relação ao primeiro evento, sugerindo a influência deste mecanismo para a formação das maiores taxas de chuvas observadas. Os indicadores dinâmicos (CV, DV e OM) apresentaram comportamento similar em ambos os eventos, caracterizando um padrão vertical de circulação atmosférica favorável à formação de nuvens e chuvas.

Através das imagens de radar e dos dados de chuva e nível d'água foi possível observar uma maior distribuição da precipitação sobre a bacia do rio Pavuna para o primeiro evento de transbordamento analisado. Entretanto, um comportamento

mais localizado e mais intenso da precipitação sobre o exutório da bacia foi observado para o segundo evento de transbordamento. Utilizando os dados pluviométricos medidos em três pontos da bacia do rio Pavuna verificou-se que apesar das maiores taxas de chuva observadas sobre o exutório da bacia no segundo evento de transbordamento, maiores acumulados de precipitação totais foram observados no primeiro evento analisado favorecendo assim o maior pico de cheia observado.

Através dos resultados obtidos nesta pesquisa foi possível observar a importância da avaliação temporal de múltiplos indicadores dinâmicos e termodinâmicos para a caracterização do potencial atmosférico para o desenvolvimento convectivo e formação de chuvas intensas. Utilizando os dados de precipitação coletados durante os dois eventos de transbordamento analisados, também verificou-se a relevância de uma análise conjunta dos dados de chuva não somente no exutório da bacia, mas também aos postos localizados em seu interior para as variações do nível d'água no ponto monitorado. Espera-se que os resultados obtidos nesta pesquisa possam servir como ferramentas de base para sistemas de alerta, principalmente em bacias que possuem rápida resposta às chuvas, como a bacia do rio Pavuna.

5 Referências

- Alcántara-Ayala, I. 2002. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. *Geomorphology*, 47(2-4): 107-124.
- Almeida, M.V. 2002. *Estimativa da precipitação via radar meteorológico do Pico do Couto*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 148p.
- Ballesteros, J.A.; Bodoque, J.M.; Díez-Herrero, A.; Sanchez-Silva, M. & Stoffel, M. 2011. Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharger based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. *Journal of Hydrology*, 403(2): 103-115.
- Brandão, A.M.P.M. 1997. As chuvas e a ação humana: uma infeliz coincidência. In: TORMENTAS CARIOCAS. SEMINÁRIO PREVENÇÃO E CONTROLE DOS EFEITOS DOS TEMPORAIS NO RIO DE JANEIRO. Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro, p.21-42.
- Carneiro, P.F. 2008. *Controle de Inundações em Bacias Metropolitanas Considerando a Integração do Planejamento do Uso do Solo à Gestão dos Recursos Hídricos. Estudo de Caso: Bacia dos rios Iguaçu/Sarapuí na Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 256p.
- Castro, A.L.C. 2002. Manual de desastres: desastres mistos. Brasília: MIN, 91p
- CPTEC. 2018. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <<https://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 04 mai. 2018.
- Dahri, N. & Abida, H. 2017. Monte Carlo simulation-aided analytical hierarchy process (AHP) for flood susceptibility mapping in Gabes Basin (southeastern Tunisia). *Environment Earth Science*, 76:302-309.
- ECWMF. 2018a. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Disponível em: <<https://www.ecmwf.int/>>. Acesso em: 02 mai. 2018.
- ECWMF. 2018b. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - "What is ERA5?" Disponível em: <<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/What+is+ERA5>>. Acesso em: 02 mai. 2018.
- Foss, M. 2011. *Condições atmosféricas conducentes à ocorrência de tempestades convectivas severas na América do Sul*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Santa Maria, Dissertação de Mestrado, 186p.
- Galway, J. 1956. "The lifted index as a predictor of latent instability". *Bulletin of the American Meteorological Society*, 37:528-529.
- George, J.J. 1960. *Weather Forecasting for Aeronautics*. New York, Academic Press. 684 p.
- Goudenhoofd, E. & Delobbe, L. 2009. "Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates". *Hydrology and Earth System Sciences*, 13:195-203.
- Hagen, M.; Schiesser, H.H. & Dorninger, M. 2000. "Monitoring of mesoscale precipitation systems in the Alps and the northern Alpine foreland by radar and rain gauges". *Meteorology and Atmospheric Physics*, 72:87-10.
- Hallak, R. & Filho, A.J.P. 2012. Análise de desempenho de índices de instabilidade atmosférica na previsão de fenômenos convectivos de mesoescala na região metropolitana de São Paulo entre 28 de janeiro e 04 de fevereiro de 2004. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(2):173-206.
- INEA 2018. Instituto Estadual do Ambiente. Disponível em: <<http://www.inea.rj.gov.br/Portal/index.htm>>. Acesso em: 02 de maio de 2018.
- Kumar, L.S.; Lee, Y.H.; Yeo, J.X. & Ong, J.T. 2011. Tropical rain classification and estimation of rain from z-r (reflectivity-rain rate) relationships. *Progress In Electromagnetics Research*, 32:107-127.
- Lackmann, G.M. & Yablonski, R.M. 2004. "The importance of the precipitation mass sink in tropical cyclones and other heavily precipitating systems". *Journal of the Atmospheric Sciences*, 61:1674-1692.
- Lima, D.R.O. 2005. *Diagnóstico de chuvas e previsão meteorológica para a bacia hidrográfica do rio Manso*. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós – graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 185p.
- Marcelino, E.V. 2008. *Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos*. Caderno Didático nº 1. Santa Maria, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. 40 p.
- Mayoral, A.G. 2017. *Estudo da bacia do rio Acari: Obras de*

- controle de inundações e resiliência da bacia. Programa de graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 184p.
- Miller, R.C. 1972. *Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Center*. Technical Report 200 (Rev.). Springfield, Air Weather Service of United States Air Force, 190 p.
- Mourão, C.E.F. 2007. *Estudo do Comportamento de Indicadores de Tempo Severo em Casos de Tempestades Sobre o Rio de Janeiro Utilizando o Modelo RAMS*. Departamento de Meteorologia (Instituto de Geociências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 93p
- Nascimento, E.L. 2005. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20(1):121-140.
- Parker, M.D. & Johnson, R.H. 2000. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. *Monthly Weather Review*, 128: 3413–3436.
- Sausen, T.M.; Ferreira, C.C.; Sousa Júnior, M.A.; Hansen, M.A.F.; Pardi Lacruz, M.S.; Saito, S.M. & Marcelino, E. 2009. Projeto Cadernos Didáticos: Desastres Naturais e Geotecnologias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 17, Anais, Natal – Rio Grande do Norte
- Silva Dias, M.A.F. 1987 “Sistemas de mesoescala e previsão de tempo a curto prazo”. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2:133- 150.
- Silva Dias, M.A.F. 2000. Índices de Instabilidade para Previsão de Chuva e Tempestades Severas. Disponível em: <<http://www.master.iag.usp.br/static/downloads/apostilas/indices.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2018.
- Silva, F.P.; Justí da Silva, M.G.A.; Menezes, W.F & Almeida, V.A. 2016. “Atmospheric Indicators Evaluation Using WRF Numerical Model in Rainfall Events in the City of Rio de Janeiro”. *Anuário do Instituto de Geociências*, 38(2): 81-90.
- Silva, F.P.; Rotunno Filho, O.C.; Sampaio, R.J.; Dragaud, I.C.D.V.; Araújo, A.A.M; Justí da Silva, M.G.A. & 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. *Meteorology and Atmospheric Physics*. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00703-017-0570-5>. Acesso em: 20 ago. 2018.
- Silva, F.P.; Justí da Silva, M.G.A.; 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*. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00703-018-0609-2>. Acesso em: 20 ago. 2018
- Tajbakhsh, S.; Ghafarian, P. & Sahraian, F. 2012. Instability indices and forecasting thunderstorms: the case of 30 April 2009. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12:1-11.
- Tavares, J.P.N. & Mota, M.A.S. 2012. Condições termodinâmicas de eventos de precipitação extrema em Belém – PA durante a estação chuvosa. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(2): 207-218.
- Teixeira, M.S. & Satyamurty, P. 2006. Dynamical and synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in Southern Brazil. *Monthly Weather Review*, 135: 598-617.
- UNISDR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). 2015. The human cost of weather related disasters: 1995-2015. Disponível em: https://www.unisdr.org/2015/docs/climatechange/COP21_WeatherDisastersReport_2015_FINAL.pdf. Acesso em: 27 ago. 2018.
- Wilson, J.W. & Brandes, E.A. 1979. Radar Measurement of Rainfall: A Summary. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60:1048-1058.