

PROPOSTA DE AVALIAÇÃO DINÂMICA E TERMODINÂMICA DA ATMOSFERA PARA EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA EM PETRÓPOLIS/RJ

Fabricio Polifke da Silva^{1,4*}
Otto Corrêa Rotunno Filho¹
Afonso Augusto Magalhães de Araujo²
Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva³
Gisele Dornelles Pires⁴
Rafael João Sampaio^{1,4}

¹*Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, CT, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Caixa Postal 68540 – Cidade Universitária - Rio de Janeiro - RJ, Brasil - 21941-914*

²*Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, Escola Politécnica, CT, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Av. Athos da Silveira Ramos – Cidade Universitária - Rio de Janeiro - RJ, Brasil - 21941-590*

³*Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, Laboratório de Meteorologia, Avenida Brenand, s.n., Imboassica, 27925-535, Macaé - RJ, Brasil*

⁴*Universidade Iguaçu, Faculdade de Ciências Exatas, Av. Abílio Augusto Távora, 2134 - Jardim Nova Era, 26275-580, Nova Iguaçu - RJ, Brasil*

* fabricio@coc.ufrj.br

RESUMO

Um importante princípio para a previsão de chuvas intensas é conhecer as condições atmosféricas necessárias para o seu desenvolvimento, sobretudo quando favorecem a ocorrência de inundações e deslizamentos de terra. Assim, estimar a possibilidade do desenvolvimento local de tempestades, especialmente durante a estação de verão, ainda necessita de aperfeiçoamento e representa um desafio na comunidade científica. O objetivo da pesquisa é propor abordagem para avaliar o comportamento de indicadores termodinâmicos e dinâmicos para eventos extremos de precipitação, notadamente para o estudo de caso de um (1) evento de chuva que causou inundações e deslizamentos de terra em Petrópolis durante os dias 17 e 18 de março de 2013. Os resultados mostraram que os índices termodinâmicos caracterizaram valores mais significativos durante o início da precipitação. Todavia os indicadores dinâmicos estiveram presentes no início e durante a precipitação, atuando como gatilho para a formação das chuvas. Procedimento de análise qualitativa evidenciou que a combinação de fatores termodinâmicos e dinâmicos favoreceu a formação de nuvens convectivas, enquanto a ausência da componente termodinâmica favoreceu a formação de nuvens estratiformes. Através da evolução temporal do perfil vertical do vento, verificou-se a presença de uma componente de ventos de noroeste antes do início da chuva e, posteriormente, uma mudança para as componentes de sudoeste-sul durante a ocorrência da chuva.

INTRODUÇÃO

A compreensão dos fenômenos meteorológicos que originam altos acumulados de precipitação e suas interações com a geografia local tem sido alvo de estudos de diversos cientistas nos últimos anos. Uma vez que a precipitação é uma das variáveis desencadeadoras de desastres naturais, o conhecimento dos mecanismos físicos que favorecem a sua formação, assim como a sua previsão, assume grande relevância (Teixeira e Satyamurty 2007). Sob este ponto de vista, a melhoria da previsão de chuvas intensas caracteriza-se somente como um dos eixos abordados pelas ciências atmosféricas em engenharia, de caráter multidisciplinar, devido a sua capacidade de modificar as características associadas com o comportamento do ambiente físico com o qual interage (Lemos e Calbete, 1996).

No estado do Rio de Janeiro, a ocorrência da precipitação está relacionada à presença da Zona de Convergência do Atlântico Sul (Seluchi e Chou 2009), sistemas frontais (Seluchi e Chou 2009; Dereczynski et al., 2009) ou sistemas convectivos isolados (Teixeira e Satyamurty 2007), especialmente durante a estação

chuosa (entre outubro e março). Em particular, a região Serrana do Rio de Janeiro apresenta maiores acumulados de precipitação em relação a outras regiões do estado (Brito et al., 2016), caracterizando consequentemente condições favoráveis à ocorrência de riscos naturais, como inundações e deslizamentos de terra (Oakley et al., 2017). Cabe citar o desastre natural ocorrido em janeiro de 2011, onde os elevados valores acumulados de chuva causaram eventos de inundações e deslizamentos de terras e geraram um total de 71 vítimas fatais, 267 vítimas parciais, 187 pessoas sem-teto e 6.956 pessoas deslocadas (Araujo et al., 2013).

No verão, os processos físicos que originam precipitações intensas ocorrem na mesoescala embebidos em um ambiente sinótico, onde várias características presentes em ambas as escalas geram a convecção e a formação de fortes chuvas (Konrad II, 1997). Em outras palavras, os sistemas convectivos dependem dos processos físicos que ocorrem em grande escala. Assim, tais processos desenvolvem uma estrutura dinâmica e termodinâmica adequada para apoiar o desenvolvimento desses sistemas, enquanto os processos de mesoescala atuam, principalmente, para iniciar a convecção (Doswell, 1987). Nesse contexto, Teixeira e Satyamurty (2007) relatam que variáveis presentes na estrutura da atmosfera podem detectar a sua potencialidade para originar eventos de chuvas intensas, e, portanto, meteorologistas, engenheiros, defesas civis podem decidir se um forte episódio de precipitação está prestes a ocorrer ou não.

Inserido nesse cenário, o presente trabalho visa investigar o comportamento de variáveis termodinâmicas e dinâmicas associadas a um evento de transbordamento do rio Quitandinha entre 17-18 de março de 2013. Entre os demais rios que atravessam a cidade de Petrópolis, realizou-se a escolha do rio Quitandinha devido a sua alta frequência de monitoramento (medição a cada quinze minutos), realizada pelo Instituto Estadual da Ambiente (INEA). O objetivo principal da pesquisa é fornecer ferramentas operacionais que possam ser utilizadas para o gerenciamento e análise de risco por parte dos centros de monitoramento ambientais.

As variáveis meteorológicas sugeridas como indicadores de chuvas estão divididas em dois tipos: as dinâmicas e as termodinâmicas. As dinâmicas são variáveis que levam em conta os movimentos da atmosfera, considerando a atmosfera como um fluido contínuo. Já as variáveis termodinâmicas são variáveis que valem para o estado de equilíbrio e que levam em conta os parâmetros térmicos da atmosfera e sua estrutura vertical (Silva 2014). Na Tabela 1, encontram-se as variáveis analisadas. As variáveis termodinâmicas avaliadas abrangem índice K, índice TT, taxa de variação vertical de temperatura (Lapse-Rate), energia potencial disponível para a convecção (CAPE) e água precipitável (PW), enquanto as variáveis dinâmicas englobam convergência do vento nos baixos níveis da atmosfera (CONV), divergência do vento nos altos níveis da atmosfera (DIV), cisalhamento vertical do vento (WS) e movimento vertical (OM).

Nas fórmulas apresentadas na Tabela 1, T e Td, ambos medidos em graus centígrados ($^{\circ}\text{C}$), caracterizam a temperatura do ar ambiente e a temperatura do ponto de orvalho, respectivamente, enquanto os números de subíndice anexados a essas variáveis referem-se aos níveis isobáricos (hPa) em que eles precisam ser medidos. Tp refere-se à temperatura de uma parcela de ar levantada da superfície até o nível atmosférico de 500 hPa. O índice K é calculado pela soma das temperaturas do bulbo seco e do ponto de orvalho a 850 hPa, subtraído da depressão do ponto de orvalho a 700 hPa e temperatura do bulbo seco a 500 hPa (George 1960). Os valores de K acima de 30 $^{\circ}\text{C}$ são considerados como indicativos de chuvas intensas (Nascimento 2005). O índice total de totais (TT), semelhante ao índice K, não considera a depressão do ponto de orvalho a 700 hPa (Miller, 1972). Os valores de TT acima de 40 $^{\circ}\text{C}$ indicam situações favoráveis à tempestade (Henry 1999; Nascimento 2005). A taxa de variação vertical da temperatura (LR) representa a variação de temperatura entre dois níveis atmosféricos. Neste trabalho, serão adotados os níveis de 700 hPa e 500 hPa, segundo o proposto por Nascimento (2005). O conteúdo de água precipitável (PW) é a integral vertical da razão de mistura do vapor de água. Essa variável 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 fosse condensado ou precipitado.

A energia potencial disponível para convecção (CAPE) é uma integração vertical da diferença entre a temperatura virtual de uma parcela de ar (Tvp(z)) e a temperatura virtual do ambiente circundante Tv(z) do nível de convecção livre (LFC) para o nível de flutuabilidade neutra (LNB). Os valores mais altos do CAPE denotam maior nível de energia do que a atmosfera tem para gerar convecção profunda na presença de forçamento dinâmico (Bluestein 1993; Derubertis 2006). O movimento vertical (OM), a convergência do vento nos baixos níveis (CONV) e nos altos níveis (DIV) da atmosfera são os mecanismos dinâmicos essenciais necessários para fornecer o movimento do ar ascendente (Doswell, 1987; Tajbakhsh et al., 2012) do ar. O cisalhamento do vento (WS) é uma diferença na velocidade e direção do vento entre dois níveis na atmosfera (Chen et al., 2006; Silva, 2017).

Tabela 1: Indicadores dinâmicos e termodinâmicos

Variável	Fórmula
Índice K	$K = (T_{850} + Td_{850}) - (T_{700} - Td_{700}) - T_{500}$
Índice TT	$TT = (T_{850} + Td_{850}) - 2 * T_{500}$
Taxa de variação vertical da temperatura	$LR = -\frac{\partial T}{\partial Z}$
Energia potencial disponível para convecção	$CAPE = g \int_{LFC}^{LN} \frac{T_{vp}(z) - T_v(z)}{T_v(z)} dz$
Água precipitável	$PW = \frac{1}{\rho g} \int_{p_1}^{p_2} wdp$
Convergência do vento nos baixos níveis da atmosfera	$CONV = \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) < 0$
Divergência do vento nos altos níveis da atmosfera	$DIV = \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) > 0$
Cisalhamento vertical do vento	$WS = \frac{V_{500_{hPa}} - V_{10_m}}{Z_{500_{hPa}} - Z_{10_m}}$
Movimento vertical	$OM = \frac{\partial p}{\partial z}$

OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é explorar e investigar as variáveis dinâmicas e termodinâmicas durante um evento de chuvas intensas que favoreceu a ocorrência de inundações e deslizamentos de terra na cidade de Petrópolis, no estado do Rio de Janeiro, entre os dias 17 e 18 de março de 2013. Espera-se que os resultados e a concepção geral construída possam ser utilizados como orientação para os meteorologistas, engenheiros e defesas civis e sejam empregados como medidas de apoio para o desenvolvimento de ferramentas operacionais para o correspondente gerenciamento e análise de risco, com diferentes aplicabilidades a serem administradas sob a responsabilidade de agências ambientais.

MATERIAIS E MÉTODOS

Petrópolis é um município localizado na região serrana do estado do Rio de Janeiro, no Brasil. Ele ocupa uma área de 795,798 km², com altitude de 838 metros acima do nível do mar, com uma população de 298.158 habitantes (2016), de acordo com o IBGE (<http://www.ibge.gov.br/home/>), além de ser a cidade mais populosa da região montanhosa do estado do Rio de Janeiro (Figura 1). Usando o nível de água limiar adotado pelo INEA, foi possível detectar o início do evento de transbordamento do rio Quitandinha, assim como a quantidade de horas que a calha permaneceu com nível de água acima da cota de transbordamento. Os dados de reanálise ERA5 (<https://www.ecmwf.int/>) foram utilizados para calcular e analisar as variáveis dinâmicas e termodinâmicas. Esse conjunto de dados tem resolução horizontal regular de 31 km x 31 km de latitude / longitude e resolução temporal de 1 hora.

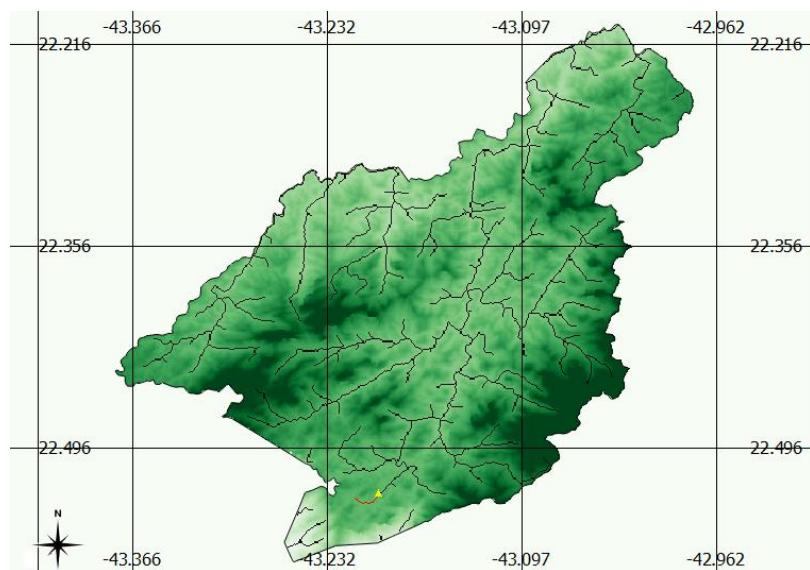


Figura 1 Mapa que demarca a bacia hidrográfica que abrange a cidade de Petrópolis; o rio Quitandinha é destacado em vermelho, e a estação Coronel Veiga está demarcada por triângulo amarelo.

RESULTADOS

Transbordamento do rio Quitandinha 17-18 de março de 2013

O evento de chuva ocorrido entre 17 e 18 de março de 2013 destaca-se devido aos altos valores de precipitação acumulados registrados. A precipitação teve seu início durante a tarde do dia 17 de março de 2013 e terminou na noite de 18 de março de 2013. Na Figura 2, é possível observar o cotograma do rio Quitandinha entre as 00:00h da manhã de 17 e 00:00h de 20 de março, 2013. A área em vermelho representa os valores de nível de água do rio Quitandinha que estavam acima da cota de transbordamento, com duração de aproximadamente 16 horas. No total de 32 horas, a precipitação acumulada atingiu 449,5 mm na região da estação Coronel Veiga. Como consequência desses altos acumulados de precipitação, um deslizamento de terra ocorreu em uma área urbana de alta densidade, atingindo a região de Quitandinha (região sul da cidade de Petrópolis) mais fortemente. A Defesa Civil de Petrópolis informou a ocorrência de deslizamentos nos distritos Alto da Serra, Independência, Dr. Thouzet e João Xavier. No total, houve 18 mortes e 560 pessoas foram deslocadas ou desabrigadas (Araujo et al., 2013).

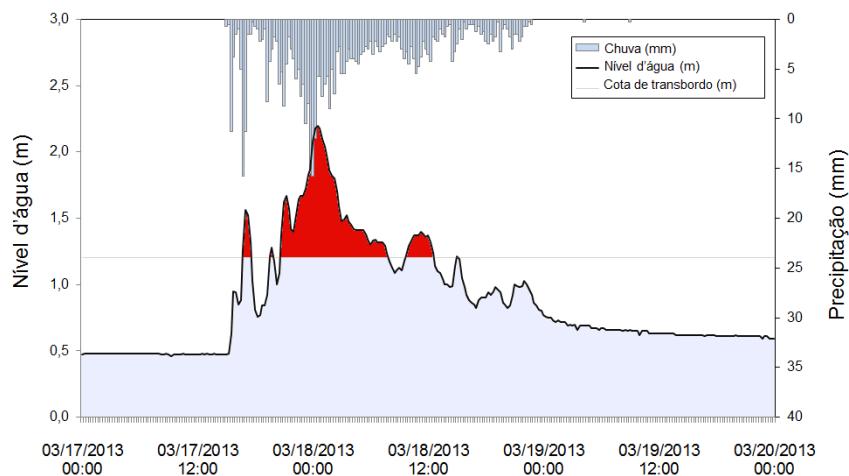


Figura 2 Cotograma do rio Quitandinha entre 00:00h da manhã de 17 de março de 2013 e 00:00h da manhã de 20 de março de 2013.

A Figura 3 mostra quatro imagens do radar meteorológico do Sumaré para o evento de chuva analisado. A partir das imagens de radar, é possível verificar diferentes valores de refletividade na cidade de Petrópolis entre as 15h30 do dia 17 de março e 03h03 do dia seguinte. Segundo os critérios utilizados por muitos autores (Punkka e Bister, 2005; Goudensoofdt e Delobbe, 2012), os valores de refletividade entre 18 dBZ e 40 dBZ são considerados como indicativos de nuvens estratiformes e acima de 40 dBZ são considerados como indicativos de nuvens convectivas. Assim, através das imagens de radar, é possível verificar uma maior presença de nuvens convectivas durante a tarde e noite do dia 17 de março e uma maior predominância de nuvens estratiformes a partir da madrugada do dia 18 de março.

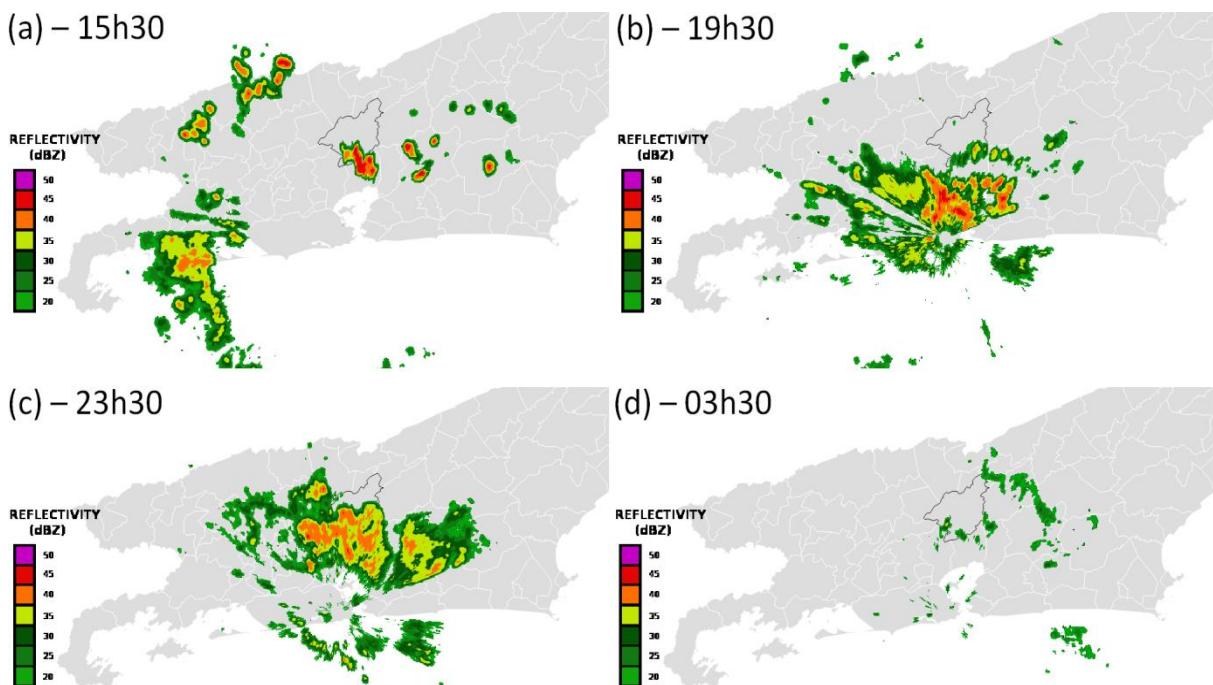


Figura 3 Imagens do radar de Sumaré às 15h30, 19h30 e 23h30 em 17 de março de 2013 e 03h30, 07h30 e 11h30 em 18 de março de 2013; a cidade de Petrópolis encontra-se delineada em preto.

As Figuras 4 e 5 caracterizam espacialmente a distribuição das variáveis termodinâmicas e dinâmicas (Tabela 1) utilizando os dados da reanálise para o início (15h do dia 17/03/2013) e para a maior taxa horária (00h do dia 18/03/2013) da precipitação. Os campos do índice K (Figura 4a) e Total Totals (Figura 4b) mostraram valores significativos sobre o estado do Rio de Janeiro, acima de 30 °C e 40°C, respectivamente. Segundo Silva Dias (1987), os índices K e TT podem ser analisados em conjunto para a determinação de tendências dicotômicas de chuvas (chuvas torrenciais ou tempestades severas). De acordo com esse critério, a combinação de $K > 24$ e $TT > 45$ caracterizam condições favoráveis a chuvas intensas, principalmente para a região sudeste do Brasil (Hallak e Filho 2012). Assim, verifica-se que, durante o início da precipitação, a região localizada mais ao norte da cidade de Petrópolis apresentava condições atmosféricas favoráveis para o desenvolvimento de tempestades e chuvas significativas.

O campo da variável CAPE (Figura 4c) mostram valores entre 200 e 400 J kg^{-1} sobre a região serrana. Segundo Hallak e Filho (2012), somente valores acima de 1000 J kg^{-1} são considerados favoráveis para a formação de tempestades. As Figuras 4c e 4d mostraram que, durante o início da precipitação, os valores mais significativos encontravam-se ao sul do estado do Rio de Janeiro. Esse fato deve-se à aproximação de uma frente fria que se acoplou a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) localizada sobre o sudeste do Brasil. As variáveis dinâmicas caracterizam a presença de forçantes em diferentes localidades sobre o Rio de Janeiro e regiões próximas da cidade de Petrópolis, caracterizando a condição básica para a formação de tempestades, isto é, a presença simultânea de instabilidade (Figuras 4a, 4b, 4d e 4e) e forçantes dinâmicas. Por meio da Figura 4f, verifica-se um fraco cisalhamento do vento, sendo esse comportamento favorável à formação e à eficiência da precipitação (Silva, 2017).

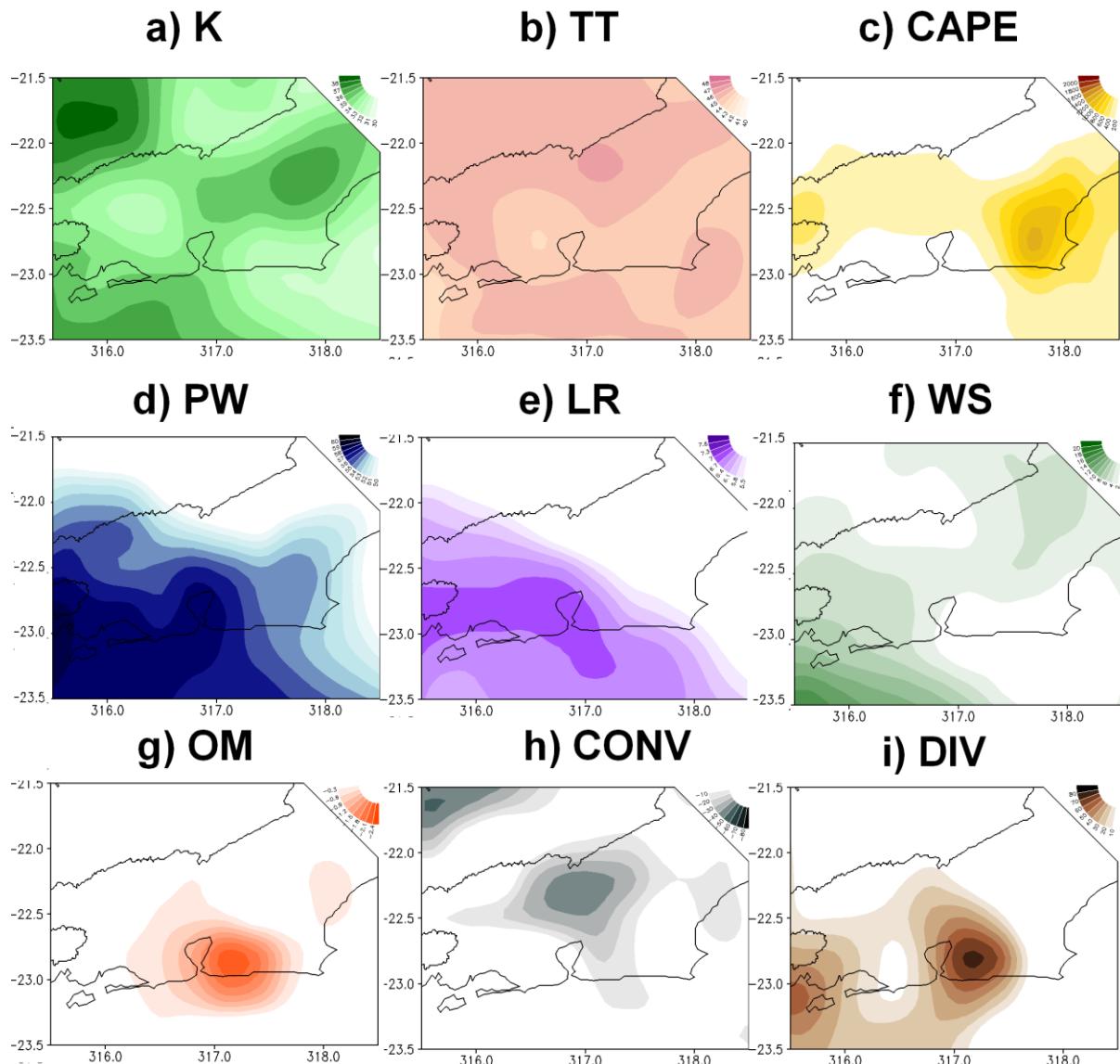


Figura 4 Variáveis dinâmicas e termodinâmicas calculadas para as 15h do dia 17 de março de 2013.

Para a maior taxa horária de precipitação (Figura 5), verifica-se que os campos do índice K (Figura 5a) e Total Totals (Figura 5b) novamente caracterizaram valores significativos sobre o estado do Rio de Janeiro, acima de 30 °C e 40°C, respectivamente. Entretanto, a variável CAPE (Figura 5c) não caracterizou indicativos para a formação de tempestades para esse horário. Sendo o cálculo da CAPE obtido utilizando como referência parcelas de ar que se deslocam a partir da superfície, o resultado sugere, inicialmente, que a formação da chuva para esse horário não teve contribuições de energia potencial oriunda da superfície. A Figura 5c mostra valores mais significativos de água precipitável, atuando como suporte de umidade sobre a cidade de Petrópolis. Apesar do baixo valor da CAPE, verificam-se valores expressivos de LR sobre a região serrana, o que caracteriza que o maior suporte de energia para a formação das nuvens e chuva se encontrava localizada nas camadas atmosféricas localizadas logo acima da superfície (entre 850 hPa e 700 hPa). Através das Figuras 5f, 5g, 5h e 5i, verifica-se a presença simultânea das variáveis dinâmicas caracterizando novamente a presença de forçantes para a formação da precipitação.

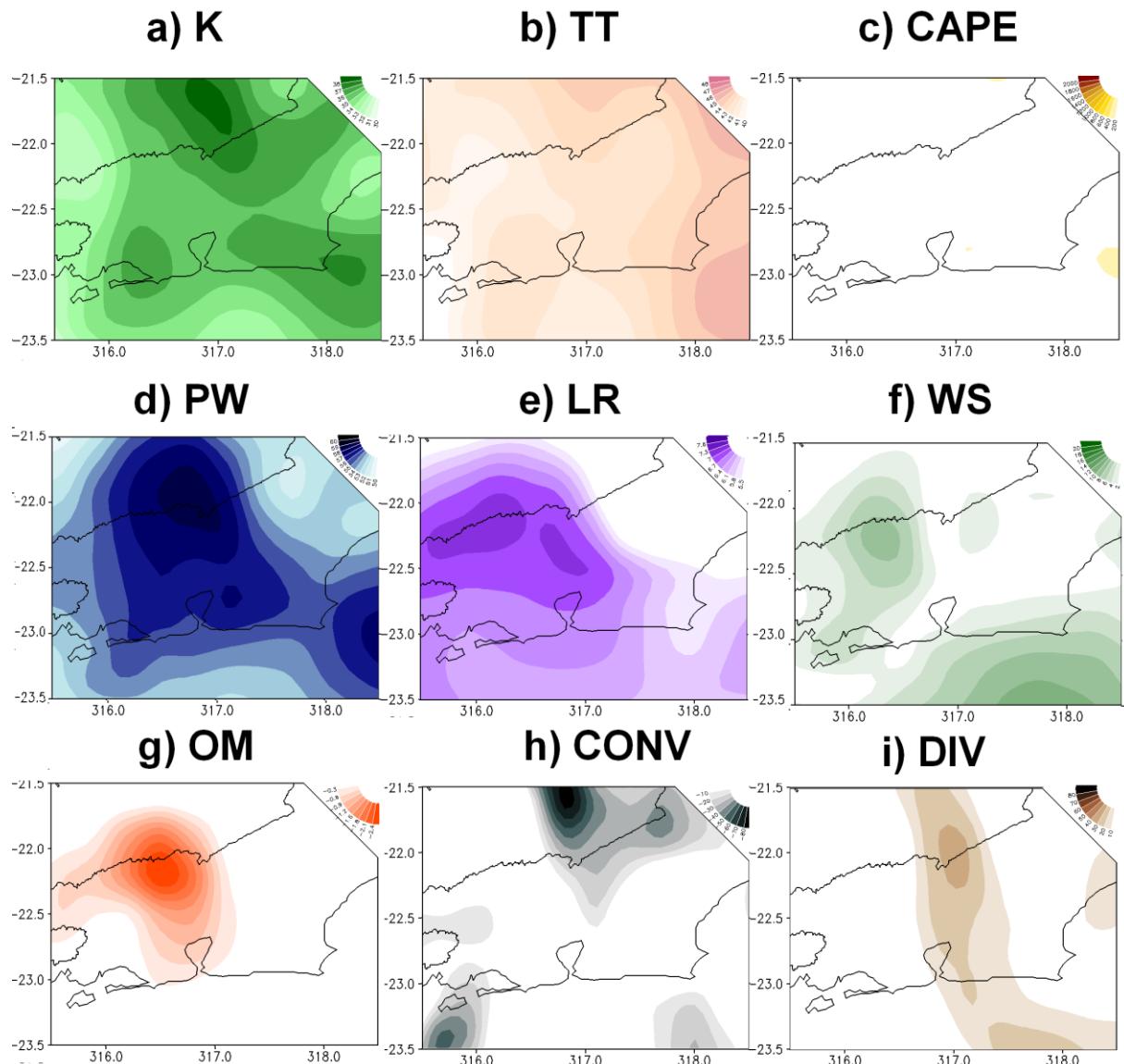


Figura 5 Variáveis dinâmicas e termodinâmicas calculadas para as 00h do dia 18 de março de 2013.

A Figura 5 mostra a evolução do perfil vertical do vento para um ponto de grade localizado sobre a cidade de Petrópolis doze horas antes e durante a precipitação. Através dessa figura, é possível observar uma constante presença de ventos soprando de noroeste que se estendem dos baixos níveis da atmosfera até aproximadamente 700 hPa. Esse efeito está relacionado com a atuação da ZCAS, que promove esse tipo de configuração na circulação dos ventos na atmosfera. Esse padrão de circulação promove um contínuo transporte da umidade e calor da Amazônia em direção ao estado do Rio de Janeiro. Assim, ao interagir com a topografia local, essa condição atmosférica favorece a formação de tempestades convectivas (refletividade acima de 40 dBZ) e chuvas intensas, principalmente sobre a região serrana. No decorrer da tarde, verifica-se um giro do vento, de noroeste para sudoeste/sul nos baixos níveis da atmosfera associado à aproximação da frente fria em direção ao estado do Rio de Janeiro. Após esse horário, verifica-se a presença de uma componente contínua de ventos intensos de sul. Essa circulação dos ventos promove também um transporte de umidade sobre o estado do Rio de Janeiro. Diferentemente da componente de noroeste, a componente de sul traz umidade do oceano e favorece à formação de nuvens estratiformes (refletividade entre 20 e 40 dBZ) como pode ser observado nas imagens do radar do Sumaré.

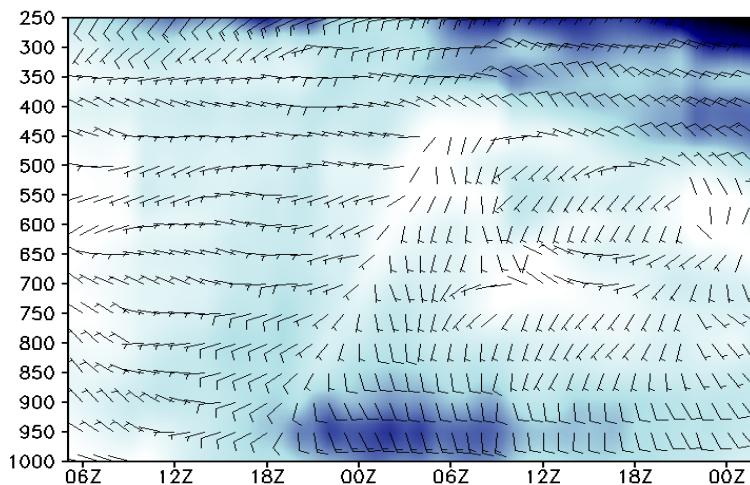


Figura 6 Perfil vertical do vento entre 06Z (03 horas local) do dia 17 de março e 21Z (18 horas local) do dia 18 de março de 2013.

CONCLUSÃO

O estudo examinou as variáveis termodinâmicas e dinâmicas durante um episódio de precipitação que causou inundações e deslizamentos sobre a cidade de Petrópolis durante os dias 17 e 18 de março de 2013. Foram analisados dois tipos de variáveis: dinâmicas, que levam em conta os movimentos da atmosfera, considerando a atmosfera como um fluido contínuo, e termodinâmicas, que levam em consideração os parâmetros térmicos da atmosfera e de sua estrutura vertical. As variáveis termodinâmicas utilizadas consideradas foram os índices K e TT, taxa de variação vertical de temperatura (*lapse-rate*), energia potencial disponível para a convecção (CAPE) e água precipitável (PW). As variáveis dinâmicas, por sua vez, foram convergência do vento nos baixos níveis da atmosfera (CONV), divergência do vento nos altos níveis da atmosfera (DIV), cisalhamento vertical do vento (WS) e movimento vertical (OM).

Os resultados mostraram que a CAPE, variável associada à taxa de aquecimento em superfície, espelhou valores mais significativos durante o início da precipitação. Entretanto, os índices K, TT, PW e LR caracterizaram ainda valores significativos durante o decorrer da precipitação, caracterizando um suporte termodinâmico oriundo dos níveis mais baixos da atmosfera, mas não tão próximos à superfície. Os resultados para os indicadores dinâmicos mostraram a correspondente presença durante todo o evento de chuva, isto é, atuando como elemento deflagrador da formação de nuvens e chuva durante o evento analisado. Tal comportamento mostrou que a combinação de fatores termodinâmicos e dinâmicos favoreceu a formação de nuvens convectivas (acima de 40 dBZ), enquanto a ausência da componente convectiva favoreceu a formação de nuvens estratiformes (entre 20 e 40 dBZ), como pode ser notado nas imagens do radar do Sumaré.

Mediante uma análise da evolução temporal do perfil vertical do vento, foi observar uma constante presença de ventos soprando de noroeste que se estendem dos baixos níveis da atmosfera até aproximadamente 700 hPa. Essa constatação está relacionada à atuação da ZCAS, que promove esse tipo de configuração na circulação dos ventos na atmosfera. O padrão de circulação caracterizado promove um contínuo transporte da umidade e calor da Amazônia em direção ao estado do Rio de Janeiro. No decorrer da tarde, verifica-se um giro do vento, de noroeste para sudoeste/sul, nos baixos níveis da atmosfera, associado à aproximação da frente fria em direção ao estado do Rio de Janeiro. Assim, espera-se que os resultados e a concepção geral construída possam ser utilizados como orientação para adequada gestão dos procedimentos operacionais sob responsabilidade de meteorologistas, engenheiros e pertinentes setores da defesa civil, com diferentes aplicabilidades a serem identificadas por agências ambientais.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Engenharia Civil do Instituto Alberto Luiz de Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), através do apoio do Laboratório de Recursos Hídricos e Estudos Ambientais (LABH2O). Os autores gostariam também de reconhecer o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), através da CAPES Edital 27/2013 - Pró-Equipamentos Institucionais e da CAPES Edital MEC 03/2015 – Processo nº 23038009469/2016-58, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), através do Edital Universal CNPq nº 14/2013 - processo 485136 / 2013-9 e CNPq Edital nº 12/2016 - processo 306944 / 2016-2, Fundação de Amparo à Pesquisa do

Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) por meio do apoio do Projeto FAPERJ - Pensa Rio - Edital 34/2014 (2014-2018) - E-26 / 010.002980 / 2014, FAPERJ nº E-12/2015 e FAPERJ nº E-22/2016, e do MCT / FINEP / CT-HIDRO (2005- 2017), que são focados em modelagem atmosférica e chuva-vazão e balanços de água e energia em relação a eventos extremos de inundações e secas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAUJO, L.M.N., ABDALAD, M.A., SATO A.M., ARAUJO, A.A.M., AVELAR, A.D.S., NETO, A.L.C., FILHO, O.C.R. Chuvas intensas recorrentes na região da Serra do Mar/RJ. https://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=3&ID=155&SUMARIO=3964&ST=chuvas_intensas_recorrentes_na_regiao_da_serra_do_mar_rj. Acessado em 12 de julho de 2015.
- BLUESTEIN, H.B. *Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes. Volume II: observations and theory of weather systems*. Taylor and Francis. New York. 1993
- BRITO, T.T., OLIVEIRA-JUNIOR, J.F., LYRA, G.B., GOIS, G., ZERI, M. Multivariate analysis applied to monthly rainfall over Rio de Janeiro state, Brazil. *Meteorol Atmos Phys*. doi:10.1007/s00703-016-0481-x, oct. 2016
- CHEN, S.S., KNAFF, J.A., MARKS, F.D. Effects of vertical wind shear and storm motion on tropical cyclone rainfall asymmetries deduced from TRMM. *Mon Weather Rev* 134:3190–3208, jul. 2006
- DEREZYNSKY, C.P., OLIVEIRA, J., MACHADO, C.O. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. *Rev Bras Meteorol* 24(1):24–38. doi:10.1590/s0102-77862009000100003, mar. 2009
- DERUBERTIS, D. Recent trends in four common stability indices derived from US radiosonde observations. *J Clim* 19:309–323, jan. 2006
- DOSWELL, C.A. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: a case study example. *Weather Forecast* 2:3–16, mar. 1987
- GEORGE, J.J. *Weather forecasting for aeronautics*. Academic Press, New York. 1960
- GOUDENHOOFDT, E., DELOBBE, L. Statistical characteristics of convective storms in Belgium derived from volumetric weather radar observations. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 52, 918–934, doi:10.1175/JAMC-D-12-079.1, jan. 2012
- HALLAK, R., FILHO, A.J.P. Análise de desempenho de índices de instabilidade atmosférica na previsão de fenômenos convectivos na mesoescala na região metropolitana de São Paulo entre 28 de Janeiro e 04 de Fevereiro de 2004. *Rev Bras Meteor* 27(2):173–206, jun. 2012
- HENRY, N.L. A static stability index for low-topped convection. *Weather Forecast* 15:246–265, apr. 1999
- INEA. Instituto Estadual do Ambiente. <http://www.inea.rj.gov.br/Portal/index.htm>. Acesso em 02 de maio de 2017 às 13: 15. 2016
- KONRAD, C.E. Synoptic-scale features associated with warm season heavy rainfall over the interior southeastern United States. *Wea. Forecast*. 12:557–571, sep. 1997
- LEMOS, C.F., CALBETE, N.O. Sistemas Frontais que atuaram no litoral de 1987 a 1995. *Climanálise Especial*, edição comemorativa de 10 anos. 1996
- MILLER, R. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. IOP Publishing <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/744042.pdf>. Acessado em 22 julho 2016, 1972
- NASCIMENTO, E.L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? *Rev Bras Meteor* 20(1):113–122, apr. 2005
- OAKLEY, N.S., LANCASTER, J.T., KAPLAN, M.L. Synoptic conditions associated with cool season post-fire debris flows in the Transverse Ranges of southern California. *Nat Hazards*. doi:10.1007/s11069-017-2867-6, mar. 2017
- PUNKKA, A.J., BISTER, M. Occurrence of summertime convective precipitation and mesoscale convective systems in Finland 2000–01. *Mon. Wea. Rev.*, 133, 362–373, doi:10.1175/MWR-2854.1, dec. 2005

ROE, G.H., MONTGOMERY, D.R., HALLET, B. Orographic precipitation and the relief of mountain ranges. *J Geophys Res Solid Earth*. doi:10.1029/2001JB00152, oct. 2003

SELUCHI, M.E., CHOU E.S.C. Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. *Theor Appl Clim.* 98:67-77, mar. 2009

SILVA DIAS, M.A.F. Sistemas de mesoescala e previsão de tempo a curto prazo. *Rev Bras Meteor* 2:133–150, jul. 1987

SILVA, F.P. Chuvas Severas no Rio de Janeiro: Indicadores dos processos físicos associados. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2014

SILVA, F.P., ROTUNNO FILHO, O.C., SAMPAIO, R.J., DRAGAUD, I.C.V., MAGALHÃES, A.A.A., JUSTI DA SILVA, M.G.A., PIRES, G.D. Evaluation of atmospheric thermodynamics and dynamics during heavy-rainfall and no-rainfall events in the metropolitan area of Rio de Janeiro, Brazil. *Meteorol Atmos Phys* <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0570-5>, dec. 2017

TAJBAHSH, S., GHAFARIAN, P., SAHRAIAN, F. Instability indices and forecasting thunderstorms: the case of 30 April 2009. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12:1–11. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-403-2012>, apr. 2012

TEIXEIRA, M.S., SATYAMURTY, P. Dynamical and synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in southern Brazil. *Mon. Wea Rev.* 135:598–617, aug. 2007