



Avaliação de Indicadores Atmosféricos Utilizando o Modelo Numérico WRF em Eventos de Chuva na Cidade do Rio de Janeiro

Atmospheric Indicators Evaluation Using WRF
Numerical Model in Rainfall Events in the City of Rio de Janeiro

Fabricio Polifke da Silva¹; Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva²;
Wallace Figueiredo Menezes¹ & Vinícius Albuquerque de Almeida¹

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza, Instituto de Geociências, Departamento de Meteorologia, Avenida Athos da Silveira Ramos, 274, Bloco G, Cidade Universitária – 21941-916, Rio de Janeiro – RJ, Brasil

² 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

E-mails: briciopolifke@gmail.com; justi.meteoro@gmail.com; wallace.menezes@gmail.com; viniciusalmeida@gmail.com

Recebido em: 13/07/2015 Aprovado em: 16/12/2015

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2015_2_81_90

Resumo

A melhoria na previsão de eventos chuvas severas contribui significativamente na eficácia do monitoramento ambiental realizado rotineiramente pelos centros operacionais. Assim, neste trabalho procurou-se avaliar o desempenho de indicadores atmosféricos em eventos de chuva que ocorreram na cidade do Rio de Janeiro, no período entre 1997-2012, com o objetivo de identificar quais dentre os mesmos apresentam maior confiabilidade na identificação das condições atmosféricas favoráveis à ocorrência de chuvas severas. A partir das saídas de simulações feitas com o modelo numérico WRF, foram estabelecidos limiares para cada um dos indicadores atmosféricos analisados neste trabalho, assim como o cálculo da probabilidade de detecção (POD) e razão de alarme falso (RAF) destes indicadores para os dias de ocorrência de chuvas severas e para os dias em que havia a presença dos mesmos sistemas meteorológicos que deram origem aos eventos de chuva severa, mas que, no entanto, estas não ocorreram. Com os resultados de POD e RAF obtidos, procurou-se determinar os indicadores que apresentaram maior confiabilidade e verificou-se que a divergência do vento em 300 hPa, umidade específica em 850 hPa, energia total das tempestades severas em 500 hPa e água precipitável foram os indicadores mais eficientes na identificação das condições atmosféricas favoráveis à ocorrência de chuvas severas que ocorreram no município do Rio de Janeiro durante o período de estudo.

Palavras-chave: chuvas severas; modelagem numérica; indicadores atmosféricos

Abstract

The improvement in the forecast of extreme rainfall events contributes significantly the effectiveness of environmental monitoring performed routinely by operational centers. Therefore, in this study it was aimed to evaluate the performance of atmospheric indicators in rain events that occurred in the city of Rio de Janeiro, between 1997-2012, in order to identify which of them have higher reliability in identifying the favorable weather characteristics to the occurrence of severe rainfall. Using outputs from WRF model, thresholds were established for each of the atmospheric indicators analyzed in this paper, as well as the calculation of the probability of detection (POD) and false alarm ratio (FAR) of these indicators for days occurrence of severe rainfall and the days there was the presence of the same weather systems giving rise to severe rain events, but, however, these did not occur. With POD and RAF values obtained, we also sought to determine the most efficient indicators in the characterization of different atmospheric conditions between rainfall events analyzed. The results showed that the divergence of the wind in 300 hPa, specific humidity at 850 hPa, total energy of severe storm and precipitable water were the most efficient indicators in the identification of favorable atmospheric condition to the occurrence of severe rainfall in Rio de Janeiro the study period.

Keywords: severe rainfall; numerical modeling; atmospheric indicators

1 Introdução

O conhecimento e a previsão dos sistemas convectivos associados a grandes acumulados de precipitação têm adquirido grande relevância ao longo dos anos já que esses sistemas são responsáveis por desligamentos da rede elétrica, alagamentos, enchentes e deslizamentos de encostas, trazendo transtornos às atividades humanas e, até mesmo, levando a perdas de vidas.

Marengo (2010) e Sausen *et al.* (2009) relatam que eventos climáticos extremos se tornaram mais intensos e/ou mais frequentes durante os últimos cinquenta anos e que as regiões Sul e Sudeste do Brasil, principalmente a partir da década de 1970, têm sido severamente impactadas, resultando em grandes prejuízos econômicos, assim como em um elevado número de vítimas fatais. As consequências destes eventos climáticos extremos são particularmente importantes sobre estas regiões, pois nelas se concentram a maior parte da população do país, as atividades produtivas na indústria e no comércio, os principais reservatórios que produzem energia elétrica e as linhas de transmissão de energia, além de muitas estradas e portos por onde escoam a produção agrícola dessas regiões e da parte central do país.

Neste cenário, destaca-se o município do Rio de Janeiro, por sua importância cultural, política e econômica, com 1.200.278 km² de extensão, uma população estimada em 6.323.037 habitantes e constituído por diferentes e variados acidentes geográficos como maciços, baías, ilhas, restingas, lagoas, serras e morros, onde a ocorrência de chuvas significativas afeta de modo direto a vulnerabilidade da população residente. Assim, o aperfeiçoamento das técnicas de previsão de fortes chuvas como medidas de mitigação tornam-se temas relevantes e se constituem em desafios para a comunidade científica, servindo de base de motivação desta pesquisa.

2 Critérios para a Identificação de Eventos Significativos de Chuvas

Para o aprimoramento das técnicas de previsão associadas a eventos significativos de chuva, faz-se necessário, em primeiro lugar, o conhecimento

de valores ou limiares de intensidade e duração de precipitação que quantifiquem os eventos de chuva de interesse. Segundo Teixeira & Satyamurty (2006), a maior parte dos eventos desastrosos são ocasionados por chuvas de forte intensidade e longa duração. Ramos *et al.* (2012), entretanto, relatam que o termo chuva forte é um termo subjetivo e sua definição varia significativamente, podendo ser referido a um curto período de tempo de uma escala que varia de poucas horas até um dia, caracterizando a necessidade de critérios que direcionem à identificação dos eventos de chuva a serem estudados.

Os critérios para definição dos eventos significativos de chuva não seguem um padrão único de escolha, mas variam regionalmente por estarem inteiramente ligados ao regime local de precipitação, aos sistemas meteorológicos predominantes e aos objetivos da pesquisa. No trabalho de Junker *et al.* (1999), por exemplo, foram identificados e estudados 85 eventos de chuvas intensas que ocasionaram uma grande enchente em nove estados do meio oeste dos Estados Unidos em 1993. Esses autores consideraram eventos de significativos de chuva aqueles que ultrapassavam acumulados diários de chuva de 50,8 mm. Konrad II (1997) em seu estudo sobre enxurradas (*flash floods*) no interior do sudeste dos Estados Unidos classificou como eventos de chuva a serem analisados aqueles onde foram observados valores maiores ou iguais a 50 mm em seis horas. Carvalho *et al.* (2002) definiram como episódios extremos aqueles em que a precipitação em 24 horas era maior do que 20% do total observado nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro no período compreendido entre 1979-96.

O estudo da climatologia da precipitação do Rio de Janeiro realizado por Dereczynski *et al.* (2008) considerou como chuvas fortes os casos em que a precipitação diária fosse igual ou superior a 30,0 mm em pelo menos cinco estações pluviométricas do sistema Alerta-Rio (<http://alertario.rio.rj.gov.br/>). Utilizando a técnica dos percentis, as autoras verificaram que em todas as estações pluviométricas, os totais pluviométricos diários correspondentes ao percentil de 99% eram superiores a 30,0 mm, considerando que esse valor poderia representar um limite inferior para identificar eventos de chuvas significativas na cidade.

Luz Barcellos (2009) selecionou os casos de precipitações intensas que atingiram valores

superiores ao percentil de 99% para cada uma das 30 estações pluviométricas do Rio de Janeiro, resultando no total de 169 eventos de chuvas intensas no período entre 1998 e 2005. Em seu trabalho o número mínimo de estações não foi limitado, sendo considerados até mesmo aqueles eventos que superaram os limiares em uma ou duas das estações pluviométricas do sistema de monitoramento.

No trabalho de Polifke da Silva & Justi da Silva (2010) foram considerados casos de chuvas de interesse, aqueles que ultrapassassem o limiar correspondente ao percentil de 99% do acumulado de chuva em 24 horas, determinado a partir dos dados de cada estação pluviométrica do sistema Alerta-Rio no período de 1997 a 2008. Na Tabela 1 estão listados os limiares correspondentes encontrados para cada uma das trinta estações.¹

A análise desta tabela mostra como são diferenciados os regimes de precipitação sobre o município do Rio de Janeiro. Mesmo as estações de observação estando tão próximas, os eventos meteorológicos que provocam precipitação sobre a cidade são influenciados por condições topográficas, pela linha de costa e pela continentalidade, além de outros fatores que fazem com que valores de precipitação acima de 35,7 mm na Penha possam ser considerado como extremos, enquanto que são necessários mais do que 99,4 mm no Alto da Boa Vista para a mesma classificação. Neste trabalho foram selecionados 84 casos considerados como de precipitação extrema já que foram destacados apenas os eventos em que os limiares de cada estação foram ultrapassados simultaneamente em, no mínimo, quatro delas.

Ribeiro *et al.* (2012) buscou limiares em que foram observadas altas taxas horárias de precipitação na cidade do Rio de Janeiro. A análise foi feita sobre os totais horários de precipitação partindo dos 84 casos selecionados em Polifke da Silva & Justi da Silva (2010). Na Tabela 2 estão listados os limiares correspondentes ao percentil de 99% para os totais horários de precipitação.

¹ Ressalta-se que, após o estudo realizado por Polifke da Silva & Justi da Silva (2010), algumas mudanças ocorreram na rede de monitoramento do sistema Alerta Rio entre elas a mudanças de nome e a ativação/desativação de algumas estações da rede (mais informações podem ser encontradas em http://alertario.rio.rj.gov.br/?page_id=10&paged=29)

Estação	Limiar (mm)	Estação	Limiar (mm)
Anchieta	40,8	Madureira	38,2
Bangu	41,4	Av. Brasil/ Mendanha	48,6
Grande Méier	40,4	Penha	35,7
Campo Grande	37,6	Piedade	45,0
Jacarepaguá/ Cidade de Deus	43,8	Barra/ Rio Centro	55,6
Copacabana	46,2	Santa Cruz	42,4
Gerició	43,0	Santa Teresa	54,0
Grajaú	48,6	São Conrado	72,4
Grota Funda	56,9	Saúde	43,3
Guaratiba	39,9	Sepetiba	47,4
Ilha do Governador	46,4	Alto da Boa Vista	99,4
Irajá	38,8	Jacarepaguá/ Tanque	41,8
Barra/ Intanhangá	65,4	Tijuca	63,3
Recreio dos Bandeirantes	43,0	Urca	42,6
Jardim Botânico	59,0	Vidigal	55,8

Tabela 1 Limiares de totais diários de precipitação correspondentes ao percentil de 99% para cada uma das trinta estações da Fundação GEORIO no período de 1997-2008 (Polifke da Silva & Justi da Silva, 2010).

Estação	Limiar (mm)	Estação	Limiar (mm)
Anchieta	19,1	Madureira	19,0
Bangu	16,6	Av. Brasil/ Mendanha	17,6
Grande Méier	20,4	Penha	15,0
Campo Grande	17,4	Piedade	21,4
Jacarepaguá/ Cidade de Deus	23,4	Barra/ Rio Centro	27,6
Copacabana	20,0	Santa Cruz	21,0
Gerició	21,2	Santa Tereza	23,6
Grajaú	23,6	São Conrado	28,6
Grota Funda	22,8	Saúde	24,6
Guaratiba	20,4	Sepetiba	23,8
Ilha do Governador	21,3	Alto da Boa Vista	30,6
Irajá	15,6	Jacarepaguá/ Tanque	19,2
Barra/ Intanhangá	26,6	Tijuca	28,0
Recreio dos Bandeirantes	22,8	Urca	20,0
Jardim Botânico	25,8	Vidigal	25,5

Tabela 2 Limiares de totais horários de precipitação correspondentes ao percentil de 99% para cada uma das estações da Fundação GEORIO no período de 1997-2008 (Ribeiro *et al.*, 2012).

3 Determinação dos Casos de Chuvas de Interesse

Dada a variabilidade na determinação dos critérios para obtenção dos eventos de chuva, foram considerados como eventos significativos nesta pesquisa os casos em que foram observadas altas taxas horárias de chuva inseridos em dias em que os acumulados diários de precipitação também apresentaram altas taxas em 24 horas na cidade do Rio de Janeiro. Assim, utilizando os dados de precipitação do Sistema Alerta-Rio no período de 1997 a 2012, os casos de chuva de interesse, chamados de chuvas severas, seriam aqueles que passassem pelos seguintes critérios:

I. Ultrapassassem os limiares do total de chuva diária encontrado por Polifke da Silva & Justi da Silva (2010) em no mínimo 10 estações do Sistema Alerta-Rio, pois assim eventos de chuvas isoladas, como, por exemplo, rápidas pancadas de verão são retirados;

II. Ultrapassassem os limiares totais de chuva horária encontrados por Ribeiro *et al.* (2012) em no mínimo 10 estações. Com este critério são retirados os eventos em que foram observados altos acumulados diários (critério 1) com baixas taxas horárias;

III. Eventos de chuva de longa duração, em geral, são mais favoráveis à ocorrência de desastres naturais (Espinosa, 2011). Assim, além de passarem pelos critérios 1 e 2, a distribuição da chuva tivesse ocorrido em um período de no mínimo 12 horas.

Após a seleção dos eventos de chuvas, fez-se um levantamento no Boletim Climanálise do CPTEC/INPE, ficando estabelecidos que dos 15 casos selecionados apenas um deles ocorreu devido à formação da ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), sendo os demais caracterizados como passagens de frentes frias pela cidade do Rio de Janeiro.

Com o objetivo da diminuição do alarme falso associados à previsão de chuvas significativas, foram considerados também como eventos de chuva de interesse aqueles em que havia a presença de sistemas atmosféricos semelhantes aos que deram origem às chuvas severas, mas que, no entanto,

não satisfizeram os critérios I-III desta pesquisa, sendo chamados de eventos de chuva fraca. Os eventos de chuva fraca foram escolhidos em datas próximas aos casos de chuvas severas para que o controle atmosférico de escala sinótica fosse aproximadamente o mesmo daquele que estava atuando sobre os dias de chuvas severas.

Na Tabela 3 estão listados em dois grupos os casos selecionados nessa pesquisa: os que passaram pelos critérios estabelecidos, chuvas severas, e os que não satisfizeram aos critérios, chuvas fracas.

Chuvas Severas	Chuvas Fracas	Sistema Meteorológico Atuante
16/02/2000	24/02/2000	Frente Fria
28/03/2001	11/03/2001	Frente Fria
02/02/2002	14/02/2002	Frente Fria
17/03/2003	18/02/2003	Frente Fria
21/03/2003	14/03/2003	Frente Fria
10/02/2006	05/03/2006	Frente Fria
26/02/2006	10/03/2006	Frente Fria
26/03/2006	30/03/2006	Frente Fria
24/10/2007	19/03/2007	Frente Fria
12/12/2007	12/11/2007	Frente Fria
14/03/2008	04/02/2008	Frente Fria
21/01/2009	04/01/2009	Frente Fria
30/12/2009	13/12/2009	Frente Fria
15/01/2010	22/01/2010	ZCAS
05/04/2010	27/04/2010	Frente Fria

Tabela 3 Eventos de chuvas severas e de chuvas fracas e sistema meteorológico atuante.

4 Previsão de Eventos Significativos de Chuvas

Dentro do conjunto das variáveis meteorológicas, a precipitação tem sido a mais difícil de ser prevista com precisão através dos diversos modelos numéricos e estatísticos existentes. Um dos principais motivos da baixa previsibilidade da precipitação é seu comportamento episódico, ou seja, a alta variabilidade e descontinuidade (Espinosa, 2011).

Segundo Molinari & Dudek (1992), a precipitação é um dos parâmetros meteorológicos

mais importantes na região tropical e, infelizmente, um dos mais difíceis de ser simulado em modelos numéricos da atmosfera. A precipitação, principalmente a convectiva, tem um caráter muito local e não existem ainda parametrizações para representá-la precisamente em modelos numéricos.

No trabalho de Ebert *et al.* (2003), foi avaliada a previsão quantitativa da precipitação nos horizontes de 24h e 48h em onze modelos numéricos utilizados operacionalmente nos Estados Unidos, Alemanha e Austrália com os dados observados pela rede pluviométrica. Os autores verificaram que a habilidade de previsão de chuvas acima de 20 mm d⁻¹ pelos modelos foi bastante baixa, associada à dificuldade de se prever precisamente quando e onde um evento de forte chuva poderia acontecer. No Brasil, estudos de caso realizados por Pereira (2004), Mourão (2007) e Polifke da Silva & Justi da Silva (2010) também verificaram que precipitação gerada pelos modelos numéricos era subestimada quando comparada com os dados observados, principalmente em eventos meteorológicos de caráter extremo.

Nesse cenário, Teixeira & Satyamurty (2006) sugerem que variáveis dinâmicas e termodinâmicas, presentes na estrutura das tempestades, podem ser analisadas a fim de se detectar o potencial da atmosfera para formação dos sistemas convectivos que dão origem a chuvas mais intensas. Os autores ainda relatam que os resultados destas variáveis, obtidos através de modelagem numérica, são de grande auxílio aos meteorologistas na tomada de decisão se um forte episódio de chuva está prestes a acontecer.

Henry (2000) relata que os meteorologistas operacionais do Serviço Meteorológico de Nova Zelândia põem considerável ênfase nos dados de modelos numéricos do tempo para a avaliação da instabilidade atmosférica e que indicadores de tempo severo são de grande importância no ambiente operacional, pois além de ajudar os previsores na visualização do estado da atmosfera em escala sinótica, fornecem uma avaliação do ambiente atmosférico favorável à convecção, alertando os meteorologistas da possibilidade de formação de fortes chuvas.

Sendo a cidade do Rio de Janeiro suscetível à ocorrência de altas taxas diárias (Polifke da

Silva, 2011) e horárias (Ribeiro *et al.*, 2012) de precipitação, a utilização de indicadores atmosféricos mostra-se como ferramenta de grande utilidade na identificação e previsão das condições atmosféricas favoráveis à formação de chuvas severas que possam ocorrer no município. Com este objetivo, foram escolhidos quatorze indicadores atmosféricos (Tabela 4) a serem analisados nos eventos de chuva obtidos nesta pesquisa. Aqueles assinalados com a letra T na segunda coluna são considerados índices que descrevem características termodinâmicas da atmosfera e aqueles com a letra D referem-se àqueles indicadores que evidenciam as condições dinâmicas dos sistemas estudados.

Os indicadores citados foram calculados a partir das saídas do modelo numérico WRF

Indicadores analisados (Unidades)	Abreviação	Tipo	Característica
Pressão ao nível médio do mar (hPa)	PNMM	D	Menor possível
Instabilidade atmosférica entre 850-700 hPa (K/Km)	IA	T	Mais negativo
Índice K (°C)	K	T	Maior positivo
Índice TT (°C)	TT	T	Maior positivo
Taxa de variação vertical da temperatura entre 500-700 hPa (°C/Km)	TVVT	T	Maior positivo
Energia total das tempestades severas em 500 hPa (J)	ETTS	T	Maior positivo
Índice KO (K)	KO	T	Maior positivo
CAPE (J Kg ⁻¹)	CAPE	T	Maior positivo
Água Precipitável (Kg/Kg)	AP	T	Maior positivo
Umidade específica em 850 hPa (Kg/Kg)	UMI	T	Maior positivo
Divergência do vento em 300 hPa (s ⁻¹)	DIV	D	Maior positivo
Movimento vertical em 500 hPa (m/s)	MV	D	Maior positivo
Fluxo de energia estática saturada em 850 hPa (J.s ⁻¹)	FES	D	Maior positivo
Fluxo de energia estática úmida em 850 hPa (J.s ⁻¹)	FEU	D	Maior positivo

Tabela 4 Indicadores dinâmicos e termodinâmicos de tempo severo.

(Michalakes *et al.*, 2001), integrado por um período de 72 horas, começando 24 horas antes do início dos eventos de chuvas e terminando 24 horas depois. Isso permitiu que as principais características atmosféricas presentes antes e durante os eventos escolhidos pudessem ser analisadas. Para simular os dados das variáveis meteorológicas escolhidas, foram utilizados como dados de entrada no modelo WRF, o banco das análises finais do Global Forecast System (GFS) dados do projeto Final (FNL) do National Centers for Environmental Prediction and National Center for Atmospheric Research NNCEP/NCAR), com dados a cada 6 horas e grade espacial de aproximadamente 111 quilômetros.

As opções físicas do WRF são contidas em seis categorias: (1) microfísica, (2) parametrização de cúmulos, (3) camada superficial (4) modelo solo-superfície, (5) camada limite planetária e (6) radiação. Em cada uma destas categorias estão incluídas várias opções. Para a consecução dos objetivos deste trabalho, o modelo WRF foi integrado com 10 km de resolução, gerando saídas horárias para todas as variáveis meteorológicas e de solo nos períodos de interesse. Quanto às parametrizações físicas, nas integrações do modelo foram utilizados os seguintes esquemas: Microfísica - Esquema de momento único de três classes - WSM 3 (Hong *et al.*, 2004), Cúmulos - Esquema de “conjunto” de Grell-Dèvènyi (Grell & Dèvènyi, 2002), Radiação - Onda curta Dudhia (Dudhia, 1989)/Onda longa – RRTM (Mlawer *et al.*, 1997), Camada Limite Planetária - Mellor-Yamada-Janjic (modelo Eta) (Janjic, 2002), Camada Limite Superficial - Esquema do modelo ETA (Janjic, 2002) e Solo-Superfície - Modelo solo-superfície de Noah (Chen & Dudhia, 2001).

A região de simulação está mostrada na Figura 1, onde a área em vermelho ressalta o domínio da grade sobre o município do Rio de Janeiro e adjacências onde foram extraídos os valores simulados para cada um dos indicadores ($\Delta x = \Delta y = 10$ km, $\Delta t = 60$ s). Esta área foi escolhida objetivando encontrar as características que cada indicador assume na identificação das condições atmosféricas sobre e nas proximidades do município do Rio de Janeiro.

No Brasil, os trabalhos de Menezes & Silva Dias (1998), Silva Dias (2000), Diniz *et al.* (2004), Lima (2005), Nascimento (2005), Grossmann

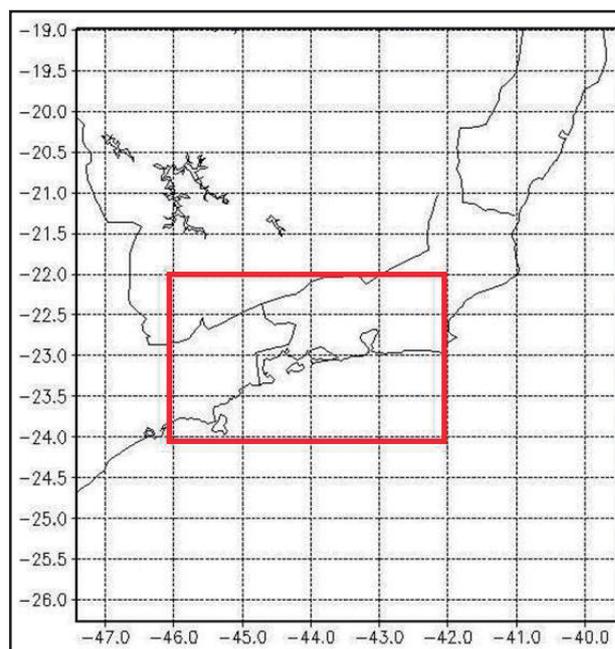


Figura 1 Área sobre a qual foram simulados os eventos de chuva. Em destaque a região onde foram calculados os indicadores analisados.

(2010), Hallak & Filho (2012), Tavares & Mota (2012), mostraram bons resultados na aplicação dos índices dinâmicos e termodinâmicos para diferentes sistemas atmosféricos. Porém tais resultados foram estudos individuais, não podendo-se estabelecer, conseqüentemente, limiares que qualifiquem e quantifiquem a formação dos sistemas analisados sobre as regiões de estudo. Inserido neste contexto, Nascimento (2005) sugere a expansão de estudos que avaliem parâmetros regionais dos indicadores dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera, calculados a partir das saídas modelos numéricos, e forneçam valores que caracterizem a formação de fortes chuvas em diferentes regiões do país.

Para o estabelecimento de limiares é necessário que sejam conhecidas as características dos indicadores dinâmicos e termodinâmicos que sinalizem a ocorrência dos eventos de chuva. Utilizando as informações do sinal esperado como favorável à formação de tempestades mais intensas (Tabela 4), parâmetros estatísticos foram calculados, a partir das saídas do modelo WRF, para cada um dos indicadores nos dias em que houve ocorrência de chuva severa na cidade do Rio de Janeiro e se encontram listados na Tabela 5.

Indicadores	1º Quartil	3º Quartil	Média	Mediana	Máximo	Mínimo	Desvio-padrão
PNMM	1011,4	1015,4	1013,3	1012,3	1022,9	1000,4	3,4
IA	-16,9	-8,2	-12,7	-13,7	5,2	-38,1	6,2
CAPE	83,9	1063,1	680,6	656,4	3841,5	-0,1	728,2
K	28,8	36,0	31,8	34,4	43,8	-9,7	6,0
TT	40,4	44,9	42,5	44,0	51,9	28,7	3,5
KO	62,3	64,0	63,1	62,9	69,0	55,8	1,6
AP	45,2	57,2	50,4	52,7	72,4	26,0	8,0
TVVT	5,1	5,7	5,4	5,4	7,1	3,9	0,4
FEU	-0,9	2,0	0,6	1,8	7,6	-5,9	2,1
FES	-23,3	52,6	16,0	4,9	218,2	-172,2	55,5
ETTS	5,2	6,8	5,9	6,0	8,5	3,1	0,9
DIV	-1,9	2,2	5,7	0,9	13,6	-69,1	5,3
MV	-0,019	0,024	0,013	0,008	9,5	-1,8	0,2
UMI	9,3	11,5	10,3	9,8	14,1	1,0	1,6

Tabela 5 Limiares dos indicadores de chuvas severas para o Município do Rio de Janeiro (Os valores coloridos indicam os limiares considerados).

Sendo assim, baseado na amostragem de dados deste trabalho, quando forem previstos ou simulados, pelo modelo numérico WRF, valores da pressão ao nível médio do mar abaixo de 1011,4hPa, instabilidade convectiva abaixo de -16,9 K, índice K acima de 36 °C, CAPE acima de 1063,1 JKg⁻¹, índice Total Totals acima de 44,9°C, índice KO acima de 64 K, água precipitável acima de 57,2 Kg/Kg, taxa de variação vertical da temperatura acima de 5,7°C/Km, fluxo de energia úmida acima de 2,0 J.s⁻¹, fluxo de energia saturada acima de 52,6 J.s⁻¹, energia para tempestades acima de 6,8 J, divergência do vento em 300 hPa acima de 2,2*10⁻⁶/s, movimento vertical em 500 hPa acima de 0,024 m/s e umidade específica em 850 hPa acima de 11,5 Kg/Kg, as condições atmosféricas caracterizam fortemente a formação de sistemas convectivos que dão origem a eventos de chuva severa na cidade do Rio de Janeiro.

5 Probabilidade de Detecção e Razão de Alarme Falso para os Eventos de Chuvas Severa e de Chuvas Fraca

Usando a metodologia descrita em Wilks (2006), buscou-se quantificar a eficiência de cada um dos quatorze indicadores analisados através do cálculo dos índices estatísticos denominados probabilidade de detecção (POD) e razão de alarme falso (RAF). Para o cálculo dos índices estatísticos (POD e RAF) foram avaliados, para cada um dos trinta eventos de chuva, se o quartil (1º ou 3º) de cada indicador atmosférico caracterizou quantitativamente as condições atmosféricas

favoráveis à ocorrência dos eventos de chuva severa ou fraca. Tal análise teve como base os quartis (1º ou 3º) obtidos na Tabela 5. O objetivo é encontrar quais dentre os quatorze indicadores poderiam ser utilizados com maior confiança para a identificação dos sistemas convectivos mais intensos. Os resultados estão apresentados na Tabela 6.

Analisando a Tabela 6 pode-se observar que grande parte dos indicadores tem probabilidade de detecção e razão de alarme falso muito próximos

Indicadores Analisados	POD (%)	RAF (%)
PNMM	53,3	40,0
IA	40,0	66,7
CAPE	20,0	73,3
K	53,3	46,7
TT	40,0	33,3
KO	33,3	26,7
AP	53,3	26,7
TVVT	53,3	33,3
FEU	66,7	46,7
FES	60,0	46,7
ETTS	53,3	23,7
DIV	73,3	20,0
MV	53,3	33,3
UMI	60,0	20,0

Tabela 6 Probabilidade de detecção (POD) e razão de alarme falso (RAF) para cada indicador analisado.

para a identificação das condições convectivas mais intensas que dão origem a altos acumulados de precipitação sobre o município do Rio de Janeiro. Por exemplo, o índice K tem uma probabilidade de detecção de 53,3%, isto é, este indicador detectou 53,3% dos eventos em que as condições atmosféricas indicavam condições favoráveis para a ocorrência de chuvas severas e estas realmente aconteceram; em contra partida, este mesmo indicador caracterizou também condições favoráveis a ocorrência de altos acumulados de precipitação em 46,7 % (RAF) mas que, no entanto, não ocorreram. Para o indicador CAPE observa-se probabilidade de detecção (POD) de 20,3 % e de razão de alarme falso (RAF) de 73,3%, caracterizando que este indicador tende a sinalizar a ocorrência de chuva severa quando a mesma não ocorre em mais de 73% dos casos. Para o indicador divergência do vento em 300 hPa, observa-se que a probabilidade de detecção é significativamente maior do que a razão de alarme falso, isto é, possui $POD = 73,7\%$ e $RAF = 20\%$, caracterizando que este indicador tende a sinalizar a ocorrência de chuvas severas quando as mesmas são realmente observadas.

Outra forma útil de verificar o desempenho de variáveis a partir de suas probabilidade de detecção e razão alarme falso é a construção de diagramas ROC (*Relative Operating Characteristic*) como descrito em Wilks (2006). Tal diagrama é construído por um conjunto de pares de valores de probabilidades de detecção (POD) e razões de alarme falso (RAF). O canto superior esquerdo do diagrama ROC representa um sistema de previsão perfeita (sem falsos alarmes, apenas sucessos). Quanto mais próximo estiver qualquer indicador deste canto superior esquerdo, mais elevada é sua habilidade na identificação das características averiguadas. O canto inferior esquerdo (sem acertos e falsos alarmes) representa um sistema que nunca percebe o evento. O canto superior direito representa um sistema onde o evento é sempre alertado, acontecendo ou não, e o canto inferior direito é aquele que representa o pior sistema possível, pois não possui acertos, apenas emite falsos alarmes.

Na Figura 2 apresenta-se o diagrama ROC que sintetiza o comportamento dos indicadores analisados. Nesta figura observa-se que grande parte dos indicadores se encontram acima da diagonal pontilhada, considerada como condição mínima

adequada a um indicador. Os dois indicadores que se encontram abaixo da diagonal pontilhada, a CAPE e a instabilidade atmosférica entre 700-850 hPa, possuem probabilidade de detecção menor do que a razão de alarme falso, mostrando-se ineficientes na identificação das condições atmosféricas presentes para a ocorrência de chuvas severas no município do Rio de Janeiro. Dois indicadores se localizam mais próximos do canto superior esquerdo, destacando-se das outras variáveis: a divergência do vento em 300 hPa e a umidade específica do ar em 850 hPa.

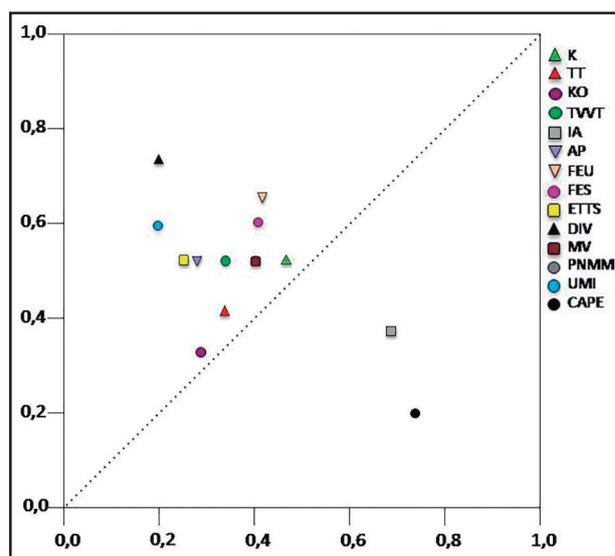


Figura 2 Diagrama ROC para os indicadores de tempo severo.

Com o objetivo de hierarquizar o desempenho de cada um dos indicadores usados, foi calculada a distância euclidiana ao canto superior esquerdo para cada ponto exposto no diagrama ROC, estando os resultados listados Tabela 7. Observa-se, portanto, que o indicador que possui melhor desempenho na identificação de chuvas severas é a divergência em 300 hPa seguido pela umidade em 850 hPa, da energia total das tempestades severas em 500 hPa, da água precipitável e assim por diante. Vale ressaltar, como observado no diagrama ROC, a deficiência da instabilidade atmosférica entre 850-700 hPa e da CAPE na identificação de chuvas severas sendo caracterizados como os mais distantes em relação ao vértice superior esquerdo.

A partir destes resultados, observa-se que se um meteorologista operacional tivesse que escolher indicadores que sinalizem de forma mais efetiva a ocorrência de sistemas convectivos embebidos em sistemas frontais ou ZCAS que dão origem a chuvas

Indicadores analisados	Distância	POD (%)	RAF (%)
DIV	0,33	73,3	20,0
UMI	0,45	60,0	20,0
ETTS	0,52	53,3	23,7
AP	0,54	53,3	26,7
TVVT	0,57	53,3	33,3
MV	0,57	53,3	33,3
FEU	0,57	66,7	46,7
FES	0,61	60,0	46,7
PNMM	0,61	53,3	40,0
K	0,66	53,3	46,7
TT	0,69	40,0	33,3
KO	0,72	33,3	26,7
IA	0,90	40,0	66,7
CAPE	1,09	20,0	73,3

Tabela 7 Distância ao vértice superior esquerdo no diagrama ROC, probabilidade de detecção (POD), razão de alarme falso (RAF) para cada indicador analisado.

severas sobre o município do Rio de Janeiro, estes poderiam ser: divergência do vento nos níveis altos de atmosfera e disponibilidade de umidade específica nos níveis mais baixos; seguidos pela energia total para tempestades severas e água precipitável. A partir destes dados, aponta-se que estes quatro indicadores foram os mais eficientes na identificação de chuvas severas na região de estudo e sugere-se o uso dos mesmos nas previsões feitas rotineiramente pelos centros operacionais e de monitoramento.

6 Conclusões

Neste trabalho, propôs-se uma avaliação da eficiência de indicadores dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera na ocorrência casos chamados de chuvas severas e fracas que ocorreram na cidade do Rio de Janeiro no período entre 1997-2012.

Utilizando as saídas das simulações feitas com o modelo numérico WRF e a análise do diagrama ROC, verificou-se que a divergência do vento em 300 hPa foi o indicador atmosférico que mostrou maior eficiência na detecção dos eventos de chuva severa, seguido pela umidade específica em 850hPa, energia total de tempestades severas em 500 hPa e água precipitável. Os indicadores K, TT,

KO, pressão ao nível médio do mar, taxa de variação vertical da temperatura entre 500-700 hPa e fluxos de energia estática saturada e úmida em 850hPa estiveram muito próximos do limite da área útil do diagrama, mostrando que o uso desses indicadores torna-se viável, mas de menor confiança com relações aos quatro anteriores. Verificou-se também que os indicadores CAPE e instabilidade atmosférica entre 850-700 hPa mostraram-se ineficientes na identificação das condições atmosféricas favoráveis à formação de convecção profunda que originaram os eventos de chuvas severas, pois apresentaram baixa probabilidade de detecção e alta taxa de alarme falso nos casos analisados.

Assim, este trabalho sugere o uso destes indicadores nas previsões feitas pelos centros operacionais, assim como o cálculo dos mesmos a partir das saídas de outros modelos numéricos da atmosfera objetivando alinhar os resultados obtidos nesta pesquisa e validar a confiabilidade dos mesmos como ferramentas na previsão de chuvas severas que possam ocorrer na cidade do Rio de Janeiro.

7 Referências

- 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*, 15(17): 2377-2394.
- Chen, F.; & Dudhia J. 2001: Coupling an advanced land-surface/ hydrology model with the Penn State/ NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Monthly Weather Review*, 129: 569-585.
- Dereczynski, C.P.; Oliveira, J.S & Machado, C.O. 2008. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24(1): 24-38.
- Diniz, M.C.S.; Correia, M.F. & Aragão, M.R.S. 2004. Convecção profunda no submédio do rio São Francisco: Uma avaliação das condições atmosféricas no aeroporto de Petrolina - PE. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 19(3): 273-2785.
- Dudhia, J. 1989. Numerical Study of Convection Observed during the Winter Monsoon Experiment Using a Mesoscale Two-Dimensional Model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46: 3077-3107.
- Ebert, E.E.; Damrath, U.; Wergen W. & Baldwin, M.E. 2003. "The WGNE assessment of Shortterm Quantitative Precipitation Forecasts." *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84: 481-492.
- Espinosa, A.M. 2011: *Previsão quantitativa por conjunto da precipitação do verão 2007/2008 na bacia de Rio Grande*. Instituto de Astronomia Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 172p.

- Grell, G.A. & Dèvényi, D. 2002. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, 29(14): 38-1 – 38-4.
- Grossmann, K.S. 2010. *Estudo da combinação de índices de instabilidade como ferramenta de auxílio na previsão do tempo*. Departamento de Meteorologia (Instituto de Geociências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 68p.
- 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.
- Henry, N.L. 2000. A static stability index for low-topped convection. *Weather Forecasting*, 15: 246-254.
- Janjic, Z.I. 2002: Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model. Tech. rep. NOAA/NWS/NCEP Office Note No. 436. <http://www.emc.ncep.noaa.gov/officenotes/newernotes/on437.pdf>
- Junker, N.W.; Schneider, R.S. & Fauver, S.L. 1999. A study of heavy rainfall events during the great Midwest flood of 1993. *Weather Forecasting*, 14: 701-712.
- Konrad II, C.E. 1997. Synoptic-scale features associated with warm season heavy rainfall over the interior southeastern United States. *Weather Forecasting*, 12: 557–571.
- 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.
- Luz Barcellos, P.C. 2009. *Precipitações intensas na cidade do Rio de Janeiro: Probabilidade e Previsibilidade*. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós – graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Dissertação de Mestrado, 186p.
- Marengo, J.A. 2010. Mudanças climáticas, condições meteorológicas extremas e eventos climáticos no Brasil. In: *Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS). Mudanças Climáticas Eventos Extremos no Brasil*. P: 05-19. Disponível em: <http://www.fbds.org.br/fbds/IMG/pdf/doc-504.pdf>.
- Menezes, W.F. & Silva Dias, M.A.F. 1998. Simulação numérica das tempestades ocorridas no estado de São Paulo em 14 de maio de 1994: O caso Ribeirão Preto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 10, *Anais*, Brasília – DF.
- Menezes, W.F.; Paiva, L.M.S.; Justi da Silva, M.G.A. & Belassiano, M. 2000. Estudo do ambiente favorável à propagação de sistemas convectivos de mesoescala sobre o Município do Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 11, *Anais*, Rio de Janeiro - RJ.
- Michalakes, J.; Chen, S.; Dudhia, J.; Hart, L.; Klemp, J.; Middlecoff, J. & Skamarock, W. 2001. Development of a Next Generation Regional Weather Research and Forecast Model. Developments in Teracomputing. In: ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology, 9, *Proceedings* Walter Zwielfhofer & Norbert Kreitz. (eds.). *World Scientific*, Singapore, p.269-276.
- Mlawer, E.J.; Taubman, S.J.; Brown, P.D.; Iacono, M.J. & Clough, S.A. 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave. *Journal of Geophysical Research*, 102(D14): 16663-16682.
- 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.
- Pereira, T.R.A. 2004. *Uma análise da Sensibilidade do Modelo MM5 na Detecção e Previsão de Sistemas Meteorológicos de Chuvas Intensas em Diferentes Escalas*. Departamento de Meteorologia (Instituto de Geociências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 78p.
- Polifke da Silva, F. & Justi da Silva, M.G.A. 2010. *Chuvas Severas no Município do Rio de Janeiro: Simulação numérica dos casos de 2007*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 16, *Anais*, Belém – PA.
- Polifke da Silva, F. 2011. *Casos de Chuvas Extremas no Rio de Janeiro: Estabelecimento de Limiares para Indicadores Atmosféricos*. Departamento de Meteorologia (Instituto de Geociências). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 81p.
- Ramos, A.M.; Conde, F.C.; Moreira, D.S.; Freitas, S.R.; Silva, A.M & Lucas, E.W.M. 2012. Numerical simulation of a heavy rainfall event over Portugal using mesoscale model., *Atmospheric Journal*, 25(3): 295-309.
- Ribeiro, G. P.; Polifke da Silva, F & Justi da Silva, M.G.A. 2012. Casos de Chuvas intensas no Rio de Janeiro: Variabilidade nas frequências diurna e anual. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 17, *Anais*, Gramado - RS.
- 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. 2000. Índices de Instabilidade Para Previsão de Chuva e Tempestades Severas. Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://mater.iag.usp.br/ensino>
- 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.
- Wilks, D.S. 2011. *Statistical Methods in Atmospheric Sciences*. Academic Press, 676 p.