

Artigo

Climatologia de Chuvas Intensas no Município do Rio de Janeiro

Marcos Vinícius de Jesus Pristo¹, Claudine Pereira Dereczynski¹, Pedro Regoto de Souza¹,
Wallace Figueiredo Menezes¹

¹*Departamento de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

Recebido em: 12 de Março de 2018 - Aceito em: 24 de Outubro de 2018

Resumo

Neste trabalho elabora-se uma climatologia de eventos de chuvas intensas (ECIs) no Município do Rio de Janeiro (MRJ) a partir dos dados observados pelo Sistema Alerta Rio no período 1997-2016. Um critério objetivo de identificação de ECIs é avaliado, confrontando-se dados de chuva com informações sobre os transtornos deflagrados por tais eventos sobre a cidade. O critério estabelece que um ECI se caracteriza por um total pluviométrico diário igual ou superior a seu percentil 95, com ocorrência no mesmo dia de pelo menos um registro de chuva em 15 minutos também igual ou superior a seu percentil 95. Ademais a climatologia da precipitação no MRJ é revisitada. Os resultados indicam que 33% do total pluviométrico anual médio no MRJ (1192 mm) ocorre durante 6,6 ECIs. Os máximos (mínimos) de ECIs são observados no Sumaré e Mendanha (na Saúde e Tijuca), numa média 30 dias por ano. Em média os ECIs ocorrem com maior frequência no verão (43,7%), seguido do outono (30,9%), na primavera (18,2%) e inverno (7,2%). Nota-se em geral uma tendência de aumento no número de ECIs durante o período analisado.

Palavras-chave: inundações repentinas, transtornos, critério, percentis, precipitação, classificação.

Heavy Rainfall Events Climatology in The City of Rio de Janeiro

Abstract

In this work a climatology of Heavy Rainfall Events (HREs) is elaborated for the Municipality of Rio de Janeiro (MRJ), based on Alerta Rio's rain gauge network for the period 1997-2016. An objective criterion for the identification of HREs is assessed by comparing rainfall data with data disaster caused by such events over the city. The criterion establishes that an HRE is characterized by a daily rainfall equal or above its 95th percentile, occurring on the same day at least one rainfall record in 15 minutes, also equal or above its 95th percentile. In addition, the precipitation climatology in the MRJ is revisited. The results show that 33% of annual mean precipitation in MRJ (1192 mm) falls during 6.6 HREs. The maximum (minimum) of HREs are observed in Sumaré and Mendanha (in Tijuca and Saúde), on average of 30 days per year. In general, HREs occur more frequently in the summer (43.7%), followed by autumn (30.9%), spring (18.2%) and winter (7.2%). In general, there is a tendency for an increase in the number of HREs during the analyzed period.

Keywords: flash flood, disorder, criterion, percentiles, precipitation, classification.

1. Introdução

Para caracterizar o clima de uma região, a precipitação destaca-se como uma das variáveis mais importantes, contudo por não ser uma variável contínua, existe uma grande dificuldade em seu tratamento. Na maior parte dos trabalhos, apenas os totais pluviométricos mensais são examinados e em alguns casos, os totais diários. Existem poucos trabalhos dedicados a descrever a precipitação,

envolvendo todas as suas características: tipo (chuva ou neve), intensidade, frequência, duração, quantidade e distribuição espaço-temporal. Além disso, há fortes ciclos diurnos e sazonais em muitas regiões que são frequentemente negligenciados (Trenberth *et al.*, 2017).

No município do Rio de Janeiro (MRJ), o Sistema de Alerta de Chuvas da Prefeitura do Rio de Janeiro (Sistema Alerta Rio), mantém há mais de 20 anos uma rede

composta por 32 pluviômetros, coletando chuva continuamente a cada 15 minutos, o que permite que estudos mais detalhados sobre a precipitação possam ser desenvolvidos.

A cidade do Rio de Janeiro (Fig. 1), capital do estado de mesmo nome, localizada na Região Sudeste do Brasil, é uma importante metrópole brasileira. A região apresenta alta densidade populacional, com 6.520.266 habitantes (população estimada para 2017 - IBGE, 2018) residindo numa área urbanizada de 595 km², sendo a área territorial total da cidade de 1204 km² (IPP, 2018). A cidade limita-se ao norte com vários municípios do estado do Rio de Janeiro: Itaguaí, Seropédica, Nova Iguaçu, Mesquita, Nilópolis, São João de Meriti e Duque de Caxias. A complexidade da orografia da cidade, com o Maciço da Tijuca dividindo-a nas Zonas Sul e Norte, os maciços do Gericinó ao norte e o da Pedra Branca a oeste, contribuem para a grande variabilidade espacial da precipitação. Além disso, a cidade sofre influência do oceano Atlântico, ao sul, das baías de Sepetiba à oeste e da Guanabara à leste.

No MRJ é comum a ocorrência de eventos de chuva intensa (ECI) concentrada em curto período de tempo, principalmente durante o verão e outono, deflagrando uma série de transtornos à população, que já convive com esse problema desde a fundação da cidade (Dereczynski *et al.*, 2017). Dessa forma, devido ao impacto socioeconômico dos ECIs é importante entender a frequência, intensidade, localização e padrões desses eventos extremos na cidade. Ademais, o processo de previsão de ECIs poderia ser

apoiado por uma maior compreensão da climatologia de tais eventos.

Os sistemas meteorológicos que provocam ECIs são frequentemente associados com células de tempestades embebidas em sistemas de escala sinótica (McGinley, 1986). Chappell (1986) ressalta que as células convectivas se desenvolvem e interagem entre si na mesoescala (10-100 km), podendo ocasionar ECIs. Tais células convectivas tipicamente ocorrem dentro de um ambiente de escala sinótica (ou subsinótica), aproximadamente 100-1000 km, no qual vários parâmetros termodinâmicos (por exemplo, temperatura e umidade) exibem elevados valores (Konrad, 1997). Doswell (2001) também realça a importância dos processos dinâmicos e termodinâmicos em escala sinótica, para a formação e evolução de sistemas de mesoescala que produzem condições de tempo severo, tanto em termos de precipitação, como de vento. Para o MRJ, Polifke da Silva *et al.* (2015) discutem o papel do ambiente em escala sinótica para sistemas que produzem tempo severo. Os autores encontraram que a divergência do vento em 300 hPa foi o indicador atmosférico que mostrou maior eficiência na detecção dos ECIs, seguido pela umidade específica em 850 hPa, energia total de tempestades severas em 500 hPa e água precipitável.

O objetivo principal deste trabalho é construir uma climatologia de ECIs para o MRJ. Contudo, a própria definição do que é um ECI não é trivial, já que depende do interesse de cada pesquisa e da disponibilidade de dados, não existindo na literatura uma definição única para o

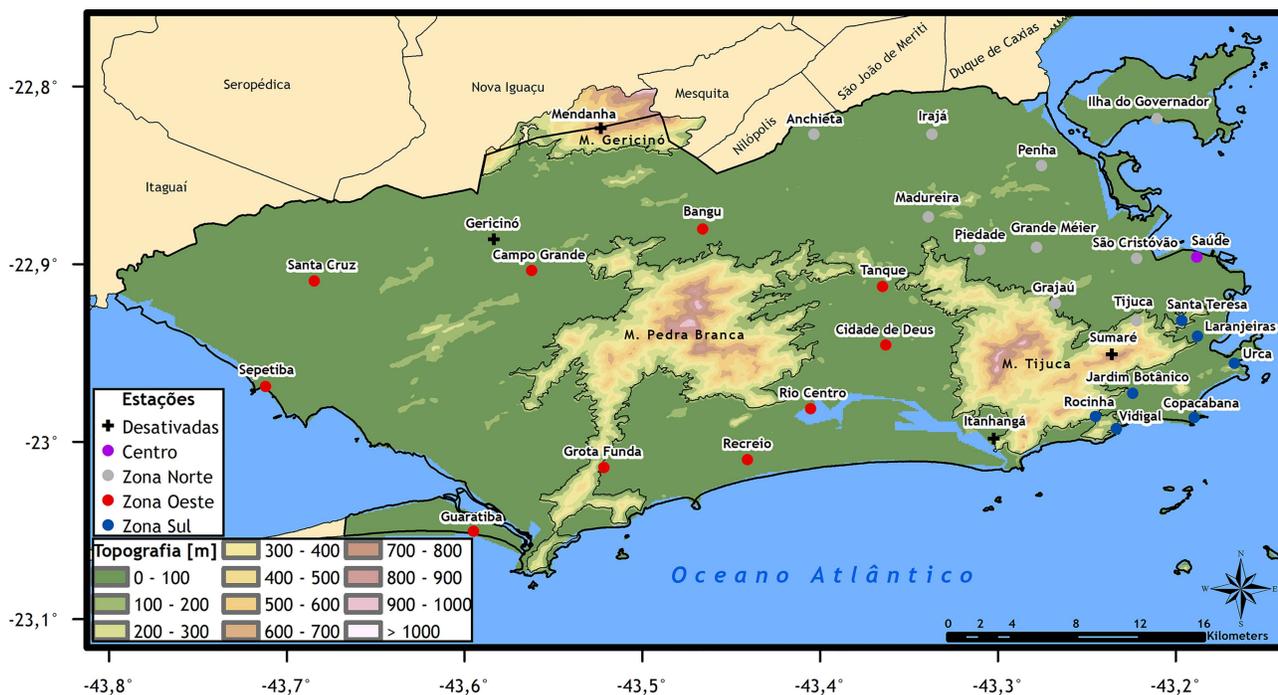


Figura 1 - Localização dos 32 postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio utilizadas neste trabalho, incluindo a topografia (m) e a localização dos Maciços da Tijuca, da Pedra Branca e do Gericinó.

termo. Para selecionar ECIs, alguns pesquisadores estabelecem limiares fixos, outros baseiam-se em percentuais de acumulados anuais ou sazonais e ainda em valores de percentis. Os valores de precipitação podem ser obtidos de uma única estação ou através da média da precipitação em uma área, envolvendo diversas estações. Além disso, os limiares podem estar relacionados a totais pluviométricos acumulados em poucos minutos até alguns dias.

Para seleção de eventos associados a inundações rápidas (*flash floods*) nos Estados Unidos, Brooks e Stensrud (2000) definem um ECI quando a taxa de precipitação é maior ou igual a 25,4 mm/h ocorrendo durante um curto período de tempo, enquanto Konrad (1997) utiliza um limiar de 50 mm/6h ocorrendo em uma ou mais estações. Groisman *et al.* (2001) definem, para os Estados Unidos, eventos de chuva intensa e muito intensa de duas maneiras: usando um limiar fixo (respectivamente 50,8 e 101,6 mm/dia) e através de percentis (respectivamente 90 e 99%). Utilizando o limiar fixo de 50,8 mm/dia, os pesquisadores encontram em média 4 dias de ECIs por ano nos estados americanos da Flórida até o Texas. Por outro lado, utilizando o limiar de 101,6 mm/dia, encontram uma média de 0,5 dias de ECI por ano na mesma região. Através dos percentis, os pesquisadores mostram para o caso de precipitação muito intensa um valor máximo de mais de 75 mm/dia ao longo da Costa do Golfo, em janeiro. Groisman *et al.* (2012), investigando uma redistribuição no espectro de ECIs nas últimas décadas nos Estados Unidos central, consideram 4 classes de precipitação: moderadamente intensa (12,7-25,4 mm/dia); intensa (25,4-76,2 mm/dia); muito intensa (76,2-154,9 mm/dia) e extrema (>154,9 mm/dia), essa última associada com inundações, danos às propriedades, acidentes e mortes.

Liebmann *et al.* (2001), utilizando totais pluviométricos diários de 127 estações no estado de São Paulo, definem um evento extremo quando a precipitação diária excede um certo percentual do total pluviométrico climatológico sazonal (ou anual) da referida estação. Por exemplo, quando a precipitação diária excede 3%, 4% ou 5% (8%, 10%, ou 12%) da precipitação climatológica anual (do total pluviométrico climatológico do verão). Em Teixeira e Satyamurty (2007), os pesquisadores definem para a Região Sul do Brasil um ECI quando a isoietta de 50 mm envolve uma área mínima de 10.000 km². Lima *et al.* (2010) utilizam percentil 99 da precipitação diária para selecionar ECIs sobre toda a Região Sudeste do Brasil, em seu período chuvoso (de novembro a março), contendo um total de 602 estações da Agência Nacional de Águas (ANA). Os autores consideram que um ECI ocorre quando 10 ou mais estações ultrapassam tal limiar e justificam que como apenas 1% da precipitação mais intensa é considerada, essa pequena porcentagem e a simultaneidade do evento ocorrer em no mínimo 10 estações, asseguram que apenas os eventos mais extremos são selecionados.

Para o MRJ, usando dados do Alerta Rio, Dolif e Nobre (2012) definem um ECI a partir da média dos totais pluviométricos diários registrados em 32 postos pluviométricos do Alerta Rio, considerando-o como um evento que produz mais do que 50 mm/dia de chuva em qualquer intervalo de 24 horas. De acordo com os autores, tal limiar para precipitação intensa é usado também pelo Centro de Informação de Tempo Severo da Organização Meteorológica Mundial.

Neste trabalho, o foco são eventos que apresentam grandes acumulados em um dia, como também em curto período de tempo (15 minutos) e que estejam associados com danos e transtornos à população. Um exemplo de chuva intensa de rápida duração, ocorreu nas primeiras horas do dia 15/02/2018, quando foram registrados 123,2 mm/h na estação Rio Centro (Zona Oeste do MRJ), 109,6 mm/h na Cidade de Deus e 106,6 mm/h em Piedade (aba estatística/moiores chuvas no sitio do alerta rio). Esse evento provocou a morte de 6 pessoas, além de sérios transtornos, como desabamentos, inundações e alagamentos no MRJ (Noticiado pelo jornal O Globo). De acordo com Braga *et al.* (2017), que estabelecem equações de intensidade-duração-frequência (IDF) para todos os postos pluviométricos do Alerta Rio, uma chuva de 123,2 mm/h apresenta período de retorno de aproximadamente 107 anos. Por outro lado, casos de chuvas estratiformes, associadas à sistemas estacionários, mesmo apresentando acumulados significativos ao longo de vários dias, não serão contemplados neste trabalho.

Ademais neste trabalho, a climatologia de 10 anos (1997-2006) da precipitação estabelecida por Dereczynski *et al.* (2009 - doravante DOM09) é revisitada, considerando-se no presente artigo o período de 20 anos (1997-2016). Pretende-se responder as seguintes questões: 1^a) A climatologia de 20 anos estabelecida neste trabalho é comparável com a de DOM09? 2^a) O critério objetivo proposto para identificação de ECIs apresenta bons resultados? 3^a) Quais as regiões da cidade com maior frequência de ocorrência de ECIs? 4^a) Quantos ECIs ocorrem em média durante o ano na cidade? 5^a) Quais os meses de maior frequência de ocorrência de ECIs? 6^a) A frequência anual de ocorrência de ECIs está se alterando?

Na próxima Seção, apresenta-se a metodologia e os dados utilizados. Os resultados da climatologia de 20 anos (1997-2016) da precipitação são descritos na Seção 3. A climatologia dos ECIs é apresentada na Seção 4. As conclusões e considerações finais são descritas na Seção 5.

2. Dados e Metodologia

2.1. Dados observacionais

Neste trabalho são utilizadas séries de dados de precipitação coletados nos postos do Sistema de Alerta de Chuvas da Prefeitura do Rio de Janeiro (Sistema Alerta

Rio), gerenciado pela Fundação Instituto de Geotécnica - GEO-RIO (Tabela 1). Tais dados de precipitação e informações técnicas dos postos pluviométricos são disponibilizados através do sítio do Sistema Alerta Rio. Os dados são considerados confiáveis, uma vez que passam pelo controle de qualidade do Sistema Alerta Rio, que periodicamente executa calibração e manutenção em sua rede telemétrica.

A distribuição espacial dos postos pluviométricos é apresentada na Fig. 1. Nota-se que tal distribuição não é homogênea, com a maior parte dos postos concentrada próximo ao Maciço da Tijuca, e poucos postos na Zona Oeste da cidade. Isso ocorre, pois, o objetivo da GEO-RIO é alertar a população durante ECIs que possam deflagrar deslizamentos nas áreas de maior densidade demográfica. Dessa forma, no Maciço da Pedra Branca seria interessante a instalação de um posto pluviométrico na região mais elevada (em torno de 1000 m de altitude) para melhor representação do máximo de precipitação que provavelmente ocorre próximo ao cume da serra. Contudo, como nesse Maciço se encontra uma Unidade de Conservação (Parque Estadual da Pedra Branca), nota-se que não houve aumento considerável da urbanização na região. Assim, considerando apenas a menor influência humana no meio ambiente, supõe-se também menor número de pessoas expostas ao risco de desastres naturais do que nas demais áreas da cidade.

Para este estudo são utilizadas um total de 32 postos pluviométricos, divididos em 3 conjuntos de dados distintos: I) 26 estações com 20 anos de dados e que permanecem em operação até os dias atuais, destacadas em negrito na Tabela 1; II) 2 estações com 16 anos de dados e que também permanecem em operação até os dias atuais (Laranjeiras e São Cristóvão), sublinhadas na Tabela 1; III) As estações Gericinó, Mendanha e Sumaré (com 13 anos de dados) e Itanhangá (com 16 anos de dados), que apesar de estarem desativadas, localizavam-se em áreas importantes para descrição da climatologia da região, próximas ou sobre os maciços da cidade. Tais postos estão destacados em *itálico* na Tabela 1. A cada etapa deste trabalho são descritos os conjuntos de postos pluviométricos utilizados.

A precipitação dos postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio é totalizada a cada 15 minutos, aqui denominada *chv15min*, considerando o horário local e o Horário Brasileiro de Verão (HBV). Dessa forma, neste trabalho as séries de dados são ajustadas do HBV para horário local. Os totais pluviométricos diários (*chv24h*) são acumulados entre 00:15 h e 00:00 do dia seguinte, totalizando-se 96 registros de *chv15min* por dia.

Os totais pluviométricos diários são calculados apenas quando o número de falhas de *chv15min* é inferior a 20%, ou seja, quando ocorrem no máximo 19 registros faltosos. No caso dos totais pluviométricos mensais, esses são calculados para os meses em que a quantidade de

falhas é inferior a 20%. Ou seja, num mês de 30 dias (contendo 2880 registros de *chv15min*), o total pluviométrico mensal só é calculado quando existem no mínimo 2304 registros de *chv15min*. O total de dias e os meses excluídos das análises em cada posto pluviométrico estão apresentados na Tabela 1. Como exemplo, observa-se que em janeiro de 2001, todos os postos pluviométricos apresentam falhas (aproximadamente 14 dias - 45% de dados faltosos), portanto o mês de janeiro desse ano foi excluído no cálculo das médias de janeiro. No caso dos totais anuais, apenas o ano de 2001 foi excluído das análises. Para as falhas diárias, apresenta-se apenas o total dos dias faltosos ao longo de todo período. Por exemplo, para a estação de Piedade há um total de 26 dias excluídos: 14 dias no mês de janeiro de 2001 e 12 dias distribuídos ao longo de toda a série de dados.

Assim como em Lima *et al.* (2010), neste trabalho não é feito nenhum tipo de interpolação ou preenchimento de dados faltantes, pois como comentado pelos pesquisadores, a precipitação é uma variável descontínua, tanto no tempo quanto no espaço, e tais processos poderiam resultar em dados espúrios ou não confiáveis.

Os totais pluviométricos mensais e anuais de cada posto pluviométrico são calculados para estabelecer a climatologia de 20 anos (1997-2016) no MRJ. Considera-se neste trabalho para o verão os meses de dezembro-janeiro-fevereiro; para o outono, março-abril-maio; para o inverno, junho-julho-agosto e para a primavera, setembro-outubro-novembro. Além disso, em todo o trabalho considera-se como dias úmidos aqueles nos quais o total pluviométrico diário é igual ou superior a 1 mm/dia.

2.2. Metodologia utilizada para identificação de eventos de chuva intensa

Inicialmente, para cada posto pluviométrico, foram calculados os percentis 75, 90, 95 e 99 da *chv15min* e *chv24h*, para todas as séries de dados dos 32 postos pluviométricos no MRJ (Ver Tabela 2). A estimativa dos percentis é baseada apenas nos registros em que a precipitação é diferente de 0 mm, ou seja, excluem-se os registros sem chuva, assim como calculado por Karl e Knight (1998).

Cinco classes de precipitação são definidas, adaptando-se limiares de Groissman *et al.* (2005): fraca (< percentil 75); moderada (\geq percentil 75 e < percentil 90); moderadamente intensa (\geq percentil 90 e < percentil 95); intensa (\geq percentil 95 e < percentil 99) e muito intensa (\geq percentil 99).

Os ECIs são selecionados analisando-se *chv15min* e *chv24h*. Para cada um dos postos pluviométricos do Alerta Rio, toda vez que *chv24h* se iguala ou ultrapassa seu percentil 95, investiga-se se no mesmo dia existe algum registro de *chv15min* igual ou superior a seu percentil 95. Em caso afirmativo, considera-se que na data estudada houve ocorrência de um ECI. Usando essa definição

Tabela 1 - Informações sobre os 32 postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio utilizados neste trabalho. Os postos estão divididos nos Grupos I (em negrito), II (sublinhados) e III (em itálico).

Nome da estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Período de dados utilizados no trabalho		Meses excluídos (dias excluídos)
				Início	Término	
Anchieta	-22,83	-43,40	50	01/01/1997	31/12/2016	set/1997 e jan/2001 (33 dias)
Bangu	-22,88	-43,47	15	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (21 dias)
Campo Grande	-22,90	-43,56	30	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 e jun/2008 (48 dias)
Cidade de Deus	-22,95	-43,36	15	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (21 dias)
Copacabana	-22,99	-43,19	90	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (22 dias)
<i>Gericinó</i>	-22,89	-43,58	0	04/01/1997	12/05/2010	jan/2001 e mai/2010 (39 dias)
Grajau	-22,92	-43,27	80	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (20 dias)
Grande Méier	-22,89	-43,28	25	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (25 dias)
Grota Funda	-23,01	-43,52	11	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 e abr/2005 (40 dias)
Guaratiba	-23,05	-43,59	0	01/01/1997	31/12/2016	nov/1997, jan/2001 e abr/2005 (55 dias)
Ilha do Governador	-22,82	-43,21	0	02/01/1997	31/12/2016	jan/2001 e mar a dez/2002 (196 dias)
Irajá	-22,83	-43,34	20	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (33 dias)
<i>Itanhangá</i>	-23,00	-43,30	80	02/01/1997	08/01/2013	jan/2001 e jan/2013 (35 dias)
Jardim Botânico	-22,97	-43,22	0	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (19 dias)
<u>Laranjeiras</u>	-22,94	-43,19	60	13/08/2000	31/12/2016	ago/2000 e jan/2001 (27 dias)
Madureira	-22,87	-43,34	45	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 e set/2006 (48 dias)
<i>Mendanha</i>	-22,82	-43,52	736	01/01/1997	31/03/2010	jan/2001 e abr/2010 (25 dias)
Penha	-22,84	-43,28	111	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (21 dias)
Piedade	-22,89	-43,31	50	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (26 dias)
Recreio dos Bandeirantes	-23,01	-43,44	10	01/01/1997	31/12/2016	jan/1997 e out/2000 e jan/2001 (44 dias)
Riocentro	-22,98	-43,41	0	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 e abr, mai, jun/2005 (89 dias)
Rocinha	-22,99	-43,25	160	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (22 dias)
Santa Cruz	-22,91	-43,68	15	01/01/1997	31/12/2016	set/1997, jan/2001 e mar/2007 (51 dias)
Santa Teresa	-22,93	-43,20	170	01/01/1997	31/12/2016	jan e set/2001 (49 dias)
<u>São Cristóvão</u>	-22,90	-43,22	25	19/08/2000	31/12/2016	ago/2000, jan/2001, mar a dez/2002, set/2003, jun/2004, fev/2005 (258 dias)
Saúde	-22,90	-43,19	15	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (20 dias)
Sepetiba	-22,97	-43,71	62	01/01/1997	31/12/2016	jan e set/1997 e jan/2001 (45 dias)
<i>Sumaré</i>	-22,95	-43,24	768	03/01/1997	16/04/2010	jan/2001 e abr/2010 (44 dias)
Tanque	-22,91	-43,36	73	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (23 dias)
Tijuca	-22,93	-43,22	340	02/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (27 dias)
Urca	-22,96	-43,17	90	01/01/1997	31/12/2016	jan/2001 (19 dias)
Vidigal	-22,99	-43,23	85	01/01/1997	31/12/2016	jan e nov/2001 (48 dias)

baseada em percentis, no lugar de estabelecer limiares fixos, os eventos de chuva intensa podem ser simultaneamente encontrados em vários limiares, dependendo da localização da estação (Groisman *et al.*, 2001).

O limiar de percentil 95 foi escolhido de forma que os eventos selecionados sejam relativamente raros, porém não extremamente raros, como observado quando o percentil 99 é utilizado.

O interesse neste trabalho são ECIs capazes de deflagrar transtornos na cidade, incluindo perdas de propriedades e mesmo de vidas humanas. A metodologia

proposta para identificação de eventos de chuva intensa é testada para o ano de 2016 a partir da comparação entre registros de alagamentos e/ou inundações reportados ao Centro de Operações Rio (COR) e noticiados nos principais veículos de comunicação, com os dados de chuva do Sistema Alerta Rio. A partir dos resultados obtidos, apresentados na Seção 4.1, elaborou-se uma tabela de contingência, sendo: A) Caso identificado a partir do critério proposto, sendo confirmado transtornos na cidade; B) Caso identificado a partir do critério proposto, porém sem ocorrência de transtornos na cidade; C) Caso não

Tabela 2 - Valores dos limiares de precipitação fraca (inferior ao percentil 75), moderada (maior ou igual ao percentil 75 e inferior ao percentil 90), moderadamente intensa (maior ou igual ao percentil 90 e inferior ao percentil 95), intensa (maior ou igual ao percentil 95 e inferior ao percentil 99) e muito intensa (maior ou igual ao percentil 99), para os 32 postos pluviométricos do Sistema Alerta Rio utilizados neste trabalho. Os postos estão divididos nos Grupos I (em negrito), II (sublinhados) e III (em itálico) e, para cada um deles, apresentam-se na primeira (segunda) linha os limiares relativos a chv15min (chv24h). Percentil 95 de chv15min e chv24h em negrito.

Postos pluviométricos		Limiares de precipitação (mm)				
		Fraca	Moderada	Moderadamente intensa	Intensa	Muito intensa
Anchieta	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 3,0	3,0 - 9,2	≥ 9,2
	chv24h	< 10,6	10,6 - 24,6	24,6 - 34,6	34,6 - 67,5	≥ 67,5
Bangu	chv15min	< 0,7	0,7 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 8,0	≥ 8,0
	chv24h	< 10,2	10,2 - 22,2	22,2 - 32,1	32,1 - 55,6	≥ 55,6
Campo Grande	chv15min	< 0,7	0,7 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 10,6	10,6 - 21,8	21,8 - 31,8	31,8 - 53,9	≥ 53,9
Cidade de Deus	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 7,6	≥ 7,6
	chv24h	< 10,4	10,4 - 23,5	23,5 - 35,4	35,4 - 63,8	≥ 63,8
Copacabana	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 3,0	3,0 - 8,0	≥ 8,0
	chv24h	< 11,2	11,2 - 23,8	23,8 - 37,4	37,4 - 68,5	≥ 68,5
Grajaú	chv15min	< 0,7	0,7 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 8,4	≥ 8,4
	chv24h	< 11,2	11,2 - 25,4	25,4 - 37,4	37,4 - 72,0	≥ 72,0
Grande Meier	chv15min	< 0,7	0,7 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 8,6	≥ 8,6
	chv24h	< 10,6	10,6 - 22,8	22,8 - 34,0	34,0 - 68,4	≥ 68,4
Grota Funda	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 2,8	2,8 - 7,2	≥ 7,2
	chv24h	< 12,6	12,6 - 27,7	27,7 - 41,6	42,6 - 82,2	≥ 82,2
Guaratiba	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,6	2,6 - 7,2	≥ 7,2
	chv24h	< 9,8	9,8 - 21,2	21,2 - 30,6	30,6 - 58,6	≥ 58,6
<i>Gericinó</i>	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,7	2,7 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 10,8	10,8 - 22,2	22,2 - 33,6	33,6 - 61,9	≥ 61,9
Ilha do Governador	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 3,2	3,2 - 9,0	≥ 9,0
	chv24h	< 10,6	10,6 - 21,9	21,9 - 36,0	36,0 - 69,1	≥ 69,1
Irajá	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,7	1,7 - 3,0	3,0 - 8,2	≥ 8,2
	chv24h	< 9,8	9,8 - 21,2	21,1 - 32,0	32,0 - 63,2	≥ 63,2
<i>Itanhangá</i>	chv15min	< 1,0	1,0 - 1,8	1,8 - 3,0	3,0 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 14,0	14,0 - 33,7	33,7 - 48,0	48,0 - 91,2	≥ 91,2
Jardim Botânico	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 3,0	3,0 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 13,2	13,2 - 29,3	29,3 - 47,3	47,3 - 80,7	≥ 80,7
<u>Laranjeiras</u>	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 2,8	2,8 - 7,4	≥ 7,4
	chv24h	< 12,6	12,6 - 28,6	28,6 - 43,0	43,0 - 77,1	≥ 77,1
Madureira	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 8,4	≥ 8,4
	chv24h	< 10,4	10,4 - 23,1	23,1 - 33,6	33,6 - 57,1	≥ 57,1
<i>Mendanha</i>	chv15min	< 0,6	0,6 - 1,4	1,4 - 2,4	2,4 - 6,7	≥ 6,7
	chv24h	< 13,0	13,0 - 27,4	27,4 - 37,6	37,6 - 64,4	≥ 64,4
Penha	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 7,9	≥ 7,9
	chv24h	< 9,2	9,2 - 19,0	19,0 - 30,4	30,4 - 57,2	≥ 57,2
Piedade	chv15min	< 0,8	0,8 - 2,0	2,0 - 3,6	3,6 - 9,8	≥ 9,8
	chv24h	< 12,6	12,6 - 28,2	28,2 - 45,5	45,5 - 95,5	≥ 95,5
Recreio	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 7,2	≥ 7,2
	chv24h	< 10,4	10,4 - 23,3	23,3 - 33,6	33,6 - 62,6	≥ 62,6

(continued)

Tabela 2 - continued

Postos pluviométricos		Limiares de precipitação (mm)				
		Fraca	Moderada	Moderadamente intensa	Intensa	Muito intensa
Rio Centro	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,7	1,7 - 2,8	2,8 - 7,6	≥ 7,6
	chv24h	< 11,2	11,2 - 26,0	26,0 - 39,6	39,6 - 70,1	≥ 70,1
Rocinha	chv15min	< 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 3,2	3,2 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 14,3	14,3 - 34,4	34,4 - 53,4	53,4 - 93,2	≥ 93,2
Santa Cruz	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,7	1,7 - 2,8	2,8 - 8,4	≥ 8,4
	chv24h	< 11,2	11,2 - 23,8	23,8 - 34,7	34,7 - 63,6	≥ 63,3
Santa Tereza	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,7	2,7 - 7,2	≥ 7,2
	chv24h	< 11,3	11,3 - 26,8	26,8 - 41,6	41,6 - 75,3	≥ 75,3
<u>São Cristóvão</u>	chv15min	< 0,6	0,6 - 1,6	1,6 - 2,7	2,7 - 7,6	≥ 7,6
	chv24h	< 9,8	9,8 - 21,4	21,4 - 31,9	31,9 - 60,3	≥ 60,3
Saúde	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,7	1,7 - 3,0	3,0 - 8,3	≥ 8,3
	chv24h	< 10,4	10,4 - 24,6	24,6 - 36,2	36,2 - 65,1	≥ 65,1
Sepetiba	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 10,6	10,6 - 23,4	23,4 - 34,2	34,2 - 61,6	≥ 61,6
<i>Sumaré</i>	chv15min	< 1,0	1,0 - 2,2	2,2 - 3,4	3,4 - 7,1	≥ 7,1
	chv24h	< 17,4	17,4 - 43,8	43,8 - 66,6	66,6 - 138,6	≥ 138,6
Tanque	chv15min	< 0,7	0,7 - 1,6	1,6 - 2,8	2,8 - 7,6	≥ 7,6
	chv24h	< 9,8	9,8 - 22,9	22,9 - 33,6	33,6 - 58,2	≥ 58,2
Tijuca	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 3,0	3,0 - 7,9	≥ 7,9
	chv24h	< 12,6	12,6 - 31,4	31,4 - 46,3	46,3 - 92,0	≥ 92,0
Urca	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,7	1,7 - 2,8	2,8 - 7,8	≥ 7,8
	chv24h	< 11,2	11,2 - 24,0	24,0 - 36,4	36,4 - 66,1	≥ 66,1
Vidigal	chv15min	< 0,8	0,8 - 1,8	1,8 - 3,0	3,0 - 8,2	≥ 8,2
	chv24h	< 11,8	11,8 - 27,0	27,0 - 41,4	41,4 - 74,5	≥ 74,5

identificado a partir do critério proposto, porém com ocorrência de transtornos na cidade e D) Caso não identificado a partir do critério proposto e sem ocorrência de transtornos na cidade.

A partir da contabilização dos casos, as métricas de avaliação Acerto (AC), Alarme Falso (AF) e Viés (VIES) foram calculadas de acordo com Wilks (2006):

$$AC = \frac{A + D}{N} \quad (1)$$

$$AF = \frac{B}{A + B} \quad (2)$$

$$VIES = \frac{A + B}{A + C} \quad (3)$$

onde N = número total de registros.

Numa situação ideal, o AC é o mais elevado possível, AF o menor possível e VIES igual a 1, indicando que

o número de eventos previstos é igual ao número de eventos observados.

3. Climatologia da Precipitação para o Período 1997-2016

Nesta seção, elabora-se uma climatologia de 20 anos da precipitação, a partir dos dados dos 32 postos pluviométricos listados na Tabela 1. Os resultados são confrontados com a climatologia de 10 anos descrita por DOM09.

A distribuição espacial da precipitação anual média sobre a cidade do Rio de Janeiro pode ser observada na Fig. 2. Nota-se na figura, como também destacado em DOM09, a presença de três máximos de precipitação associados às serras existentes na cidade. O mais significativo encontra-se junto ao Maciço da Tijuca, onde se localiza a estação do Sumaré, que registra os valores máximos de 2546 mm por ano. Os outros dois centros de máxima precipitação se encontram, um junto ao Maciço do Gericinó,

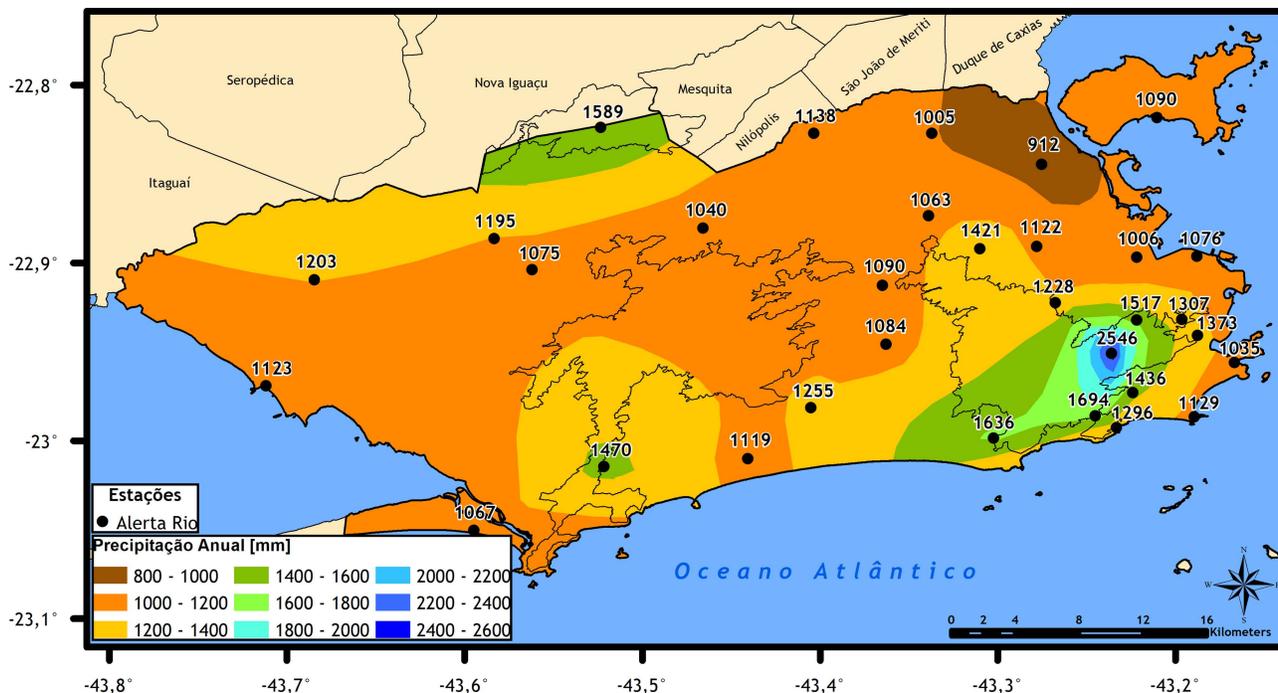


Figura 2 - Climatologia do total pluviométrico anual (mm/ano) para o período 1997-2016, a partir de 32 postos pluviométricos do Alerta Rio.

onde se situa a estação Mendanha, com 1589 mm, e o último junto ao Maciço da Pedra Branca, com valores de até 1470 mm anuais na Grotta Funda. Entretanto, como destacado na Seção 1, provavelmente a precipitação na região mais elevada do Maciço da Pedra Branca é superior aos valores encontrados na estação Grotta Funda. Assim como demonstrado em DOM09, as áreas de planície registram sempre valores anuais de precipitação inferiores às regiões de relevo mais acidentado, e destaca-se uma região de mínima precipitação na Zona Norte da cidade, com valores inferiores a 1000 mm anuais, onde está localizada a estação da Penha. Tais resultados mais uma vez confirmam que os valores máximos de precipitação ocorrem à barlavento das regiões montanhosas, levando-se em conta que os sistemas transientes de tempo que produzem precipitação deslocam-se, em sua maioria, de sul para norte, e considerando também a direção da brisa marítima que ocorre nesse sentido, como havia sido ressaltado em DOM09.

A climatologia sazonal é apresentada na Fig. 3, nas quais os valores representam médias mensais em cada estação do ano. No período de verão (Fig. 3a), observam-se três máximos de precipitação sobre a cidade, sendo o máximo principal, mais uma vez no Sumaré, com valores acima de 231 mm/mês. Um máximo secundário de chuva no norte da cidade, compreendendo várias estações das Zonas Oeste e Norte, atinge um valor de 198 mm/mês na estação do Mendanha. Um terceiro centro de máxima precipitação, menos intenso, é encontrado na região do Maciço da Pedra Branca, com valor médio de 162 mm/

mês, registrado na estação Grotta Funda. Tal distribuição espacial da precipitação encontra-se de acordo com apresentado em DOM09.

No período do outono (Fig. 3b), mais uma vez o máximo de precipitação é encontrado na região do Maciço da Tijuca, com os maiores valores registrados no posto do Sumaré, atingindo 185 mm/mês. Esse máximo de precipitação na área do referido maciço também é registrado em DOM09, entretanto com valores inferiores (em torno de 160 mm/mês). Ainda no outono, outro máximo secundário de precipitação é encontrado na região do Maciço da Pedra Branca, registrando-se na estação Grotta Funda 129 mm/mês. Tais máximos secundários também são encontrado em DOM09, entretanto com valores médios de precipitação ligeiramente inferiores ao do atual trabalho. Na Zona Oeste, a precipitação oscila entre 90 e 110 mm. Ressalte-se que, como esperado, os valores máximos são menores que no verão.

Nos meses de inverno (Fig. 3c) verifica-se, mais uma vez, uma região de máximo de precipitação no Maciço da Tijuca, com valor médio de 149 mm/mês, registrado na estação do Sumaré. Tal região de precipitações máximas está de acordo com DOM09, onde foi encontrado um valor médio de 130 mm/mês (inferior ao do atual trabalho) no mesmo posto pluviométrico. Dois máximos secundários de precipitação são encontrados, um junto ao Maciço da Pedra Branca, registrando 77 mm/mês na estação da Grotta Funda, e outro ao norte da cidade com 70 mm/mês na estação Mendanha, sendo esses os menores valores comparados as demais estações do ano. Tais regiões de

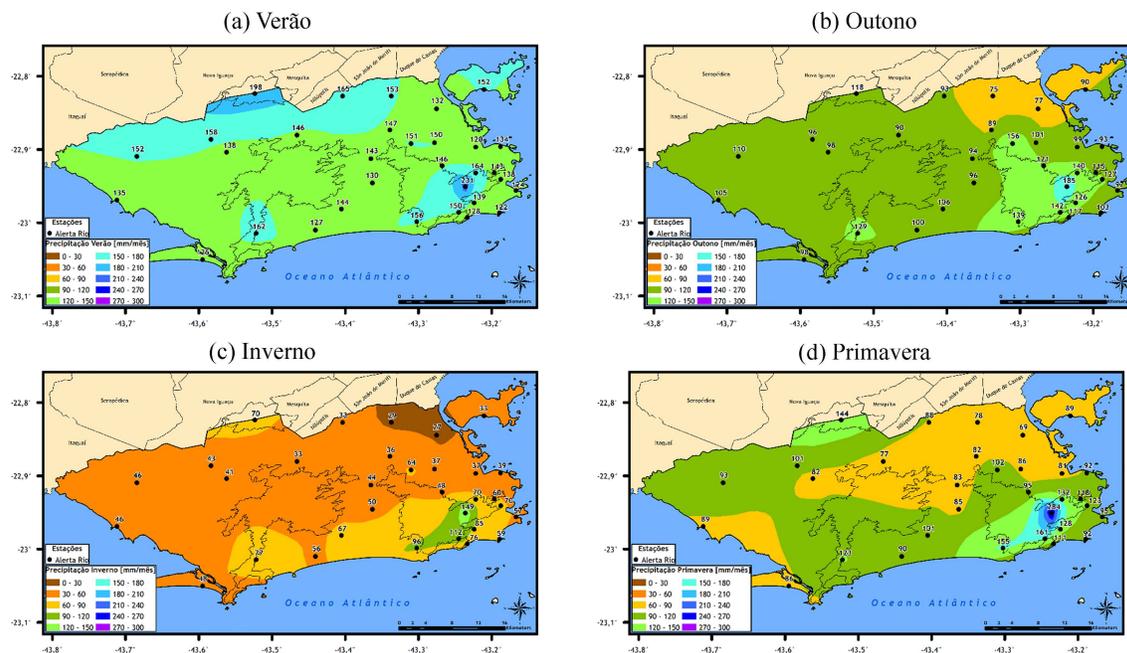


Figura 3 - Climatologia da precipitação média mensal (mm/mês) para o período 1997-2016, a partir de 32 postos pluviométricos do Alerta Rio: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno e (d) Primavera.

máximo secundário de precipitação também são encontrados em DOM09, entretanto com valores médios inferiores a 70 mm/mês. Com relação aos mínimos de precipitação, esses são observados na Zona Norte do MRJ nos postos pluviométricos de Irajá (29 mm) e Penha (27 mm).

Na primavera (Fig. 3d), ocorrem os maiores picos de precipitação média do ano na estação do Sumaré (284 mm/mês). Esse valor máximo é relativamente parecido com o encontrado em DOM09, que foi superior a 260 mm/mês. Da mesma forma, no atual trabalho, foram encontrados dois máximos secundários, com precipitações médias de 144 mm/mês no Maciço do Gericinó e de 129 mm/mês no Maciço da Pedra Branca (estação Grotta Funda), sendo esses inferiores aos seus respectivos valores encontrados no verão. Tais máximos secundários também são encontrados na climatologia de DOM09.

De uma forma geral, no restante da cidade, não ocorreram diferenças muito significativas entre as duas climatologias. Considerando-se todos os postos pluviométricos, no verão ocorrem os maiores acumulados de precipitação, a seguir destaca-se o outono como estação mais chuvosa, seguido da primavera e finalmente o inverno.

A Fig. 4 apresenta os ciclos anuais da precipitação e dos dias úmidos para cinco postos pluviométricos selecionados em distintos ambientes do MRJ: um em ambiente lacustre (Sepetiba), um localizado junto a um maciço (Tijuca), um sob influência da Baía de Guanabara (Ilha do Governador), um na Zona Norte da cidade (Penha) e o último na Zona Sul da cidade (Jardim Botânico).

Nota-se na Fig. 4 que a estação chuvosa se concentra entre os meses de outubro a março, quando são acumulados cerca de 60% da precipitação anual e com ocorrência de 10 dias úmidos por mês. A redução da chuva e dos dias úmidos que ocorrem em fevereiro é devido a menor quantidade de dias nesse mês (28 dias), em relação a janeiro e março (31 dias). Observam-se os máximos (mínimos) de precipitação e dias úmidos em janeiro (agosto). Destaca-se na figura a grande variabilidade espacial da precipitação. Nota-se na Tijuca (340 metros) e Jardim Botânico (nível do mar), ambos localizados junto ao Maciço da Tijuca, elevados valores de precipitação e de dias úmidos. Por outro lado, na Penha (111 metros), localizada à sotavento e afastado do mesmo Maciço, o total climatológico anual é cerca de 40% menor do que na Tijuca e os dias úmidos aproximadamente 50% menores no inverno. Por outro lado, Ilha do Governador e Sepetiba apresentam um regime pluviométrico semelhante.

Considerando os 26 postos pluviométricos do Grupo I, ocorrem em média 94 dias chuvosos anualmente. Portanto, se o total pluviométrico anual de 1192 mm (média aritmética simples nos 20 anos e considerando os 26 postos) fosse homogeneamente distribuído ao longo do ano, ocorreria em média 13 mm de chuva por dia. Contudo, logicamente isso não é observado. De acordo com Gershunov e Barnett (1998), a distribuição diária da precipitação para a maior parte do mundo é tal que poucos eventos de precipitação intensa correspondem a uma grande parte da precipitação mensal, sazonal ou anual. Groisman *et al.* (2012) afirmam que em média sobre a

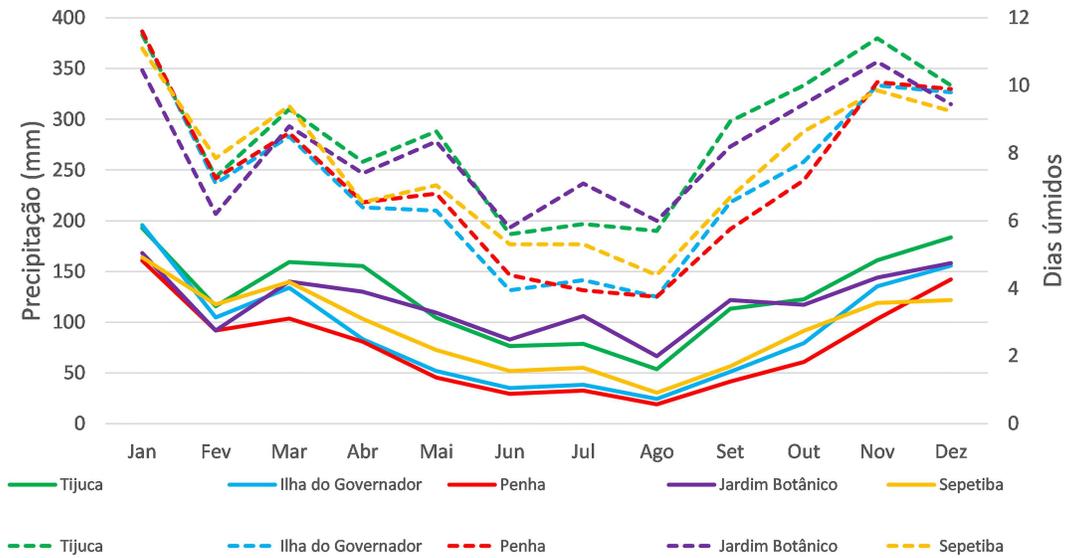


Figura 4 - Ciclos anuais da precipitação (escala da esquerda em mm/mês - linha cheia) e dos dias úmidos (escala da direita dias/mês - linha tracejada) para cinco postos pluviométricos selecionados no MRJ. Climatologia do período (1997-2016).

região central dos Estados Unidos, mais do que 70% da precipitação anual cai durante 25% dos dias cujo total diário é superior a 12,7 mm. A Fig. 5 apresenta, para cada um dos 26 postos do Grupo I, o número médio de dias de ECI no ano e o percentual médio da precipitação anual que ocorre nos dias em que o total pluviométrico diário é igual

ou superior ao percentil 95. Nota-se que em média para o MRJ cerca de 33% da precipitação anual cai aproximadamente em apenas 6,6 dias, quando o total pluviométrico diário é igual ou superior ao percentil 95 de cada posto pluviométrico. Destaca-se na figura a má distribuição da precipitação anual em Piedade, onde mais do

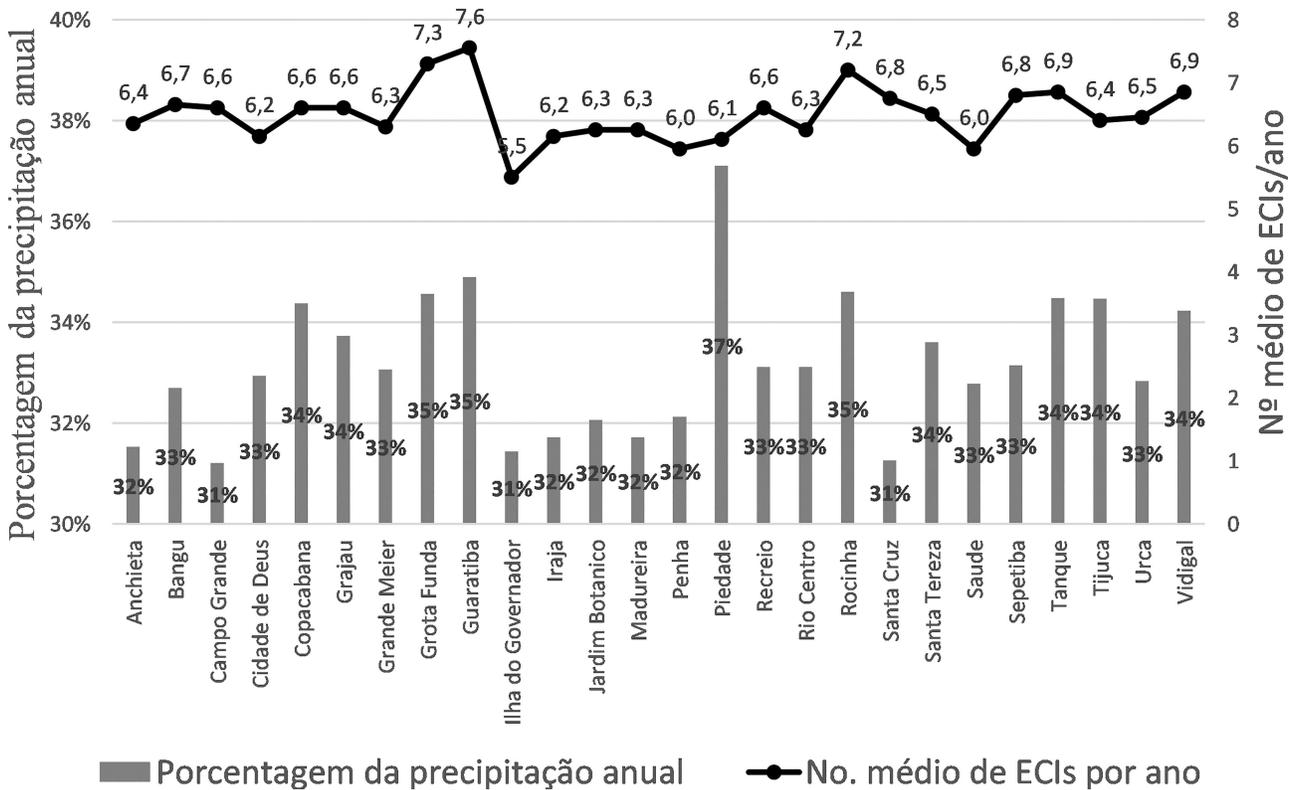


Figura 5 - Número médio de ECI (dias) no ano e o percentual médio da precipitação anual (%) que ocorre nos dias em que o total pluviométrico diário é igual ou superior ao percentil 95 para cada um dos 26 postos do Grupo I da Tabela I.

que um terço (37%) da precipitação anual é acumulada em apenas 6,1 dias.

A partir das classes de precipitação definidas Seção 2.2, apresenta-se na Tabela 2 os limiares da precipitação: fraca, moderada, moderadamente intensa, intensa e muito intensa para chv15min e chv24h em cada um dos postos pluviométricos utilizados. Por exemplo, na Penha, considera-se como chuva fraca quando o total pluviométrico diário é inferior a 9,2 mm/dia; moderada quando está entre 9,2 e 19,0 mm/dia; moderadamente intensa entre 19,0 e 30,4 mm/dia; intensa entre 30,4 e 57,2 mm/dia e, finalmente, muito intensa quando o total pluviométrico diário é igual ou maior que 57,2 mm/dia. Nota-se, portanto, que no Sumaré uma chuva diária considerada moderadamente intensa (entre 43,8 e 66,6 mm/dia) pode ser muito intensa na Penha (se for igual ou maior que 57,2 mm/dia).

Em relação a chv15min, na Penha a precipitação é classificada como fraca quando os registros são inferiores a 0,8 mm/15min; moderada entre 0,8 e 1,6 mm/15min; moderadamente intensa entre 1,6 e 2,8 mm/15min; intensa entre 2,8 e 7,9 mm/15min e muito intensa para valores iguais ou superiores a 7,9 mm/15min. Portanto uma chuva de 15 minutos no valor de 2,8 mm/15min é considerada intensa na estação Penha, porém, na estação Piedade essa chuva é considerada moderadamente intensa (valores variando entre 2,0 e 3,6 mm/15min).

4. Climatologia de Eventos de Chuva Intensa

O critério objetivo estabelecido para selecionar eventos de chuvas intensas é testado para o ano de 2016, considerando-se as 26 estações do conjunto de dados do Grupo I (ver Seção 2.2), sendo uma avaliação apresentada na Seção 4.1. A seguir, na Seção 4.2 apresenta-se a climatologia de tais eventos, aplicando-se o critério objetivo proposto para todo o período de dados (1997-2016).

4.1. Avaliação do critério utilizado para identificação de eventos de chuva intensa

Para ser considerado um ECI é necessário que tanto chv15min quanto chv24h sejam iguais ou superiores a seus percentis 95 e que ocorram concomitantemente. Os valores dos percentis para chv15min e chv24h são destacados em negrito na coluna relativa à precipitação intensa, da Tabela 2. Com relação à chv24h, nota-se que o menor valor do percentil 95 é 30,4 mm/dia (na Penha). Para chv15min, o menor valor é de 2,4 mm/15min (Mendanha). Dessa forma, em um ECI o total pluviométrico diário em qualquer posto pluviométrico é necessariamente superior a 30,4 mm e o total pluviométrico acumulado em 15 minutos é superior a 2,4 mm. Tais limiares representam o limite inferior de um ECI para o MRJ. Observa-se na Tabela 2 que, enquanto na Penha é necessário que chv24h seja superior a 30,4 mm, no Sumaré esse valor sobe para 67,6 mm. Analisando-se as séries de todos os postos

pluviométricos utilizados nesta etapa do trabalho, para o ano de 2016, nota-se que na maior parte das vezes em que a chv24h é intensa, o chv15min também é intenso. Apenas em 5% dos casos ocorridos em 2016, o critério é atendido para chv24h, mas não para chv15min.

Após aplicação do critério objetivo aos dados de precipitação dos 26 postos do Sistema Alerta Rio com 20 anos de dados, além São Cristóvão e Laranjeiras (com 16 anos de dados) e que estavam operantes durante os 366 dias do ano de 2016, os seguintes resultados foram encontrados:

- i. Trinta e cinco datas foram identificadas pelo método objetivo proposto como ECIs, sendo que em 4 desses dias não houve ocorrência de transtornos na cidade. Dessa forma, considerando uma tabela de contingência, como mencionada na Seção 2.2, contabiliza-se: A=31 e B=4. Nesses 4 dias o critério foi atendido em apenas 1 ou 2 postos pluviométricos.
- ii. Em 4 dias ocorreram transtornos relacionados com chuvas na cidade, devidamente documentado nas planilhas do COR e/ou através de notícias nos principais veículos de comunicação, porém em nenhum posto pluviométrico o critério objetivo foi atingido. Assim, C=4. Nesses quatro dias, a chv24h ficou próximo ao percentil 95 em alguns postos pluviométricos, sem ultrapassá-los.
- iii. Nos demais dias do ano (366-31-4-4=327 dias) não houve registro de transtornos na cidade e o critério objetivo também não foi atingido. Dessa forma, D=327.

Assim, com A=31, B=4, C=4 e D=327, obtêm-se a partir das Equações 1, 2 e 3, respectivamente: AC = 97,8%, AF = 11,4% e VIES = 1. Tais resultados indicam um índice de acerto (AC) elevado, baixo alarme falso (AF) e viés igual a unidade, demonstrando que o número de eventos projetados pelo método proposto é igual ao número de eventos observados.

Conclui-se, portanto, que o critério proposto está satisfazendo o objetivo deste trabalho, sendo capaz de identificar a maior parte dos ECIs ocorridos na cidade e com baixo índice de alarme falso. Por outro lado, é importante ressaltar que os eventos de chuva moderada, mesmo que ocorram durante vários dias consecutivos, provavelmente causando transtornos na cidade, não serão captados por esta metodologia.

4.2. Climatologia de eventos de chuva intensa (1997-2016)

Um dos objetivos da investigação da climatologia dos ECIs é identificar as áreas de maior ocorrência de tais eventos. Na Fig. 6 apresenta-se a distribuição espacial do número médio de ECIs por ano para cada um dos 32 postos pluviométricos listados na Tabela 1. É importante realçar que nessa figura a contagem da frequência de ECIs é feita para cada localidade, aplicando-se o critério

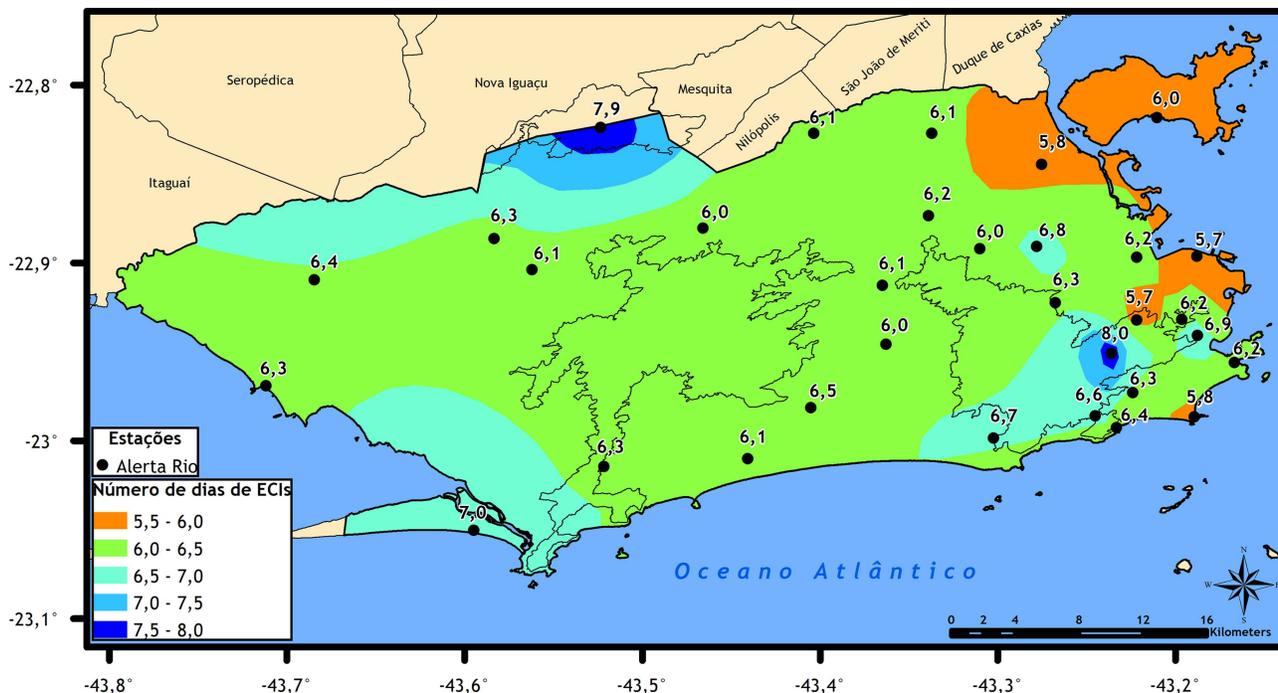


Figura 6 - Número médio anual de ECIs (dias) identificados para cada um dos 32 postos pluviométricos do Alerta Rio.

proposto individualmente para cada posto pluviométrico. Dessa forma, o fato de na maior parte das localidades ocorrerem entre 6 e 6,5 dias de ECIs, como pode ser observado na Fig. 6, não significa que ocorrem em média apenas esses dias de chuvas intensas por ano em toda a cidade. Isso ocorre, pois os ECIs identificados em um determinado posto pluviométrico não são necessariamente o mesmo daqueles identificados nos demais postos, resultando portanto em um número maior de ECIs quando se analisa conjuntamente todos os postos localizados na cidade. Retornando a Fig. 6, notam-se máximos coincidentes com as regiões mais chuvosas do MRJ, localizadas próximas aos maciços da Tijuca e do Gericinó. Ou seja, além de chover mais em média próximo a essas áreas de maior altitude, observa-se também a maior frequência de ocorrência de dias de ECIs nessas regiões. Enquanto no Sumaré e no Mendanha ocorrem em média 8 dias de ECIs por ano, na Saúde e na Tijuca essa média cai para 5,7 dias. Portanto, observam-se que os mínimos de ECIs também acompanham as regiões de menores totais pluviométricos anuais.

A Fig. 7 mostra a distribuição espacial sazonal do número médio de ECIs no MRJ. Nota-se que no verão (Fig. 7a) ocorrem os maiores valores médios de ECIs por toda a cidade. Nessa estação, os maiores valores estão localizados na porção norte do MRJ, com um máximo de 4,0 ECIs em Irajá, representando a soma das médias mensais de ECIs entre dezembro e fevereiro. Esses máximos ocorrem na Zona Norte devido ao maior aquecimento local que atua como um gatilho para a formação de nuvens

convectivas e ocorrência de precipitação intensa, principalmente no final da tarde e início da noite. Um segundo máximo é encontrado na porção sul do MRJ, próximo a Sepetiba, provavelmente devido à entrada de sistemas frontais por esse setor da cidade. Observa-se que o outono (Fig. 7b) é a segunda estação do ano com a maior ocorrência de ECIs. O posto pluviométrico Mendanha apresenta o maior valor climatológico de ECIs, com 2,7 dias em 3 meses. Ainda no outono, um mínimo é observado na Zona Norte, com apenas 1,1 ECI em Irajá. No inverno (Fig. 7c), como esperado, ocorre a menor frequência de ECIs. Isso se deve ao fato de que no inverno predominam condições termodinâmicas de uma atmosfera mais estável e mais seca, inibindo a formação de nebulosidade convectiva. Na primavera (Fig. 7d), em média, as ocorrências de ECIs são baixas em quase toda a cidade. Entretanto, verifica-se uma região de destaque no Maciço da Tijuca, com média de 2,5 ECIs registrados no posto Sumaré.

Além de conhecer a distribuição espacial dos ECIs, é importante que o previsor de tempo saiba quantos dias em média ao longo de um ano ele deverá lidar com o problema de prever ECIs que ocorrem na cidade. Dessa forma, contabiliza-se a frequência de ECIs considerando o número de dias por ano em que pelo menos um dos postos pluviométricos do Alerta Rio atingiu o critério proposto. Para esta etapa foram utilizados dados dos 26 postos pluviométricos que permaneceram em operação continuamente entre 1997 e 2016 (Grupo I). Os resultados dessa estatística mostram em média um total de $30,1 \pm 6,6$ dias por ano com ocorrência de ECI em toda a cidade. Os

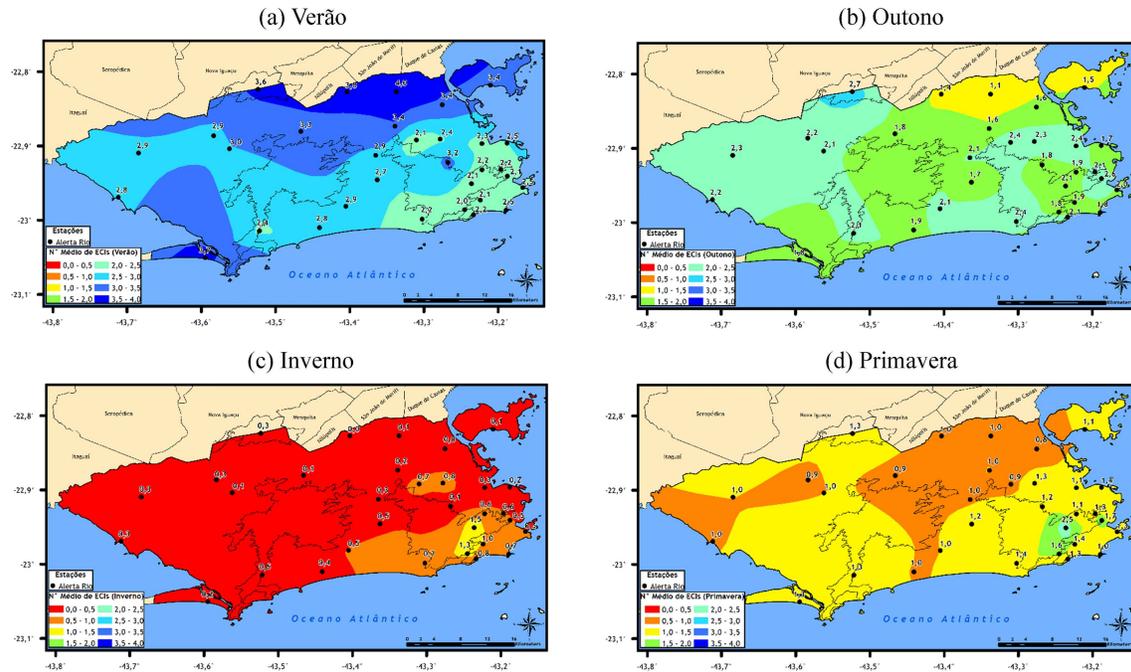


Figura 7 - Distribuição espacial sazonal do número médio de ECIs no RJ para: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno e (d) Primavera.

valores de ECIs encontrados para os 19 anos entre 1997 e 2016 (excluindo o ano de 2001), são respectivamente: 29, 40, 26, 23, 22, 34, 26, 32, 30, 18, 29, 41, 38, 25, 30, 40, 24, 30 e 35. Ressalta-se que o índice de acerto obtido para o critério utilizado na identificação de ECIs é de 97,8%, e que o índice de alarme falso é de 11,4%. Nota-se uma elevada variabilidade interanual, com frequência de ECIs oscilando entre 18 dias em 2007 até 41 dias em 2009.

Barcellos (2009) utilizou a técnica dos percentis para analisar dados de chuva do Sistema Alerta Rio, sendo selecionados os ECIs que atingiram valores superiores ao percentil 99 da chuva diária para um total de 30 estações pluviométricas estudadas, sem limite do número mínimo de estações para que o critério fosse satisfeito. Barcellos (2009) selecionou um total de 169 ECIs no período entre janeiro de 1998 e dezembro de 2005 (8 anos), ou seja, uma média de 21 ECIs/ano. Comparando-se o critério de Barcellos (2009) com o utilizado neste trabalho, percebe-se que no atual trabalho o critério proposto é menos restritivo. Utilizando-se 26 postos pluviométricos e o mesmo período de Barcellos (2009), ou seja 1998 a 2005, obtém-se uma média de 29 eventos por ano, ou seja, quase 35% a mais de ECIs do que o obtido por Barcellos (2009).

O ciclo anual dos ECIs para os postos pluviométricos da Ilha do Governador, de Piedade e para a média dos 26 postos pluviométricos do Grupo I é apresentado na Fig. 8. O objetivo é identificar os meses de menor e maior frequência de ocorrência de ECIs. Como esperado, para a maior parte dos postos pluviométricos a maior frequência de ocorrência de ECIs ocorre no verão, seguido do outono, primavera e inverno. Portanto, configura-se um ciclo anual

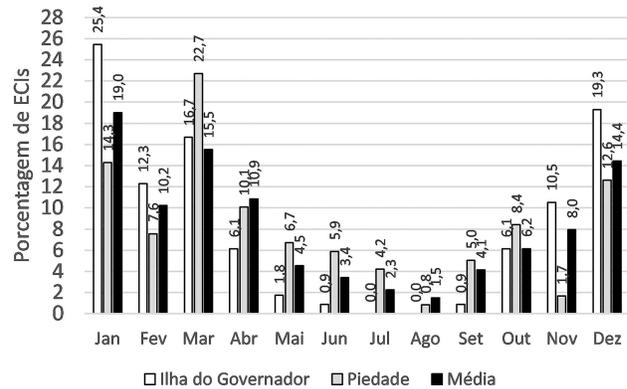


Figura 8 - Ciclo anual do número médio de ECI (dias) na Ilha do Governador, em Piedade e para a média dos 26 postos pluviométricos utilizados com valores destacados.

bem definido, com máximos no verão e mínimos no inverno, como exemplificado na Fig. 8 para o posto pluviométrico da Ilha do Governador, localizado na Zona Norte da cidade. Destaca-se também, uma redução na frequência de ocorrência de ECIs no mês de fevereiro conforme observado na média mensal da precipitação climatológica (Fig. 4 - vide Seção 3). Em vários postos pluviométricos (Grota Funda, Guaratiba, Piedade, Santa Cruz, Santa Tereza, Sepetiba e Urca) a maior frequência de ocorrência de ECIs é observada em março, como exemplificado na Fig. 8 para Piedade, também localizado na Zona Norte da cidade. Comparando-se o ciclo anual de ECIs dos dois postos pluviométricos, nota-se na Ilha do Governador uma frequência maior de dias de ECIs no

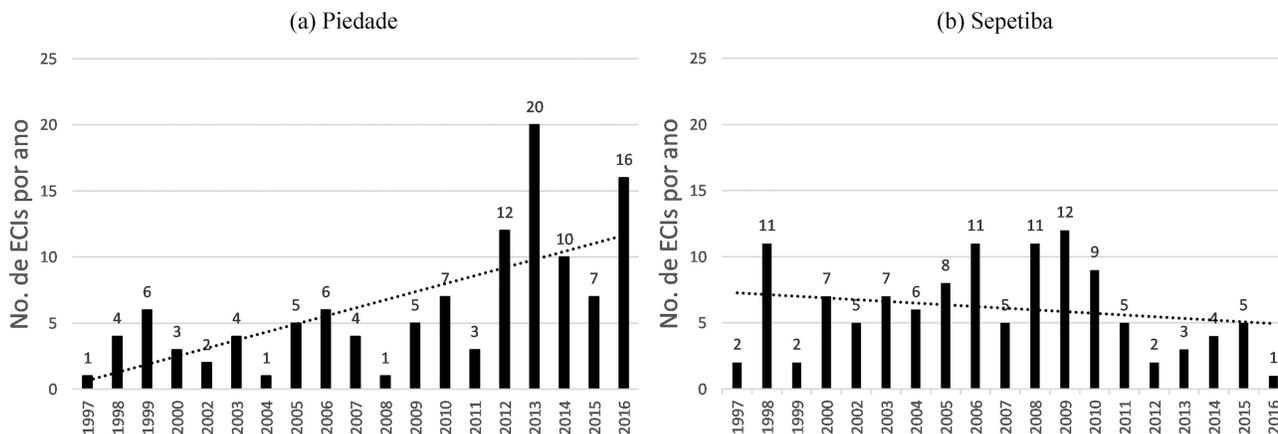


Figura 9 - Número de ECIs (dias) por ano: (a) Piedade e (b) Sepetiba. O número de ECI está em barra e a tendência em linha pontilhada.

verão (57,0%), seguido do outono (24,6%), primavera (17,5%) e finalmente o inverno (0,9%). Para Piedade a maior frequência de ocorrência ocorre no outono (39,5%), a seguir no verão (34,5%), primavera (15,1%) e inverno (0,9%). Destaca-se na figura o máximo de 22,7% de dias de ECI em Piedade no mês de março, responsável por tornar a média do outono superior à do verão nesse posto pluviométrico. Ao calcular a média aritmética simples mensal, considerando todos os 26 postos pluviométricos, os resultados mostram os percentuais mensais destacados na Fig. 8, ou seja: 43,7% de eventos no verão, seguido de 30,9% no outono, 18,2% na primavera e finalmente 7,2% no inverno. Nota-se que 70% de todos os ECIs ocorrem entre dezembro e abril.

As séries temporais dos totais anuais de ECIs para Piedade e Sepetiba são apresentados na Fig. 9. Apesar do curto período de tempo analisado (20 anos), existe uma tendência clara de aumento de ECIs em Piedade (Fig. 9a). Nota-se que, nessa localidade, enquanto nos primeiros 5 anos do período analisado ocorriam em média 3 ECIs por ano, nos últimos 5 anos essa média se elevou para 13 dias. Tal resultado concorda com Dereczynski *et al.* (2013), onde os autores mostram que para as estações Santa Cruz e Alto da Boa Vista do INMET, está ocorrendo nas últimas décadas uma elevação no número de dias no ano com total pluviométrico diário superior a 30 mm (R30mm), sendo de +0,07 dias/ano no Alto da Boa Vista e de +0,03 dias/ano em Santa Cruz. Por outro lado, na estação de Sepetiba (Fig. 9b), observa-se uma tendência geral de redução do número de ECIs. Nessa estação, nota-se que entre 1997 e 2008, há uma tendência de aumento nos dias de ECIs, contudo a partir de 2009 é observada uma tendência negativa. Analisando as séries temporais de ECIs dos demais postos do Alerta Rio (figuras não apresentadas), mostra-se uma tendência de aumento na maior parte das localidades, ou ausência de tendência. Em apenas três postos onde ocorre tendência negativa (Guaratiba, Sepetiba e Tijuca), essa está claramente associada ao grande número de ECIs ocorridos no início da série, em 1998.

5. Conclusões

Neste trabalho, elabora-se uma climatologia de vinte anos de ECIs a partir dos dados de precipitação coletados no município do Rio de Janeiro pelo Sistema Alerta Rio. Ademais a climatologia de 10 anos (1997-2006) da precipitação, descrita em DOM09, é revisitada, considerando-se no atual trabalho, o período 1997-2016.

Respondendo a 1ª questão da Seção 1 deste artigo, a respeito da comparação entre as climatologias de 20 anos (1997-2016) e de 10 anos (1997-2006) descrita em DOM09, é possível afirmar que esta nova climatologia se mostra com um padrão espacial bem similar à anterior. Observa-se um núcleo máximo principal de precipitação sempre localizado junto ao Maciço da Tijuca, registrado na estação do Sumaré, e dois outros máximos secundários sendo encontrados, um no Maciço da Pedra Branca (estação Grota Funda), e o outro junto à Serra do Mendanha. Tal distribuição ocorre tanto para o padrão anual, como para o sazonal, presente nas quatro estações do ano. As diferenças do atual resultado para o apresentado em DOM09 ficam no âmbito de alguns pequenos detalhes em termos de valores médios de precipitação. Na análise espacial/sazonal obtida desta climatologia de 20 anos, entre os resultados mais importantes, ressalta-se o núcleo de chuvas máximas junto ao maciço da Tijuca, ocorrendo na primavera. Entretanto, numa análise para o MRJ, como um todo, o verão se apresenta como a estação mais chuvosa, estando esses resultados em acordo com DOM09. De uma forma geral, a região de precipitações mínimas se encontra na porção nordeste da cidade, ao longo de todo o ano, englobando principalmente as estações da Penha e do Irajá. Na análise do ciclo anual de precipitação e de dias úmidos para diversas estações localizadas em pontos diferentes da cidade, evidencia-se que a estação chuvosa se concentra entre os meses de outubro a março. Observam-se os máximos (mínimos) de precipitação e dias úmidos em janeiro (agosto). Destaca-se também a grande variabilidade espacial da precipitação, sendo um exemplo interessante a comparação entre as estações da Tijuca e da

Penha, onde a primeira, localizada junto a uma área montanhosa registra elevados valores de precipitação e de dias úmidos, enquanto a segunda, localizada em uma região de baixada registra uma quantidade bem menor de precipitação e de dias úmidos do que a primeira. Na climatologia atual ressalta-se também a distribuição desigual da precipitação ao longo do ano, ocorrendo em média para o MRJ cerca de 33% da precipitação anual em apenas 6,6 dias, quando o total pluviométrico diário é igual ou superior ao percentil 95.

Sobre a 2ª questão, envolvendo o critério proposto para identificação dos ECIs, apesar da avaliação ter sido feita apenas para o ano de 2016, os resultados mostram uma ótima performance da metodologia proposta, apresentando elevado índice de acerto (97,8%) e baixo índice de alarme falso (11,4%). É importante realçar que o limite inferior para ocorrência de ECIs é chv24h de 30,4 mm/dia e chv15min de 2,4 mm/15min. Ademais, na maior parte (95%) dos ECIs ocorridos em 2016, os limiares de chv24h e de chv15min são atendidos conjuntamente, sendo que apenas em 5% dos casos em que ocorre ultrapassagem de chv24h, o mesmo não ocorre para chv15min.

As quatro últimas questões levantadas na Seção 1 referem-se à climatologia de ECIs. Os resultados mostram que os máximos de ECIs são coincidentes com as regiões mais chuvosas da cidade, localizadas próximos aos maciços, com máximo de 8,0 dias/ano no Sumaré e no Mendanha. O mínimo é observado na Tijuca e Saúde (5,7 dias/ano). A respeito da frequência de ocorrência de ECIs em toda a cidade, pode-se esperar um total de 30 dias de ECIs por ano, com a maior parte deles (70%) ocorrendo no período chuvoso, entre dezembro e abril. Todavia, apesar da baixa frequência de ocorrência no inverno (7,2%) e na primavera (18,2%), medidas de precaução deveriam ser adotadas também nesses meses. Para responder a 6ª questão, relacionada com a possível mudança na frequência de ocorrência de ECIs, investiga-se as séries temporais dos totais anuais de dias de ECIs. Os resultados para Piedade são surpreendentes, com notável aumento de dias de ECIs, o que ocorre também para a maior parte dos postos pluviométricos, apesar do curto período de tempo analisado.

Agradecimentos

O primeiro autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de Mestrado recebida no Programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PPGM) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Os autores agradecem ao Sistema de Alerta de Chuvas da Prefeitura do Rio de Janeiro pela disponibilidade dos dados.

Referências

- BARCELLOS, P.C. **Precipitações intensas na cidade do Rio de Janeiro: Probabilidade e Previsibilidade**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, p. 186, 2009.
- BRAGA, R.N.S.; DA HORA, M.A.G.M.; LYRA, G.B.; NASCENTES, A.L. Determinação e interpolação dos coeficientes das equações de chuvas intensas para cidade do Rio de Janeiro. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Scienc.* v. 13, n. 1, p. 1–14, 2017. <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2076>
- BROOKS, H.E.; STENSRUD, D. Climatology of Heavy Rain Events in the United States from Hourly Precipitation Observations. *Monthly Weather Review. Notes and Correspondence.* v. 128, p. 1194–1201, 2000.
- CHAPPELL, C.F. Quasi-stationary convective events. *Mesoscale Meteorology and Forecasting*, Ray, P. S. Ed., American Meteorological Society, p. 289–310, 1986.
- DERECZYNSKI, C.P.; OLIVEIRA, J.S.; MACHADO, C.O. Climatologia da precipitação no Município do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Meteorologia.* v. 24, n. 1, p. 24–38, 2009.
- DERECZYNSKI, C.P.; LUIZ SILVA, W.; MARENGO, J. Detection and Projections of Climate Change in Rio de Janeiro, Brazil. *American Journal of Climate Change.* v. 2, p. 25–33, 2013. <http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2013.21003>
- DERECZYNSKI, C.P.; CALADO, R.N.; BODSTEIN, A. Chuvas extremas no Município do Rio de Janeiro: Histórico a partir do Século XIX. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ.* v. 40, n. 2, p. 17–30, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2017_2_17_30
- DOLIF, G.; NOBRE, C.A. Improving extreme precipitation forecasts in Rio de Janeiro, Brazil: are synoptic patterns efficient for distinguishing ordinary from heavy rainfall episodes? *Atmospheric Science Letters.* v. 13, p. 216–222, 2012. DOI: 10.1002/asl.385
- DOSWELL, C.A. Severe convective storms—an overview. In: DOSWELL, C. (ed) *Severe convective storms. Meteorological Monograph*, v. 28, n. 50. American Meteorological Society, Massachusetts, p. 1–26, 2001.
- GERSHUNOV, A.; BARNETT, T.P. ENSO Influence on Intra-seasonal Extreme Rainfall and Temperature Frequencies in the Contiguous United States: Observations and Model Results. *Journal of Climate.* v. 11, p. 1575–1586, 1998.
- GROISMAN, P.Y.; KNIGHT, R.W.; KARL, T.R. Heavy precipitation and high streamflow in the contiguous United States: Trends in the twentieth century. *Bulletin of American Meteorological Society.* v. 82, p. 219–246, 2001.
- GROISMAN, P.Y.; KNIGHT, R.W.; EASTERLING, D.R.; KARL, T.R.; HEGERL, G.C.; RAZUVAEV, V.N. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate.* v. 18, p. 1326–1350, 2005.
- GROISMAN, P.Y.; KNIGHT, R.W.; KARL, T.R. Changes in Intense Precipitation over the Central United States. *Journal of Hydrometeorology.* v. 13, p. 47–66, 2012. DOI: 10.1175/JHM-D-11-039.1
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Acesso em 27/02/2018. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/panorama>

- IPP – Instituto Pereira Passos. Acesso em 27/02/2018. <http://www.data.rio/pages/rio-em-sntese-2>
- KARL, T.R.; KNIGHT, R.W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the USA. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 79, p. 231–241, 1998.
- KONRAD, C.E. Synoptic-scale features associated with warm season heavy rainfall over the interior southeastern United States. **Weather and Forecasting**. v. 12, n. 3, p. 557–571, 1997.
- LIEBMANN, B.; JONES, C.; CARVALHO, L.M.V. Interannual variability of daily extreme precipitation events in the State of São Paulo, Brazil. **Journal of Climate**, v. 14, p. 208–218, 2001.
- LIMA, K. C.; SATYAMURTY, P.; FERNÁNDEZ, J.P.R. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in southeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 101, n. 1-2, p. 121–135, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-009-0207-9>
- MCGINLEY, J. Nowcasting Mesoscale Phenomena (Chap. 28). Mesoscale Meteorology and Forecasting (P. RAY, ed.). **American Meteorological Society**, Boston, p. 657–688, 1986.
- POLIFKE DA SILVA, F.; JUSTI DA SILVA, M.G.A.; MENEZES, W.F., ALMEIDA, V.A. Avaliação de Indicadores Atmosféricos Utilizando o Modelo Numérico WRF em Eventos de Chuva na Cidade do Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**. v. 38, n. 2, p. 81–90, 2015. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2015_2_81_90
- TEIXEIRA, M.S.; SATYAMURTY, P. Dynamical and synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in Southern Brazil. **Monthly Weather Review**. v. 135, p. 598–617, 2007.
- TRENBERTH, K.E.; ZHANG, Y.; GEHNE, M. Intermittency in Precipitation: Duration, Frequency, Intensity, and Amounts Using Hourly Data. **Journal of Hydrometeorology**. v. 18, p. 1393–1412, 2017. DOI: 10.1175/JHM-D-16-0263.1
- WILKS, D. S. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. **Academic Press, Second Edition. International Geophysics Series, Elsevier, USA**, v. 91, p. 262–265, 2006.

Sítios da Internet

- Centro de Informação de Tempo Severo da Organização Meteorológica Mundial - <http://severe.worldweather.org/rain/>
- Notícias jornal O Globo em 21/02/2018 <https://oglobo.globo.com/rio/chuva-forte-deixa-varias-ruas-do-rio-alagadas-22418569>.
- Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro <http://alertario.rio.rj.gov.br/>
- Unidade de Conservação <http://www.rio.rj.gov.br/web/smac/unidades-de-conservacao>

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.