

Chuvas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: caracterização, eventos extremos e tendências

Rainfall in Metropolitan Region of Rio de Janeiro: characterization, extreme events, and trends

Sofia Siqueira Lima¹ 
Nubia Beray Armond² 

Palavras-chave:

Climatologia geográfica
Variabilidade
Extremos Climáticos
Fatores Geográficos

Resumo

O conjunto de fatores físico-naturais, econômicos, sociais e espaciais constituem processos que, associados, formam e dão sentido à complexidade espacial da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, configurando-a como um espaço suscetível e vulnerável à ocorrência de excepcionalidades de natureza climática. Assim, o artigo tem como objetivo analisar a variabilidade espacial e temporal dos eventos extremos de precipitação na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Foram utilizados dados diários de 48 postos pluviométricos: 40 postos na série de 2008 a 2019, e 8 postos entre 1970 e 2019. Foi empregada a técnica de percentis para o estabelecimento de anos-padrão (percentil 1, 10, 90 e 99) e para definição dos extremos (percentil 99). O software R foi utilizado para realização de testes de autocorrelação, extração dos índices RX1Day e RX5Day e para execução dos testes de Mann-Kendall, Pettitt e Sen's Slope. Foi verificada a influência da altitude, orientação das vertentes e maritimidade na distribuição espacial da precipitação e dos eventos extremos. Os anos com mais ocorrência de extremos, e com os eventos concentrados e persistentes de maior magnitude, são anos identificados como tendente à chuvosos e chuvosos, sendo eles 1988 e 2009. 90% dos extremos ocorrem na estação chuvosa, com destaque para dezembro, janeiro e março. Contudo, é abril que manifesta extremos de maior magnitude. Foram identificados 4 postos com tendências negativas, e 2 com tendências positivas.

Keywords

Geographical Climatology
Variability
Climate Extremes
Geographic Factors

Abstract

Physical-natural, economic, social, and spatial factors constitute processes that, when associated, form and give meaning to the spatial complexity of the Metropolitan Region of Rio de Janeiro, configuring it as a susceptible and vulnerable space to the occurrence of climate exceptionalities. Thus, this paper aims to analyze the spatial and temporal variability of extreme precipitation events in the Metropolitan Region of Rio de Janeiro. Daily data regarding 48 rainfall stations were used: 40 stations in a series from 2008 to 2019 and 8 stations concerning the period between 1970 and 2019. The percentile technique was used to establish standard years (1, 10, 90, and 99 percentile) and to define the extremes (99th percentile). The R software was used to perform autocorrelation tests, to extract the RX1Day and RX5Day indices, and to perform the Mann-Kendall, Pettitt, and Sen's Slope tests. The influence of altitude, slope orientation, and sea level was verified on the spatial distribution of precipitation and extreme events. The years with the highest occurrence of extremes, as well as concentrated and persistent events of greater magnitude, are identified as rainy and extremely rainy, namely 1988 e 2009. 90% of extremes occur in the rainy season, especially during December, January, and March. However, April manifests extremes of a greater magnitude. Four stations with negative and two with positive trends were identified.

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. sofiasiqueiralima@gmail.com

² Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. nubia.beray@gmail.com

INTRODUÇÃO

Na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), problemas ambientais deflagrados por fenômenos climáticos são frequentes, sobretudo aqueles desencadeados por eventos de precipitação (ARMOND; SANT'ANNA NETO, 2019; BRANDÃO, 1987, 2003; GONÇALVES, 2003; GOUDARD, 2019; MENDONÇA, 2003; NEIVA et al., 2017; SANT'ANNA NETO, 2011). No cenário de mudanças climáticas, dois aspectos são particularmente críticos para esta: a elevação do nível médio do mar; e o incremento da ocorrência de eventos extremos, tais como ventos intensos, ondas de tempestade, chuvas torrenciais e secas mais prolongadas (INPE, 2011). Desenrola-se, então, um esforço científico mundial para compreender a variabilidade e tendência destes fenômenos posto que, como deflagradores de impactos, há a iminência de intensificação de efeitos, que se materializam em espaços desiguais e, portanto, são assimilados de forma distinta (CONTI, 1975; GOUDARD, 2019; MONTEIRO, 1971, 1999; STEPHENSON, 2008 apud ARMOND, 2018).

O IPCC define eventos extremos como “an extreme weather event would normally be as rare as or rarer than the 10th or 90th percentile of a probability density function estimated from observation” (IPCC, 2021). Para além dos percentis, limiares de chuva máxima em 1 dia e 5 dias, na forma dos índices do Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI) são amplamente empregados em estudos sobre extremos climáticos (ARMOND, 2018; BENAVIDES et al., 2007; DOS SANTOS et al., 2006; REBELLO et al., 2008; GOUDARD, 2019; SILVA; DERECZYNSKI, 2014; ZHANG et al., 2004). Por possibilitar a mensuração e caracterização da variabilidade climática para, assim, detectar mudanças no clima, a aplicabilidade do ETCCDI encontra-se também nos estudos de tendências.

Para o Rio de Janeiro, o estudo de eventos extremos de precipitação é recorrente na literatura, com uma preponderância de pesquisas sobre o recorte do Estado do Rio de Janeiro (ARMOND, 2018; DERECZYNSKI et al., 2013; SILVA; DERECZYNSKI, 2014) e da capital metropolitana (ARANHA; BRANDÃO, 2007; ARMOND, 2014; ARMOND; SANT'ANNA NETO, 2017, 2019; DERECZYNSKI et al., 2009), ao passo que, considerando estudos específicos, a RMRJ permanece com pouca expressividade nesta bibliografia (MOURA et al., 2013).

Assim, o objetivo deste manuscrito consiste em analisar a variabilidade espacial e temporal

dos eventos extremos de precipitação na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Pretende-se fazer uma caracterização da dinâmica climática, a partir da análise da variabilidade espacial e temporal da precipitação na RMRJ, e também uma caracterização dos eventos extremos de chuva, buscando identificar magnitude, frequência e analisar tendências relacionadas a ocorrências destes eventos.

A complexidade orográfica e hidrológica da RMRJ que singulariza a espacialização da dinâmica de precipitação na região, atrelada à circulação atmosférica regional entre sistemas de transição (SANT'ANNA NETO, 2005), configuram-na como um complexo cenário de vulnerabilidade à ocorrência de excepcionais (ABREU, 1987; CONTI, 1975; CRUZ, 1974). Por isso, observar a variabilidade e tendência – em magnitude, frequência e extensão – de eventos de precipitação, considerando a multiplicidade de dinâmicas espaciais supracitadas, faz-se necessário para compreender os impactos de possíveis alterações climáticas nas diferentes escalas.

REFERENCIAL TEÓRICO

A Climatologia Geográfica (MONTEIRO, 1971, 1999), assim como a Geografia do Clima (SANT'ANNA NETO, 2001, 2008), se configuram como marcos na ciência geográfica por incorporarem o espaço como uma categoria central. Essas matrizes permitem pensar o espaço para além de um receptáculo de fenômenos meteorológicos e climáticos, mas como uma forma de “estabelecer interrelações entre fenômenos, dinâmicas e processos com um espaço que, nessa abordagem, tem em sua razão de ser uma existência relativa” (ARMOND, 2018, P. 96). Assim, o espaço como um espaço relativo possibilita compreender os fenômenos climáticos – no presente trabalho, os eventos extremos de chuva – a partir da ideia de que a existência do espaço e dos extremos resulta apenas porque ambos se relacionam entre si (HARVEY, 2015).

Ademais, como conceitos centrais da Climatologia Geográfica que conduzem esta investigação, o ritmo, compreendido como a sucessão habitual dos tipos de tempo (MONTEIRO, 1971), expressa a atuação dos sistemas atmosféricos dentro da realidade regional e, inserindo o espaço relativo, permite compreender os fenômenos em uma perspectiva totalizante, a partir da relação entre a dinâmica de circulação atmosférica e o espaço, sobretudo

com os fatores geográficos que o constituem (NIMER, 1979).

Inserido nesta análise, o conceito de variabilidade (NASCIMENTO JUNIOR, 2013) permite observar variações na magnitude, frequência e extensão nos diversos e combinados elementos climáticos. A variabilidade, em associação ao ritmo climático, permite pensar os eventos extremos posto que é a partir do conhecimento do que é habitual que se estabelecem as excepcionalidades (MONTEIRO, 1971).

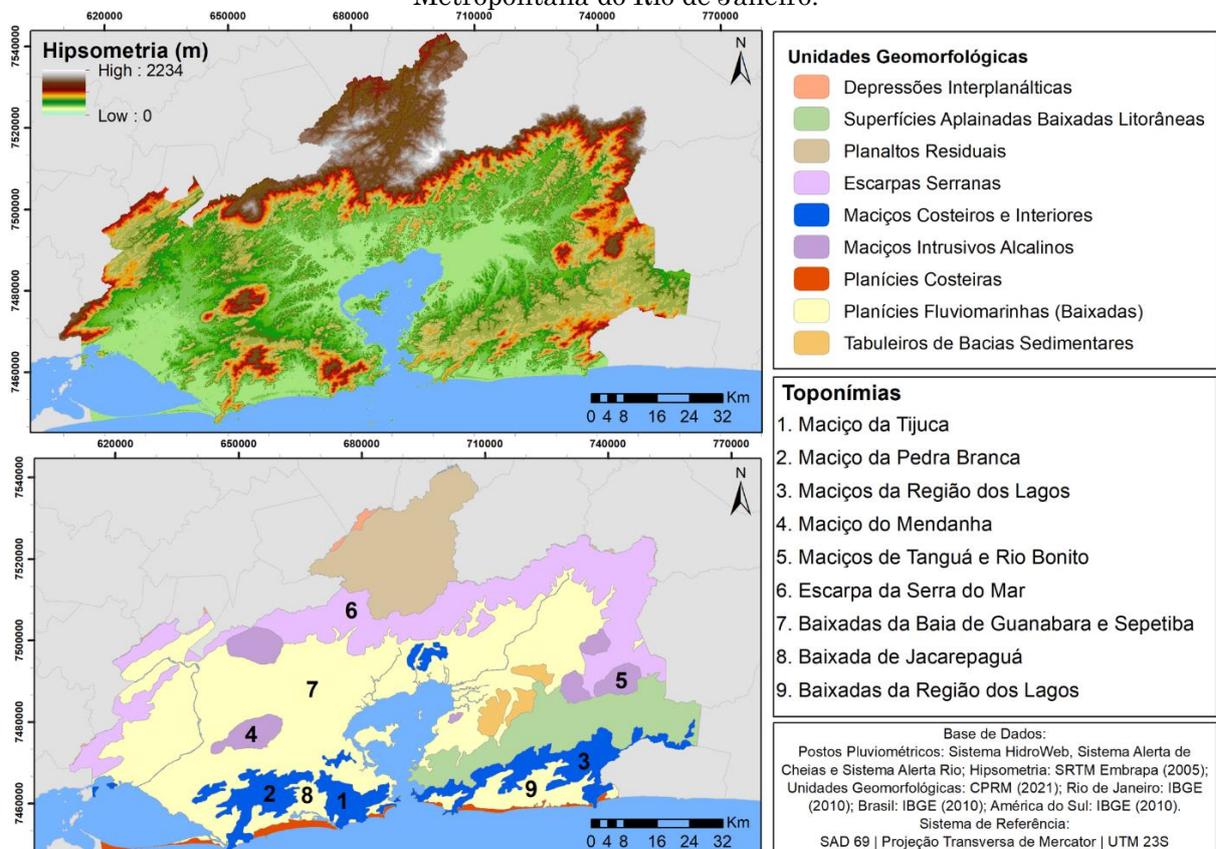
Os eventos extremos, objeto desta pesquisa, são abordados através da consideração da precipitação acumulada acima de um determinado limiar, ou distante do padrão habitual (ARMOND; SANT'ANNA NETO, 2017; MENDONÇA; ROSEGHINI, 2012 *apud* GOUDARD, 2019; MONTEIRO, 1991; NASCIMENTO JÚNIOR, 2013).

ÁREA DE ESTUDO

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro foi institucionalizada em 1974, mas foi em 2018 que se formou sua atual composição legal com 22 municípios. Os distintos ciclos de processo de ocupação, iniciada na capital metropolitana, marcaram a expansão urbana e consolidação da RMRJ a partir do crescimento paulatino para os municípios vizinhos alicerçado na metropolização da região (ABREU, 1987).

Para compreensão da variabilidade da precipitação e, conseqüentemente, dos eventos extremos na RMRJ, valem ser ressaltados aspectos físico-naturais que ditam a espacialização deste fenômeno. A chave para essa apreensão é a relação e interação dos fatores geográficos – a maritimidade e o relevo, considerando altitude e orientação das vertentes – entre si e conjugados com os fatores de ordem dinâmica – a dinâmica atmosférica regional.

Figura 1 - Mapa de hipsometria (superior) e unidades geomorfológicas (inferior) da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.



Fonte: Os autores (2021).

A presença de baixadas, maciços e serras, das baías de Guanabara e de Sepetiba e do extenso litoral longitudinal caracterizam a complexidade orográfica e hidrológica da região, formas estas que refletem na hipsometria

regional que chega a mais de 2.000 metros de altitude. A disposição longitudinal da RMRJ proporciona uma incursão de umidade do oceano para o continente — em geral, de quadrante Sul advindo de sistemas frontais (ARMOND, 2014;

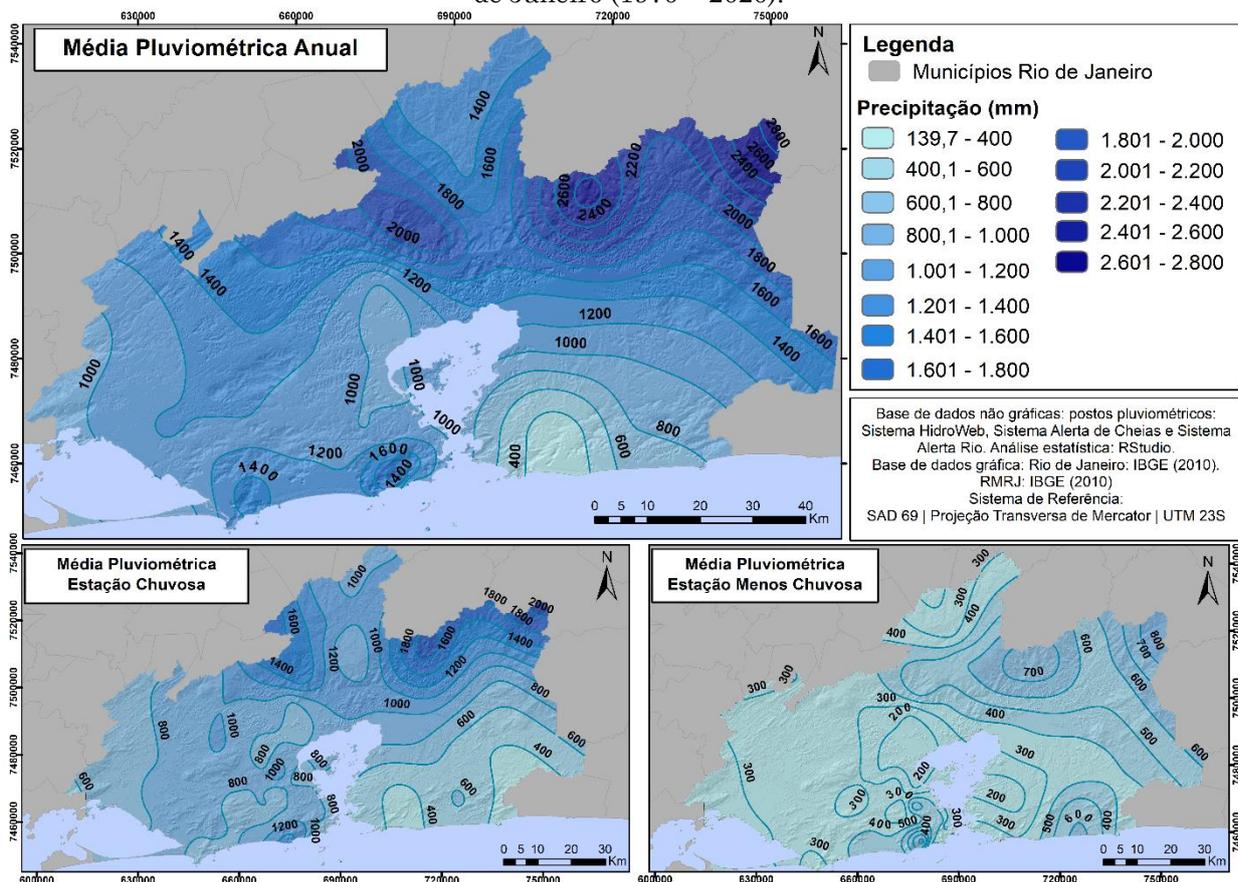
NIMER, 1979) e do sistema de brisas local (DERECZYNSKI et al., 2009). As abruptas rupturas de cotas altimétricas e declividade da encosta favorecem a ascensão orográfica do ar que acarreta em seu resfriamento adiabático e, em vista da elevada umidade relativa e da velocidade da ascensão, pode criar condições convectivas potenciais para a geração de chuvas.

À vista disso, identifica-se à barlavento da Escarpa Serrana (6) e dos Maciços (1, 2 e 4) maiores valores médios de precipitação, favorecida pelos ventos de quadrante Sul, habituais na RMRJ pela sua extensão longitudinal litorânea que propicia uma incursão de umidade pelo domínio do sistema de

brisas e dos sistemas frontais (DERECZYNSKI et al., 2009). Essa dinâmica ocorre: a) no Leste Metropolitano, com média anual de precipitação entre 1250 a 2600 mm, e b) no Rio de Janeiro, à barlavento dos Maciços da Pedra Branca e da Tijuca, de médias entre 1200 e 1800 mm (Figura 2).

Nas áreas de baixada (Figura 1), à sotavento das altas topografias, há a diminuição gradual das chuvas pelo efeito de sombra de chuva. Destaca-se a baixada da Guanabara e Sepetiba, com médias pluviométricas anuais entre 900 e 1200 mm, com médias inferiores à 1000 mm nos postos Penha (28) e Piedade (29), no município do Rio de Janeiro (Figura 2).

Figura 2 - Distribuição espacial das médias pluviométricas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (1970 – 2020).



Fonte: Os autores (2021).

No aspecto sinótico, a atuação de sistemas de baixa troposfera, como as massas de ar e os sistemas frontais – sobretudo Frentes Frias -, juntamente com sistemas atmosféricos singulares tais quais a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) – associada à Massa Equatorial Continental -, as linhas de instabilidade tropical, que acompanham as Frentes Frias, e o Anticiclone Semifixo do

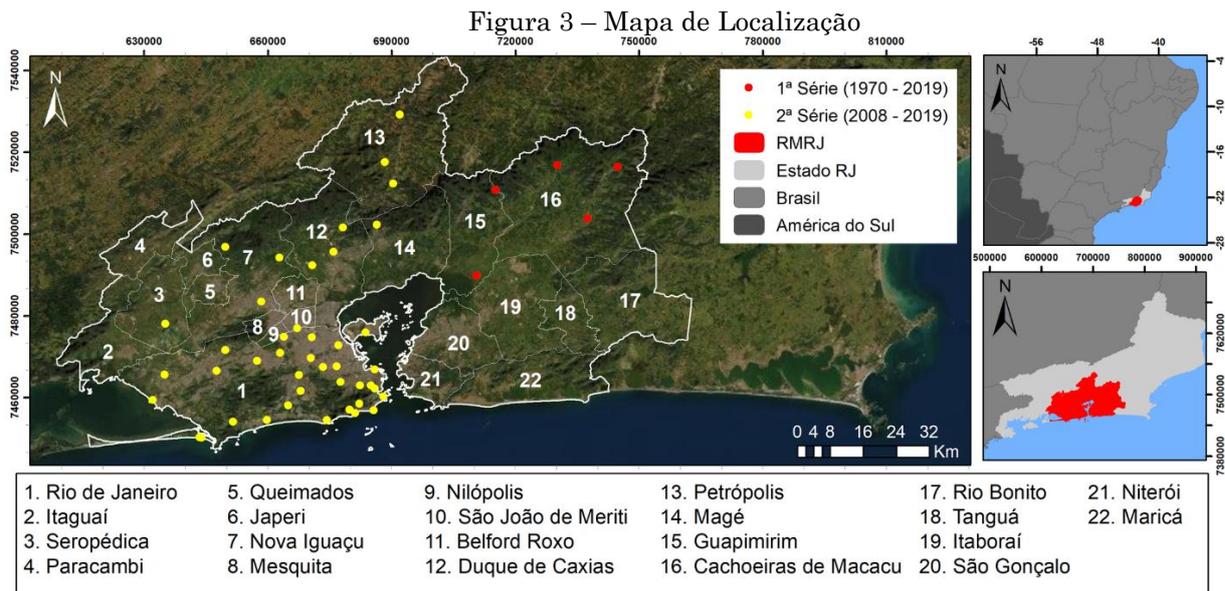
Atlântico Sul (ASAS) exprimem a complexa dinâmica climática produzida na região (NIMER, 1979; SANT'ANNA NETO, 2005). Os sistemas atmosféricos supracitados ditam a sazonalidade climática regional, de maneira que, ao entrar em contato com os fatores geográficos locais, propicia a variabilidade espaço-temporal da precipitação na RMRJ.

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Foram empregados dados quantitativos relativos à precipitação diária, obtidos: a) no portal *HidroWeb – Sistemas de Informações Hidrológicas* da Agência Nacional de Águas (ANA); b) em estações telemétricas do Sistema de Alerta de Cheias do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), c) no Sistema de Alerta de Chuvas da Prefeitura do Rio de Janeiro (Alerta Rio) e d) do Instituto Nacional de Meteorologia. No total, 48 postos pluviométricos foram escolhidos, localizados nos municípios do Rio de

Janeiro, Duque de Caxias, São João de Meriti, Nova Iguaçu, Seropédica, Cachoeiras de Macacu, Magé, Guapimirim e Petrópolis, seguindo os critérios definidos por Goudard (2019)

A consistência de dados como é uma dificuldade para os estudos em Climatologia, em razão da necessidade do uso de séries históricas confiáveis. Portanto foram estabelecidas duas séries históricas: uma de maior extensão histórica, envolvendo anos entre 1970 e 2019, com 8 postos pluviométricos; e outra mais curta temporalmente, porém com 40 postos, entre os anos de 2008 a 2019.

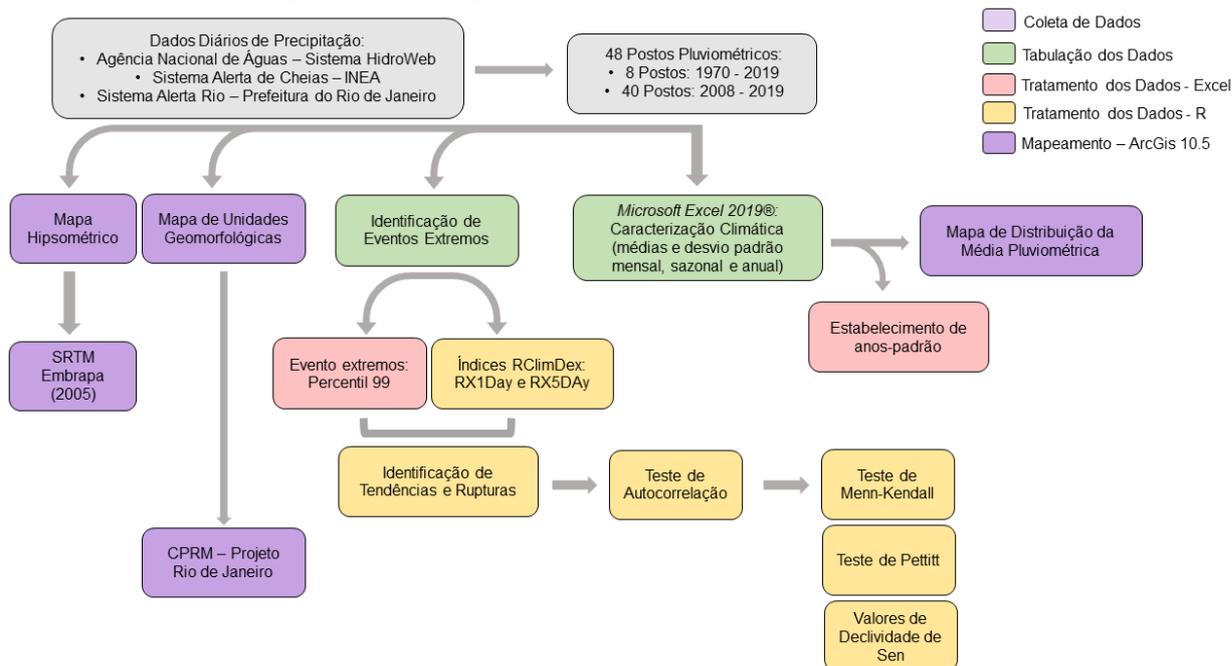


Fonte: Os autores (2021).

A técnica de percentis, aplicada para todos os postos pluviométricos, foi empregada para o estabelecimento de anos-padrão, com a delimitação dos percentis 1, 10, 90 e 99, como também para definição dos eventos extremos diários, pelo limiar do percentil 99. Para definição de extremos, os índices do ETCCDI

foram gerados usando os dados diários: o máximo de precipitação em 24 horas (RX1day) e máximo de precipitação em cinco dias (RX5day), realizados no software R, por meio do pacote *RClimDex*.

Figura 4 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos



Fonte: Os autores (2021).

No tratamento dos dados, teste de autocorrelação foi anteriormente aplicado aos teste de Mann-Kendall, pelo uso do pacote *ACFMperiod* em ambiente R. No caso de autocorrelação, utilizou-se o Teste de Mann-Kendall modificado, pelo pacote *MODIFIEDMK*, que não considera a tendência interna-natural da série temporal na tendência de Mann-Kendall.

Para as tendências, também no software R, aplicou-se os testes não-paramétricos de Mann-Kendall e do valor de declividade de Sem, pelo pacote *trend*, para verificar a existência de tendência estatisticamente significativa dos eventos extremos e para avaliar a magnitude da tendência, respetivamente. O teste de Pettitt também foi aplicado para apurar a significância de uma ruptura nos dados de extremos nas séries históricas. Utilizou-se intervalo de confiança de 95% em todos os testes.

Gráficos foram gerados no software *Microsoft Excel 2019®* e no software *Surfer 16*. Os mapas foram confeccionados no software *ArcGis 10.5*. A representação espacial dos dados de precipitação foi feita por meio do método de interpolação *Spline Tension*, no software *ArcGis* (SOARES; FRANCISCO, 2014).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização e variabilidade temporal da precipitação

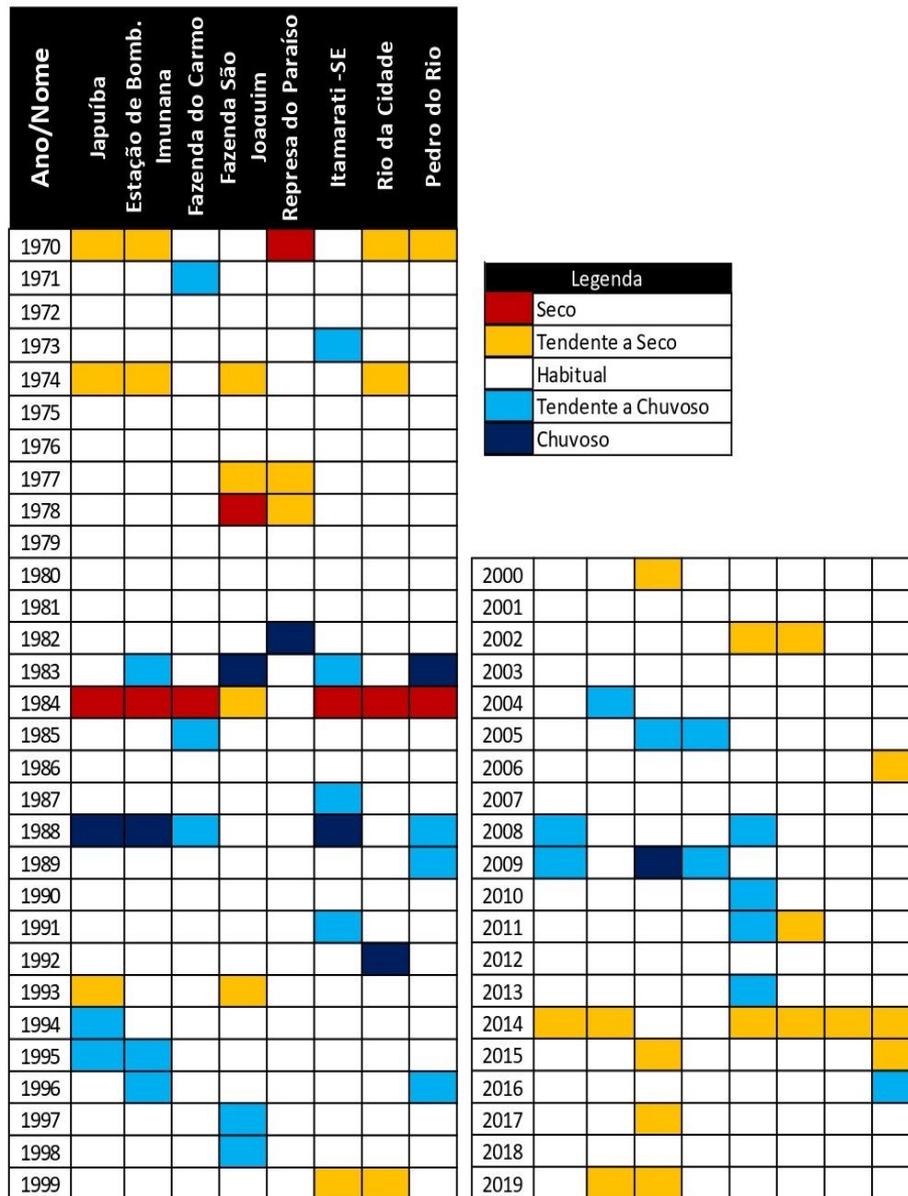
A caracterização temporal da precipitação será decomposta em dois recortes analíticos, posto as distintas dinâmicas de variabilidade e teleconexões que implicam os fenômenos que neles ocorrem: recorte interanual, alicerçado sobre a análise dos anos-padrão; e recorte sazonal, com base na estatística descritiva. Ambas as observações divididas nas duas séries temporais utilizadas.

No recorte interanual, os anos-padrão destacam 1970 (com exceção de Fazenda do Carmo, Fazenda São Joaquim e Itamarati), 1974 (exceção de Fazenda do Carmo, Represa do Paraíso e Itamarati), 1984 (exceção de Represa do Paraíso), 1984 (exceção de Represa do Paraíso) e 2014 (exceção de Fazenda do Carmo e Fazenda São Joaquim) como anos secos. Para os chuvosos, evidência para os anos de 1982 (chuvoso para Represa do Paraíso), 1983 (para Estação de Bombeamento de Imunana, Fazenda São Joaquim, Itamarati e Pedro do Rio), 1988 (Japuiba, Estação de Bombeamento de Imunana, Fazenda do Carmo, Itamarati e Pedro do Rio), 1992 (Rio da Cidade) e 2009 (Japuiba, Fazenda do Carmo e Fazenda São Joaquim) que manifestaram ao menos um dos postos pluviométricos utilizados como chuvoso ou tendente a chuvoso (Figura 5). Ressalta-se,

também, a década entre 1982 e 1992, significativamente chuvosa com base nos anos-padrão. Os demais anos apresentaram um

padrão habitual de precipitação, na maior parte dos postos.

Figura 5 - Anos-padrão na 1ª série temporal (1970-2019)

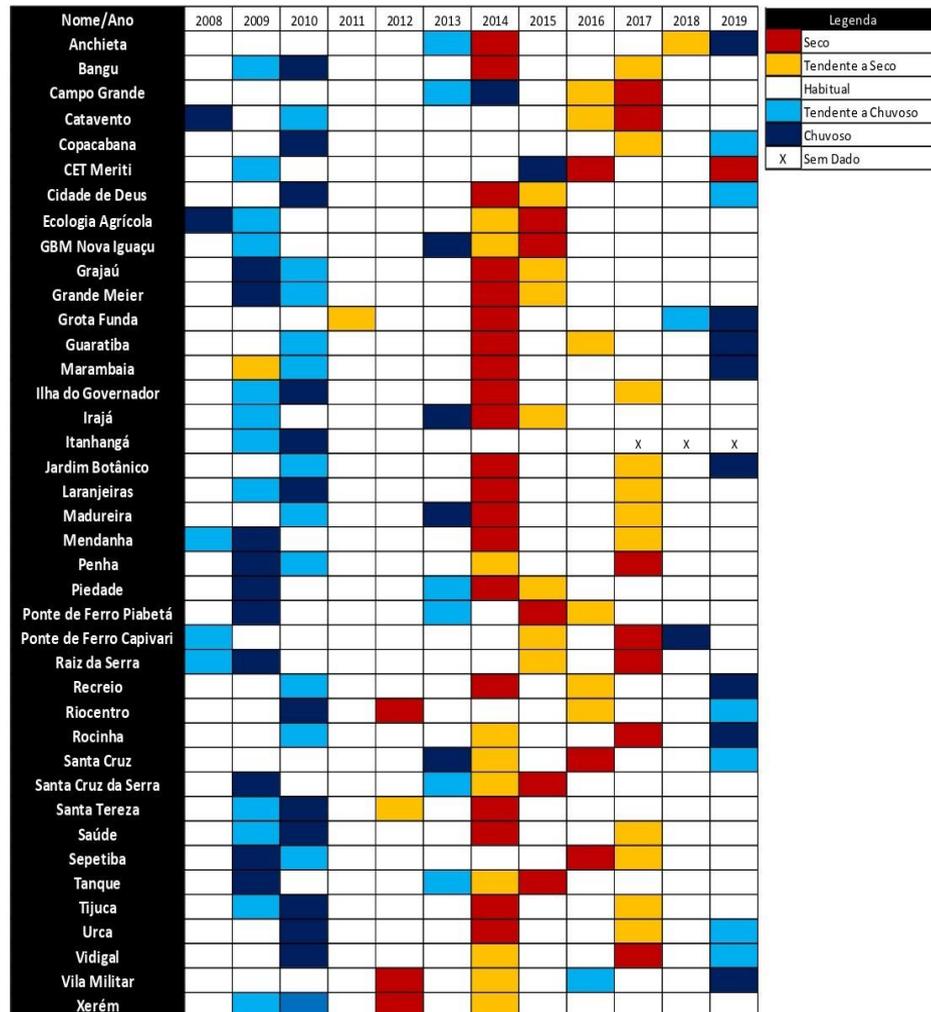


Fonte: Os autores (2021).

Para a 2ª série temporal (2008 a 2019), 2014 se sobressai como ano seco, posto que 30 postos pluviométricos – dos 40 analisados – manifestam-se como tendente a seco ou seco, com exceção de Campo Grande que se apresenta chuvoso (Figura 6). 2015, 2016 e 2017 também

registram postos significativos com tendência a seco e/ou seco, mas com menor expressão espacial. Para os chuvosos, 2009 e 2010 se destacam, com tendência a chuvoso e/ou chuvoso em 22 e 24 postos pluviométricos, respectivamente.

Figura 6 – Anos-padrão na 2ª série temporal (2008-2019)



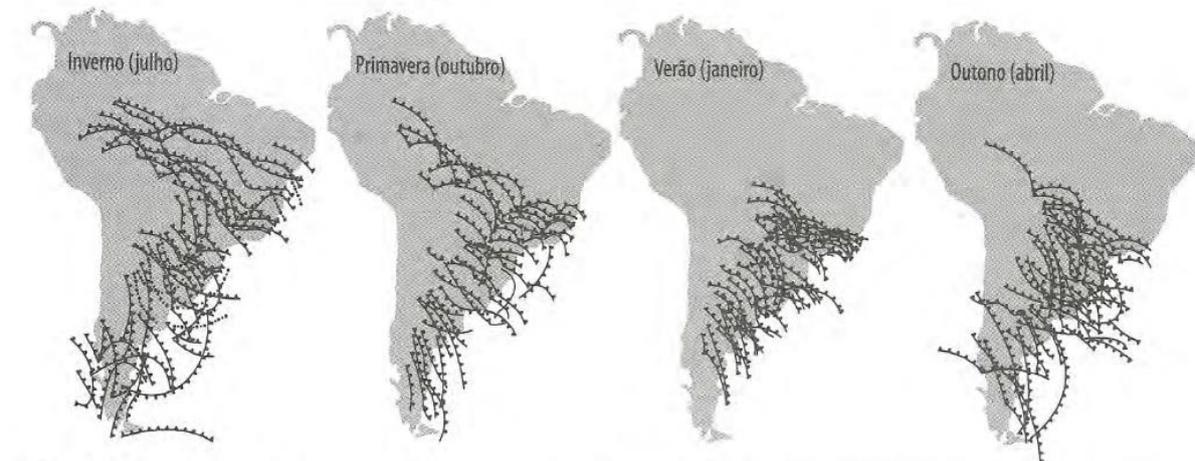
Fonte: Os autores (2021).

Sabe-se que os modos de variabilidade e teleconexões são um dos aspectos que explicam a variabilidade interanual da precipitação supracitada, ao exemplo do El Niño Oscilação Sul (ENOS). Nota-se que os anos com registro de episódios fortes de El Niño (INPE, 2020) tiveram ao menos um posto pluviométrico como tendente a chuvoso e/ou chuvoso. É o caso de 1972/73 (Itamarati), 1982/83 (Represa do Paraíso, Estação de Bombeamento de Imunana, Fazenda São Joaquim, Pedro do Rio), 1987/88 (Itamarati, Japuiba, Estação de Bombeamento de Imunana, Fazenda do Carmo, Itamarati e Pedro do Rio) e 1997/98 (Fazenda São Joaquim).

No recorte sazonal, a dinâmica de precipitação da RMRJ é definida por duas estações: estação chuvosa, de novembro a abril (que corresponde a 71% do total de precipitação), e estação menos chuvosa, de maio a outubro (29%), períodos estabelecidos a partir dos postos estudados, e que corroboram com Nimer (1979) e Sant'Anna Neto (2005).

Essa concentração de precipitação ocorre pelo fortalecimento do Anticiclone Semifixo do Atlântico Sul (ASAS) e com enfraquecimento do Anticiclone Polar no verão austral, que restringe o avanço da Massa Polar Atlântica para latitudes mais elevadas e permite a formação de diversos sistemas frontais sobre o Rio de Janeiro (ARMOND; SANT'ANNA NETO, 2017). Os sistemas frontais, acrescido das condições convectivas e características geomorfológicas locais, e de potenciais episódio da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (AGUIAR, 2018; DE QUADRO et al., 2016; SANT'ANNA NETO, 2005) provocam intensas chuvas na primavera/verão. Assim, janeiro é o mês com maior concentração de precipitação ao longo do ano, com 14,2% do volume total de precipitação anual, seguido por março e dezembro, correspondendo a 13,2% e 12,7%, respectivamente.

Figura 7 - Variação espacial da ocorrência de frentes frias e frentes quentes ao longo do ano, nas quatro estações, na América do Sul.



Fonte: Monteiro (1969) *apud* Mendonça e Danni-Oliveira (2017).

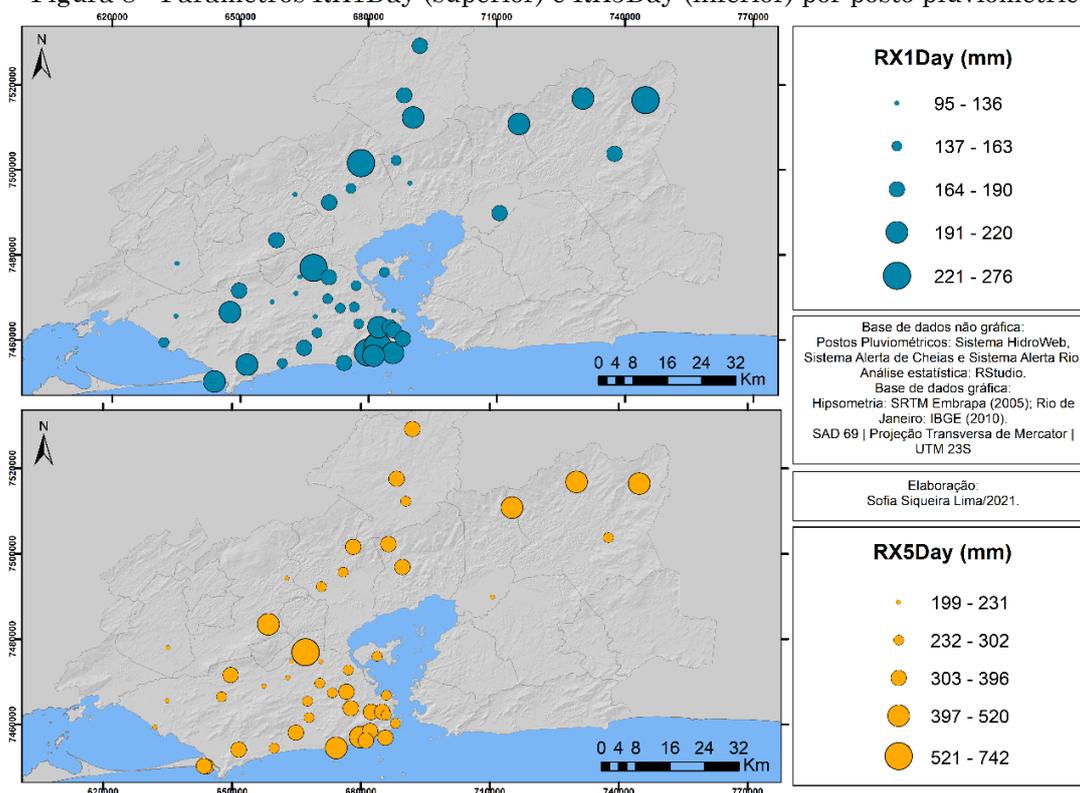
A partir de abril, mês de transição entre sistemas atmosféricos atuantes, a fragilidade do bloqueio do Anticiclone Polar acarreta em uma diminuição do acumulado de precipitação sobre a RMRJ, que demarca o início da estação menos chuvosa. Por isso, as chuvas de agosto e julho equivalem a 3,2% e 3,8% do volume total precipitado na série histórica.

Eventos extremos

RClimDex

O uso dos parâmetros gerados pelo pacote RclimDex confere a identificação de *eventos concentrados*, máximo mensal de chuva acumulada em um dia (RX1Day) e *persistentes*, máximo mensal de chuva acumulada em 5 dias (RX5Day) (GOUDARD, 2019). Será exposto uma análise espacial e temporal – interanual e sazonal – dos eventos concentrados e persistentes.

Figura 8 - Parâmetros RX1Day (superior) e RX5Day (inferior) por posto pluviométrico.

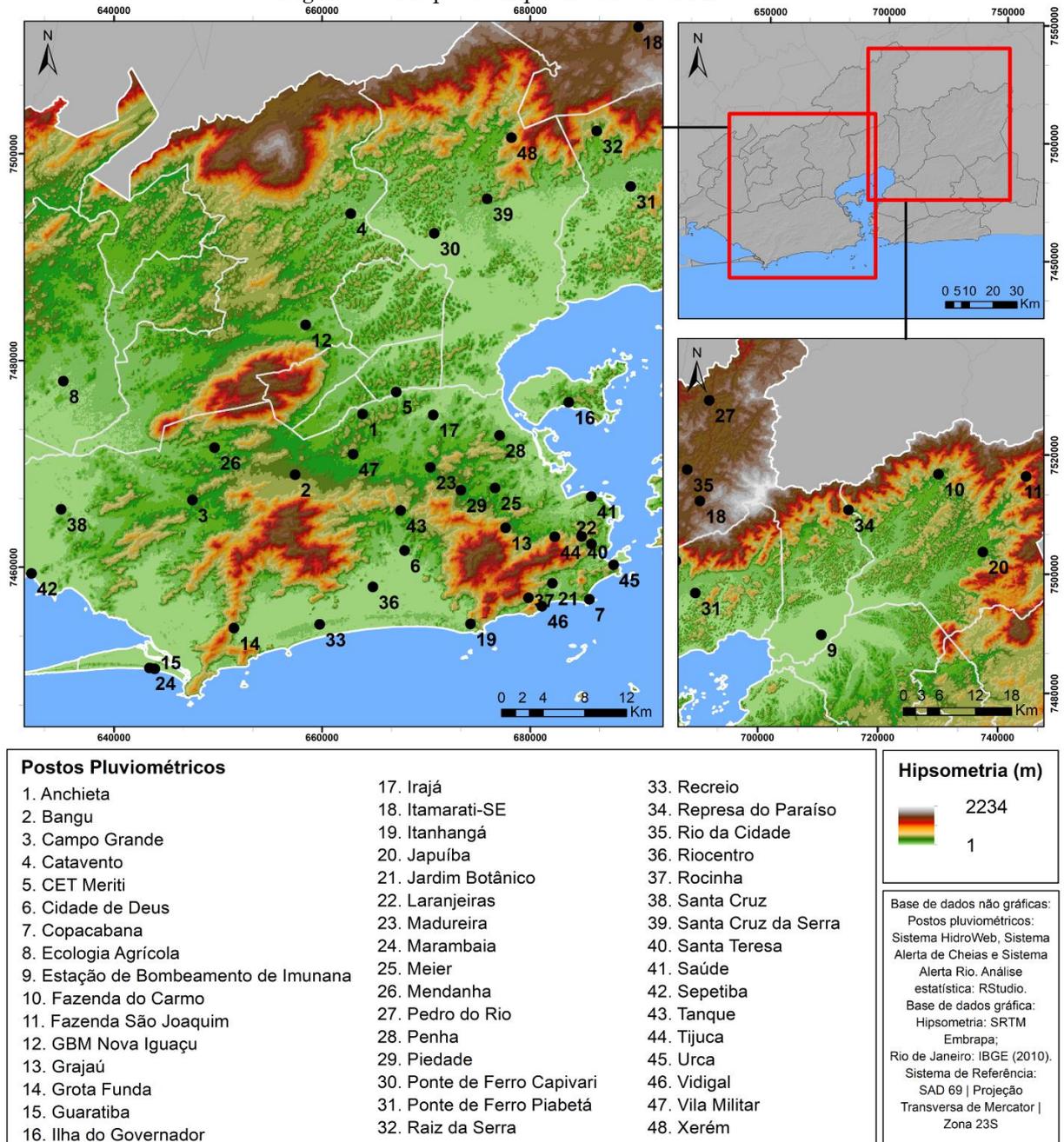


Fonte: Os autores (2021).

Os postos com maiores valores de eventos concentrados localizam-se à barlavento da escarpa serrana, com registro de eventos de 204,2 mm (1976), 224 mm (2009), 216 mm (2009) e 275,8 mm (2016) (Figura 8) em 24 horas. Os postos situados à barlavento dos maciços costeiros apresentam valores significativos de RX1Day, com destaque para Rocinha, Jardim

Botânico e Copacabana com um total de chuva acumulada de 241,2 mm (2010), 239 mm (2010) e 218 mm (2019). Os menores valores de eventos concentrados foram registrados em postos da baixada da Guanabara e Sepetiba, com valores inferiores a 130 mm, como nos postos Santa Cruz, Bangu, Vila Militar, Anchieta e Irajá.

Figura 9 – Mapa de Hipsometria da RMRJ



Fonte: Os autores (2021).

Relativo aos eventos persistentes, os maiores acumulados em 5 dias registram-se também no Leste Metropolitano, à barlavento da escarpa serrana, com mais de 500 mm. Apesar dos postos à barlavento do Maciço da Tijuca apresentarem

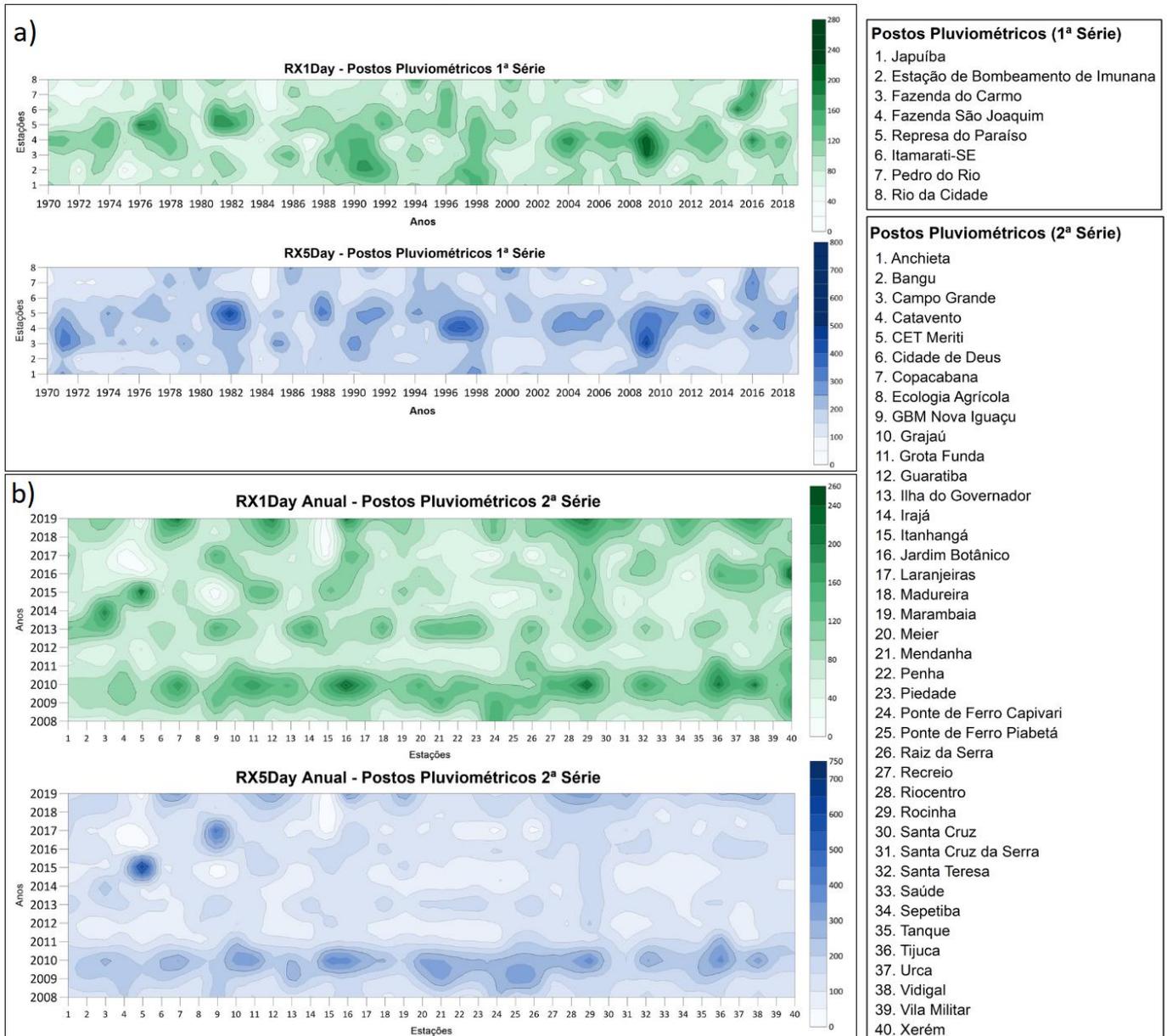
valores altos para eventos concentrados, os eventos persistentes não se mostram tão expressivos quando comparado aos postos do Leste Metropolitano. Nesta área, os postos Rocinha e Jardim Botânico são os que

apresentaram eventos persistentes mais expressivos, registrando 415,2 mm e 395,8 mm em 2010.

Na variabilidade temporal, é possível perceber uma correspondência da ocorrência de eventos concentrados e persistentes de maiores magnitudes nos anos que se mostram chuvosos

ou tendente à chuvosos na análise dos anos-padrão. Os anos de 1982, 1983, 1988, 1992, 2009 e 2010, classificados como chuvosos para, pelo menos, um posto pluviométrico da 1ª série temporal, manifestaram eventos concentrados e persistentes de intensidade histórica (Figura 10).

Figura 10 - Paineis espaço-temporais dos parâmetros anuais do RCLimDex: a) 1ª série histórica (1970-2019); b) 2ª série histórica (2008-2019)



Fonte: Os autores (2021).

Contudo, nem sempre um extremo concentrado em 24 horas resulta em um evento persistente de mesma magnitude, e como também o contrário. Entre 1988 e 1992, por exemplo, mais da metade dos postos pluviométricos da 1ª série temporal manifestaram eventos concentrados de alta

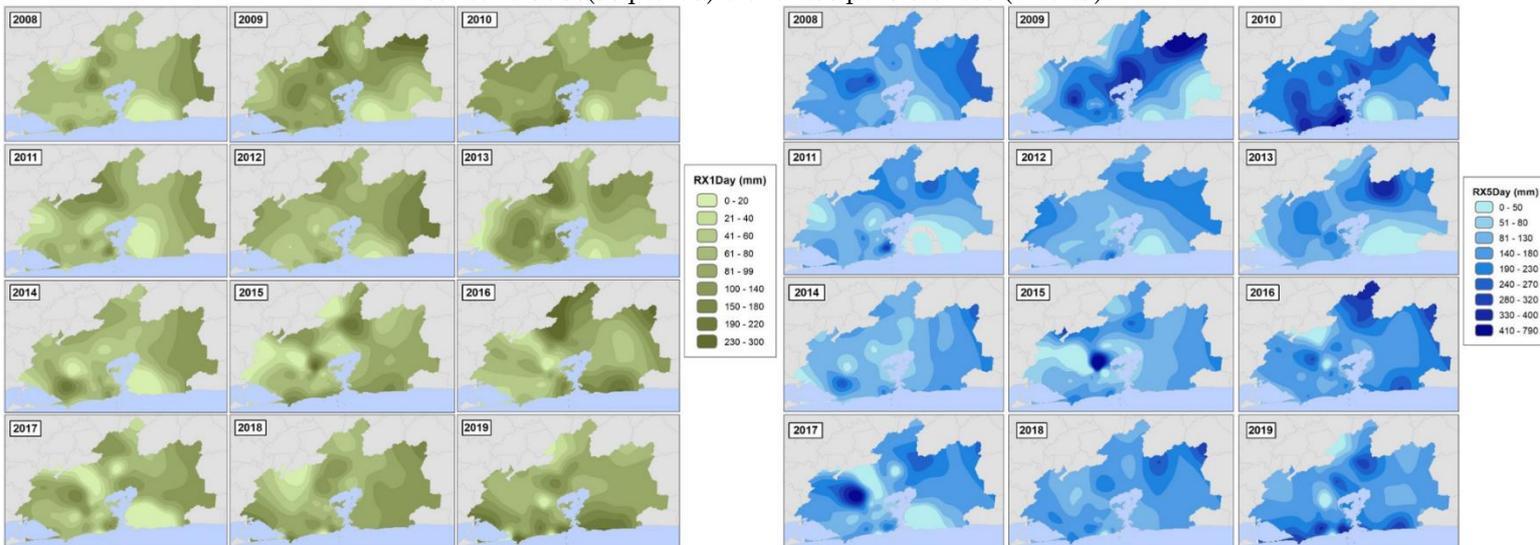
magnitude, enquanto não foram constatados extremos persistentes igualmente expressivos.

Na distribuição espacial da variabilidade interanual dos extremos concentrados e persistentes (Figura 11), observa-se que o mesmo padrão: as zonas à barlavento da escarpa serrana e dos maciços da Tijuca e Pedra Branca são áreas de registro de extremos de chuva de

alta magnitude. Assim, fica nítido a influência da orografia na distribuição da precipitação,

impactando também na espacialização dos extremos.

Figura 11 - Distribuição temporal (2008 – 2019) da magnitude máxima anual de eventos concentrados(esquerda) e eventos persistentes (direita).



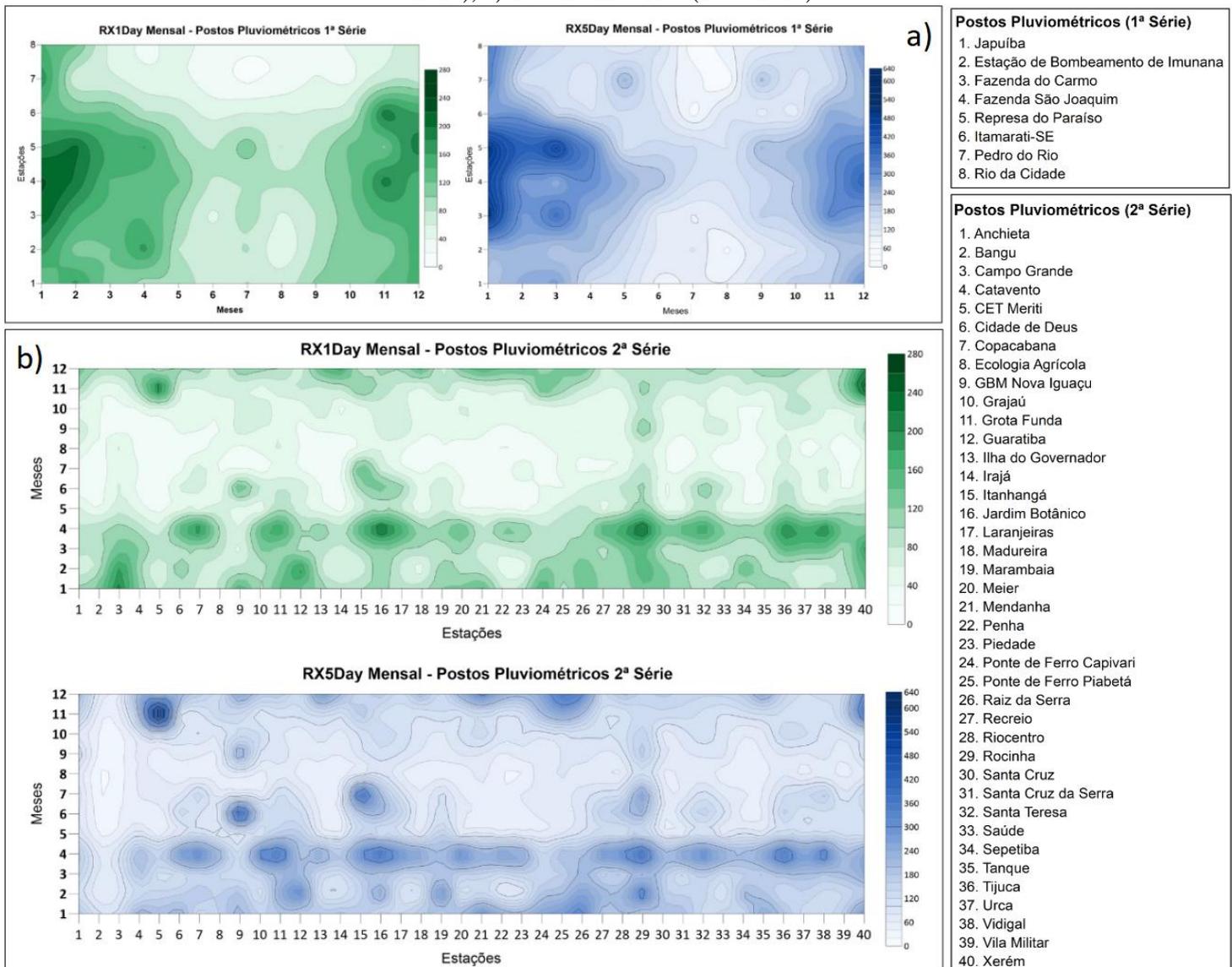
Fonte: Os autores (2021).

Na variabilidade sazonal, os meses da estação chuvosa manifestam os extremos concentrados e persistentes de maiores magnitudes na maior parte dos postos pluviométricos, especialmente nos meses de dezembro, janeiro e abril (Figura 12). Estudos sobre circulação atmosférica do Rio de Janeiro associados à ocorrência de chuvas extremas apontam que os sistemas frontais são essenciais na gênese destes (DERECZYNSKI, 2009; MOURA et al., 2013; NIMER, 1979; ARMOND; SANT'ANNA NETO, 2017; SILVA; DERECZYNSKI, 2014), o que pode explicar a

alta ocorrência de eventos extremos neste período do ano.

Vale salientar que abril, um mês de transição na dinâmica sinótica regional ao conduzir para a diminuição da precipitação, identifica eventos concentrados e persistentes de maiores magnitudes nos postos da série temporal de 1970 a 2019. Nesse sentido, pode inferir que a distribuição da precipitação em abril é concentrada, em razão do menor acumulo médio de chuvas, em comparação aos demais meses da estação chuvosa, acompanhado de extremos de maiores magnitudes registrados.

Figura 12 - Painel espaço-temporal dos parâmetros mensais do RClimDex: a) 1ª série histórica (1970-2019); b) 2ª série histórica (2008-2019)



Fonte: Os autores (2021).

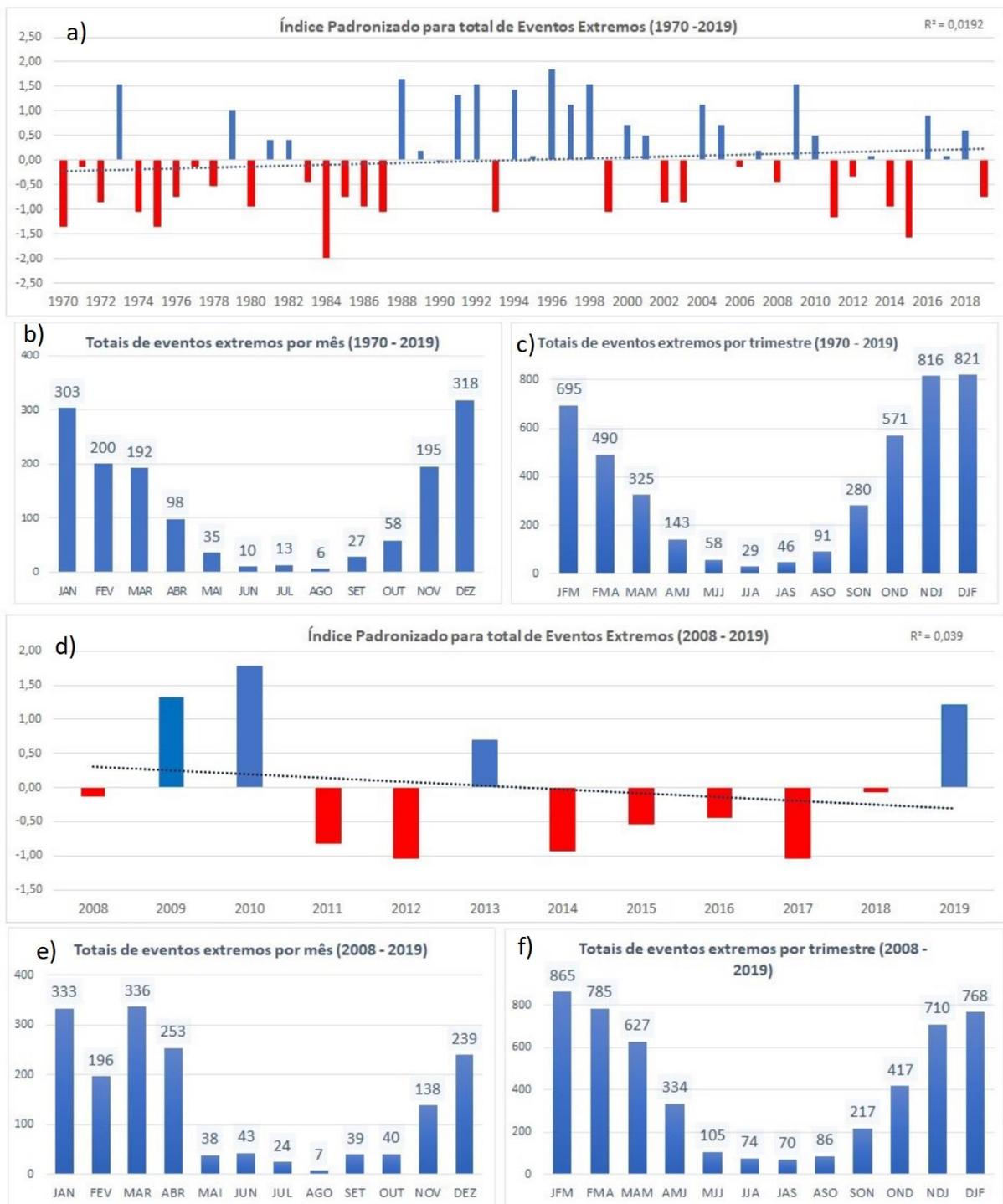
Percentis

Nesta seção, será analisada a variabilidade temporal da frequência de extremos seguindo, novamente, os recortes interanual e sazonal. A análise do percentil 99, aplicada para cada um dos 48 postos pluviométricos utilizados, fornece reflexões acerca da frequência dos extremos de precipitação.

Na variabilidade interanual, pode-se identificar três ciclos de tendências para a série de 1970 a 2019 (Figura 13a). O primeiro ciclo inicia na década de 1970 até 1987, podendo ser identificada uma frequência menor de extremos em relação à média de ocorrência. Destaque para 1984, ano com menor ocorrência de extremos com apenas 10 eventos. O segundo ciclo de 1988 a 2001 manifesta ocorrências acima da média

temporal, registrando anos com mais de 40 eventos externos registrados, ratificando estudos sobre a variabilidade anual de extremos (ARANHA; BRANDÃO, 2007; BRANDÃO, 1997; DEREZYNSKI et al. 2013) que destacam 1996 e 1998 com temporais de grande intensidade e que “permanecem na memória do carioca contemporâneo como verdadeiras calamidades” (BRANDÃO, 1997). O terceiro ciclo, de 2002 a 2019, não identifica um padrão homogêneo na frequência dos extremos, com anos de intensa (2009) e baixa (2015) ocorrência de extremos, anos estes identificados como tendente à chuvoso e seco, respectivamente. Os dados da 2ª série histórica (2008 a 2019) (Figura 13d) corroboram com o terceiro ciclo identificado anteriormente, com destaque para os anos de 2009 e 2010 com ocorrências positivas em relação à média.

Figura 13 - Distribuição temporal dos eventos extremos (P99) para 1ª série histórica (1970-2019): a) Índice Padronizado Anual; b) Acumulado Mensal; c) Acumulado Trimestral; e para 2ª série histórica (2008-2019): d) índice Padronizado Anual; e) Acumulado Mensal; f) Acumulado Trimestral.



Fonte: Os autores (2021).

Observa-se, assim, uma relação imediata entre a frequência de extremos e sua classificação dos anos-padrão, ao caso dos anos de 1988 e 2009, anos-padrão chuvoso para pelo menos um posto pluviométrico, e com alta ocorrência de eventos pluviométricos extremos. A respeito da relação entre frequência (percentil) e magnitude (RClmDex), anos com alta

frequência de extremos, como 1973, 1988, 1996, 1998, 2009 e 2010, manifestaram eventos concentrados e persistentes de elevada magnitude.

Concernente à distribuição **sazonal**, a estação chuvosa registra maior frequência de eventos extremos, e também maior concentração de eventos concentrados e persistentes de maior

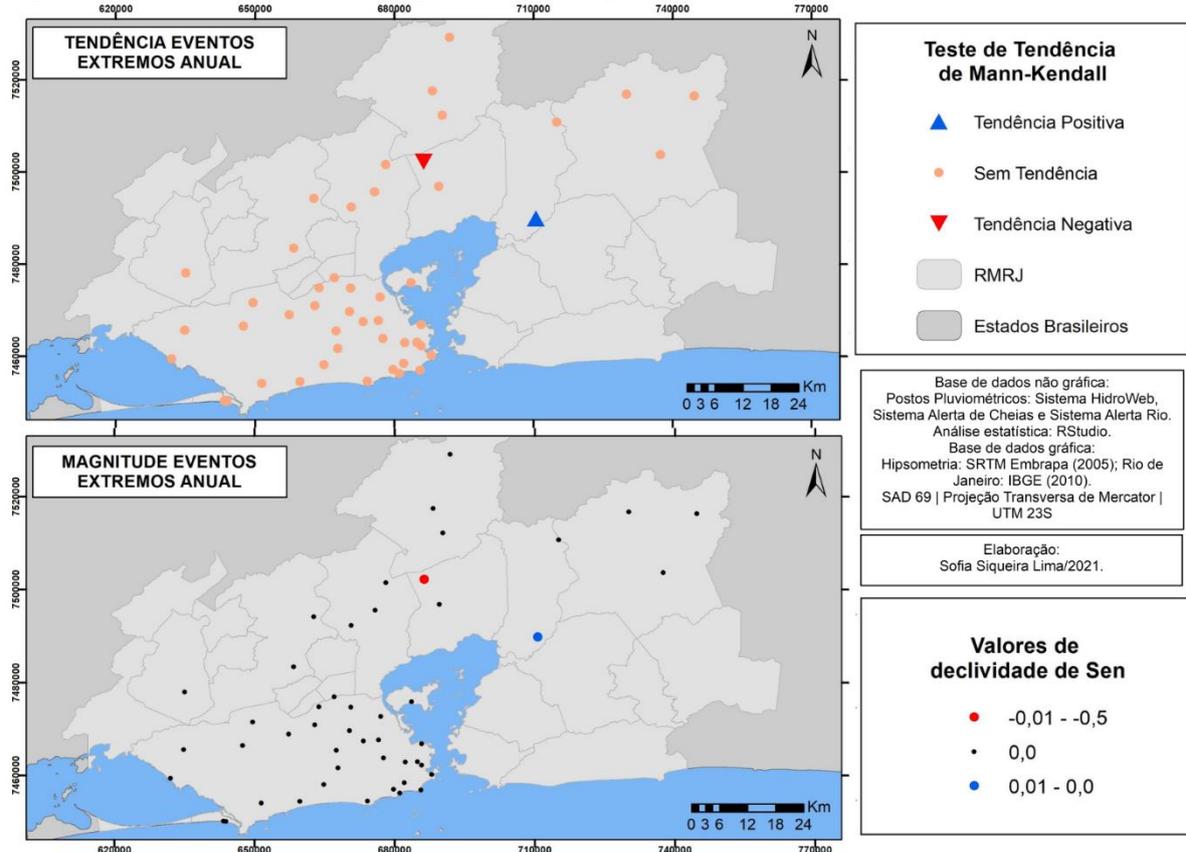
magnitude. Na 1ª série temporal (1970-2019), os meses de maior frequência de ocorrência de extremos (Figura 13b) correspondem aos meses dos eventos de maior magnitude – no caso dezembro e janeiro -, com registro de totais acumulados de 223,90 mm (Fazenda São Joaquim) em 24 horas, e total acumulado em 5 dias de 519,80 mm (Fazenda do Carmo) em janeiro. Para a 2ª série temporal, a mesma relação não pode ser estabelecida, porque, apesar de janeiro e março registrem mais ocorrência de

extremos (Figura 13e), abril manifestou eventos concentrados e persistentes de maior magnitude.

Tendências

Concernente ao total de eventos extremos por ano, foi verificada tendência de aumento de frequência de extremos na porção leste da Baía de Guanabara, e negativa à norte desta unidade geomorfológica, nas proximidades da escarpa serrana (Figura 14).

Figura 14 -Teste de tendência (superior) e de magnitude (inferior) para o total de eventos extremos

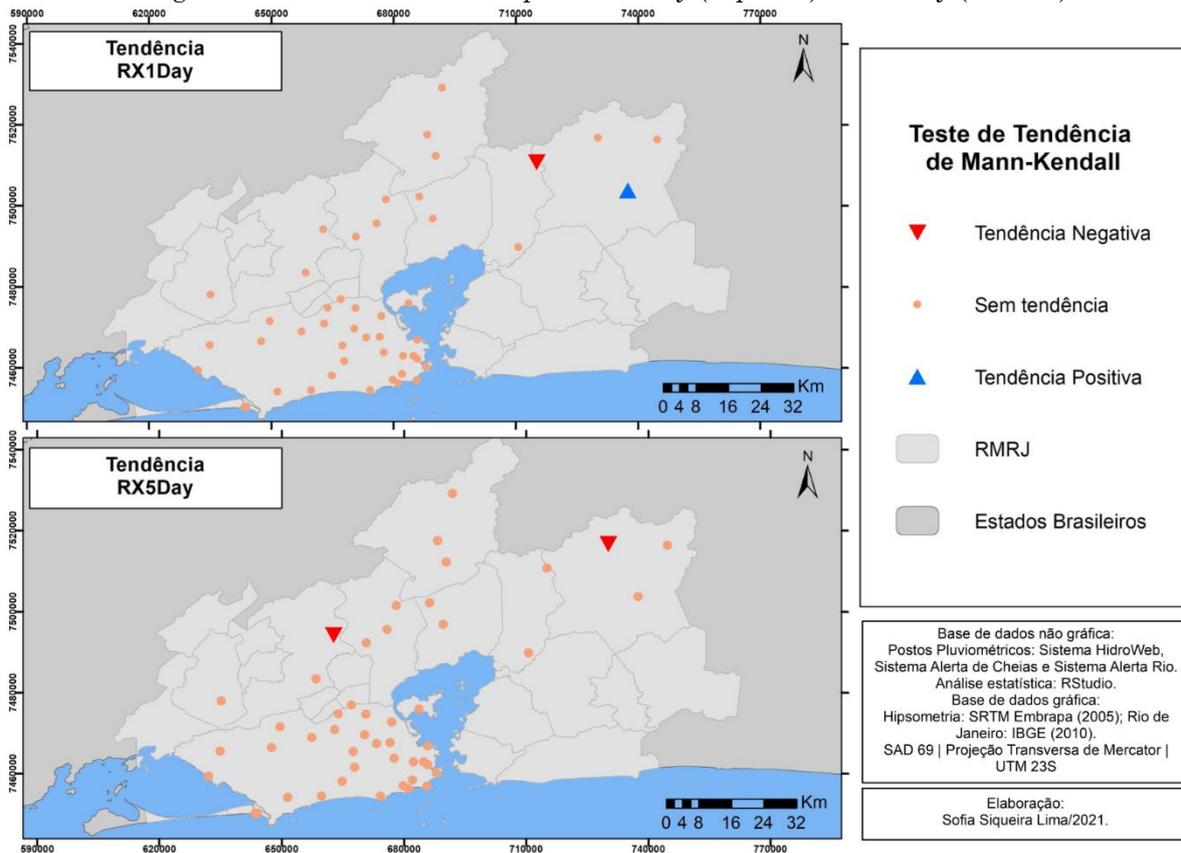


Fonte: Os autores (2021).

Para os eventos concentrados, o Leste Metropolitano manifesta tendência positiva nas proximidades da baixada da Guanabara, e negativa na escarpa serrana. Para os eventos

persistentes, foram identificadas duas tendências de diminuição da intensidade desses eventos, à nordeste e à noroeste da RMRJ.

Figura 15 -Teste de tendência para RX1Day (superior) e RX5Day (inferior)



Fonte: Os autores (2021).

Os postos pluviométricos utilizados, o uso destas séries históricas que englobam dinâmicas climáticas particulares, bem como a metodologia aplicada são fatores que podem explicar os resultados encontrados. Ademais, a literatura demonstra que as tendências para chuvas são menos significativas e tem um padrão espacial menos definidos quando comparado às tendências de temperatura, em vista da maior variabilidade espacial e temporal da natureza dos dados de precipitação (BEZERRA et al, 2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Fundamentado por uma abordagem dinâmica do clima pela matriz teórico-metodológica da Climatologia Geográfica de Monteiro, o espaço, compreendido como um espaço relativo, foi estruturante no desenvolvimento deste trabalho em vista da possibilidade de incorporação de elementos espaciais na interpretação dos eventos extremos de precipitação. O entendimento do fenômeno de modo relacional, associando-o aos elementos que compõe a RMRJ, propõe pensar geograficamente os eventos extremos.

Para a variabilidade espacial, fica evidenciado que a altitude, orientação das vertentes e a maritimidade são elementos espaciais essenciais na variabilidade da distribuição das chuvas na região. As áreas à barlaventos das altas altitudes – escarpa serrana e maciços interiores e costeiros – registram os maiores volumes de chuvas, como também os extremos de maior magnitude, enquanto as áreas a sotavento dessas unidades geomorfológicas e sobre as baixadas apresentam volumes precipitados significativamente inferiores.

Na variabilidade temporal, o recorte interanual demonstrou que que 1988 e 2009, anos-padrão chuvoso para, no mínimo, um posto pluviométrico, foram anos que apresentaram elevada frequência de extremos, e eventos concentrados e persistentes de intensa magnitude. No oposto, 1984 foi um ano-padrão seco (em 6 dos 8 postos pluviométricos da 1ª série) e apresentou eventos de menor intensidade, concentrados e persistentes, assim como teve menor frequência de eventos, considerando o percentil 99.

Na variabilidade sazonal, aproximadamente 90% dos extremos ocorreram nos meses da estação chuvosa (novembro a abril), com destaque para dezembro, janeiro e março.

Relativo à magnitude, dezembro e janeiro manifestam eventos concentrados e persistentes de altas magnitudes, mas abril apresenta a maior quantidade de postos pluviométricos com os eventos mais intensos, que demonstra a concentração das chuvas neste mês.

A respeito das tendências, foram identificadas 6 tendências - 4 negativas e 2 positivas - contabilizando as três variáveis aplicadas. As tendências foram manifestadas nas porções nordeste, norte e noroeste da RMRJ.

O presente artigo buscou, assim, caracterizar a dinâmica pluviométrica da Região Metropolitana do Rio de Janeiro, com destaque para a análise da variabilidade espacial e temporal das chuvas e dos eventos extremos na região. Portanto, a complexidade que se dá ao fenômeno dos eventos extremos de precipitação não está apenas em seu caráter estritamente físico-atmosférico, mas também no espaço - repleto de complexidades - em que este se materializa. Por isso a importância de considerar, ao analisar a gama de índices utilizados neste artigo, os fatores geográficos que afetam e configuram as chuvas que caem sobre a RMRJ.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem aos pareceristas desta Revista pelas considerações realizadas; ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) pela concessão da bolsa de iniciação científica; e ao Laboratório de Estudos e Pesquisas em Geografia do Clima (GeoClima/UFRJ).

FINANCIAMENTO

Financiamento através do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), sob projeto "Estudo do Sistema Clima Urbano do Rio de Janeiro - RJ" - Processo 157688/2021-6.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, M. de A. **Evolução urbana no Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: IPLANRIO/Zahar, 1987.
 AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Rede Hidrometeorológica Nacional. Sistema HidroWeb,

2020. Disponível em: <
<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>
 >. Acesso em: 04 de julho de 2020

AGUIAR, L. de F. **Vulnerabilidade socioambiental na região sudeste do Brasil associada à configuração da ZCAS**. 2018. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Recursos Hídricos e do Meio Ambiente) - Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, 2018.

ARANHA, R.I de C.; BRANDÃO, A. M. de P. M. **Os extremos pluviométricos cariocas**. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo, 2007.

ARMOND, N. B.; SANT'ANNA NETO, J. L. **Entre eventos e episódios: ritmo climático e excepcionalidades para uma abordagem geográfica do clima no município do Rio de Janeiro**. Revista Brasileira de Climatologia, v. 20, 2017. <https://doi.org/10.5380/abclima.v20i0.49792>

ARMOND, N. B.; SANT'ANNA NETO, J. L.. The Urban Climate System and the Impacts of Flooding on Rio de Janeiro, Brazil. In: **Urban Climates in Latin America**. Springer, Cham, 2019. p. 259-280. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97013-4_10

ARMOND, N. B. **Entre eventos e episódios: as excepcionaisidades das chuvas e os alagamentos no espaço urbano** do Rio de Janeiro. 2014. xx, 239 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/124041>. Acesso em: 01 de fevereiro de 2021

ARMOND, N. B. **Dinâmica climática, excepcionaisidades e vulnerabilidade: contribuições para uma classificação geográfica do clima do estado do Rio de Janeiro**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/154354>. Acesso em: 27 de agosto de 2021

BEZERRA, B. G. et al. Changes of precipitation extremes indices in São Francisco River Basin, Brazil from 1947 to 2012. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 135, n. 1, p. 565-576, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2396-6>

BRANDÃO, A. M. de P. M. **Tendências e oscilações climáticas na área metropolitana do Rio de Janeiro**. 1987. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1987.

BRANDÃO, A. M. de P. M. As chuvas e a ação humana: uma infeliz coincidência. In: **Tormentas Cariocas**. In: **Seminário prevenção e controle dos efeitos dos temporais no Rio de Janeiro**. Universidade Federal do Rio de Janeiro Rio de Janeiro, 1997, p.21-42.

BRANDÃO, A. M. de P. M. O clima urbano na cidade do Rio de Janeiro. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. (orgs). **Clima urbano**, São Paulo: Contexto, v.2, 2003.

BENAVIDES, H.; MAYORGA, R.; HURTADO, G. Análisis de índices de extremos climáticos para Colombia usando el RCLIMDEX. **Instituto de**

- Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales**, 2007.
- CONTI, J. B. **Circulação secundária e efeito orográfico na gênese das chuvas na região lesnordeste paulista**. Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1975.
- CRUZ, O. **A Serra do Mar e o litoral na área de Caraguatatuba: contribuição à geomorfologia tropical litorânea**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo, Instituto de Geografia. 1974.
- DE QUADRO, M. F. L.; PEZZI, L. P.; ROSA, E. B.. **O Climanálise e o monitoramento da ZCAS nos últimos 30 anos**. 2016.
- DERECZYNSKI, C.P.; OLIVEIRA, J. S. de; MACHADO, C. O. Climatologia da precipitação no município do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, n. 1, p. 24-38, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862009000100003>
- DERECZYNSKI, C.; SILVA, W. L.; MARENGO, J. **Detection and projections of climate change in Rio de Janeiro, Brazil**. 2013. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2013.21003>
- DOS SANTOS, L. A.R. et al. **Caracterização de extremos climáticos utilizando o Software RClimDex**. Estudo de caso: Sudeste de Goiás. 2006.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/satelites-de-monitoramento/missoes/srtm>>. Acesso em: 10 de agosto de 2020
- GONÇALVES, N. M. S. Impactos pluviiais e desorganização do espaço urbano em Salvador. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. (orgs). **Clima urbano**, 2003.
- GOUDARD, G. **Eventos pluviiais extremos e riscos hidrometeorológicos híbridos na Bacia do Alto Iguaçu (Paraná)**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.
- HARVEY, D. O espaço como palavra-chave. **Revista em Pauta**, n. 35, v. 13, p. 126-152, 2015. <https://doi.org/10.12957/rep.2015.18625>
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Megacidades, vulnerabilidade e mudanças climáticas: Região Metropolitana do Rio de Janeiro**. Centro de Ciência do Sistema Terrestre do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais CST/INPE. Núcleo de Estudos de População da Universidade de Campinas. NEPO/UNICAMP. 2011. Relatório.
- INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**. Disponível em: <http://enos.cptec.inpe.br/>. Acesso em: Outubro de 2020.
- IPCC. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press. 2021
- INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. Sistema de Alerta de Cheias, 2020. Disponível em: <<http://alertadecheias.inea.rj.gov.br/mapa.php>>. Acesso em: 15 de julho de 2020
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Base de faces de logradouros do Brasil, 2010. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/28971-base-de-faces-de-logradouros-do-brasil.html?=&t=downloads>>. Acesso em: 15 de julho de 2020
- MENDONÇA, F. A. Clima e planejamento urbano em Londrina. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. (orgs). **Clima urbano**, 2003.
- MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. Oficina de textos, 2017.
- MONTEIRO, C A de F. **A frente polar atlântica e as chuvas de inverno na fachada sul-oriental do Brasil: contribuição metodológica à análise rítmica dos tipos de tempo no Brasil**. São Paulo: Instituto de Geografia/Universidade de São Paulo, 1969
- MONTEIRO, C. A. de F. **Análise rítmica em climatologia: problemas da atualidade climática em São Paulo e achegas para um programa de trabalho**. *Climatologia*, n. 1, p. 1-21, 1971.
- MONTEIRO, C. A. de F. **Clima e excepcionalismo: conjecturas sobre o desempenho da atmosfera como fenômeno geográfico**. Florianópolis: EdUFSC, 1991.
- MONTEIRO, C. A. de F. O estudo geográfico do clima. **Cadernos Geográficos**, Florianópolis, v. 1, n. 1, p. 7-72, 1999.
- MONTEIRO, C. A. de F. Teoria e clima urbano: um projeto e seus caminhos. In: MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. (orgs). **Clima urbano**, 2003.
- MONTEIRO, A. As cidades e a precipitação: uma relação demasiado briguenta. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 5, n. 1, 2009. <https://doi.org/10.5380/abclima.v5i0.49390>
- MONTEIRO, J. B. **Chover mas chover de mansinho: desastres naturais e chuvas extremas no Estado do Ceará**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual do Ceará. 2011.
- MOURA, C.R.; ESCOBAR, G. C. J.; ANDRADE, K. M. Padrões de circulação em superfície e altitude associados a eventos de chuva intensa na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 267-280, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000300004>
- NASCIMENTO JÚNIOR, L. **As chuvas no Paraná: variabilidade, teleconexões e impactos de eventos extremos**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2013.
- NEIVA, H.; SILVA, M.; CARDOSO, C. Analysis of climate behavior and land use in the city of Rio de Janeiro, RJ, **Brazil. Climate**, v. 5, n. 3, p. 52, 2017. <https://doi.org/10.3390/cli5030052>

- NIMER, E. Clima da região Sudeste. In: Geografia do Brasil. Rio de Janeiro/IBGE, 1971. **Climatologia no Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1979.
- PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. Fundação GEO-RIO. Sistema Alerta Rio da Prefeitura do Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <<http://alertario.rio.rj.gov.br/download/dados-pluviometricos/>>. Acesso em: 15 de julho de 2020
- REBELLO, E. R. G. et al. Observação de mudanças de extremos climáticos (precipitação e temperatura) utilizando o software RCLimDex. Estudo de caso: Distrito Federal. **Congresso Brasileiro de Meteorologia (CBMET)**, v.1, 2008.
- SANT'ANNA NETO, J. L. Por uma Geografia do Clima – antecedentes históricos, paradigmas contemporâneos e uma nova razão para um novo conhecimento. **Terra Livre**, v. 17, p. 49-62, 2001.
- SANT'ANNA NETO, J. L. Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25232>
- SANT'ANNA NETO, J. L. Da climatologia geográfica à geografia do clima Gênese, paradigmas e aplicações do clima como fenômeno geográfico. **Revista da ANPEGE**, v. 4, n. 04, p. 51-72, 2008. <https://doi.org/10.5418/RA2008.0404.0004>
- SANT'ANNA NETO, J. L. O clima urbano como construção social: da vulnerabilidade polissêmica das cidades enfermas ao sofisma utópico das cidades saudáveis. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 8, 2011. <https://doi.org/10.5380/abclima.v8i0.25794>
- SERRA, A.; RATISBONNA, L. As Massas de Ar da América do Sul:(PRIMEIRA PARTE). **Revista Geográfica**, p. 67-129, 1959.
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Geomorfologia do estado do Rio de Janeiro. CPRM. **Geologia do Estado do Rio de Janeiro: texto explicativo do mapa geológico do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília, 2001. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/17229/14/rel_proj_rj_geoambiental.pdf. Acesso em: 12 de novembro de 2020
- SILVA, W. L.; DEREZCZYNSKI, C. P. Caracterização climatológica e tendências observadas em extremos climáticos no estado do Rio de Janeiro. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 37, n. 2, p. 123-138, 2014. https://doi.org/10.11137/2014_2_123_138
- SOBRAL, B.S.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J. F.; GOIS, G.; TERASSI, P. M. B.; MUNIZ-JÚNIOR, J. G. R. Variabilidade espaço-temporal e interanual da chuva no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, ano 14, v. 22, p. 281-308, 2018. <https://doi.org/10.5380/abclima.v22i0.55592>
- SOARES, F. S.; FRANCISCO, C. N.; SENNA, M. C. A. Distribuição espaço-temporal da precipitação na Região Hidrográfica da Baía da Ilha Grande-RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 1, p. 125-138, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000100012>
- STEPHENSON, D. Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events. In: DIAZ, Henry; MURNANE, Richard (eds.). **Climate extremes and society**. Cambridge University Press, 2008. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535840.004>
- ZHANG, X. et al. RCLimDex (1.0) user manual. Climate Research Branch Environment Canada, v. 22, 2004.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Sofia Siqueira Lima concebeu o estudo, coletou, tratou, analisou os dados e redigiu o texto. Núbia Beray Armond orientou o tratamento e processamento dos dados, assim como orientou as análises realizadas.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.