Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS
ISSN 2237-8642

PRECIPITAÇÃO EXTREMA PARA OS CENÁRIOS ATUAL E FUTUROS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA A CIDADE DO RIO DE JANEIRO

Extreme precipitation for current and future climate change scenarios for the city of Rio de Janeiro

Precipitación extrema para los escenarios de cambio climático actuales y futuros para la ciudad de Rio de Janeiro

Thamires Franco da Conceição
Programa de pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
franco.thamires2014@gmail.com

Henderson Silva Wanderley
Departamento de Ciências Ambientais/Instituto de Floresta, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (DCA-IF, UFRRJ)
henderson@ufrrj.br

Resumo: Os eventos extremos de precipitação (EPP) têm apresentado aumento na sua frequência e magnitude nas últimas décadas. Desse modo, surge há necessidade de compreender como esses eventos podem ser alterados pelas mudanças climáticas. Esta pesquisa tem como objetivo analisar índices extremos de precipitação para cenários atual e futuros de mudanças climáticas, para a cidade do Rio de Janeiro (CRJ). Para o período atual foram utilizados dados de precipitação diário, entre os anos de 1997 a 2020. As análises futuras estão compreendidas entre os anos de 1997 a 2100, com projeções dos modelos climáticos, adotando cenários SSP 4.5 e SSP 8.5, com projeções do CMIP-6. Foram calculados os índices CDD, PRCPTOT, RX1DAY, RX5DAY e SDII, para ambos os períodos em análise. Os resultados obtidos mostram mudanças dos padrões pluviométricos em todos os índices climáticos, como a redução da precipitação e a possibilidade de aumento dos eventos extremos de precipitação no futuro para o CRJ.

Palavras-chave: Eventos extremos. índices de mudanças climáticas. modelos climáticos.

Abstract: Extreme precipitation events (EPE) have increased in frequency and magnitude in recent decades. Thus, there is a need to understand how these events can be altered by climate change. This research aims to analyze extreme precipitation indices for current and future climate change scenarios

for the city of Rio de Janeiro (CRJ). Daily precipitation data from 1997 to 2020 were used for the analysis. Future analyses are from 1997 to 2100, with projections from climate models, adopting SSP 4.5 and SSP 8.5 scenarios, with CMIP-6 projections. The CDD, PRCPTOT, RX1DAY, RX5DAY and SDII indices were calculated for both periods under analysis. The results obtained show changes in rainfall patterns in all climate indices, such as reduced precipitation and the possibility of an increase in extreme precipitation events in the future for CRJ.
Keywords: Extreme events. Climate change indices. Climate models.

Resumen: Los eventos de precipitaciones extremas (EPE) han aumentado en frecuencia y magnitud en las últimas décadas. Por lo tanto, es necesario comprender cómo estos eventos pueden verse alterados por el cambio climático. Esta investigación tiene como objetivo analizar las tasas de precipitación extrema para los escenarios actuales y futuros de cambio climático para la ciudad de Río de Janeiro (CRJ). Para el análisis se utilizaron datos de precipitación diaria de 1997 a 2020. Los análisis futuros son del período 1997 al 2100, con proyecciones de modelos climáticos, adoptando escenarios SSP 4.5 y SSP 8.5, con proyecciones CMIP-6. Se calcularon los índices CDD, PRCPTOT, RX1DAY, RX5DAY y SDII para ambos períodos analizados. Los resultados obtenidos muestran cambios en los patrones de precipitación en todos los índices climáticos, como la reducción de la precipitación y la posibilidad de un aumento de eventos de precipitación extrema en el futuro para CRJ.
Palabras clave: Eventos extremos. índices de cambio climático. modelos climáticos.

Submetido em: 28/11/2024
Aceito para publicação em: 25/04/2025
Publicado em: 28/04/2025

1. INTRODUÇÃO

Os impactos das mudanças climáticas serão sentidos globalmente, causando grandes problemas para a população, especialmente em relação a eventos extremos de precipitação (EEP), que se tornarão mais frequentes e intensos, com graves consequências sociais, ambientais e econômicas. De acordo com Van Der Wiel e Bintanja (2021) o aumento de 2 °C na temperatura média global da superfície aumentará os eventos extremos em todo o globo. Estima-se que a ocorrência dos eventos de precipitação dobre ou até mesmo triplique com acréscimo médio global de 2° C (Myhre *et al*., 2019).

O aumento da temperatura proporcionará a ampliação da frequência e da magnitude dos EEP, os quais terão maiores impactos socioeconômicos (Fischer e Knutti, 2015). O incremento da temperatura será crítico para os grandes centros urbanos, como a cidade do Rio de Janeiro (CRJ), onde já foi observada tendência positiva na temperatura do ar mínima de +0,66 °C e máxima +0,73 °C. O aumento na temperatura fora agravado para 1,21 °C e 0,90 °C em períodos de El Niño intenso (Wanderley *et al*., 2019).

Os EEP afetam diretamente ou indiretamente as cidades e a sociedade devido a problemas corriqueiros e significativos como: inundações, que em muitos casos são repentinas, enxurradas, deslizamentos de terra, rompimentos de barragem, soterramentos. Esses eventos contribuem para interrupção das atividades sociais e econômicas, e em alguns casos provocando óbitos. No Brasil, entre os anos de 1979-2019, as tempestades, inundações e movimentos de massa foram responsáveis por 3176 óbitos (Azevedo Couto *et al.*, 2023).

Nesse contexto, a análise de EEP desempenha um papel importante no planejamento, gestão e redução de risco na ocorrência de acidentes em virtude de um desastre natural. O estado do Rio de Janeiro (ERJ) se destaca por ser o Estado do Brasil com o maior número de óbitos associados aos eventos estremos (Azevedo Couto *et al*., 2023). O maior desastre natural ocorrido no Brasil, aconteceu na região Serrana do ERJ. Em janeiro de 2011, chuvas intensas provocaram movimento de massa e enxurrada, que vitimaram quase 1.000 pessoas, desalojando mais de 7.000 e desabrigando mais de 6.000. Recentemente, em fevereiro de 2022, em decorrências de EEP, 231 pessoas vieram a óbito em Petrópolis, região serrana do ERJ (Alcântara *et al*., 2023). Um mês depois, foi registrado o maior valor de chuvas, até então no país, de 534,4 mm em 24 horas no município.

Os EEP não são exclusivos da região Serrana do ERJ. A CRJ também apresenta histórico de EEP. De acordo com Dereczynski *et al*. (2017) em 63 anos a CRJ apresentou 82 casos de chuvas extremas. Em decorrência dessas chuvas foram verificados danos materiais decorrentes de desabamentos, inundações, alagamentos, deslizamentos e danos físicos, os quais incluem mortos, feridos, dentre outros. Segundo Lima e Armond (2022) entre os anos de 1970-2019, os EEP apresentaram aumento na CRJ. A Tendência positiva nos EEP também foi verificada por Regueira e Wanderley (2022), com aumento na precipitação máxima diária, precipitação máxima consecutiva e precipitação extrema acima do percentil 99. Para a CRJ foi constatado ainda aumento dos EEP em anos com ocorrência de evento El Niño (V*eiga et al*., 2021).

Para compreender as mudanças na precipitação, e principalmente os impactos em função das mudanças climáticas, índices climáticos são utilizados para detectar alterações em series temporais. As mudanças climáticas locais são avaliadas por meio da análise de séries históricas de variáveis meteorológicas, como temperatura do ar ou precipitação pluviométrica. As tendências observadas nessas variáveis em uma cidade, pode indicar que a mesma apresenta alterações em sua distribuição e frequência ao longo do tempo (Ferreira *et al*., 2025).

Na tentativa de compreender alterações na distribuição da precipitação na CRJ, algumas pesquisas analisaram índices climáticos extremos para a cidade, com alguns constatando aumento dos eventos extremos, como Dereczynski *et al*. (2017), Carvalho e Wanderley (2022) e Regueira e Wanderley (2022). No entanto, pesquisas que investigue as mudanças futuras desses índices, para cenários de mudanças climáticas futuras, para a CRJ são necessárias.

Identificar o aumento dos EEP futuros para a CRJ pode ser crucial, pois a cidade apresenta localidades vulneráveis a ocorrência de desastres naturais relacionados a EEP (Pereira *et al*., 2022). As áreas críticas da CRJ apresentam maior vulnerabilidade decorrente de ocupação irregular de encostas e morros, onde a ocupação irregular contribui significativamente para a ocorrência de desastres socioambientais. Deste modo, o objetivo desta pesquisa foi identificar mudanças na distribuição da precipitação para cenários atuais e futuros de mudanças climáticas na cidade do Rio de Janeiro.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

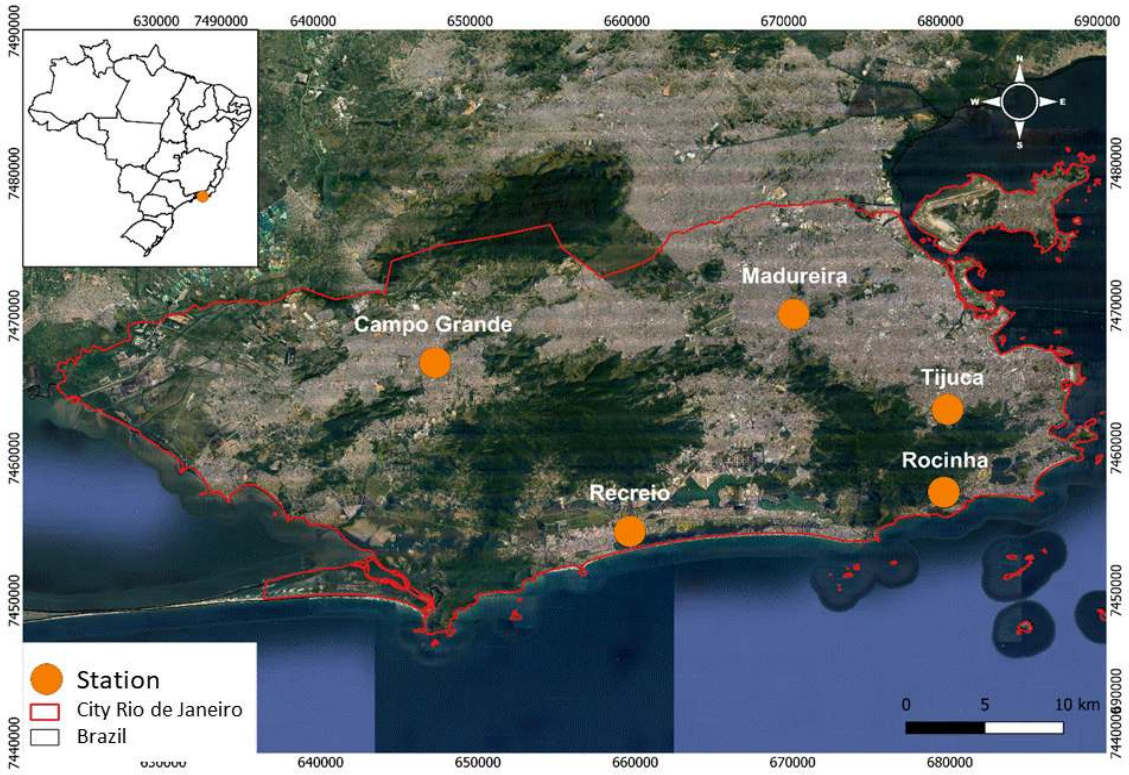
A pesquisa foi realizada para a cidade do Rio de Janeiro - RJ (22° 54’ 10” S e 43° 12’ 27” W), a qual ocupa uma área total de 1.200.329 km², sendo 744,73 km^2 urbanizada. A população da cidade foi estimada em 6.775.561 habitantes (IBGE, 2022), o que a classifica como a segunda maior população das cidades do Brasil. A CRJ está dividida em quatro regiões: Centro, Zona Norte, Zona Oeste e Zona Sul, com toda sua área inserida dentro do bioma da Mata Atlântica, caracterizada por grande diversidade biológica.

A orografia da CRJ determina influência em sua variedade climática, com elevados índices de umidade do ar (Wanderley e Miguel, 2019), temperaturas que variam entre 18 °C a 32 °C (Wanderley *et al*., 2019) e frequência mínima de chuva que variaram de 468,20 mm ano^{-1} a 902,00 mm ano-1, e os valores máximos de 1.363,40 mm ano^{-1} a 2.580,90 mm ano^{-1} (Regueira e Wanderley, 2022).

2.2. Dados Utilizados

Para o desenvolvimento dessa pesquisa foram utilizados dados diários de precipitação disponíveis no Sistema de Monitoramento Alerta Rio (alertario.rio.rj.gov.br), da prefeitura do Rio de Janeiro, com intervalos de 15 em 15 minutos entre os anos de 1997 a 2020. O sistema Alerta Rio disponibiliza de 33 estações pluviométricas distribuídas pelo município, destas foram selecionadas 5 estações (Figura 1), com distribuição espacial que caracterize as zonas existentes na CRJ, sendo elas: Campo Grande e Recreio dos Bandeirantes localizadas na Zona Oeste, Madureira e Tijuca na Zona Norte e Rocinha na Zona Sul (Tabela 1).

Figura 1 - Município do Rio de Janeiro e estações pluviométricas utilizadas na pesquisa.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Tabela 1- Informações geográficas das estações pluviométricas utilizadas.

Estação	Latitude (S)	Longitude (W)	Altitude (m)
Campo Grande	-22,90361°	-43,56194°	30
Madureira	-22,87333°	-43,33889°	45
Recreio dos Bandeirantes	-23,01000°	-43,44056°	10
Rocinha	-22,98583°	-43,24500°	160
Tijuca	-22,93194°	-43,22167°	340

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os índices de detecção de mudanças climáticas foram calculados para 2 intervalos distintos: o primeiro compreendido entre os anos de 1997 a 2020. Para esse período os índices climáticos foram calculados com o total diário das estações meteorológicas e com os dados de modelos climáticos. Essa metodologia foi realizada para verificar a acurácia dos modelos em simular dados de chuva para a CRJ. No segundo intervalo, compreendido entre 2021 a 2100, foram utilizados apenas as simulações dos modelos climáticos CanESM5, MIROC6 e MPI-ESM1.2 LR, para os cenários futuros de mudanças climáticas Shared Socio Economic Pathway (SSP) 4.5 e 8.5, definidos pelo World Climate Research Programme (CMIP6).

· 2.3. Cálculo dos Índices de Precipitação Extrema

Para detecção da mudança de precipitação foram calculados para o cenário atual e cenários futuros, cinco índices climáticos (Tabela 2). Para calcular os índices de detecção de mudanças climáticas na precipitação foi usado o software RClimDex, no Software R (R Core Team, 2022).

Tabela 2- Índices de mudanças climáticas calculados.

Índices	Descrição	Unidade
CDD	Dias secos consecutivos	dias
PRCPTOT	Precipitação total anual	mm
RX1DAY	Precipitação máxima de um dia	mm
RX5DAY	Precipitação máxima de cinco dias	mm
SDII	Índice simples de intensidade diária	mm/dia

Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

O cálculo dos índices foi realizado para o período atual e futuro. Para o período atual os índices foram calculados para o intervalo 1997 a 2020, com dados medidos em estações meteorológicas e simulados pelos modelos climáticos. Os dados dos modelos do período atual foram utilizados para verificar a acurácia dos modelos em simular os dados futuros, comparado a simulação do período atual, com os dados medidos nas estações meteorológicas. A validação das simulações com os dados das estações pluviométricas foram realizadas para o índice PRCPTOT, por meio de estatística descritiva (média e desvio padrão), testes de Fisher (F) e de Student (t), coeficiente angular da reta (β), índice de concordância de Wilmont (d) e coeficiente de correlação (r).

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Índice PRCPTOT

A média da precipitação medida nas estações e simulada pelos modelos, entre os anos de 1997 a 2020, não mostrou grandes diferenças entre os valores máximos, mínimos e médios (Tabela 3). Em geral, a média dos modelos climáticos foi maior para as chuvas mínimas e médias e menor para as máximas. O índice de concordância de Wilmont (d) foi de 0,87,

indicando concordância entre os valores, e o coeficiente de correlação foi de r=0,96, indicando linearidade entre os dados, ratificando a exatidão e precisão satisfatória dos modelos em simular a precipitação para a CRJ. Segundo classificação apresentada por Pinheiro et al. (2020), os dados simulados pelos modelos apresentaram desempenho satisfatório na estimativa da precipitação na CRJ.

Tabela 3- Estatísticas dos dados medidos nas estações pluviométricas e simulados pelos modelos para o período atual e futuro no município do Rio de Janeiro.

		Mín	Máx	μ	σ	β	d	r
Cenário Atual	Média das Estações	872,5	1792,4	1330,7	281,1	6,12	0,87	0,96
	Média dos Modelos	1071,4	1619,7	1388,0	148,3	6,47		
Cenário Futuro	4.5	904,6	1708,5	1354,6	157,8	0,95		
	8.5	1165,3	1870,1	1482,7	154,9	-2,54		

Mín – valores mínimos; Máx – valores máximos; μ - média; σ – desvio padrão; β - coeficiente angular da regressão linear; d – coeficiente de Wilmont; r - coeficiente de correlação da regressão linear.

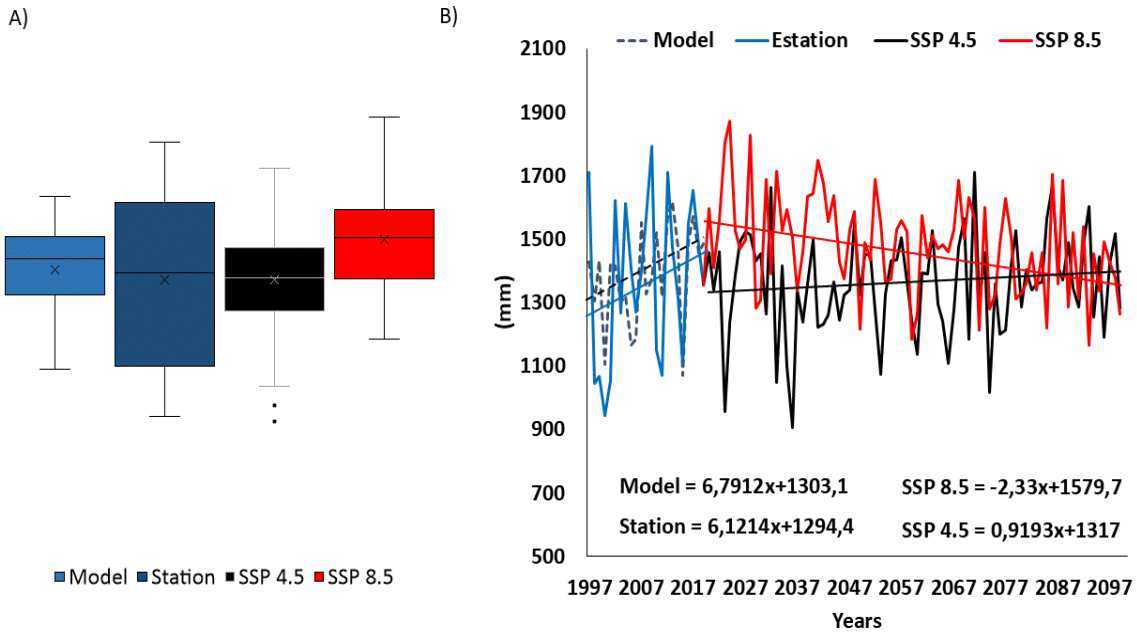
Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Os dados medidos nas estações apresentaram maior variabilidade do que os simulados pelos modelos, com desvio padrão maior. Isso ocorre devido à variabilidade das chuvas na CRJ ser influenciada pela orografia da cidade e sua proximidade com a superfície oceânica (Sobral *et al*., 2017). A orografia é responsável por altos índices pluviométricos na região Sudeste do Brasil, a qual associada com os processos impulsionados pela distribuição da radiação e evaporação abundante na CRJ, criam condições favoráveis para a formação da precipitação (Davis, 2001). As chuvas na CRJ também são influenciadas pela passagem de Sistemas Frontais de origem polar, que podem provocar eventos extremos de chuva, gerando transtornos à população e ocorrência de movimentos gravitacionais de massa e enchentes (Silva e Silva, 2024).

A estatística entre os dados medidos e simulados mostrou ajustes semelhantes para os coeficientes angulares das retas, não sendo verificadas diferenças estatísticas para os testes F e t, indicando que os dados simulados não apresentam diferenças estatísticas entre a média e a variância, com mesma tendência linear dos dados medidos e simulados (Figura 2). Os coeficientes angulares positivos de 6,12 e 6,47, referentes aos ajustes lineares dos dados

medidos e simulados, demostraram tendência linear crescente das chuvas para o período atual (Tabela 3 e Figura 2).

Figura 2 - Representação gráfica da precipitação total anual (PRCPTOT) medida e estimada para a CRJ de 1997 até 2100, a) Boxplot e b) Regressão linear.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

Para o cenário futuro SSP 4.5 os dados da PRCPTOT não apresentaram mudanças significativas na distribuição das chuvas simuladas e medidas (Tabela 3). No entanto, é observado redução dos valores médios e mínimos das chuvas, com aumento dos valores máximos. É observado aumento na variabilidade das chuvas na CRJ, o que pode indicar uma maior frequência de EEP mínimos e máximos para a cidade. Também foi observado mudanças nos ajustes lineares das chuvas para o cenário SSP 4.5. Observa-se coeficiente positivo, mas próximo de zero, indicando que a precipitação da CRJ vai reduzir até o final do século, em comparação com o período atual.

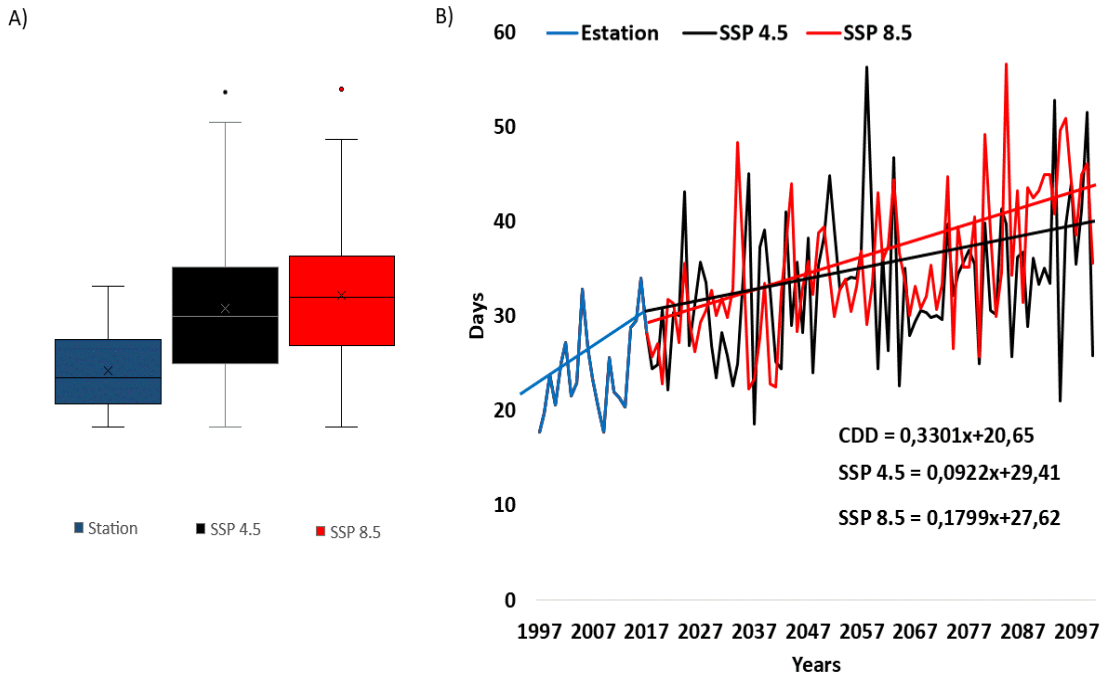
O cenário SSP 8.5 mostra valores mínimos, médios e máximos das chuvas maiores, quando comparado aos demais resultados já apresentados. Esse aumento é decorrente do incremento das chuvas nos primeiros anos simulados, com valores máximos maiores do que os medidos e simulados. Esses resultados indicam que para um cenário mais quente, os EEP possam ser maiores, mas com indicação de redução do total anual das chuvas até o fim do

século. Essa redução é observada devido ao ajuste do coeficiente angular com valor negativo, indicando redução na precipitação no município.

3.2. Índice CDD

O índice climático que se refere ao número de dias secos consecutivos (CDD), os quais oscilaram entre 18 a 35 dias sem chuva, para o período atual (Figura 3). Resultado que corrobora aos obtidos por Regueira e Wanderley (2022) e Luiz-Silva e Oscar-Júnior (2022), onde CDD para a CRJ varia em valores máximos de 30 a 35 dias. Para o interior do estado do Rio de Janeiro CDD oscila entre 50 a 60 dias. A CRJ por ser uma cidade costeira é influenciada pelas brisas marítimas, na qual os ventos de Sul transportam umidade do oceano em direção ao continente, aumentando a umidade/condensação na costa. Este fenômeno induz o movimento ascendente do vapor de água, permitindo que a umidade se eleve para a atmosfera mais baixa, formando nuvens e, eventualmente, precipitação. Este efeito diminui à medida que se avança para o interior do continente, resultando em maiores valores para CDD.

Figura 3 - Representação gráfica dos valores medidos e estimados para o CDD do município do Rio de Janeiro, a) Boxplot e b) Regressão linear.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

As projeções futuras para ambos os cenários indicam a continuidade do aumento observado em CDD no período atual. Os valores estimados apresentam tendência de aumento no número de dias secos consecutivos em ambos os cenários de mudanças climáticas. Os valores futuros indicam aumento médio maior do que 10 dias sem chuva para CDD na CRJ. Para o fim do século os valores de CDD podem ser maiores do que 60 dias. O aumento do CDD contribui para a redução da precipitação anual (PRCPTOT). Segundo Lagos-Zúñiga *et al*. (2022) para a região de estudo se projeta condições de seca mais prolongadas, com aumentos de CDD.

Carvalho e Wanderley (2022) demonstraram que, nas últimas décadas, o total de precipitação anual e os dias chuvosos consecutivos diminuíram no Rio de Janeiro, o que se deve principalmente ao aumento dos dias secos consecutivos. A redução no total anual de chuvas tende a se refletir no período seco do ano com o aumento do CDD. Resultados semelhantes também foram observados por Regueira e Wanderley (2022). McErlich *et al*. (2023) ratificam que resultados satisfatórios na estimativa de CDD podem ser a chave para a compreensão de índices de mudanças climáticas mais complexo de precipitação extremos, onde as simulações para CDD apresentaram comportamento espacial coerente, quando as simulações são comparadas com as observações (Lagos-Zúñiga *et al*., 2022).

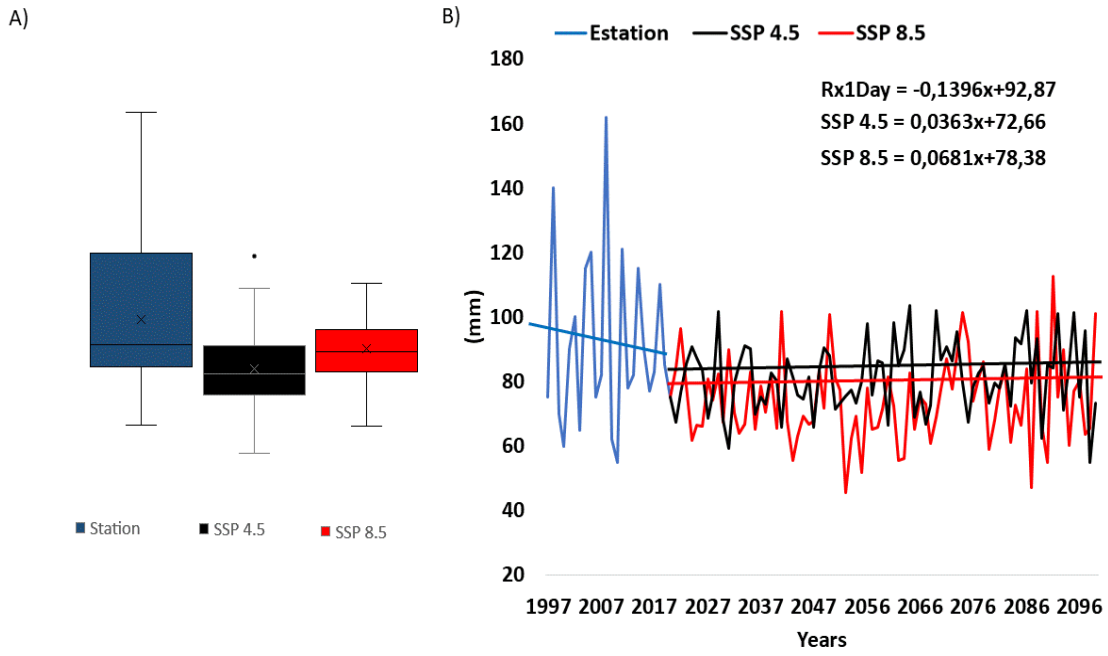
A variabilidade de CDD, tanto para o período observacional quanto para os simulados, mostra aumento desse índice, o que sugere períodos de déficit hídrico mais longos. De acordo com os resultados apresentados por Coppola *et al*. (2021) para a região em estudo se projeta aumento do número de secas, que estarão associados também com aumento de precipitação extrema.

3.3. Índice RX1DAY

O índice pluviométrico Rx1day, que quantifica a precipitação diária máxima anual, apresentou valores entre 60 e 160 mm entre os anos de 1997 a 2020 (Figura 4). Esses totais de chuva podem causar perturbações diárias em várias cidades do Brasil, incluindo a CRJ. Dereczynski *et al*. (2017) indicaram que o número de eventos extremos de chuva na CRJ aumentou. Resultados análogos foram encontrados por Luiz-Silva e Oscar-Junior (2022), que identificaram valores médios diários de 110 mm na Região Metropolitana do município.

Carvalho e Wanderley (2022) e Regueira e Wanderley (2022) também obtiveram resultados semelhantes aos desta pesquisa, com mudanças de tendência nos valores deste índice.

Figura 4 - Representação gráfica dos valores medidos e estimados do índice RX1DAY para a CRJ, a) Boxplot e b) Regressão linear.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

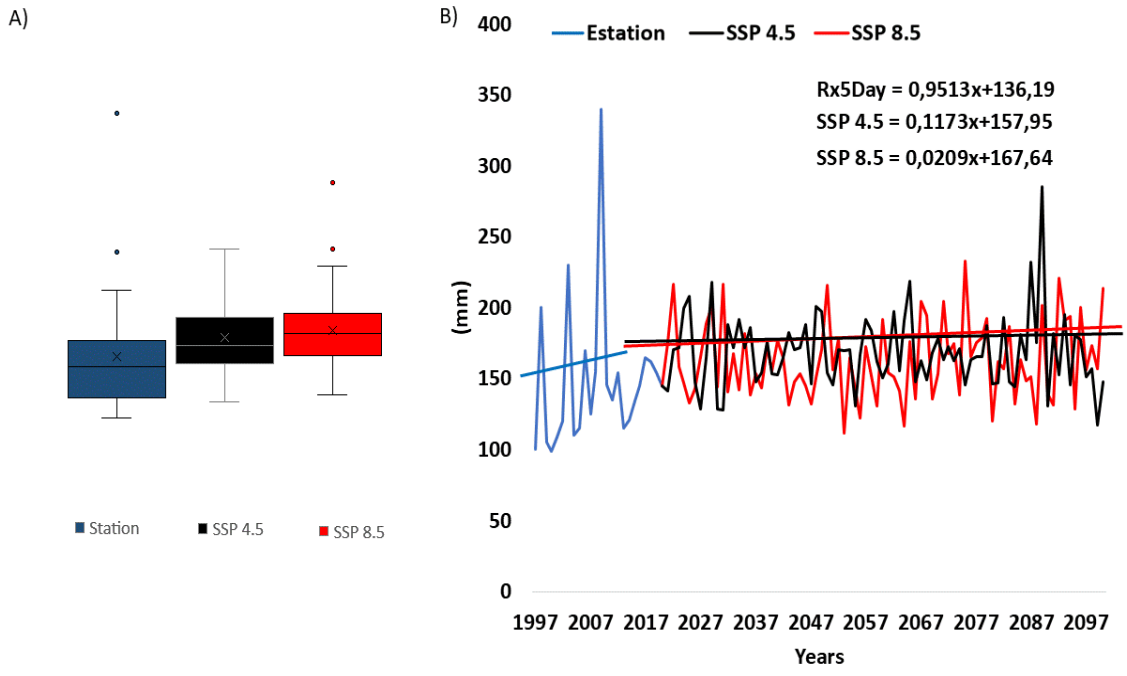
Para os cenários futuros, não é observada grande mudança desse índice. No entanto, é notório precipitação acima de 100 mm/dia. Apesar da pequena variação ente os períodos atual e futuro, eventos dessa magnitude tendem a gerar transtornos na CRJ, que possui grande área urbanizada, impermeabilizada e sem planejamento estratégico ou regida por plano diretor, que identifica áreas de risco no município.

Os resultados obtidos do período atual mostram ajuste linear de redução dos valores do índice, enquanto os resultados obtidos pelos modelos climáticos apresentam aumento. O aumento dos EEP é geralmente projetado pelos modelos climáticos devido ao aumento da temperatura do ar, fatores dinâmicos e termodinâmicos (Pendergrass e Hartmann, 2014). A proporcionalidade do aumento dos EEP também ocorrerá em função do aumento do conteúdo do vapor de água atmosférico (Gimeno *at al*., 2022). De acordo com Myhre *et al*. (2019) as projeções dos modelos climáticos para a intensidade anual máxima da precipitação são relativamente semelhantes aos dados observacionais, mas com um viés baixo.

3.4. Índice RX5DAY

Para o índice Rx5day, que registra a precipitação máxima de 5 dias seguidos, é observada tendência linear de aumento, com total precipitado sempre superior a 100 mm, sendo registrado evento com precipitação superior a 300 mm, como em 2013 (Figura 5). Comumente, o ERJ sofre com chuvas extremas, como o ocorrido em 2010 na cidade de Angra dos Reis, região Sul do ERJ, onde 53 pessoas morreram, em decorrência de chuvas torrenciais de 142,9 mm, em 24 horas (Metsul, 2024). Evento extremo que causou 48 óbitos e deixou mais de 200 pessoas desaparecidas em virtude de movimento de massa no morro do Bumba, em Niterói, região metropolitana do Rio de Janeiro. O ano de 2010 também foi trágico para a Região Serrana do ERJ, com quase 1.000 óbitos. O evento extremo na Região Serrana do Rio de Janeiro se repetiu em fevereiro de 2022 (Alcântara *et al*., 2023).

Figura 5 - Representação gráfica dos valores medidos e estimados para o índice RX5DAY da CRJ, a) Boxplot e b) Regressão linear.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

A tendencia positiva no índice Rx5day também foi observada por Regueira e Wanderley (2022). O índice Rx5day é de grande importância, pois indica o potencial para

causar inundações, deslizamentos de terra, entre outros desastres ambientais. O aumento das chuvas durante dias consecutivos foi observado em janeiro de 2024, o qual foi caracterizado como o mês mais chuvoso que se tem registro na CRJ, segundo o Sistema Alerta Rio (2024). Nesse mês foi observado total de 348,9 mm, superando a marca anterior de janeiro de 2013, que era de 346,8 mm.

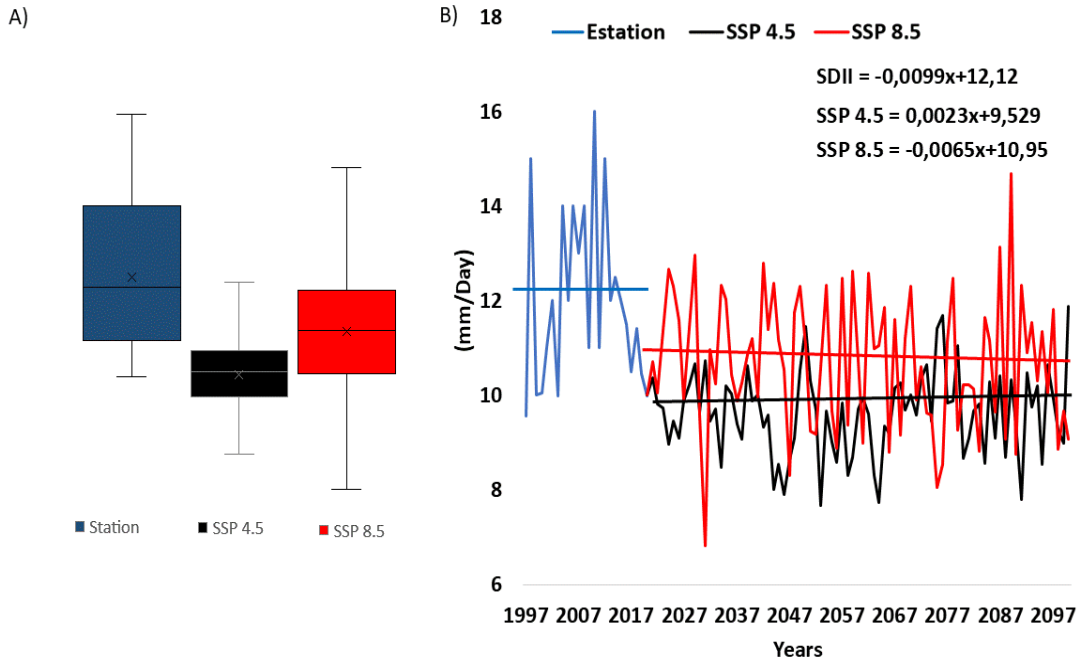
Em comparação com os valores atuais, as simulações futuras para ambos os cenários mostram aumento para o Rx5day. Para o cenário SSP 4.5, espera-se aumento médio desse índice de 20 mm, com média de 160 mm. Essa projeção indica totais que podem chegar próximos a 200 mm, mas com a possibilidade de acumulados maiores do que 250 mm. Para o cenário SSP 8.5, espera-se aumento maior dos EEP, valores médios de 180 mm na CRJ, com extremos que podem chegar a 300 mm. Esses valores implicam em aumento na atenção aos problemas relacionados à chuva no planejamento dos centros urbanos.

As simulações apresentadas por Chen *et al*. (2020) mostram que o desempenho dos dados do CMIP6 ao CMIP5 apresentou redução significativa nas dispersões dos modelos para Rx5dia. No entanto, a tendência para Rx5day pode variar com o modelo usado e com a região para onde o índice é estimado. Entretanto, há concordância entre o índice observado e simulado para os cenários futuros de mudanças climáticas (Lagos-Zúñiga *et al*., 2022).

3.5 Índice SDII

O índice SDII que quantifica a intensidade da precipitação diária simples (mm/dia), mostra oscilação nos dados observacionais entre 9 a 16 mm/dia. O ajuste linear para esse índice indica estabilidade, com uma leve inclinação negativa, ao longo dos anos de análise para o período atual (Figura 6). Os resultados apresentados por Regueira e Wanderley (2022) também mostram diminuição do SDII, mas essa após 2005 na CRJ. Carvalho e Wanderley (2022) ratificam redução estaticamente significativa, por meio de dois testes estatísticos para SDII. A diminuição do SDII pode estar em consonância com a diminuição do PRCPTOT. Para CRJ também foi observado redução do número de dias com chuva (R ≥ 1mm), a qual corrobora para que SDII também diminua (Carvalho e Wanderley, 2022).

Figura 6 - Representação gráfica do índice SDII medido e estimado para a CRJ, a) Boxplot e b) Regressão linear.



Fonte: Elaborado pelos autores (2024).

No período atual SDII mostra relação oposta a PRCPTOT. Os anos com maiores SDII são os com menores totais da precipitação. Em decorrência dos resultados obtidos, PRCPTOT mostrou tendência positiva, enquanto que SDII mostrou tendencia de redução. Essa relação pode indicar aumento dos EEP, uma vez que, para a CRJ já foi verificado aumento de Rx5day e da precipitação extrema maior do que o percentil 99, seguido da redução dos dias úmidos (Carvalho e Wanderley, 2022).

Para o cenário futuro SSP 4.5 é observada tendência de aumento em SDII. Entretanto, sua variação até o fim do século é entre 8 a 12 dias, inferiores aos dados observacionais. Para esse cenário é esperado pequeno aumento dos totais precipitados, em função do aumento de Rx1dia e de CDD. Esses resultados preconizam que, se as mudanças climáticas projetadas para esse cenário se concretizarem, os impactos nas mudanças da distribuição anual das chuvas na CRJ serão menores.

Para o cenário futuro SSP 8.5, SDII mostra tendência negativa com valores extremos mínimos podendo chegar a 7 mm dia^{-1}, ratificando o déficit hídrico que pode ser estabelecer na CRJ, se o cenário mais pessimista de mudança climática se concretizar. Para esse cenário é

projeta reduções para a precipitação e aumento de CDD na CRJ maiores o que as observadas para o cenário SSP 4.5.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa verificou que não há diferenças significativas entre os dados medidos nas estações e os simulados pelos modelos climáticos para a CRJ. Também foram constatadas alterações futuras nos padrões de precipitação em todos os índices climáticos utilizados para análise na CRJ.

Nos dois cenários futuros utilizados a PRCPTOT mostra diminuição, em comparação com os valores medidos no cenário atual. O índice CDD para os dois cenários futuros analisados mostra aumento, ratificando a redução da precipitação anual.

Os extremos de precipitação Rx1day e Rx5day apresentam aumento para ambos os cenários futuros. A alteração em Rx1day apresenta valores inferiores aos eventos extremos de chuva já observados na CRJ. Mostrando que os modelos usados ainda não conseguiram capitar essa variação devido as condições locais da CRJ. Para o Rx5day, as simulações foram satisfatórias, e ratificam aumento superior à variabilidade desse índice em comparação com o cenário atual.

O índice SDII praticamente não apresentou oscilações para os dados observacionais. No entanto, se projeta redução nos dois cenários climáticos futuros, em relação aos valores do cenário atual. Para os cenários futuros espera-se que o total das chuvas na CRJ diminua, mas essa redução será caracterizada pelo aumento dos eventos extremos de precipitação, com o incremento dos transtornos socioambientais para a CRJ.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo auxílio pesquisa SEI-260003/005647/2024 – APQ1.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, E., et al. Deadly disasters in southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro. **Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions**, p. 1-27, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.5194/nhess-23-1157-2023.

AZEVEDO COUTO, G. et al. Natural hazards fatalities in Brazil, 1979–2019. **Natural Hazards**, v. 118, n. 2, p. 1487-1514, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11069-023-06059-x.

CARVALHO, L. V., WANDERLEY, H. S. Risk identification of precipitation extremes due to climate change in the southern region of the state of Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 04, p. 2073-2085, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.4.p2073-2085. 2022.

CHEN, H. et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating climate extremes. **Sci. Bull**, v. 65, n. 17, p. 1415-1418, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scib.2020.05.015.

COPPOLA, E. et al. Climate hazard indices projections based on CORDEX-CORE, CMIP5 and CMIP6 ensemble. **Climate Dynamics**, v. 57, p. 1293-1383, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00382-021-05640-z.

DAVIS, E. G., NAGHETTINI, M. D. C. **Estudos de chuvas intensas no Estado do Rio de Janeiro**. CPRM-Serviço Geológico do Brasil. (2001). Disponível em: https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/155/279.pdf.

DERECZYNSKI, C. P., CALADO, R. N., E DE BARROS, A. B. Chuvas extremas no Município do Rio de Janeiro: Histórico a partir do Século XIX. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 40, n. 2, p. 17-30. 2017. Disponível em: https://doi.org/10.11137/2017_2_17_30.

Ferreira, W. P. C., Wanderley, H. S., Delgado, R. C. Changes in the Distribution of Precipitation with the Potential to Cause Extreme Events in the State of Rio de Janeiro for a Future Climate Change Scenario. **Atmosphere**, v. *16*, n. 4, p. 358-372, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/atmos16040358.

FISCHER, E. M., KNUTTI, R. Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. **Nature climate change**, v. 5, n 6, p. 560-564. 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1038/nclimate2617.

GIMENO, L. et al. Extreme precipitation events. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Water**, v. 9, n. 6, e1611, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1002/wat2.1611.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. BANCO DE DADOS. **Cidades**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat>. Acesso em: 12 jul. 2022.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change**. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixthc Assessment Report of the Intergovernmental Painel on Climate Change**. Cambridge, Reino Unido: Cambridge University Press. Disponível em: https://www.ipcc.ch/. >. Acesso em: 06 mar. 2024.

KARL, T.R., N. Nicholls, A. Ghazi. **CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: Workshop summary**. Climatic Change, v. 42, p. 3-7. 1999. Disponível em: CLIVAR/GCOS/WMO Workshop on Indices and Indicators for Climate Extremes Workshop Summary | SpringerLink. Acesso em: 18 set. 2024.

LAGOS-ZUNIGA, M. et al. Extreme indices of temperature and precipitation in South America: Trends and intercomparison of regional climate models. **Climate Dynamics**, p. 1-22. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00382-022-06598-2.

LIMA, S. S., ARMOND, N. B. Chuvas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: caracterização, eventos extremos e tendências. **Sociedade & Natureza**, v. 34, e64770, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-64770.

LUIZ-Silva, W., Oscar-Júnior, A. C. Climate extremes related with rainfall in the State of Rio de Janeiro, Brazil: a review of climatological characteristics and recorded trends. **Natural Hazards**, v. 114, n. 1, p, 713-732, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11069-022-05409-5.

MAURITSEN, T. et al. Developments in the MPI-M Earth System Model version 1.2 (MPI-ESM1. 2) and its response to increasing CO2. **Journal of Advances in Modeling Earth Systems**, v. 11, n. 4, p. 998-1038, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1029/2018MS001400.

MARTINS, M. E. G., RODRIGUES, J. F. Coeficiente de correlação amostral. **Revista de Ciência Elementar**, v. 2, n. 2, p. 34-36, 2014. Disponível em: doi.org/10.24927/rce2014.042.

MCERLICH, C. et al. Positive correlation between wet-day frequency and intensity linked to universal precipitation drivers. **Nature Geoscience**, v. 16, n. 5, p. 410-415, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41561-023-01177-4.

Metsul #CriseClimáticaNoRJ: Regiões Norte e Noroeste do estado do Rio sofrem com secas e fortes chuvas - Diário do Rio de Janeiro (diariodorio.com). Disponível em: https://metsul.com/2024-01-14-chuva-rio-de-janeiro-deslizamentos/. Acesso em: 25 abr. 2024.

MYHRE, G. et al. Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, 16063, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s41598-019-52277-4.

NOBRE, C. A. Mudanças climáticas globais: possíveis impactos nos ecossistemas do país. **Parcerias estratégicas**, v. 12, p. 239-258, 2001. Disponível em: C:\MEUSDO~1\Publico\REVIST~1\13. Acesso em: 05 mai. 2023.

PENDERGRASS, A. G., Hartmann, D. L. Changes in the distribution of rain frequency and intensity in response to global warming. **Journal of Climate**, v. 27, n. 22, p. 8372-8383, 2014. Disponível em: https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00183.1.

PEREIRA, R. M. S., WANDERLEY, H. S., DELGADO, R. C. Homogeneous regions for rainfall distribution in the city of Rio de Janeiro associated with the risk of natural disasters. **Natural Hazards**, v. 111, p. 1-19, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11069-021-05056-2.

PINHEIRO, F. S. et al. Precipitação e temperatura do ar simuladas pelo modelo ETA/CPTEC-HADCM3 para o estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 05, p. 2037-2052, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.5.p2037-2052.

R Core Team R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. (2022). URL . Disponível em: https://www.R-project.org/.

REGUEIRA, A. D. O., Wanderley, H. S. Changes in rainfall rates and increased number of extreme rainfall events in Rio de Janeiro city. **Natural Hazards**, v. 114, n. 3, p. 3833-3847. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s11069-022-05545-y.

SILVA, T.M., SILVA, S.L.S. O relevo do estado do Rio de Janeiro: cenário de beleza e fragilidade ambiental. In: MARAFON, G.J., and RIBEIRO, M.A. orgs. Revisitando o território fluminense, VI [online]. Rio de Janeiro: EDUERJ, 2017, pp. 43-64. ISBN: 978-85-7511-457-5. https://doi.org/10.7476/9788575114575.0004.

SISTEMA ALERTA RIO DA PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. **Banco de Dados**. Disponível em: http://alertario.rio.rj.gov.br/. Acesso em: 14 mar. 2024.

SOBRAL, B. S. et al. Variabilidade espaço-temporal e interanual da chuva no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.5380/abclima.v22i0.55592.

SWART, N. C. et al. The Canadian earth system model version 5 (CanESM5. 0.3). **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 11, p. 4823-4873, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.5194/gmd-12-4823-2019.

TATEBE, H. et al. Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 7, p. 2727-2765, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.5194/gmd-12-2727-2019.

VAN DER WIEL, K., BINTANJA, R. Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes. **Communications Earth & Environment**, v. 2, n. 1, p.1-21, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1038/s43247-020-00077-4.

VEIGA, R. Q., DE-LUCENA, A. J., WANDERLEY, H. S. Influência dos eventos El Niño na distribuição das chuvas na cidade do Rio de Janeiro/Influences of El Niño on the distribution

of rainfall in the city of Rio de Janeiro. **Ra'e Ga**, v. 53, p. 22-48, 2022. Disponível em: vhttp://dx.doi.org/10.5380/raega.v53i0.73975.

WANDERLEY, H. S., FERNANDES, R. C., DE CARVALHO, A. L. Mudança térmica na cidade do Rio de Janeiro e o desvio ocasionado durante um evento de El Niño intenso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 04, p. 1291-1301, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.4.p1291-1301.

WANDERLEY, H. S., MIGUEL, V. C. Mudança dos elementos meteorológicos em função da degradação da floresta urbana. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 834-843, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.5902/1980509832090.