

Artigo

Análise dos Índices de Extremos de Precipitação em Cenários Futuros na Bacia do Rio Ribeira de Iguape - São Paulo

Briane Carla Coppi Ferreira¹ , Maria Cleofé Valverde¹

¹*Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Federal do ABC,
Santo André, SP, Brasil.*

Recebido em: 26 de Maio de 2020 - Aceito em: 19 de Dezembro de 2021

Resumo

Eventos extremos de precipitação são causados pelo excesso ou falta de chuva que podem provocar inundações, períodos de estiagem longos e secas que afetam a vida da população. Este trabalho visa estudar as tendências da precipitação através dos índices de extremos climáticos (CDD, R10mm, Rx1day, Rx5day e R95p) nas sub-bacias Alto Juquiá, Baixo Ribeira e Rio Ribeira de Iguape, localizadas na Bacia do Rio Ribeira de Iguape, tanto no contexto atual quanto futuro. A sub-bacia Alto Juquiá alimenta o Sistema Produtor de São Lourenço que abastece parte dos municípios da Grande São Paulo. Analisaram-se os dados de índices extremos observados e simulados por dois modelos regionais climáticos: Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. A análise histórica dos dados observados identificou tendências de aumento nos números de dias secos consecutivos (CDD) e em anos com dias muito chuvosos (R95p) nas três sub-bacias. As projeções dos dois modelos e cenários indicam para um futuro mais próximo (2006-2040) períodos de estiagem mais longos (CDD) e uma menor intensidade da chuva diária (R95p e Rx1day) até 2099. Ainda, é possível inferir que o modelo Eta-HadGEM2-ES obteve melhor desempenho, já que os erros sistemáticos das simulações foram menores nas sub-bacias de Alto Juquiá e Rio Ribeira de Iguape.

Palavras-chave: índices de extremos de precipitação, cenários climáticos futuros, bacia hidrográfica Rio Ribeira de Iguape.

Analysis of Extreme Rainfall Indexes in Future Scenarios in the Ribeira de Iguape (SP) River Basin

Abstract

Extreme precipitation events are caused due to excess or lack of rain sufficient to cause flooding, prolonged dry spells and droughts that can affect the population's life. This work aims to study the precipitation behavior through climatic extremes indices (CDD, R10mm, Rx1day, Rx5day and R95p) in Alto Juquiá, Baixo Ribeira and Ribeira de Iguape sub-basins located in Ribeira de Iguape River Basin, in both current and future contexts. The Alto Juquiá sub-basin feeds the São Lourenço Water Production System, which supplies part of the municipalities of Greater São Paulo. The extreme index data observed and simulated by two regional climate models: Eta-HadGEM2-ES and Eta-MIROC5. Historical analysis of the observed data identified an increasing trend in the number of consecutive dry days (CDD) and extremely rainy years (R95p) in the three sub-basins. The projections of the two models and scenarios indicate for closer future (2006-2040) longer periods of drought (CDD) and a lower intensity of rain (R95p and Rx1day) until 2099. It is also possible to infer that the model HadGEM2-ES performed better, since the systematic errors were lower in the Alto Juquiá and Rio Ribeira de Iguape sub-basins.

Keywords: indexes precipitation extremes, projection, hydrographic basin Ribeira de Iguape River.

1. Introdução

O aumento da frequência de extremos de chuva causa preocupação perante a sociedade e gestores políticos, visto que pode alterar a dinâmica de espécies animais e vegetais de uma região, além de acarretar grandes prejuízos materiais à população e risco à vida.

Eventos extremos, segundo Stephenson (2008) são eventos geralmente raros de valores extremos de certas variáveis meteorológicas como, por exemplo, precipitação (originada por ciclones), temperatura (ondas de calor), vento (furacões) e que apresentem danos, tais como inundações, secas, estresse de calor, veranicos, entre outros.

O estudo de Mohleji e Pielke Junior (2014) mostra que as perdas globais devido aos extremos climáticos aumentaram a uma taxa de 3,1 bilhões de dólares ao ano e que os prejuízos através de tempestades nos EUA representam 57% das perdas econômicas mundiais.

Na América do Sul, nos últimos anos, tem-se observado diversos desastres naturais de origem hidrometeorológica e climática, como eventos de seca e inundações na Argentina, Bolívia, Brasil, Paraguai, Chile, Peru e Uruguai (Nunes, 2015).

No Brasil alguns eventos extremos de precipitação marcaram a última década, sendo exemplos as fortes chuvas que atingiram o Estado de Santa Catarina em 2008 e o Estado do Rio de Janeiro em 2012 acarretando em inundações, deslizamentos e grande número de desabrigados e vítimas fatais (Ribeiro *et al.*, 2014; Freitas *et al.*, 2014). Problemas com a falta de chuva também fizeram parte da história recente como os eventos que ocorreram na Amazônia em 2005, 2010, 2015/2016 e em grande parte do território brasileiro em 2014 e 2015 (Marengo, 2009; Marengo *et al.*, 2011; 2017; Coelho *et al.*, 2015; Ribeiro Neto *et al.*, 2021).

O Painel Intergovernamental de Mudança do Clima (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*), uma das mais importantes organizações que avaliam as alterações do clima e seus impactos no mundo, também analisam projeções oriundas de modelos climáticos acoplados atmosfera-oceano.

Os modelos climáticos acoplados atmosfera-oceano são utilizados para realizar projeções com cenários de emissões de CO₂, os quais têm evoluído consideravelmente, desde o terceiro relatório do IPCC. Atualmente, o IPCC, para o seu sexto relatório (AR6 – IPCC) utiliza os cenários de emissões *Shared Socioeconomic Pathways* (SSP) que fazem parte de uma nova estrutura de cenários, a fim de facilitar a análise integrada de futuros impactos climáticos, vulnerabilidades, adaptação e mitigação (Riahi *et al.*, 2017).

No entanto, apesar dos múltiplos aprimoramentos dos modelos e dos cenários de emissões, os erros associados à modelagem são uma realidade, uma vez que não conseguem descrever o sistema climático completamente

e em toda a sua complexidade (Knutti, 2008; IPCC, 2021, Almazroui *et al.*, 2021). Esses erros refletem nas incertezas das simulações, sobretudo às simulações das precipitações, principalmente na identificação de aumento ou diminuição das tendências em eventos extremos de chuva (IPCC, 2021; Almazroui *et al.*, 2021).

Em seu quinto e sexto relatório, o IPCC adverte que o sudeste da América do Sul pode apresentar um aumento nos padrões de chuva (IPCC, 2014; IPCC 2021). Além disso, estudos de observações e projeções futuras, realizadas para América do Sul, verificaram mudança positiva significativa da precipitação durante o verão e a primavera na região Sudeste do continente (Blazquez *et al.*, 2012; Diaz *et al.*, 2020; Almazroui *et al.*, 2021; Ortega *et al.*, 2021).

Especificamente para o Brasil, vários estudos têm documentado através da observação e da modelagem (projeções climáticas) o aumento da frequência de extremos climáticos em diversas regiões dos pais (Marengo *et al.*, 2013; Sousa, 2017; Natividade *et al.*, 2017; Brito *et al.*, 2019).

A Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), na região sudeste do Brasil, apresentou um aumento da precipitação nas últimas décadas (Marengo *et al.*, 2013; Obregon *et al.*, 2014; Machado *et al.*, 2021). Ademais, as projeções de mudanças da precipitação futura através do uso de modelos climáticos apontaram um aumento na precipitação total e na intensidade da precipitação, além de existir a possibilidade de longos períodos secos separados com dias de precipitação intensa (Marengo *et al.*, 2013).

No contexto de bacias hidrográficas nas grandes metrópoles a preocupação ocorre com a forma que essa variabilidade climática extrema poderá afetar a disponibilidade de água para o consumo, e para diferentes serviços produtivos. Com a seca severa de 2014-2015, os principais sistemas produtores que abastecem a RMSP, o Sistema Cantareira (Coelho *et al.*, 2015; Calado *et al.*, 2019) e o Sistema Alto Tietê (Silva e Valverde, 2017; Milano *et al.*, 2018) entraram em colapso. Segundo Calado *et al.* (2019), nos meses de janeiro e fevereiro de 2014, na região da Cantareira, choveu somente 63% e 68% dos valores climatológicos esperados. Ainda, especificamente sobre o reservatório Jaguari-Jacareí, o maior contribuinte do Sistema Cantareira, as chuvas de janeiro e de fevereiro de 2014 representaram apenas o 24,9% (54,9 mm) e 30,3% (60,6 mm) do acumulado climatológico para esses meses. A diminuição das chuvas em 2014 no Sistema Cantareira, não tinha alcançado valores extremos (abaixo do percentil 10) desde os anos de 1968 e 1969, nos quais somente choveu 30% e 40% do acumulado anual climatológico (1961-1990) (Calado *et al.*, 2019).

Neste artigo são estudados os extremos de chuva da região da Bacia Hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape (BHRRI) pertencente ao estado de São Paulo. Essa

bacia está localizada ao sul do estado, entre a RMSP e a Região Metropolitana de Curitiba (RMC), no estado do Paraná.

Atualmente a BHRRI merece destaque no estudo da precipitação, pois nela se encontra a sub-bacia do Alto Juquiá, na qual foi construído o Sistema Produtor São Lourenço (SPSL). O SPSL aproveita as águas do rio Juquiá, afluente do Rio Ribeira do Iguape, ao captar cerca de $4,7 \text{ m}^3/\text{s}$ de água na represa Cachoeira do França, a qual é transferida para a bacia do Alto Tietê com o intuito de auxiliar no abastecimento da RMSP que possui alta demanda hídrica (SABESP, 2011). O SPSL atende 1,4 milhão de habitantes de sete municípios da zona oeste da RMSP: Carapicuíba, Barueri, Jandira, Itapevi, Cotia, Vargem Grande Paulista e Santana do Parnaíba (SABESP, 2011). Esse fato mostra a dependência hídrica da RMSP em relação à oferta de água na BHRRI e enfatiza que muitas pessoas podem ser afetadas com a falta de água nesta bacia, além da população local.

Schisler e Custodio (2017) destacaram em seu estudo sobre a gestão dos recursos hídricos na Bacia de Juquiá, que a governança da água deve ser inclusiva para todos os setores da população e que a construção da SPSL para abastecimento, pode beneficiar a RMSP, mas não

necessariamente à população local. A vulnerabilidade ambiental da Bacia do Ribeira do Iguape aos extremos climáticos que já é uma realidade, junto com as mudanças climáticas (Ferreira, 2020) tende a piorar essa situação e colocam em maior risco as populações mais carentes e vulneráveis que habitam a região do Juquiá (Schisler; Custodio, 2017).

A BHRRI apresenta, historicamente, um grande número de eventos de inundações com destaque para a estação de verão com maior número de eventos registrados, porém existem casos de inundações extremas na estação seca, como foi o caso do dia 2 de agosto de 2011, produto de uma chuva intensa devido à interação de uma frente fria com um vórtice ciclônico de altos níveis. Esse evento de inundação atingiu 17 municípios e deixou perto de 28 mil pessoas afetadas (Ferreira e Valverde, 2012; Ferreira, 2013). Esses eventos trazem diversos prejuízos à região, cita-se outro caso ocorrido no ano de 1997 em que um evento de inundação causou a morte de três pessoas, deixou três pessoas feridas, além de mais de 15.400 desabrigados (CBH-RB, 2013; Dickel, 2016).

Além dos problemas de inundações, algumas regiões da BHRRI apresentaram escassez de água durante a última grande crise hídrica em 2014/2015, que atingiu vários

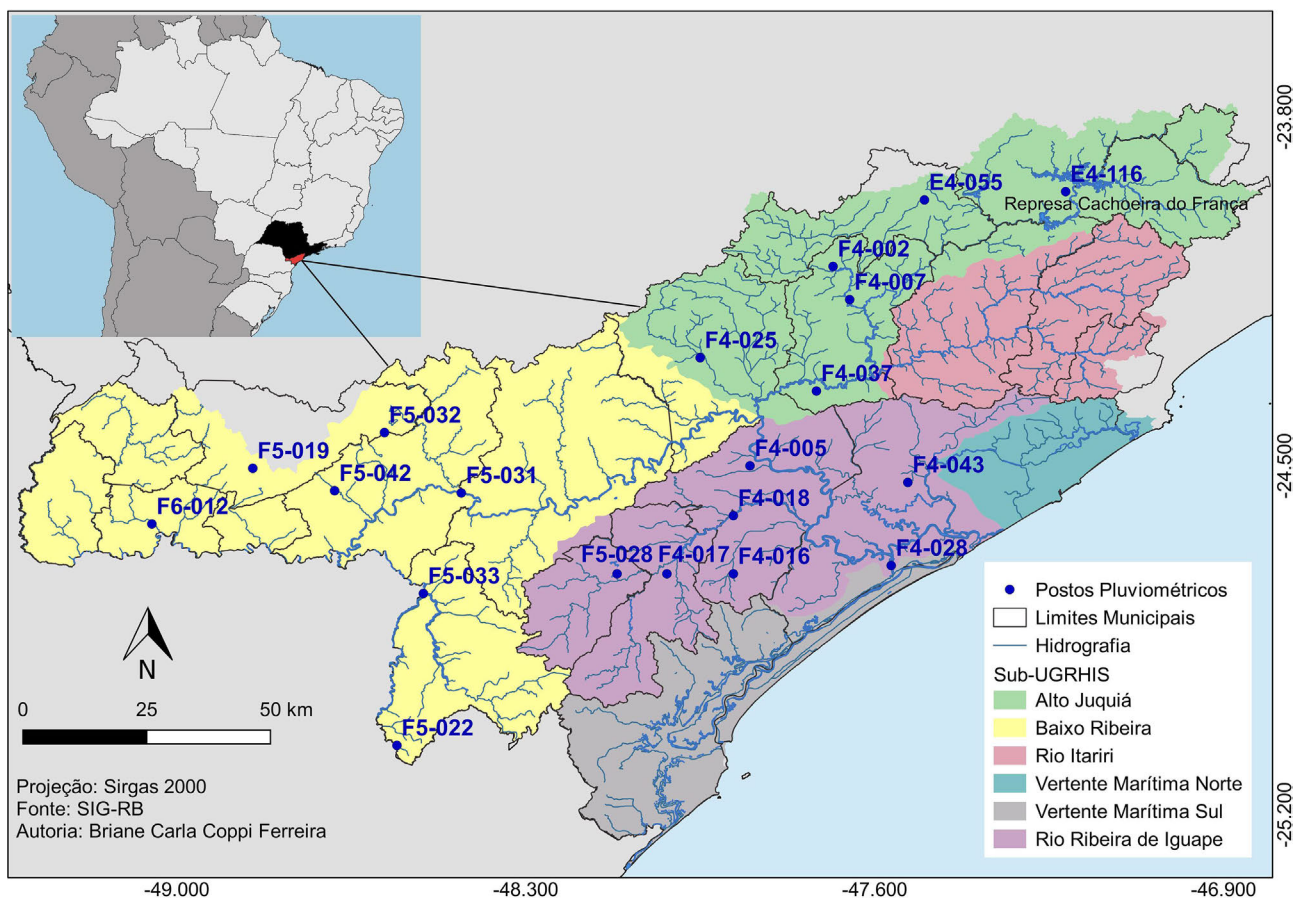


Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape no estado de São Paulo e dos postos pluviométricos considerados neste trabalho.

estados brasileiros, inclusive o Estado de São Paulo, apesar da bacia ser considerada privilegiada em relação à oferta de água (CBH-RB, 2015; Coelho *et al.*, 2015). Ao considerar os danos causados à BHRRI por eventos extremos de precipitação tanto com as inundações, quanto com os efeitos da seca que podem afetar inclusive o abastecimento de bacias vizinhas, este estudo visa avaliar a tendência dos extremos de chuva no futuro, identificando assim a possibilidade de ocorrência de um aumento ou diminuição desses extremos na região.

Nesse contexto, o artigo tem como objetivo principal o cálculo de índice de extremos climáticos e a análise das tendências nas condições atuais e futuras para a região da Bacia do Rio Ribeira de Iguape - SP.

2. Dados e Métodos

A Bacia Hidrográfica do Rio Ribeira de Iguape apresenta uma área total de 26.792,37 km², com 17.056,37 km² (63,6%) presente no estado de São Paulo e 9.736 km² (36,4%) no estado do Paraná (CBH-RB, 2015). A área de estudo compreende apenas a bacia localizada no estado de São Paulo e é representada pela Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos nº 11 (UGRHI-11- Rio Ribeira de Iguape e Litoral Sul) neste trabalho. A bacia é dividida em 06 sub-UGRHIs ou sub-bacias, sendo elas: Baixo Ribeira, Rio Ribeira de Iguape, Vertente Marítima Sul, Vertente Marítima Norte, Alto Juquiá e Rio Itariri (CBH-RB, 2013), conforme apresentado na Fig. 1.

A BHRRI pode ser classificada, de uma forma geral, com o clima tropical úmido com ligeira variação entre zonas costeiras e da serra de Paranapiacaba. A média da precipitação na bacia é de 1.400 mm/ano, sendo que na parte inferior da bacia chove por volta de 1.900 mm/ano. Na sub-bacia do Rio Juquiá a média chega a 1.500 mm/ano e o trecho mais chuvoso localiza-se no baixo curso do rio Ribeira, a jusante do município de Registro (CBH-RB, 2007).

2.1. Dados

Foram utilizados dados de precipitação diária, disponibilizados pelo Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE) dos 20 postos pluviométricos indicados na Fig. 1 no período de 1981-2018.

Os dados de precipitação para a avaliação dos cenários futuros correspondem ao modelo regional climático ETA (Chou *et al.*, 2014a), que foi rodado com as condições de contorno dos modelos globais do *Met Office Hadley Center*, o *Hadley Centre Global Environmental Model version 2* (HadGEM2-ES) (Collins *et al.*, 2011) e do modelo japonês *Model for Interdisciplinary Research on Climate version 5* (MIROC5), desenvolvido em conjunto no Centro de Pesquisa do Sistema Climático (CCSR) da Universidade de Tóquio, Instituto Nacional de Estudos Ambientais (NIES) e Agência do Japão para Ciência e

Tecnologia Terra-Marinha (Watanabe *et al.*, 2010). Tanto o Eta-HadGEM2-ES quanto o Eta-MIROC5 são simulações de alta resolução espacial e atendem de forma satisfatória a área de estudo deste trabalho. As simulações desses modelos regionais climáticos foram geradas pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) e disponibilizados na Plataforma Projeções de Mudança do Clima para a América do Sul regionalizados pelo modelo ETA (PROJETA) (Chou *et al.*, 2014a; Chou *et al.*, 2014b; Lyra *et al.*, 2017). O ETA é um modelo de mesoescala composto por pontos de grades e equações físicas elementares, modificado para realizar projeções futuras. Esse modelo é do tipo hidrostático com resoluções espaciais de 40 km, 20 km e 5 km, e cobre quase toda América do Sul (Chou *et al.*, 2014a; Moura *et al.*, 2010).

O período histórico analisado pelos modelos foi de 1981 até 2005 e para as projeções futuras de 2006 até 2099 nos cenários de emissões com RCP 4.5 e ao RCP 8.5. A Forçante Radiativa ou *Representative Concentration Pathways* (RCP) é expressa na unidade de watts por metro quadrado (W/m²) e representa uma mudança líquida no balanço energético do sistema Terra devido alguma perturbação, sendo uma boa medida de alteração da temperatura de superfície terrestre (van Vuuren *et al.*, 2011). O IPCC no quinto relatório utiliza cenários de RCP para gerar as projeções globais do clima, sendo eles cenários de 2,6; 4,5; 6,0 e 8,5 W/m², com os cenários 2,6 e 8,5 W/m² considerados mais e menos otimistas, respectivamente (IPCC, 2014).

2.2. Métodos

Este estudo considerou apenas as sub-bacias mais importantes da BHRRI, em quanto ao uso do recurso hídrico, conforme identificado por Ferreira e Valverde (2018). A identificação teve como base a avaliação de parâmetros de monitoramento de qualidade de água, uso da água para consumo humano e uso da água para geração de energia elétrica segundo o método de Franz (2011) que determina a importância da sub-bacia devido ao maior número de parâmetros atendidos.

Das seis sub-bacias, as que se apresentaram mais importantes foram: Alto Juquiá, Baixo Ribeira e Rio Ribeira de Iguape. As sub-bacias Alto Juquiá e Baixo Ribeira obtiveram o maior número de parâmetros necessários para determinar a importância, enquanto a Rio Ribeira de Iguape atendeu duas exigências para determinação de importância: o uso de água para consumo humano e o monitoramento de qualidade (Ferreira e Valverde, 2018).

Para o cálculo dos índices de precipitação foram utilizados dados de chuva diária provenientes dos postos pluviométricos e estes índices foram desenvolvidos pelo grupo de especialistas da *Commission for Climatology World Climate Research Programme – Climate Variability and Predictability* (CCI/CLIVAR/JCOMM) com o

objetivo de caracterizar a variabilidade climática da precipitação e da temperatura (Alexander *et al.*, 2005), sendo muito utilizados em pesquisas de variabilidade e mudanças climáticas para a determinação de indicadores de ocorrência de eventos extremos. No presente trabalho foram utilizados sete índices de precipitação: número máximo de dias secos consecutivos no ano (CDD); máxima precipitação em um dia (RX1day) no ano; máxima precipitação em cinco dias consecutivos (RX5day) no ano; número de dias com precipitação maior que 10 mm/dia (R10mm) no ano; número de dias com precipitação maior que 50 mm/dia (R50mm); número de dias com precipitação maior que 80 mm/dia (R80mm); e precipitação total anual em dias com chuva acima do percentil 95 (R95p) (Zhang e Yang, 2004). A Tabela 1 descreve a formulação dos índices.

Os sete índices utilizados foram obtidos com base nos dados diários de precipitação, utilizando o *software* RCLimDex, que é mantido pelo *Climate Research Division* e foi desenvolvido na linguagem computacional R, fornecendo uma interface gráfica de fácil interpretação para calcular o total de 27 índices de temperatura e precipitação (Zhang e Yang, 2004; Zhang *et al.*, 2005; Alexander *et al.*, 2005). O *software* realiza um controle de qualidade nos dados diários e gera parâmetros estatísticos, entre eles a tendência linear anual calculada pelo método de mínimos quadrados; nível de significância estatística da tendência (valor-p); coeficiente de determinação (r^2) e erro padrão de estimativa (Zhang *et al.*, 2005). Nesse estudo consideraram-se tendências significativas, aquelas que apresentaram nível de significância de 95% (valor-p < 0,05).

Para avaliar o comportamento dos índices no cenário de projeções climáticas simulados pelos modelos regionais Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5, inicialmente foi validada a precipitação histórica simulada pelos modelos climáticos para o período de 1981-2005, período com os dados disponibilizados pelo PROJETA para os modelos estudados. A validação possibilitou a estimativa do erro sistemático dos modelos. As métricas utilizadas foram o viés ou Erro Médio (EM), onde a simulação pode ser considerada perfeita se o EM apresentar valor igual à zero. Além disso, foi estimado o valor da Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE em inglês), para mostrar a dimensão do erro associado ao modelo, e a correlação de anomalias

como mostram as Eqs. (1), (2), (3) (Moura *et al.*, 2010; Martins, 2014).

$$EM = \sum_{i=1}^n \frac{(P - O)}{n} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P - O)^2}{n}} \quad (2)$$

$$CA = \frac{\sum_{i=1}^n (P - \bar{P})(O - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O - \bar{O})^2}} \quad (3)$$

onde P são as simulações do modelo; O as observações; \bar{P} e \bar{O} são as médias simuladas e observadas, respectivamente; e n é o número da série de dados estudados.

O site do PROJETA fornece os índices de extremos dos dados históricos e dos cenários futuros já corrigidos pelo método Quantil-Quantil (Bárdossy e Pegram, 2011), com a remoção de erro sistemático na precipitação diária minimizando as incertezas. Assim, foram utilizados os índices de extremos de chuva corrigidos dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 resolução 20 km x 20 km. As tendências dos índices extremos foram analisadas em três intervalos de períodos climáticos (*time slice*): 2006-2040; 2041-2070; e 2071-2099.

3. Resultados e Discussão

As bacias hidrológicas na região Sudeste, de uma forma geral, apresentam um calendário hidrológico muito similar com as chuvas no período de outubro a março, sendo o intervalo com maiores chuvas e as maiores vazões que originam as cheias dos rios (Calado *et al.*, 2019; Ferreira, 2013). Esse calendário hidrológico não é diferente para a Bacia do Ribeira de Iguape, como é descrito a seguir.

3.1. Avaliação da chuva mensal e dos índices extremos para o clima atual

A Fig. 2a mostra a distribuição mensal climatológica das chuvas nas três sub-bacias em estudo, que evidencia o calendário hidrológico típico da região com o início do

Tabela 1 - Característica dos índices climáticos de precipitação.

Índices	Descrição
CDD	RR_{ij} é a quantidade de dias de precipitação diária < 1 mm no dia i e no período j .
RX1day	RR_{ij} é a quantidade de precipitação diária no dia i e no período j . O máximo valor de precipitação num dia i para o período j .
RX5day	RR_{ij} é a quantidade de precipitação no intervalo de cinco dias, terminando no dia k , no período.
R nm mm	Seja nm um limiar definido, então RR_{ij} será a quantidade de dias de precipitação diária no dia i e no período j . $nm = 10$ mm; $nm = 50$ mm e $nm = 80$ mm.
R95p	Seja $RR_{w,j}$ a quantidade de precipitação diária no dia úmido w ($RR \geq 1$ mm) no período i , e temos $RR_{w,n}95$ como o 95º percentil de precipitação sobre os dias úmidos em um período climatológico.

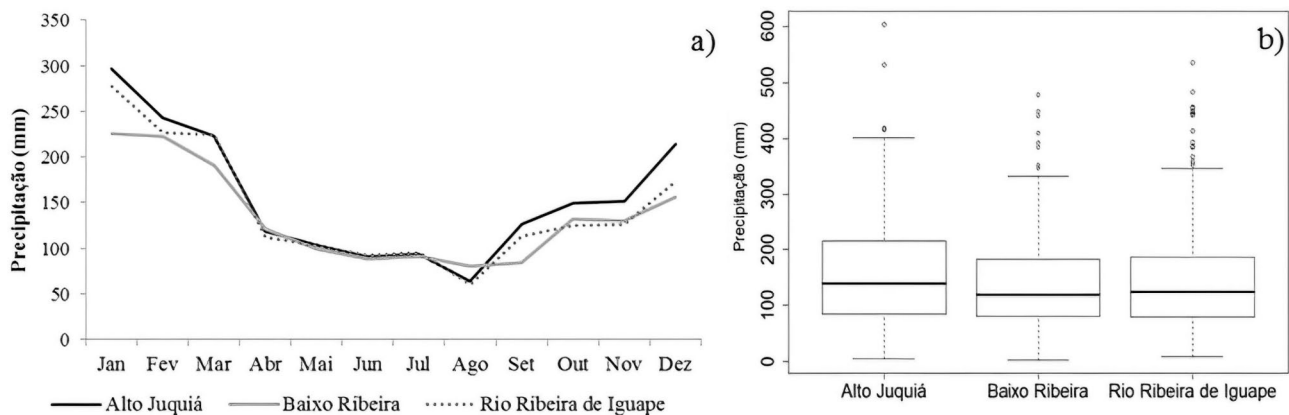


Figura 2 - Climatologia do ciclo anual da precipitação (a) e diagrama de *boxplot* da chuva mensal (b) para o período 1981-2018 das sub-bacias hidrográficas em estudo.

período chuvoso em outubro e finalizando em março, sendo o mês de janeiro o de máximas chuvas. Por outro lado, o mês de menor chuva ocorre em agosto em todas as sub-bacias.

As diferenças entre as climatologias das sub-bacias encontram-se, principalmente, entre o período de setembro até março. A sub-bacia do Alto Juquiá, região na qual está localizado o sistema de captação de água SPSL, apresentou maior precipitação entre as três estudadas com destaque para os meses de janeiro e dezembro, que superaram em 71 mm e 58 mm, respectivamente o valor mensal do Baixo Ribeira. Devido à intensidade das chuvas que abastece a bacia do rio Juquiá, este pode ser um dos motivos da construção do sistema produtor na região. Essa região também apresenta maior altitude e a sub-bacia com maior área de Unidade de Conservação, sendo cerca de 70% de sua área total.

A segunda região mais chuvosa, no verão e na primavera, é o Rio Ribeira de Iguape, uma região costeira que apresenta a maior população urbana e a menor área de Unidade de Conservação. Já a região menos chuvosa, em parte do verão (janeiro), outono (março) e primavera (setembro) foi o Baixo Ribeira, que apresenta menor população urbana e maior área de extensão (Ferreira, 2013; Ferreira e Valverde, 2018).

Ao analisar a Fig. 2b pode-se observar que, os eventos extremos de precipitação mensal já ocorrem ao menos nas últimas três décadas (1981-2018), o diagrama de *boxplot* evidencia que estes extremos, identificados pelos *outliers*, foram mais frequentes na Bacia do Rio Ribeira de Iguape, mas os de maiores intensidades têm ocorrido no Alto Juquiá.

O cálculo dos índices climáticos, com base nos dados observados diários nas três sub-bacias, mostrou evi-

Tabela 2 - Apresentação dos valores da tendência e valor-p calculados no RCLimindex para o período 1981-2018.

Índices	Alto Juquiá		Baixo Ribeira		Rio Ribeira de Iguape	
	Inclinação	Valor-p	Inclinação	Valor-p	Inclinação	Valor-p
CDD	0,306 (E4-055)	0,007 [*] (E4-055)	0,221 (F5-022)	0,05 [*] (F5-022)	0,268 (F4-028)	0,004 [*] (F4-028)
Rx1day	0,361 (E4-055)	0,295 (E4-055)	-0,334 (F5-031)	0,342 (F5-031)	-0,381 (F4-043)	0,534 (F4-043)
Rx5day	-1,421 (F4-037)	0,04 [*] (F4-037)	-0,795 (F5-042)	0,144 (F5-042)	-1,416 (F4-028)	0,226 (F4-028)
R50mm	0,063 (F4-002)	0,05 [*] (F4-002)	0,065 (F5-019)	0,05 [*] (F5-019)	0,013 (F5-018)	0,072 (F5-018)
R80mm	0,022 (E4-055)	0,094 (E4-055)	0,017 (F5-019)	0,042 [*] (F5-019)	0,02 (F5-028)	0,083 (F5-028)
R95p	4,879 (F4-002)	0,05 [*] (F4-002)	5,603 (F5-019)	0,027 [*] (F5-019)	3,71 (F5-028)	0,196 (F5-028)

^{*}Significância estatística com valor-p < 0,05.

dências de tendências diferenciadas para cada índice (Tabela 2). O índice de dias máximos secos consecutivos (CDD) apresentou uma tendência positiva e com significância estatística (valor- $p < 0,05$) para as três sub-bacias. Mais de 80% dos postos pluviométricos, de cada sub-bacia, coincidiram com a tendência positiva. O que sugere uma redução progressiva dos dias úmidos consecutivos e em Alto Juquiá a tendência positiva foi mais pronunciada, conforme mostra o parâmetro de inclinação.

Já o índice Rx1day, que representa a máxima precipitação diária, no mês, mostrou tendência negativa em 57% dos postos no Baixo Ribeira e Rio Ribeira de Iguape. Em Alto Juquiá o índice Rx1day, assim como o Rx5day, não demonstrou predominância de tendência, uma vez que metade dos postos obteve tendência positiva e a outra metade negativa. A Tabela 2 destaca apenas os postos com maiores valores do parâmetro de inclinação para os dois índices. Esse resultado, sem definição de tendência predominante, indica a alta variabilidade da chuva diária dessa sub-bacia. Todavia, vale destacar que houve significância estatística para tendência negativa do índice Rx5day (Tabela 2). Além disso, salienta-se que o posto E4-116 (Fig. 1), que é o mais próximo ao SPSL, mostrou tendência negativa tanto ao acumulado em um dia, quanto ao acumulado em cinco dias consecutivos. Essa redução do acumulado de chuva próximo ao reservatório do SPSL pode demandar maior atenção à gestão da bacia.

Em Baixo Ribeira e Rio Ribeira de Iguape, a maior parte dos postos, cerca de 57% em ambas sub-bacias, apresentou tendência negativa do acumulado de precipitação em cinco dias.

Por outro lado, o número de dias com precipitação maior que 50 mm/dia (R50mm) exibiu tendência positiva em 80% dos postos em Alto Juquiá, Baixo Ribeira e Rio Ribeira de Iguape. Isto mostra um aumento do número de dias com precipitação maior ou igual que 50 mm em todas as sub-bacias, sendo Alto Juquiá e Baixo Ribeira significativamente estatística a essa tendência (Tabela 2).

O índice R80mm, que representa o número de dias com chuva muito intensa igual ou maior a 80 mm, demonstrou aumento em 66% dos postos Alto Juquiá e 71% em Baixo Ribeira e Rio Ribeira de Iguape, com significância estatística em Baixo Ribeira (Tabela 2).

O índice R95p, que representa os anos muito úmidos (precipitação total anual em dias com chuva diária acima do percentil 95) mostrou na maior parte dos postos pluviométricos analisados tendência positiva nas três sub-bacias e com significância estatística em Alto Juquiá e Baixo Ribeira, indicando o aumento na ocorrência de anos muito úmidos ao longo do período estudado. Em Alto Juquiá e Rio Ribeira de Iguape houve uma tendência positiva de R95p em 57% dos postos, enquanto 66% dos postos também apresentaram esta tendência em Baixo Ribeira.

Na Fig. 3, apresentam-se os gráficos da variabilidade anual dos índices CDD, Rx1day e R95p dos postos plu-

viométricos com significância estatística. Observa-se que o índice CDD apresenta tendência negativa em todas as sub-bacias, o Alto Juquiá apresenta uma tendência mais acentuada comparada com as demais regiões, como verificado pelo parâmetro de inclinação (Tabela 2). Em Baixo Ribeira, houve 46 dias consecutivos sem chuva em 1994, sendo o maior em todo o período estudado. Já Alto Juquiá apresentou mais picos nos anos 2000, 2008 e 2011; e em Rio Ribeira de Iguape, o ano de 2018 sobressaiu como o mais extremo. Em todos esses anos (exceto em 1994) houve a ocorrência de La Niña moderada, no entanto, eles afetaram de forma diferenciada cada região.

No caso de Baixo Ribeira, que apresentou um maior valor de CDD de 46 dias no ano de 1994, evidencia que houve quase um mês e meio com ausência de chuva, sendo que se esse efeito aconteceu na época chuvosa pode ter comprometido diferentes setores, principalmente de abastecimento público e agricultura.

O índice RX1day mostrou uma leve tendência positiva na sub-bacia do Alto Juquiá, e nas outras sub-bacias uma tendência positiva com muita variabilidade (Fig. 3 e Tabela 2). Os maiores valores do índice Rx1day ocorreram na sub-bacia Rio Ribeira de Iguape, apesar da tendência negativa, com um registro de 233,2 mm em 1983, ano considerado El Niño forte e um dos piores eventos de chuva diária que atingiu a região, e que acarretou em inundações com muitos prejuízos em grande parte da sub-bacia (Santana *et al*, 2005; Dickel, 2016), e 223,6 mm em 2008, ano de La Niña moderada (Ferreira, 2020).

O R95p apresentou tendência positiva acentuada nas três sub-bacias, com destaque para Baixo Ribeira (Fig. 3), com um parâmetro de inclinação maior, se mostrou estatisticamente significativa (Tabela 2). Os maiores valores deste índice foram observados na região de Rio Ribeira de Iguape, com 892 mm em 2009 e 847 mm em 1988 no Alto Juquiá, ambos os anos com presença do fenômeno El Niño. Porém, em Alto Juquiá observou-se a maior frequência de altos valores deste índice.

Estudos hidroclimatológicos e de inundações na bacia do Vale do Ribeira já verificaram que eventos intensos de inundações ocorreram em situações de eventos de El Niño, como foram os casos dos anos 1965, 1982-1983, 1987, 1995, 1997-1998 e 2011 com fortes impactos para a população (Ferreira e Valverde, 2012; Ferreira, 2013; Dickel, 2016).

Com os resultados encontrados, a sub-bacia Alto Juquiá mostrou tendência positiva de dias secos e aumento no índice R95p apontando anos muito chuvosos. Alto Juquiá apresentou-se como a região mais chuvosa entre as estudadas e com tendência positiva de número de dias com precipitação acima dos 50 mm.

A sub-bacia Baixo Ribeira apresentou aumento do número de dias secos, diminuição das máximas chuvas diárias e das chuvas acumuladas em cinco dias e uma

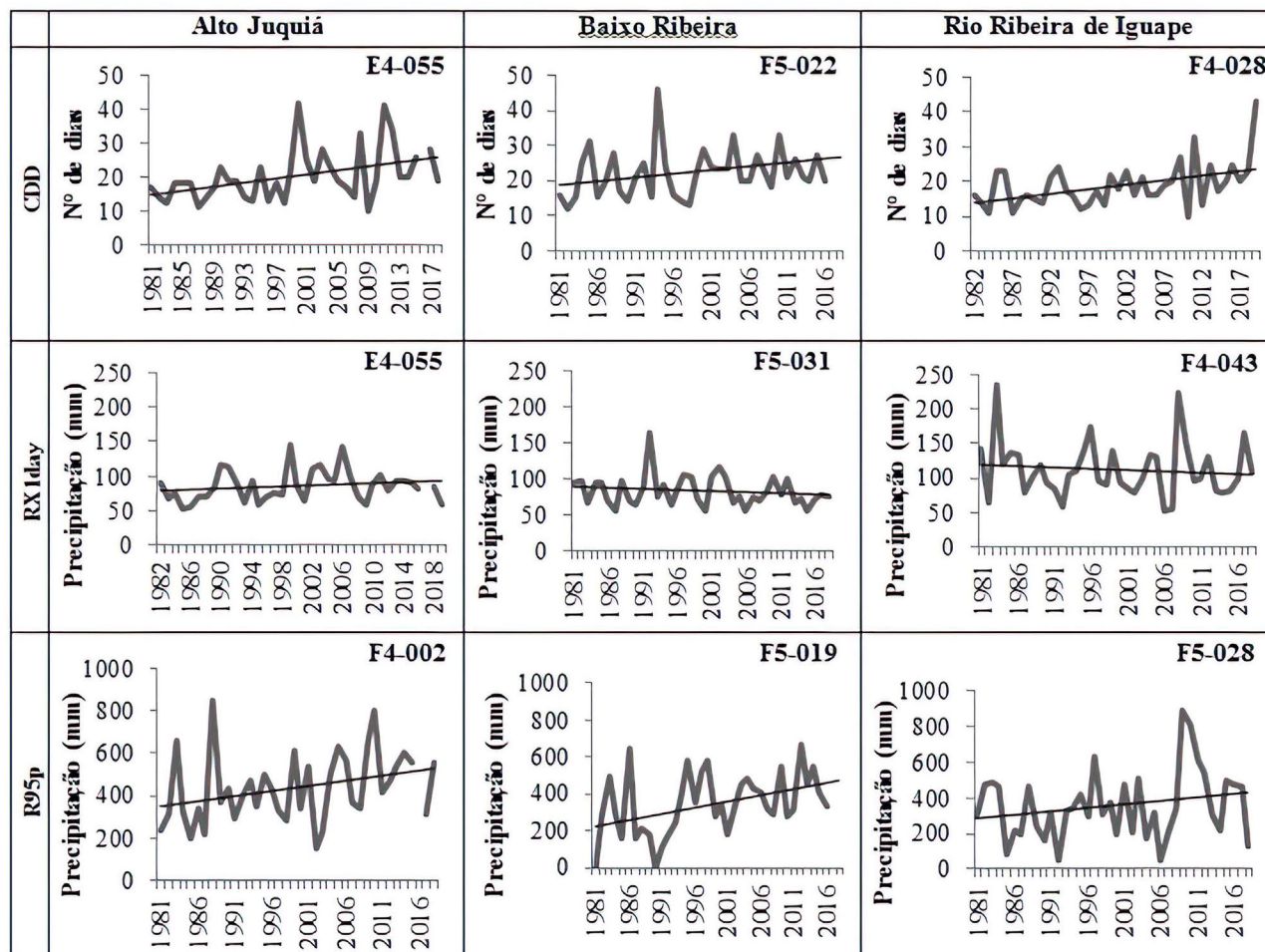


Figura 3 - Gráficos dos índices CDD, Rx1day, Rx1day verão e R95p.

suave tendência positiva no número de dias com chuvas intensas (R50mm). O Rio Ribeira de Iguape indicou tendências semelhantes ao Baixo Ribeira.

3.2. Análise dos modelos climáticos

3.2.1. Avaliação das simulações históricas dos modelos e erros associados

A validação de modelos climáticos deve ser realizada, para conferir o desempenho e as incertezas dos modelos em simular as condições atmosféricas e climáticas de uma região. Para a área de estudo as simulações do Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 foram validadas com base nos dados observados, como explicado na seção metodologia, para identificar os erros associados. A Fig. 4 apresenta o ciclo sazonal do histórico observado e dos simulados pelos modelos (Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5) e a Tabela 3 mostra as métricas estatísticas de validação. Observa-se que ambos os modelos mostram diferenças em relação ao observado, um adiantamento do período seco com início em abril, sendo os valores de

maior semelhança nos meses de setembro e outubro na sub-bacia Alto Juquiá e os meses março e abril em Baixo Ribeira no modelo Eta-MIROC5.

Jones e Carvalho (2013) avaliaram as mudanças nos sistemas de padrão de chuva na América do Sul, para a época de verão, utilizando simulações históricas (1979-2010) de dez modelos do CMIP5 (*Fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project*) do IPCC e projeções futuras de seis modelos do CMIP5 no cenário RCP 8.5. Os resultados, especificamente para a região sudeste do Brasil (onde está inserida a bacia do Ribeira do Iguape) identificaram que a maioria dos modelos, para as simulações históricas, mostram diferenças como adiantamento na data de início da estação chuvosa, final de estação atrasada e um aumento na duração do período chuvoso.

Os resultados encontrados para as sub-bacias de Alto Juquiá e Baixo Ribeira são um pouco similares, pois o adiantamento do período seco implica em um início adiantado do período chuvoso, mas não necessariamente significa um aumento na sua amplitude, como observado na Fig. 4.

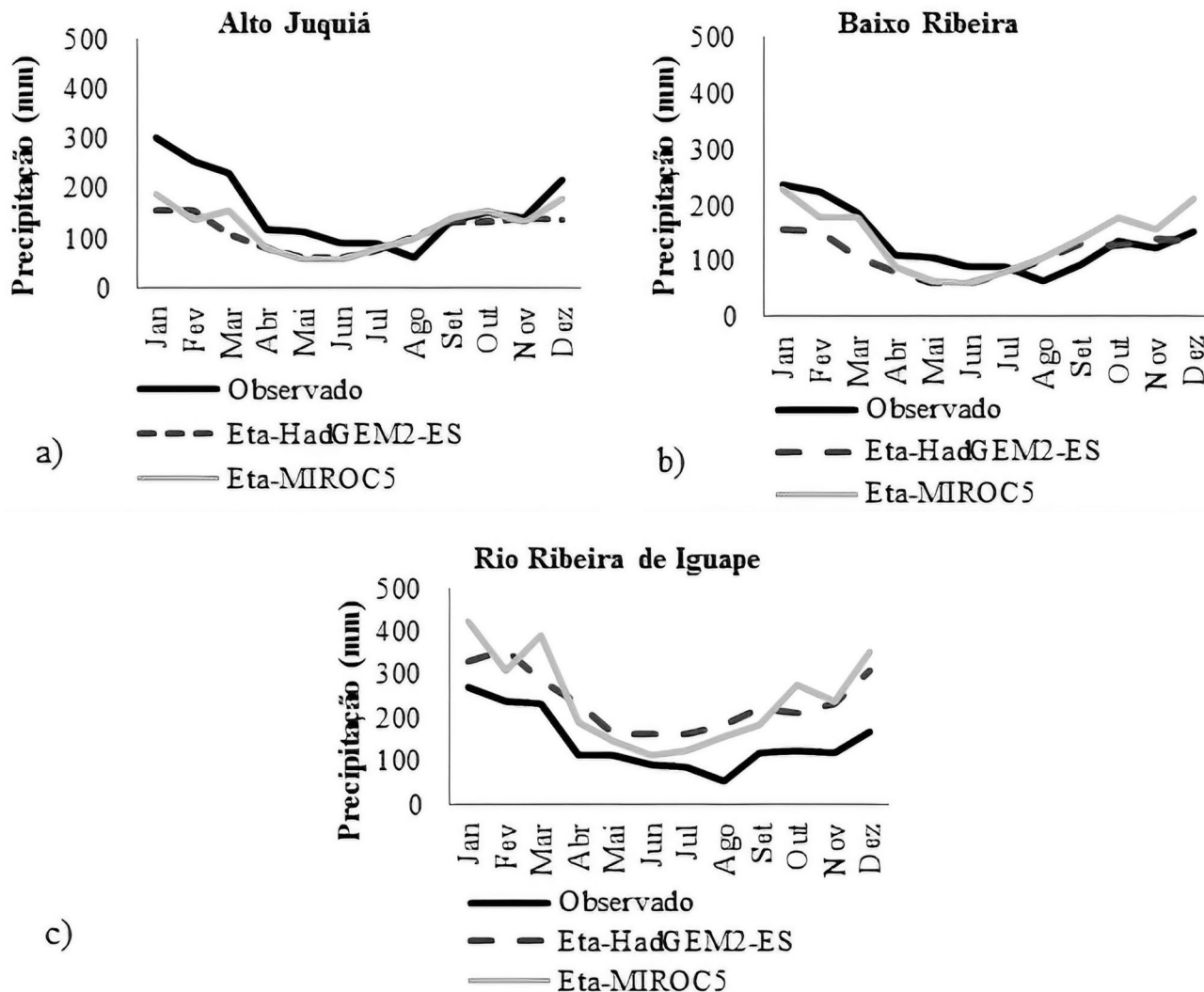


Figura 4 - Ciclo sazonal da precipitação dos dados observados e dos simulados pelos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5.

Tabela 3 - Erro sistemático, erro quadrático médio e correlação dos dados modelos com os dados observados.

Sub-Bacia	Modelo	EM	RMSE	CA
Alto Juquiá	Eta-HadGEM2-ES	-25,74	78,83	0,35
	Eta-MIROC5	-20,35	76,61	0,37
Baixo Ribeira	Eta-HadGEM2-ES	7,45	73,23	0,27
	Eta-MIROC5	2,43	70,86	0,32
Rio Ribeira de Iguape	Eta-HadGEM2-ES	51,90	118,57	0,36
	Eta-MIROC5	55,09	129,52	0,40

Para a sub-região do Rio Ribeira de Iguape os modelos superestimam a chuva em todos os meses, com destaque para o modelo Eta-MIROC5, que simulou uma chuva de 424 mm, enquanto o observado foi de 270 mm, por isso os erros calculados são maiores, conforme mostrados na Tabela 2. Em Alto Juquiá a chuva é subestimada no verão,

outono e grande parte do inverno, visto que o erro médio é negativo para ambos modelos. Para o Baixo Ribeira, observa-se uma melhor simulação dos modelos, principalmente do modelo Eta-MIROC5 nos meses de janeiro, fevereiro, março, abril e junho, pelo que apresentou os menores erros.

Outra análise realizada com os dados históricos simulados, para identificar as diferenças entre os dados observados, refere-se à tendência dos índices de extremos de precipitação, conforme demonstra a Tabela 4. Vale ressaltar que os índices históricos e futuros, disponibilizados pelo PROJETA, foram corrigidos a partir dos dados diários, o que diminuiu muito as incertezas associadas.

O CDD, nas três sub-regiões apresentou a mesma tendência positiva em comparação com os dados históricos apenas com o modelo Eta-HadGEM2-ES. Para o índice R10mm, somente em Alto Juquiá os dois modelos

Tabela 4 - Tendência dos índices de extremos de chuva históricos.

	Índice	Observado	Eta-HadGEM2-ES	Eta-MIROC5
Alto Juquiá	CDD	0,306 [*] (E4-055)	0,2208	-0,0715
	R10mm	-0,56 [*] (F4-037)	-1,1369 [*]	-0,2177
	RX1day	0,361 (E4-055)	-1,1427 [*]	0,0147
	RX5day	-1,421 [*] (F4-037)	-3,2488 [*]	0,8077
	R95p	4,879 [*] (F4-002)	-16,425 [*]	-2,0854
Baixo Ribeira	CDD	0,221 [*] (F5-032)	0,3654	-0,1015
	R10mm	0,388 [*] (F5-032)	-0,7531 [*]	0,1485
	RX1day	-0334 (F5-031)	-0,12	0,0353
	RX5day	-0,795 (F5-042)	-0,0712	-0,1015
	R95p	5,603 [*] (F5-019)	-9,2832 [*]	0,3118
Rio Ribeira de Iguape	CDD	0,268 [*] (F4-028)	0,4046 [*]	-0,1415
	R10mm	-0,156 (F4-017)	-0,6923	0,0931
	RX1day	-0,381 (F4-043)	-1,2608	-0,1948
	RX5day	-1,416 (F4-028)	-1,8965	-1,029
	R95p	3,71 (F5-028)	-14,702 [*]	-2,18

^{*}Significância estatística com valor-p < 0,05.

simularam as mesmas tendências de diminuição nos dias com chuva maior ou igual que 10 mm.

A tendência negativa histórica de Rx1day em Baixo Ribeira e Rio Ribeira de Iguape foi simulada apenas pelo modelo Eta-HadGEM2-ES. Já na região Alto Juquiá, a tendência positiva observada, foi simulada apenas pelo modelo Eta-MIROC5.

Em Baixo Ribeira e Rio Ribeira de Iguape, a precipitação acumulada de cinco dias (Rx5day) apresentou tendência negativa em ambas as sub-bacias e os dois modelos considerados simularam essa tendência. Em Alto Juquiá, apenas o HadGEM2-ES mostrou essa mesma tendência e com significância estatística. O índice R95p obteve tendência positiva em todas as sub-bacias com os dados observados, porém, somente em Baixo Ribeira, o modelo Eta-MIROC5 simulou a mesma tendência.

O modelo Eta-HadGEM2-ES mostrou melhor desempenho em simular as tendências como o observado, principalmente os índices CDD e RX5day em todas as sub-bacias. Já para o índice R10mm, o Eta-HadGEM2-ES simulou uma mesma tendência somente para o Alto Juquiá e para o Rio Ribeira de Iguape. Apenas o índice R95p não apresentou o mesmo comportamento entre o observado e o modelado pelo Eta-HadGEM2-ES nas três sub-bacias.

3.2.2. Avaliação dos índices de extremos de precipitação para os cenários futuros

As tendências dos índices dos extremos climáticos do Eta-HadGEM2-ES e o Eta-MIROC5 são mostrados separadamente para três períodos: 2006-2040, 2041-2070 e 2071-2099, e para dois cenários de emissões (RCP 4.5 e RCP 8.5) conforme exibido na Tabela 5. O resultado dos

modelos mostrou muitas diferenças nas tendências na maioria dos índices, para cada sub-bacia, cenário de emissões e *time slices* analisados.

Na sub-bacia Baixo Ribeira, a projeção do índice R95p para o cenário de emissões RCP 4.5, e para os dois modelos, mostrou tendências negativas, evidenciando decréscimo em anos com chuva anual de dias muito chuvosos (\geq percentil 95) até 2099 (Tabela 5), diferente da tendência positiva de R95p dos dados observados. Para o cenário de emissões RCP 8.5 nos dois primeiros *time-slices* (2006-2040 e 2041-2070) também houve uma tendência negativa desse índice, enquanto, a partir de 2071-2099 a tendência muda de sinal. Em Alto Juquiá e Rio Ribeira de Iguape, o modelo Eta-MIROC5 para o cenário RCP 4.5 projeta tendências negativa para todos os *time-slices*. Já o Eta-HadGEM2-ES só mostrou tendências negativas a partir do *time slices* 2041-2070. Por outro lado, analisando um futuro mais próximo (até 2040), os dois modelos, e para um cenário de emissão mais pessimista (RCP 8.5) a tendência de anos com dias muito chuvosos (R95p) será negativa.

Outro índice que apresentou consenso para os dois modelos na sub-bacia do Baixo Ribeira foi o RX5day para o cenário RCP 8.5, com tendência negativa ao longo dos três *time slices* no acumulado da chuva máxima em cinco dias consecutivos até 2099, assim como com dados observados. Para o cenário de emissões RCP 4.5, o modelo Eta-MIROC5 projetou a tendência negativa de RX5day nos *time slices* 2006-2040 e 2071-2099 nas três áreas consideradas.

O índice CDD, que nos dados observados já mostrou uma tendência positiva nas três sub-bacias analisadas,

Tabela 5 - Tendência dos índices de extremos de chuva modelados para os cenários 4,5 RCP e 8,5 RCP.

		Cenário de emissões RCP 4,5														
		Alto Juquiá				Baixo Ribeira				Ribeira de Iguape						
Modelo	Período	CDD	R10mm	RX1day	RX5day	R95p	CDD	R10mm	RX1day	RX5day	R95p	CDD	R10mm	RX1day	RX5day	R95p
Eta-HadGEM2-ES	2006-2040	+	+	+	+	+	-	+	+	+	-	-	+	+	+	+
	2041-2070	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	2071-2099	-	-	-	-	-	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-
Eta- MIROC5	2006-2040	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	2041-2070	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2071-2099	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
Cenário de emissões RCP 8,5																
		Alto Juquiá				Baixo Ribeira				Rio Ribeira de Iguape						
Modelo	Período	CDD	R10mm	RX1day	RX5day	R95p	CDD	R10mm	RX1day	RX5day	R95p	CDD	R10mm	RX1day	RX5day	R95p
Eta-HadGEM2-ES	2006-2040	+	-	+	+	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	2041-2070	-	-	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	+	+	-
	2071-2099	-	+	+	+	-	+	-	+	-	+	+	+	+	+	+
Eta- MIROC5	2006-2040	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	2041-2070	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	-	-
	2071-2099	+	+	-	-	-	+	-	-	-	-	+	+	+	+	+

somente continuou mostrando tendência positiva na projeção do Eta-MIROC5 para o futuro mais próximo, *time slice* 2006-2040 nos dois cenários. O Eta- HadGEM2-ES, para este índice, projetou tendência positiva somente em Alto Juquiá para o mesmo *time slice* de 2006-2040 no cenário RCP 4.5. Por outro lado, no cenário de RCP 8.5, a projeção foi de tendência positiva para o aumento no número de dias secos consecutivos nas três sub-bacias, também no período de 2006-2040.

No que se refere aos índices R10mm e RX1day, existe muita variabilidade entre os modelos, cenários e sub-bacias. No entanto, para um futuro próximo (2006-2040) e para as três sub-bacias a tendência dos dois índices são positivas pelas projeções do modelo Eta- HadGEM2-ES no cenário de emissões RCP 4.5. Já para o cenário mais extremo (RCP 8.5) e para um futuro próximo, as tendências serão negativas pela simulação do modelo Eta-MIROC5.

Em geral, para a região sudeste do Brasil, alguns trabalhos recentes que têm analisado as projeções futuras da chuva a partir de modelos globais do IPCC e modelos regionais têm indicado pouco consenso em relação ao aumento ou diminuição das chuvas, como encontrado nos resultados deste trabalho.

Natividade *et al* (2017) analisaram índices extremos climáticos de 19 modelos globais do CMIP5 para o estado de Minas Gerais e o estudo ressaltou que nos índices de extremos de chuva o resultado da modelagem mostrou aumento das condições secas (CDD) no norte de Minas Gerais no período presente e na projeção futura 2041-2070, e uma tendência negativa do Rx5day e R95p em 2071-2099.

Ao utilizar as simulações dos modelos climáticos regionais Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, ambos com a resolução de 20 km, para avaliar as projeções dos índices de precipitação (CWD, Rx1day, Rx5day e R95p) na determinação da vulnerabilidade a desastres naturais no Brasil, Debortoli *et al.* (2017) encontraram comportamentos distintos dos modelos nas diferentes regiões do país. O estudo relata que o Eta-HadGEM2-ES representa melhor as características climáticas das regiões mais altas e sub-tropicais que se encontram nas regiões sudeste e sul do Brasil. Por outro lado, o Eta-MIROC5 descreve melhor áreas mais baixas e tropicais, como o norte, nordeste e centro-oeste (Debortoli *et al.*, 2017).

Uma comparação realizada por Lyra *et al.* (2017) entre as resoluções de 5 km e 20 km do modelo regional Eta-HadGEM2-ES revelou que a maior resolução espacial apresenta melhores representações dos valores extremos, quando comparado à resolução de 20 km. Os cenários de RCP 4.5 e RCP 8.5, na resolução de 5 km, mostraram redução dos extremos de precipitação (Rx1day, Rx5day e R95p) e aumento da duração de dias secos (CDD) na maior parte da área nas regiões metropolitanas de São

Paulo, Santos e Rio de Janeiro. O trabalho de Lyra *et al.* (2017) que analisou uma área muito próxima ao BHRRI mostra um resultado similar com parte dos resultados obtidos neste trabalho, exceto pela predominância do índice R95p estar diminuindo na BHRRI.

4. Considerações finais

Vale destacar que os modelos globais acoplados oceano-atmosfera apresentam erros e incertezas em suas projeções e o aprimoramento constante dos modelos permite a diminuição dos mesmos e a maior confiabilidade das suas simulações. Este trabalho calculou índices climáticos extremos a partir de dados observados e analisou índices simulados por dois modelos regionalizados de alta resolução disponibilizados pelo PROJETA: Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5. Esses modelos regionais apresentam erros derivados dos modelos globais de origem e/ou relacionado aos dados, porém quando corrigidos tornam-se úteis para realizar projeções no território brasileiro (Almagro; Oliveira, 2019).

Tendo como base os resultados obtidos e discutidos sobre as tendências dos índices de chuva observada para a BHRRI, foi possível identificar nas três sub-bacias estudadas tendências positivas do índice número de dias secos consecutivos (CDD) ao longo do período de análise 1981-2018. Ao mesmo tempo, o número de dias com precipitações moderadas (R50mm) e anos com dias muito úmidos (R95p) também apresentaram tendências positivas. Isso sugere que embora exista uma diminuição no acumulado total de chuva, devido à tendência positiva do número de dias secos consecutivos, os dias com chuva tendem a ser mais extremos (R50mm e R95p), o que contribui para episódios de inundações e deslizamentos, que são comuns na região de estudo como já referenciado ao longo do texto.

As projeções dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-MIROC5 mostraram diversos resultados de tendências dos extremos de chuva para as três sub-bacias nos *time slices* considerados. Entretanto, os resultados mostram um consenso dos modelos regionais, para uma tendência positiva do CDD para o período mais próximo (2006-2040) e para o cenário de emissões mais extremo (RCP 8.5) nas três sub-bacias. Assim, espera-se um aumento anual no número de dias secos consecutivos, sendo necessário dar atenção a esse índice visto que a falta de chuva por longos períodos pode acarretar em desabastecimento das regiões que recebem água desta bacia, especificamente do SPSL. Por outro lado, as projeções do índice R95p mostraram consenso de diminuição na sua tendência anual para as três sub-bacias e os dois modelos, isto para os *times slices* 2041-2070 e 2071-2099 no cenário RCP 4.5. Esse resultado indica que anos muito chuvosos e que apresentam dias com chuva acima do percentil 95 poderão diminuir.

Dando ênfase aos resultados das simulações para a sub-bacia Alto Juquiá, onde se encontra o SPSL, além de mostrar o aumento do CDD também para o cenário de RCP 4.5 em ambos os modelos, somente o modelo Eta-HadGEM2-ES, para o futuro mais próximo (até 2040), simulou tendências positivas para RX1day e RX5day nos dois cenários de emissões. Todavia, é prudente que haja atenção a estes índices uma vez que seu aumento, como projetado nos dois cenários, em uma escala temporal diária, pode provocar inundações com grandes prejuízos para a população e a diminuição, quando associada ao aumento do CDD, pode causar diminuição da disponibilidade hídrica da bacia, em uma escala temporal sazonal, e afetar o abastecimento de água para a RMSP através do SPSL.

Neste trabalho, também foi possível inferir que o Eta-HadGEM2-ES teve um melhor desempenho e, consequentemente, uma melhor representação do comportamento das chuvas nas sub-bacias Alto Juquiá e Rio Ribeira de Iguape, já que os erros sistemáticos foram menores nesta condição, enquanto que o menor erro associado ao modelo Eta-MIROC5 foi na sub-bacia Baixo Ribeira.

Tomar conhecimento do comportamento da chuva através de extremos climáticos, principalmente ao considerar cenários futuros, permite identificar tendências de aumento ou diminuição da precipitação que é importante para que órgãos responsáveis possam gerir a bacia com ações preventivas à desastres como a ocorrência de inundações e a falta de água. Apesar das incertezas inerentes às projeções através dos modelos climáticos, que a cada atualização apresentam melhoras através da diminuição dos erros associados aumentando a confiabilidade, é de suma relevância que as projeções amparem aos tomadores de decisões que visem mitigar fatalidades que prejudiquem a população.

Agradecimentos

À Universidade Federal do ABC, ao programa de Pós-graduação em Ciências e Tecnologia Ambiental pelo fomento à pesquisa e todo apoio prestado, ao DAEE e ao SIG-RB pelas informações disponibilizadas.

Referências

- ALEXANDER, L.V.; ZHANG, X.; PETERSON, T.C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; *et al.* Global observed changes in daily climatic extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, v. 111, p. 1-22, 2005. doi
- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P.T.S. Avaliação da precipitação simulada pelos modelos Eta/HadGEM2-Es e Eta/Miroc5 para o Brasil. *Anais da 71 Reunião Anual da SBPC*, Campo Grande: SBPC, p. 1-4, 2019.
- ALMAZROUI, M.A.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M.N.; RASHID, I.U.; KAMIL, S.; *et al.*, Assessment of CMIP6 perfor-

- mance and projected temperature and precipitation changes over South America. **Earth Systems and Environment**, v. 5, n. 2, p. 155-183, 2021. doi
- BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology. **Water Resources Research**, v. 47, n. 4, p. 1-18, 2011. doi
- BRITO, A.L.; VEIGA, J.A.P.; CORREIA, F.W.; CAPISTRANO, V.B. Avaliação do desempenho dos modelos HadGEM2-ES e Eta a partir de indicadores de extremos climáticos de precipitação para a Bacia Amazônica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, p. 165-177, 2019. doi
- CALADO, G.G.; VALVERDE, M.C.; BAIGORRIA, G.A. Use of teleconnection indices for water management in the Cantareira System - São Paulo – Brazil. **Environmental Processes**, v. 6, n. 2, p. 413-431, 2019. doi
- CBH - RB - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRA DE IGUAPE E LITORAL SUL – CBH-RB. **Relatório de situação dos recursos hídricos e meio ambiente da unidade de gerenciamento N° 11: bacia hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul**. Registro, 2007. p. 659. Disponível em http://www.comiterb.com.br/sigrb/app/pdf/Rel_de_%20Situacao_RB_%202007.pdf, acesso em 18 fev. 2020.
- CBH - RB - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO RIBEIRA DE IGUAPE E LITORAL SUL. **Relatório de situação dos recursos hídricos e meio ambiente da unidade de gerenciamento N° 11: bacia hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul**. Registro, 2013. Disponível em http://www.sigrb.com.br/app/pdf/RSMA_COM_PLETO_2013.pdf, acesso em 15 fev. 2020.
- CBH - RB - COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRA DE IGUAPE E LITORAL SUL. **Relatório de situação dos recursos hídricos da UGRHI-11: bacia hidrográfica do Ribeira de Iguape e Litoral Sul Ano-Base 2014**. Registro, 2015. p. 44. Disponível em <http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/CBH-RB/10501/relatorio-de-situacao-2015-ugrhi-11.pdf>, acesso em 15 fev. 2020.
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; *et al.* Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v.3, n. 5, p. 512-527, 2014a. doi
- CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; *et al.* Evaluation of the Eta simulations nested in three global climate models. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 5, p.438-454, 2014b. doi
- COELHO, C.A.S.; CARDOSO, D.H.F.; FIRPO, M.A.F. Precipitation diagnostics of an exceptionally dry event in São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 125, n. 3-4, p. 769-784, 2015. doi
- COLLINS, W.J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; *et al.* Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p.1051-1075, 2011. doi
- DICKEL, M.E. **Eventos climáticos extremos na sub-bacia hidrográfica do rio Ribeira do Iguape e Litoral Sul, SP: defesa civil e capacidade operacional para a gestão de riscos**. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, p. 212, 2016.
- DIAZ, L.B.; SAURRAL, R.I.; VERA, C.S. Assessment of South America summer rainfall climatology and trends in a set of global climate models large ensembles. **International Journal of Climatology**, v. 41, n: 1, p. 1-19, 2020. doi
- FERREIRA, B.C.C.; VALVERDE, M.C. Estudo das enchentes fora de época no Vale do Ribeira: caso agosto de 2011. In: **Anais do 17° Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Gramado: SBMET, p. 1-10, 2012. Disponível em <http://www.sbmet.org.br/cbmet2012/pdfs/62N2.pdf>, acesso em 18 fev. 2020.
- FERREIRA, B.C.C. **Estudo das Inundações na Bacia do Rio Ribeira de Iguape e Seus Fatores Hidroclimáticos e Socioambientais**. Santo André: UFABC, 93 p., 2013.
- FERREIRA, B.C.C.; VALVERDE, M.C. Análise das fragilidades quanto ao uso do recurso hídrico nas regiões hidrográficas da bacia do rio Ribeira de Iguape. In: **Anais do 16° Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia e Ambiental**, São Paulo: ABGE, p. 1-10, 2018. Disponível em http://www.schenautomacao.com.br/cbge/envio/files/trabalho_51.pdf, acesso em 18 fev. 2020.
- FERREIRA, B.C.C. **Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos da Bacia do Rio Ribeira de Iguape – SP às Mudanças Climáticas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do ABC, Santo André, 144 p., 2020.
- FRANZ, B. Fatores Intervenientes nas vulnerabilidades dos recursos hídricos às mudanças do clima no Estado do Rio de Janeiro. In: NUNES, R.T.S.; FERITAS, M.A.V.; ROSA, L. P. (orgs.). **Vulnerabilidade dos Recursos Hídricos no âmbito Regional e Urbano**. Rio de Janeiro: Interciência, p. 1-60, 2011.
- FREITAS, C.M.; SILVA, D.R.X.; SENA, A.R.M.; SILVA, E.L.; SALES, L.B.F.; *et al.* Desastres naturais e saúde: uma análise da situação do Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 19, n. 9, p. 3645-3656, 2014. doi
- JONES, C.; CARVALHO, L.M.V. Climate change in the South American monsoon system: present climate and CMIP5 projections. **Journal of Climate**, v. 26, n. 17, p. 6660-6678, 2013.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability Part B: regional aspects**. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. BARROS, V.R.; FIELD, C.B.; DOKKEN, D.J.; MASTRANDREA, M.D.; MACH, K.J.; *et al.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, 688 p., 2014.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE: **Summary for policymakers. In: 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.; ZHAI, P.; PIRANI, A.; CONNORS, S.L.; PÉAN, C.; *et al.* Cambridge University Press, 40 p., 2021.
- KNUTTI, R. Should we believe model predictions of future climate change? **Philosophical Transactions of the Royal Society: mathematical, Physical and Engineering Sci-**

- ences, v. 366, n. 1885, p. 4647-4664, 2008. doi, acesso em 11 jan. 2020.
- LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S.C.; SUEIRO, G.; DERECZYNSKI, C.; *et al.* Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 132, n. 1-2, p. 683-683, 2017. doi
- MACHADO, C.B.; CAMPOS, T.L.O.B.; RAFEE, S.A.A.; MARTINS, J.A.; GRIMM, A.M.; *et al.* Extreme rainfall events in the Macro-Metropolis of São Paulo: trends and connection with climate oscillations. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 60, n. 5, p. 661-675, 2021. doi
- MARENGO, J.A. **Impactos de Extremos Relacionados com o Tempo e o Clima - Impactos Sociais e Econômicos**. 8. ed. São Paulo: GPMC, 5 p., 2009. Disponível em http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/~rmclima/pdfs/newsletters/Boletim_No8_Port.pdf, acesso em 5 jan. 2020.
- MARENGO, J.A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L.M.; SOARES, W.R.; RODRIGUEZ, D.A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 12, p. 1-5, 2011. doi
- MARENGO, J.A.; VALVERDE, R.; OBREGON, G.O. Observed and projected changes in rainfall extremes in the Metropolitan Area of São Paulo. **Climate Research**, v. 57, n. 1, p. 61-72, 2013. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/260057016>.
- MARENGO, J.A.; ALVES, L.M.; ALVALA, R.C.S.; CUNHA, A.P.; BRITO, S.; *et al.* Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 21, p. 1973-1985, 2017. doi
- MARTINS, M.E.G. Coeficiente de correlação amostral. **Revista de Ciência Elementar**, v. 2, n. 2, p. 1-2, 2014. doi
- MILANO, M.; REYNARD, E.; MUNIZ-MIRANDA, G.; GUERRIN, J. Water supply basins of São Paulo Metropolitan Region: hydro-climatic characteristics of the 2013-2015 water crisis. **Water**, v. 10, n. 1517, p. 1-19, 2018. doi
- MOHLEJ, S.; PIELKE JUNIOR, R. Reconciliation of trends in global and regional economic losses from weather events: 1980–2008. **Natural Hazards Review**, v. 15, n. 4, p. 1-9, 2014. doi
- MOURA, R.G.; HERDIES, D.L.; MENDES, D.; MENDES, M.C.D. Avaliação do modelo regional ETA utilizando as análises do CPTec e NCEP. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 46-53, 2010. doi
- NATIVIDADE, U.A.; GARCIA, S.R.; TORRES, R.R. Tendência dos índices de extremos climáticos observados e projetados no Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 600-614, 2017. doi
- NUNES, L.H. **Urbanização e Desastres Naturais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- OBREGON, G.O.; MARENGO, J.A.; NOBRE, C. Rainfall and climate variability: long-term trends in the Metropolitan Area of São Paulo in the 20th century. **Climate Research**, v. 61, p. 93-107, 2014. doi
- RIAHI, K.; VAN VUUREN, D.P.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEIL, B.C.; *et al.*, The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153-168, 2017. doi
- RIBEIRO, F.G.; STEIN, G.; CARRARO, A.; RAMOS, P.L. O impacto econômico dos desastres naturais: o caso das chuvas de 2008 em Santa Catarina. **Planejamento e Políticas Públicas: PPP**, v. 1, n. 43, p. 299-322, 2014.
- RIBEIRO NETO, G.G.; ANDERSON, L.O.; BARRETOS, N.J.C.; ABREU, R.; ALVES, L.; *et al.* Attributing the 2015/2016 Amazon basin drought to anthropogenic influence. **Climate Resilience and Sustainability**, p. 1-10, 2021. doi
- SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Estudo de Concepção e Projeto Básico do Sistema Produtor São Lourenço - Relatório Síntese: Relatório de Impacto ao Meio Ambiente**. São Paulo: SABESP, 112 p., 2011. Disponível em http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/ppp_sao_lourenco/estudo_concep%C3%A7%C3%A3o_SPSL.pdf, acesso em 27 fev. 2020.
- SANTANA, C.L.; SOUZA, C.R.G.; HARARI, J. Inundações/Enchentes no Baixo Rio Ribeira de Iguape (SP): estudo baseado em dados limnimétricos, pluviométricos e maregráficos. In: **X Anais Encontro de Geógrafos da América Latina**, 2005, São Paulo. Prolam/USP, 2005. p. 13363-13383. Disponível em <http://observatoriogeograficoamericacalatina.org.mx/egal10/Procesosambientales/Geomorfologia/12.pdf>, acesso em 31 jan. 2020.
- SCHISLER, M.P.; CUSTODIO, V. Planejamento e gestão de recursos hídricos: conflitos socioambientais e territoriais na sub-bacia do Rio Juquiá, no Vale do Rio Ribeira do Iguape-São Paulo. In: **Anais Encontro de Geógrafos da América Latina**, La Paz, 2017. Disponível em <https://www.egal2017.bo/>, acesso em 30 jan. 2020.
- SILVA, M.C.O.; VALVERDE, M.C. Cenário futuro da disponibilidade hídrica na Bacia do Alto Tietê. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 1, n. 43, p. 114-130, 2017. doi
- SOUSA, R.M. **Mudanças Climáticas Futuras Simuladas Pelos Modelos Regionais Eta-HadGEM2-Es e Eta-MIROC5 para o Estado do Tocantins**. Dissertação de Mestrado, Curso de Ciências Florestais e Ambientais, Universidade Federal do Tocantins, 96 p., 2017. Disponível em <http://repositorio.uft.edu.br/bitstream/11612/676/1/Rhonanc3%a3o.pdf>, acesso em: 12 jan. 2020.
- STEPHENSON, D.B. Definition, diagnoses, and origin of extreme weather and climate events. In: DIAZ, H.F.; MURRANE, R.J. (eds). **Climate Extremes and Society**, p. 11-23, 2008. doi
- VAN VUUREN, D.P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A.; *et al.* The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 5, p. 109, 2011. doi
- WATANABE, M.; SUZUKI, T.; O'ISHI, R.; KOMURO, Y.; WATANABE, S.; *et al.* Improved climate simulation by MIROC5: mean states, variability and climate sensitivity. **Journal of Climate**, v. 23, n. 23, p. 6312-6335, 2010. doi
- ZHANG, X.; YANG, F. **RClimDex (1.0): User manual**. **Climate Research Branch Environment Canada Downs**

View. Ontario, 23 p., 2004. Disponível em <http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>, acesso em 30 jan. 2020.

ZHANG, X.; HEGERL, G.; ZWIERS, F.W.; KENYON, J. Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes. **Journal of Climate**, v. 18, n. 11, p. 1641-1651, 2005. doi

Internet Resources

Dados de chuva e vazão, <http://www.hidrologia.daece.sp.gov.br/>.

PROJETA, <https://projeta.cptec.inpe.br/#/dashboard>.

Fonte de identificação de anos El Niño e La Niña, https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.