

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

EXTREMOS CLIMÁTICOS E VULNERABILIDADE HÍDRICA NA BACIA DO RIO SOROCABA E MÉDIO TIETÊ FRENTE ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Vanine Elane Menezes de Farias¹; Deborah de Matos²; Adelaide Cassia Nardocci³

Resumo: Este artigo investiga a influência das mudanças climáticas na Bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI-10), com foco em seus potenciais impactos nos recursos hídricos. Para tanto, foram aplicados e analisados índices de extremos climáticos de temperatura (TMAXmean, TMINmean, DTR) e precipitação (PRCPTOT, CDD, CWD, RX1day, RX5day). O estudo utilizou dados de 19 modelos climáticos do CMIP6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, abrangendo períodos futuros (curto, médio e longo prazo), comparados a uma linha de base histórica observada (1984-2013). Os resultados revelam uma tendência geral de aquecimento, com aumento nas temperaturas máximas e mínimas em todos os cenários e períodos, e uma redução na amplitude térmica diurna. Para a precipitação, o curto prazo indica uma redução média do PRCPTOT com divergência entre modelos, enquanto o médio e longo prazo projetam aumento. Contudo, todos os períodos convergem para um aumento de dias secos e chuvas mais intensas. A análise detalhada desses índices fornece reflexões sobre a vulnerabilidade hídrica da região, subsidiando estratégias de adaptação e planejamento regional frente às mudanças climáticas.

Palavras-Chave – Mudanças Climáticas; Disponibilidade Hídrica; Bacia do Sorocaba e Médio tietê.

Abstract: This study investigates the influence of climate change on the Sorocaba and Médio Tietê River Basin (UGRHI-10), focusing on its potential impacts on water resources. Climate extreme indices were applied and analyzed, including temperature indices (TMAXmean, TMINmean, DTR) and precipitation indices (PRCPTOT, CDD, CWD, RX1day, RX5day). The analysis was based on data from 19 CMIP6 climate models under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, covering future periods (short, medium, and long term), and compared to a historical baseline (1984–2013). The results reveal a general warming trend, with increases in both maximum and minimum temperatures across all scenarios and timeframes, as well as a reduction in the diurnal temperature range. Regarding precipitation, the short term shows an average reduction in PRCPTOT with high inter-model variability, whereas the medium and long term indicate an increase. However, all periods consistently project more dry days and more intense rainfall events. The detailed analysis of these indices provides reflections into the region's water vulnerability, supporting adaptation strategies and regional planning in the context of climate change.

Palavras-Chave – Climate Change; Water Availability; Sorocaba Basin and Middle Tietê.

1) Pós-doutoranda na Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo– FSP/USP, São Paulo, vaninefarias@usp.br;

2) Bolsista de Treinamento Técnico na Faculdade de Saúde Pública– FSP/USP, São Paulo, deborahmatos.matos@gmail.com;

3) Professora Titular da Faculdade de Saúde Pública da Universidade de São Paulo – FSP/USP, São Paulo, e-mail: nardocci@usp.br.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, impulsionadas pelas atividades humanas e emissões de gases de efeito estufa (GEE), intensificam a ocorrência de eventos extremos como secas, inundações e chuvas intensas (IPCC, 2021; Jiménez-Navarro et al., 2021). Esses eventos alteram diretamente o ciclo hidrológico e afetam desigualmente os territórios, resultando em impactos significativos, sobretudo em populações mais vulneráveis, e no aumento da frequência de desastres (Armani et al., 2022; Nunes et al., 2023; Xue et al., 2022).

No contexto urbano e metropolitano, esses efeitos são potencializados por fatores como a alta densidade populacional, o uso intensivo da terra e a infraestrutura inadequada (Nunes e Guandique, 2022). Regiões metropolitanas, especialmente na América Latina, enfrentam o desafio de integrar políticas climáticas em estruturas institucionais complexas, marcadas por fragmentação e, por vezes, baixa coordenação (Chaves et al., 2025).

A Bacia Hidrográfica dos Rios Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI-10), onde se insere a Região Metropolitana de Sorocaba (RMS), exemplifica essa vulnerabilidade. Estrategicamente localizada na Macrometrópole Paulista, essa bacia se destaca por sua expressiva urbanização, dinamismo econômico com cadeias produtivas industriais e agrícolas de alto consumo hídrico, e a crescente pressão sobre seus recursos (Chaves et al., 2025; Nunes e Guandique, 2022). O último Relatório de Situação da bacia (CBH-SMT, 2024) já aponta que, desde 2019, a disponibilidade hídrica per capita tem diminuído, situando-se abaixo de 1.700m³/hab/ano, valor classificado pela UNESCO (2003) como situação de estresse hídrico. Essa condição é agravada pela alta demanda por abastecimento público e industrial, bem como pela qualidade da água, com o lançamento de efluentes (mesmo tratados) que, em períodos de seca, podem concentrar poluentes e afetar a balneabilidade e usos múltiplos. Essa dinâmica a torna particularmente sensível às mudanças climáticas, com potenciais impactos na disponibilidade hídrica, na produtividade agropecuária e na infraestrutura urbana (Nunes et al., 2023).

Nesse cenário, o monitoramento e a análise da variabilidade climática tornam-se ferramentas importantes para antecipar riscos e subsidiar o planejamento regional. Projeções climáticas, baseadas em modelos globais de circulação atmosférica (MCGs), têm sido amplamente utilizadas para avaliar tendências futuras e apoiar estratégias de adaptação e mitigação (Ballarin et al., 2023; Marengo et al., 2020; Armani et al., 2022; Jiménez-Navarro et al., 2021).

Considerando a relevância socioeconômica, a densidade populacional e a sensibilidade da UGRHI-10 aos impactos climáticos, especialmente na gestão hídrica urbana e industrial, este estudo visa analisar as tendências de precipitação e temperatura na bacia sob diferentes cenários de emissões. A aplicação de índices de extremos climáticos, utilizando 19 modelos climáticos, busca fornecer subsídios para o planejamento e desenvolvimento de estratégias de adaptação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A área de estudo deste trabalho é a Bacia Hidrográfica dos Rios Sorocaba e Médio Tietê – SMT (Figura 1), correspondente à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI-10), localizada na porção centro-sudeste do estado de São Paulo. A bacia abrange cerca de 11.829 km² e envolve 35 municípios, incluindo importantes centros urbanos como Sorocaba (CBH-SMT, 2024).

A UGRHI-10 conecta-se a outras unidades de gestão, como Alto Tietê (UGRHI-6), Piracicaba-Capivari-Jundiaí (UGRHI-5), Tietê/Jacaré (UGRHI-13), Baixada Santista (UGRHI-7),

Neste estudo, foram utilizados dados de precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima de 19 MCGs disponibilizados pelo CLIMBra - *Climate Change Dataset for Brazil* (BALLARIN et al., 2023), que fornece as projeções dos modelos com a correção de viés, em uma resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. As séries simuladas vão de 2015 a 2100 e foram divididas em três períodos de estudo: curto prazo (2015–2044), médio prazo (2045–2074) e longo prazo (2075–2100), considerando os cenários SSP2-4.5, que representa as emissões intermediárias de gases de efeito estufa, e SSP5-8.5, que representa as emissões altas de gases de efeito estufa.

Para a comparação com o histórico observado, foi utilizada a base *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD), em uma série diária de 1984 a 2013 e resolução espacial de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ (XAVIER et al., 2022).

2.3 Índices de extremos climáticos (IEC)

A fim de quantificar as alterações na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, empregou-se uma seleção 7 índices de extremos de precipitação e temperatura do ar, sendo eles: Precipitação total anual em dias chuvosos, com a precipitação superior a 1 mm (PRCPTOT); Precipitação anual máxima de 1 dia (Rx1day); Precipitação máxima anual consecutiva de 5 dias (Rx5day); Número máximo de dias consecutivos com precipitação diária < 1 mm (CDD); Número máximo de dias consecutivos com precipitação diária ≥ 1 mm (CWD); Valor médio anual da temperatura máxima diária (TMAXmean); Valor médio anual da temperatura mínima diária (TMINmean); e Faixa de temperatura diurna (DTR).

Para a análise, foram utilizadas as médias diárias de temperatura e precipitação provenientes de 19 modelos climáticos do CMIP6, abrangendo dois cenários distintos. A avaliação das variações entre os períodos futuros e o histórico foi realizada por meio do cálculo da mudança relativa de cada IEC. Este cálculo seguiu a Equação 1, uma formulação adaptada do trabalho de Medeiros et al. (2022):

$$\text{Mudança Relativa} = \frac{\overline{IEC_{futuro}} - \overline{IEC_{histórico}}}{\overline{IEC_{histórico}}} * 100 \quad (1)$$

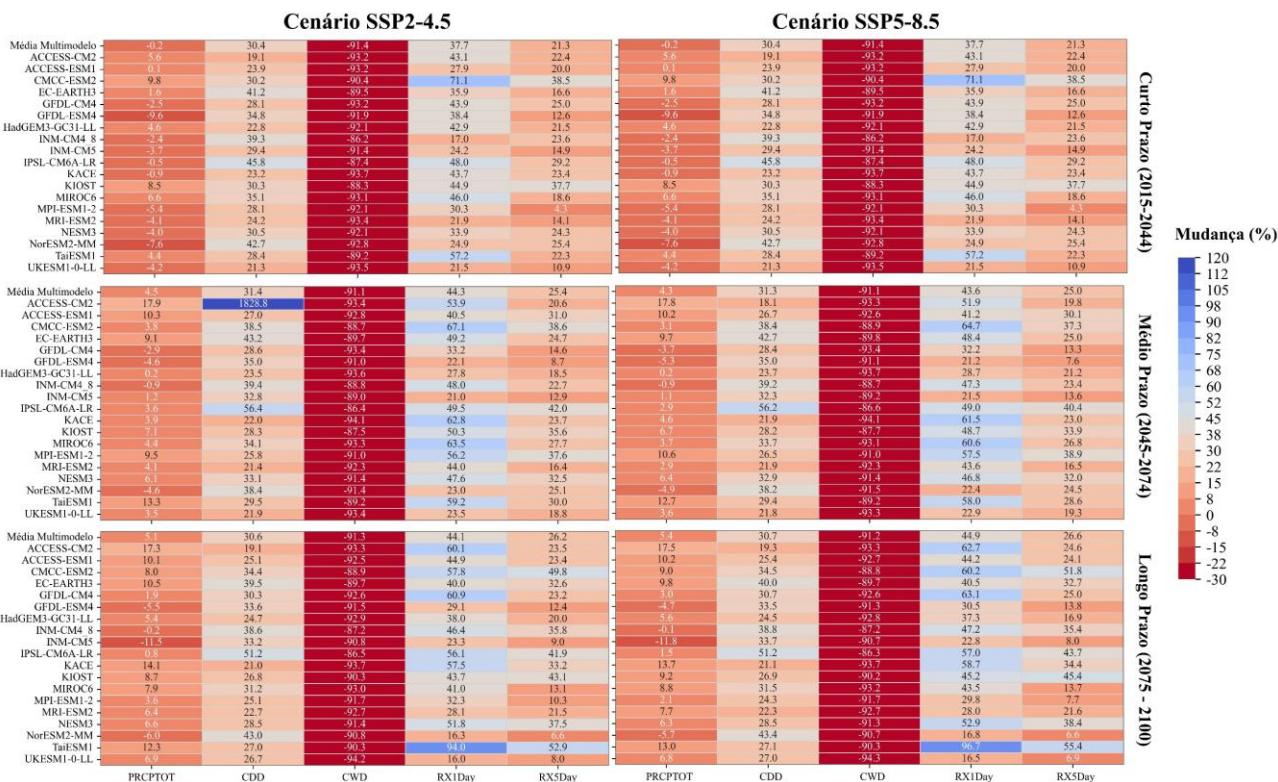
Na Equação 1, $\overline{IEC_{futuro}}$ representa a média do índice para os períodos futuros. Por sua vez, $\overline{IEC_{histórico}}$ corresponde à média histórica (1984–2013) para cada região de estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção apresenta e discute as projeções de mudanças nos índices de extremos climáticos de precipitação (Figura 2) e temperatura do ar (Figura 3) para a Bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê, sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Os resultados são apresentados para os períodos de curto (2015–2044), médio (2045–2074) e longo prazo (2075–2100), com base em 19 modelos climáticos.

A análise do índice PRCPTOT no curto prazo revela significativa divergência entre os modelos: 57,8% projetam redução e 42,2% indicam aumento. A média do conjunto, no entanto, aponta para uma redução da precipitação, o que pode afetar setores como agricultura, irrigação e abastecimento público. Essa divergência evidencia as incertezas inerentes à modelagem climática, sobretudo em escala regional. As diferenças nas parametrizações de processos atmosféricos (e.g., nuvens, convecção, interação terra-atmosfera) entre os MCGs, além da redução de escala realizada, podem levar a esses resultados distintos, evidenciando a complexidade de simular o comportamento do clima futuro (Santos et al., 2015). Por exemplo, o modelo CMCC-ESM2 projeta um aumento de 9,8%, enquanto o NorESM2-MM indica uma queda de 7,6%.

Figura 2 – Mudança relativa dos índices de precipitação nos cenários futuros a curto, médio e longo prazo.



Os demais índices de precipitação demonstram maior convergência entre os modelos. Todos apontam tendência de aumento dos dias secos consecutivos (CDD) e redução dos dias úmidos consecutivos (CWD), indicando maior frequência de estiagens. Já os índices de chuvas intensas, RX1day e RX5day, projetam aumento na magnitude das precipitações extremas nos períodos de curto, médio e longo prazo, reforçando a tendência de maior variabilidade climática.

Uma observação importante é a similaridade no comportamento geral dos índices entre os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Embora o cenário SSP5-8.5 indique mudanças de maior magnitude, os dois cenários mantêm tendências semelhantes. Os valores apresentados já no curto prazo, com redução de precipitação e aumento de extremos, apontam para a urgência de estratégias de adaptação.

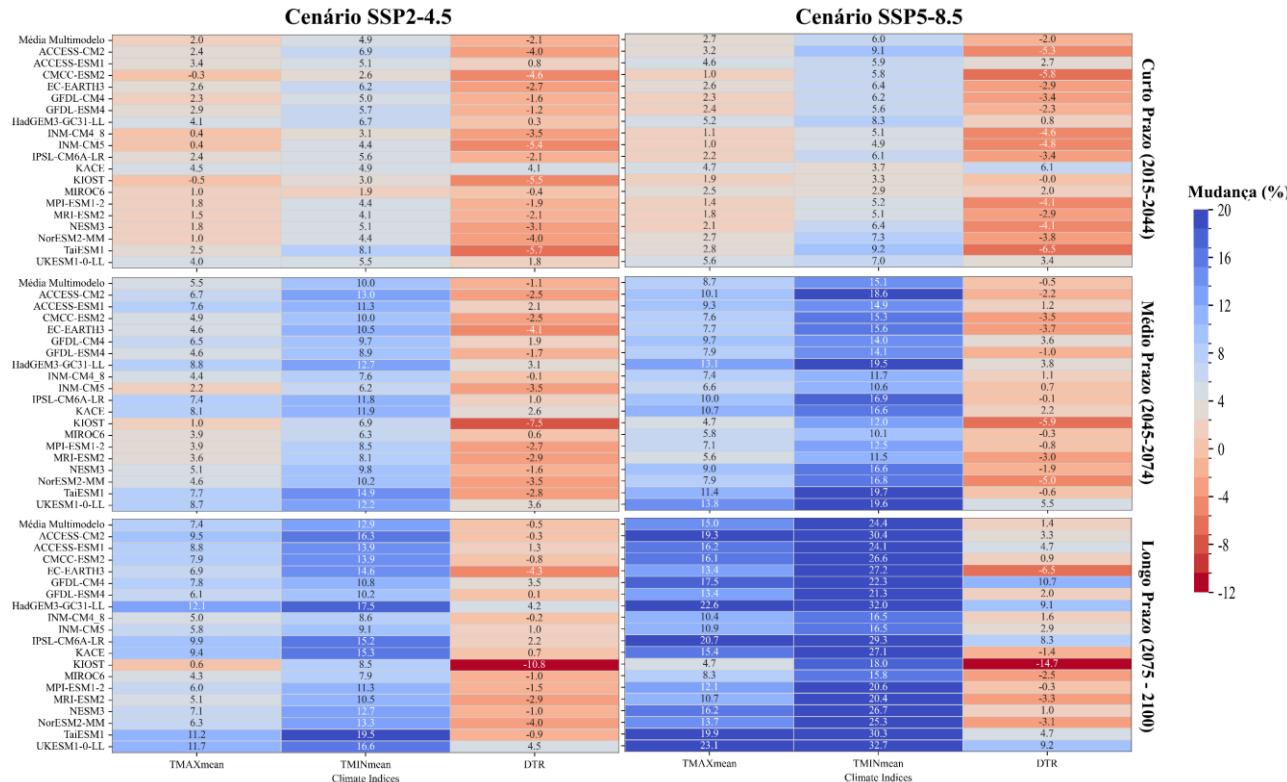
Nos períodos médio e longo prazo, observa-se reversão na tendência do PRCPTOT: a maioria dos modelos projeta aumento no total de chuvas, embora os demais índices (CDD, CWD, RX1day e RX5day) mantenham os padrões de intensificação de extremos e prolongamento do período seco.

Esses resultados para a Bacia do Rio Sorocaba corroboram achados em estudos anteriores para o estado de São Paulo e outras regiões. Armani et al. (2022), por exemplo, projetaram um aumento na duração de dias secos consecutivos (CDD) para todo o estado de São Paulo, o que se alinha com a tendência observada em nossa análise. Da mesma forma, Marengo et al. (2013) projetaram um aumento na precipitação total e na precipitação intensa para a Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), além de indicar a possibilidade de períodos de seca mais longos, reforçando as preocupações com o abastecimento público. A projeção de aumento de dias secos consecutivos, pode ser associado à redução da disponibilidade hídrica em bacias e ao aumento do risco de desabastecimento urbano e problemas de irrigação agrícola (Armani et al., 2022; Nunes et al., 2023).

23 a 28 de novembro de 2025 - Vitória - ES

A análise dos índices de temperatura para a Bacia do Rio Sorocaba, sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, revela tendências consistentes de aquecimento em quase todas as projeções, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Mudança relativa dos índices de temperatura nos cenários futuros a curto, médio e longo prazo.



em períodos de menor vazão, há maior concentração de poluentes nos corpos d'água, e as temperaturas mais altas favorecem a proliferação de algas e a eutrofização, comprometendo os usos múltiplos (Nunes e Guandique, 2022).

Por outro lado, o aumento na intensidade das chuvas extremas (RX1day e RX5day), em conjunto com o crescimento urbano e a impermeabilização do solo, amplifica o risco de inundações e enxurradas (Marengo et al., 2020; Silva et al., 2023). Esses eventos podem causar danos significativos à infraestrutura urbana (residências, vias, redes de saneamento), acarretando perdas econômicas e riscos diretos à vida e à saúde da população. O Relatório de Situação mais recente da bacia do Sorocaba e Médio Tietê (CBH-SMT, 2024), mostra que se registrou 656 ocorrências de enxurrada, alagamento e inundaçao em área urbana entre os anos de 2019 e 2022, afetando mais de 30 mil pessoas somente em 2021.

Esses impactos reforçam a complexidade da vulnerabilidade hídrica da bacia, exigindo uma abordagem abrangente para a gestão de riscos e o desenvolvimento de estratégias de adaptação.

4. CONSLUSÃO

Este estudo avaliou as projeções de mudanças nos padrões de extremos climáticos de precipitação e temperatura na Bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê (UGRHI-10), utilizando 19 modelos climáticos do CMIP6 sob cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. A análise dos índices de extremos revelou tendências significativas que podem impactar na vulnerabilidade hídrica da região.

Os principais achados indicam um aquecimento generalizado da bacia, com aumentos consistentes nas temperaturas máximas e mínimas ao longo de períodos de curto médio e longo prazo em ambos os cenários, acompanhados por uma redução da amplitude térmica diurna (DTR). Para a precipitação, embora o PRCPTOT mostre uma redução média no curto prazo e aumento no médio e longo prazo, há uma clara convergência dos modelos para o aumento na duração dos períodos secos (CDD) e na intensidade das chuvas extremas (RX1day e RX5day) em todos os horizontes temporais.

A persistência de períodos de seca mais longos e eventos de chuva mais intensos, independentemente do aumento ou diminuição do volume total de precipitação, aponta para uma maior variabilidade no regime hídrico. Isso implica em desafios crescentes para a gestão de recursos hídricos, podendo levar a problemas de abastecimento em períodos de estiagem e a riscos de inundações em eventos de chuva intensa.

A similaridade das tendências entre os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 mostram que os impactos dos extremos climáticos já são e continuarão a ser uma realidade para a bacia, demandando ações imediatas. Estudos voltados a essa temática podem fornecer subsídios para o planejamento adaptativo e de sistemas de alerta precoce em regiões vulneráveis, auxiliando na gestão de riscos associados à seca agrícola e ao abastecimento hídrico frente às mudanças climáticas. A metodologia aplicada e os resultados obtidos servem como uma ferramenta para compreender a complexidade das projeções climáticas e suas implicações práticas na bacia, sendo um ponto de partida para futuras pesquisas que incorporem modelagem hidrológica e socioeconômica para uma avaliação de impacto mais abrangente.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de Pós-Doutorado (Processo No. 2025/05846-2). Pela bolsa de Treinamento Técnico (Processo No. 24/22232-5). E ao Projeto Nexo Ambiente - Saúde - Serviços Ecossistêmicos: um caminho para a transição do risco à adaptação e resiliência - NASSE (Processo: 23/12042-1).

REFERÊNCIAS

- ARMANI, G.; LIMA, N. G. B.; GARCIA, M. F. P.; CARVALHO, J. L. (2022). Regional climate projections for the State of São Paulo, Brazil, in the 2020 – 2050 period. *Derbyana*, 43, e773. <https://doi.org/10.14295/derb.v43.773>.
- BALLARIN, A. S.; SONE, J. S.; GESUALDO, G. C.; SCHWAMBACK, D.; REIS, A.; ALMAGRO, A.; WENDLAND, E. C. (2023). CLIMBra - Climate change dataset for Brazil. *Scientific Data*, 10, 1–31. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-01956-z>
- CHAVES, I. M. S.; SANTOS, L. C. O.; JACOBI, P. R.; WEINS, N. W. (2025). The travelling of global policy in the metropolitan region of Sorocaba (Brazil): the role of international organizations in shaping climate agendas. *Finisterra*, LX(128), e36381. <https://doi.org/10.18055/Finis36381>.
- COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SOROCABA E MÉDIO TIETÊ (CBH-SMT). (2024). Relatório de Situação 2024: Ano base 2023. Sorocaba, SP: CBH-SMT; FABH-SMT.
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.
- JIMÉNEZ-NAVARRO, I. C.; JIMENO-SÁEZ, P.; LÓPEZ-BALLESTEROS, A.; PÉREZ-SÁNCHEZ, J.; SENENT-APARICIO, J. (2021). Impact of Climate Change on the Hydrology of the Forested Watershed That Drains to Lake Erken in Sweden: An Analysis Using SWAT+ and CMIP6 Scenarios. *Forests*, 12, 1803. <https://doi.org/10.3390/f12121803>.
- MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N. J. C.; RAMOS, A. M. (2020). Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1472, 5–20. <https://doi.org/10.1111/nyas.14307>.
- MARENGO, J. A.; VALVERDE, M. C.; OBREGON, G. O. (2013). Observed and projected changes in rainfall extremes in the Metropolitan Area of São Paulo. *Climate Research*, 57, 61–72. <https://doi.org/10.3354/cr01160>.
- NUNES, L. H.; GABRIEL, G. H.; MARENGO, J. A. (2023). More erratic and more extreme: trends in precipitation in the State of São Paulo, Brazil. *American Journal of Climate Change*, 12, 140-171. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2023.121008>.
- NUNES, N.; GUANDIQUE, M. E. G. (2022). O processo de planejamento e gestão de recursos hídricos das Bacias Hidrográficas dos rios Sorocaba e Médio Tietê e sua integração com o planejamento regional e municipal. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 19, e19. <https://doi.org/10.21168/rega.v19e19>.

- RAJU, K. S.; KUMAR, D. N. Review of approaches for selection and ensembling of GCMs. *Journal of Water and Climate Change*, 11(3), 577–599, 2020. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.128>.
- SANTOS, T. S.; MENDES, D.; CASTRO, A. A.; SILVA, A. R. (2015). Incertezas das projeções de mudanças climáticas: Análise preliminar. *Ciência e Natura*, 37(Ed. Especial SIC), 63–68.
- SILVA, R. C.; MARENKO, J. A.; LEMES, M. R. (2024). Analysis of extreme rainfall and landslides in the metropolitan region of the Paraiba do Sul River Valley and North Coast of São Paulo, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 155, 3927–3949. <https://doi.org/10.1007/s00704-024-04857-2>.
- XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. (2022). New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). *International Journal of Climatology*, 42, 8390–8404. <https://doi.org/10.1002/joc.7731>.
- XUE, P.; ZHANG, C.; WEN, Z.; PARK, E.; JAKADA, H. (2022). Climate variability impacts on runoff projection under quantile mapping bias correction in the support CMIP6: An investigation in Lushi basin of China. *Journal of Hydrology*, 614, 128550. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128550>