

MUDANÇAS CLIMÁTICAS E SEGREGAÇÃO SOCIOESPACIAL: UM INDICADOR INTEGRADO PARA A BACIA DO RIO SOROCABA

*Carolina de Almeida Lopes¹ ; Larissa Aparecida Rodolfo Durães² ; Thales Augusto Beneton
Landucci³ & William Dantas Vichete⁴*

RESUMO – A urbanização acelerada em áreas socialmente vulneráveis, somada à crise climática, intensifica a exposição de populações marginalizadas a eventos hidrológicos extremos. Este estudo analisa como as mudanças climáticas amplificam a injustiça climática na Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba (UGRHI 10), por meio de uma abordagem integrada que correlaciona indicadores socioeconômicos, uso do solo e séries de precipitação entre 1961 e 2009. A metodologia se estrutura no desenvolvimento do Indicador de Vulnerabilidade à Injustiça Climática (IVIC), articulando os pilares de exposição, sensibilidade e capacidade adaptativa. Este trabalho detalha a aplicação de um teste de hipótese estatístico para detectar a Intensificação por Mudanças Climáticas, utilizando a variância conjunta da média e da variabilidade das chuvas como subsídio para a identificação de sinais de alterações de padrões de chuvas. Os resultados mostram que a incerteza hidrológica futura, aliada à precariedade habitacional histórica, potencializa a segregação socioespacial. Conclui-se que a adaptação climática na UGRHI 10 exige superar modelos de resiliência genéricos, posicionando reparação histórica e equidade social como eixos centrais do planejamento urbano e da governança das águas.

Palavras-Chave – Sustentabilidade, Resiliência Urbana, Análise de Extremos.

ABSTRACT – Accelerated urbanization in socially vulnerable areas, coupled with the climate crisis, intensifies the exposure of marginalized populations to extreme hydrological events. This study analyzes how climate change amplifies climate injustice in the Sorocaba River Basin (UGRHI 10) through an integrated approach that correlates socioeconomic indicators, land use, and precipitation series between 1961 and 2009. The methodology is structured around the development of the Climate Injustice Vulnerability Indicator (IVIC), articulating the pillars of exposure, sensitivity, and adaptive capacity. This work details the application of a statistical hypothesis test to detect Climate Change Intensification, utilizing the joint variance of the mean and rainfall variability as a subsidy for identifying signals of altered rainfall patterns. The results show that future hydrological uncertainty, combined with historical housing precariousness, enhances socio-spatial segregation. It is concluded that climate adaptation in UGRHI 10 requires overcoming generic resilience models, positioning historical reparation and social equity as central axes of urban planning and water governance.

Key-words – Sustainability; Urban Resilience; Analysis of Extremes.

¹) Unesp, Instituto de Ciência e Tecnologia (ICTS). Avenida Três de Março, 511, Aparecidinha, Sorocaba, SP. E-mail: carolina.a.lopes@unesp.br

²) Unesp, Instituto de Ciência e Tecnologia (ICTS). Avenida Três de Março, 511, Aparecidinha, Sorocaba, SP. E-mail: la.duraes@unesp.br

³) Unesp, Instituto de Ciência e Tecnologia (ICTS). Avenida Três de Março, 511, Aparecidinha, Sorocaba, SP. E-mail: thales.landucci@unesp.br

⁴) Unesp, Instituto de Ciência e Tecnologia (ICTS). Avenida Três de Março, 511, Aparecidinha, Sorocaba, SP. E-mail: w.vichete@unesp.br

1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização contemporânea consolidou modelos de ocupação territorial desiguais. Nas grandes metrópoles, a crise climática não atua de maneira isolada, mas como um catalisador de vulnerabilidade preexistentes (Lee e Han, 2005). A intensificação dos eventos extremos expõe a fragilidade de infraestruturas urbanas que negligenciam a dinâmica do ciclo da água, resultando em inundações frequentes que impactam a funcionalidade das cidades (Tucci, 2005). No cenário brasileiro, esse impacto é agravado pela produção social do risco, em que a lógica de mercado e a omissão estatal acabam empurrando as populações mais pobres para as margens ambientais e nas áreas de risco (Santos, 2015).

A análise dessa dinâmica revela a injustiça climática: a constatação de que aqueles que menos contribuíram para a emissão dos gases de efeito estufa são os que mais sofrem os impactos imediatos e severos (IPCC, 2023). Os estudos sobre vulnerabilidade urbana demonstram que o risco ambiental não é distribuído de forma igualitária, sendo moldado pela desigualdade de classe e território que caracterizam a segregação socioespacial (Valencio, 2010). Apesar da existência de bases de dados robustas, como o sistema GeoSampa, a gestão pública ainda falha na integração entre os indicadores de vulnerabilidade socioeconômica e os planos de adaptação, o que acaba impedindo que o planejamento urbano responda de forma preventiva à maximização dos riscos climáticos nas periferias (Di Giulio *et al.*, 2019).

Historicamente, a Bacia Hidrográfica do Rio Sorocaba (UGRHI 10) exemplifica este desafio através de uma urbanização acelerada em áreas de várzea, resultando em uma recorrência de cheias críticas na cidade. A escolha da UGRHI 10 justifica-se pela necessidade de ferramentas que traduzam a variabilidade da precipitação em impacto social. Esse artigo avalia o impacto da mudança climática na alteração dos padrões de chuvas intensas e a sua consequência no Indicador de Vulnerabilidade à Injustiça Climática (IVIC), baseado na variação conjunta da média e da variância das chuvas como gatilho decisório nas políticas públicas. Este trabalho busca contribuir no preenchimento da lacuna científica que reside no modelo de “resiliência urbana” genérico, onde a adaptação só é efetiva através da reparação histórica.

2. METODOLOGIA

O indicador de vulnerabilidade à injustiça climática apresentado em Baudenbacher *et al.* (2026)¹, considerou variáveis que expressam a susceptibilidade física e socioambiental.

¹ Este artigo também está publicado no “XVI Encontro Nacional de Águas Urbanas e VI Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos” com o título de “INDICADOR DE VULNERABILIDADE À INJUSTIÇA CLIMÁTICA FRENTE A ENCHENTES URBANAS”, sendo uma publicação complementar.

Adicionalmente, foi considerada a amplificação do seu resultado por meio da consideração de um sinal positivo na mudança das variáveis estatísticas que explicam a distribuição das chuvas intensas observadas no registro histórico quando comparado com a projeção futura. A construção do Indicador de Vulnerabilidade a Injustiça Climática (IVIC) frente às ameaças de enchentes urbanas levou em consideração aspectos relacionados à exposição ao risco, capacidade de adaptação e capacidade de recuperação após eventos de enchentes. Com a projeção das mudanças dos padrões de chuvas observada a partir dos resultados dos modelos de mudanças climáticas, um município que se prepara para mitigação de enchentes observando somente os registros de precipitação históricos, poderão continuar vulneráveis em algum grau de susceptibilidade. Para incluir a amplificação dos fatores de mudança dos padrões das chuvas intensas, foi adotado um teste de hipótese comparando os registros de chuvas históricas com resultados de projeção futura. A equação 1 apresenta o IVIC com a amplificação devido às mudanças climáticas. Entretanto, esta metodologia se apoia no teste de hipótese de mudanças com sinais positivos ou nulos, sendo este último um indicativo para desconsideração do fator de amplificação no resultado final do IVIC. O amplificador climático teve seu coeficiente λ fixado em 0,5. O parâmetro x'_{i6} refere-se à Intensificação Projetada de Chuvas Extremas, incorporando ao modelo a dimensão associada ao agravamento de eventos pluviométricos extremos, objeto de análise deste artigo.

$$IVIC_i = \left(\sum_{k=1}^5 w_k \cdot x'_{ik} \right) \cdot (1 + \lambda \cdot x'_{i6}) \quad (1)$$

Onde: x_{ik} representa o valor do parâmetro k para o município i . Por sua vez, o valor x'_{ik} é o valor normalizado de x_{ik} , obtido a partir dos valores máximos e mínimos associados ao parâmetro k no conjunto de municípios analisados e da direção de proporcionalidade do parâmetro em relação à vulnerabilidade à injustiça climática.

Para cada centro urbano, foi considerada a coordenada da sede urbana obtida no IBGE. Esta referência foi utilizada para desenvolver as análises estatísticas propostas. Em cada coordenada, o teste de hipótese consistiu em obter a série de máximas precipitações anuais para o registro de precipitações históricas e das projeções futuras com base nos resultados dos modelos de mudança do clima do IPCC (Ballarin *et al.*, 2023). A série de precipitações diárias futuras foram obtidas a partir de uma rotina computacional para processar dados especializados. Os resultados de precipitação utilizados a partir de BALLARIN *et al.* (2023) foram desenvolvidos a partir do CMIP6 para os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 com correção de viés para 19 modelos de projeção do clima no território brasileiro. Os resultados utilizados neste trabalho tiveram a correção de viés por

“Quantile Delta Mapping” para as séries diárias de precipitação, temperatura máxima e mínima, radiação solar, vento e umidade relativa. A correção de viés utilizou os dados históricos de 1980-2013 e projeção futura de 2015 a 2100 com uma resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ no território brasileiro (Ballarin *et al.*, 2023). Em cada uma das séries de precipitação máxima diária anual (histórica e projeção futura), foi obtido a média e a variância. Quando a média e a variância da série de máximas precipitações diárias anuais dos resultados de projeção resultaram superior a 10% em comparação com os registros históricos, foi considerado um sinal positivo de alteração dos padrões de chuvas intensas. Quando a média e a variância, ou um deles, resultou inferior a 10%, foi considerado um sinal negativo para a alteração dos padrões de chuvas intensas. Para evitar o impacto da não-estacionariedade nos parâmetros estatísticos (Jorgensen & Nielsen-Gammon, 2024), foi utilizado a projeção futura entre 2020 e 2050. A Figura 1 apresenta o fluxograma da metodologia adotada para inclusão da amplificação das ameaças devido às mudanças climáticas no IVIC.

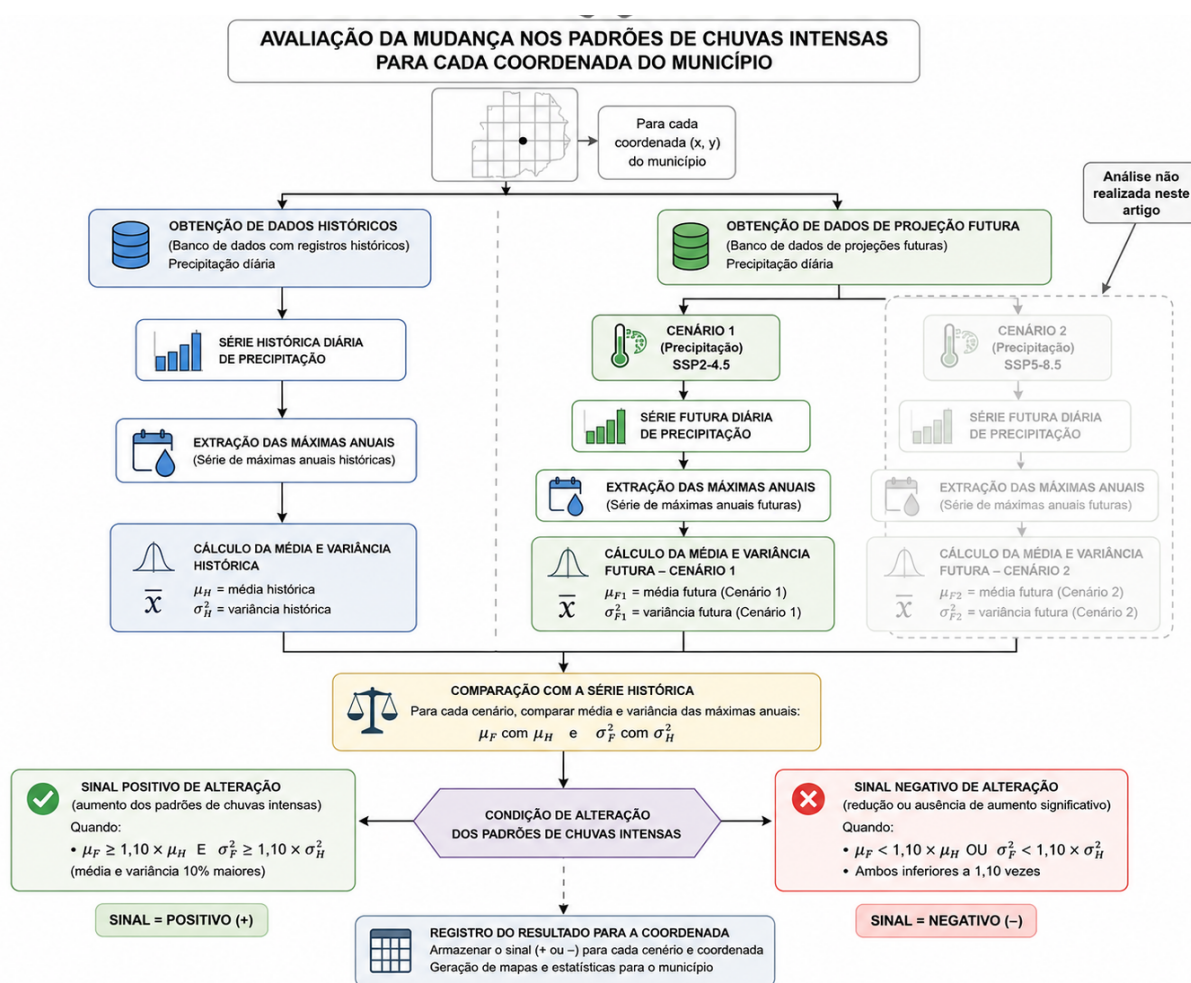


Figura 1. Fluxograma da metodologia adotada

A metodologia proposta consiste em avaliar os principais parâmetros que modificam a função de densidade de probabilidades com base na análise de extremos proposta por Gumbel (Naghetini e Pinto, 2007). Para aplicação da metodologia proposta, foi considerado os municípios da bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê. Nesta etapa preliminar do projeto, com objetivo de redução do esforço computacional, foi realizada a análise para um resultado de projeção do clima para um cenário de caminho de possibilidade futura (CENÁRIO 1 (precipitação) SSP2-4.5). Foi adotado o modelo HadGEM3-GC31-LL referente ao cenário SSP2.4-5 (Ballarin *et al.*, 2023) considerando que esta publicação possui os métodos de redução de escala (*downscaling*) e correção de viés para o território brasileiro para 19 modelos do CMIP6.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O IVIC está apresentado integralmente em Baudenbacher *et al.* (2026) foi inicialmente realizado para os municípios da bacia do Rio Sorocaba e Médio Tietê. As análises de amplificação das mudanças climáticas realizadas para os 57 municípios resultaram em 30 municípios com sinal positivo de alteração dos padrões de chuvas intensas e um total de 27 municípios com sinal negativo de alteração. A Tabela 1 apresenta o resultado da análise do teste de hipótese considerado e o resultado final da consideração da amplificação do IVIC considerando a amplificação das chuvas intensas devido às mudanças climáticas.

Tabela 1 – Resultado da análise de alteração das chuvas intensas.

Cidade	Sinal	Cidade	Sinal	Cidade	Sinal
Alambari	<i>Positivo</i>	Guareí	<i>Positivo</i>	Pirapora do Bom Jesus	Negativo
Alumínio	<i>Positivo</i>	Ibiúna	Negativo	Porangaba	Negativo
Anhembi	Negativo	Igaraçu do Tietê	<i>Positivo</i>	Porto Feliz	Negativo
Araçariguama	<i>Positivo</i>	Indaiatuba	Negativo	Quadra	<i>Positivo</i>
Araçoiaba da Serra	<i>Positivo</i>	Iperó	<i>Positivo</i>	Rafard	Negativo
Barra Bonita	Negativo	Itapetininga	<i>Positivo</i>	Rio das Pedras	Negativo
Bofete	Negativo	Itapevi	<i>Positivo</i>	Saltinho	Negativo
Boituva	<i>Positivo</i>	Itu	<i>Positivo</i>	Salto	<i>Positivo</i>
Botucatu	Negativo	Jumirim	Negativo	Salto de Pirapora	<i>Positivo</i>
Cabreúva	<i>Positivo</i>	Jundiaí	<i>Positivo</i>	Santana de Parnaíba	Negativo
Cajamar	<i>Positivo</i>	Laranjal Paulista	Negativo	São Manuel	Negativo
Capela do Alto	<i>Positivo</i>	Mairinque	Negativo	São Roque	Negativo
Capivari	Negativo	Mineiros do Tietê	<i>Positivo</i>	Sarapuí	<i>Positivo</i>
Cerquilha	Negativo	Mombuca	Negativo	Sorocaba	<i>Positivo</i>
Cesário Lange	<i>Positivo</i>	Pardinho	Negativo	Tatuí	<i>Positivo</i>
Conchas	Negativo	Pereiras	<i>Positivo</i>	Tietê	Negativo
Cotia	<i>Positivo</i>	Piedade	<i>Positivo</i>	Torre de Pedra	Negativo

Dois Córregos	<i>Positivo</i>	Pilar do Sul	<i>Positivo</i>	Vargem Grande Paulista	Negativo
Elias Fausto	Negativo	Piracicaba	<i>Positivo</i>	Votorantim	<i>Positivo</i>

Fonte: Autoria Própria

A Figura 2 ilustra o resultado da análise do fator de amplificação do IVIC considerando as mudanças climáticas, destacando os municípios que possuem alterações nos padrões de chuvas intensas por meio da análise proposta. O resultado completo do IVIC está apresentado no artigo “Indicador de Vulnerabilidade à Injustiça Climática Frente a Enchentes Urbanas” (*Baudenbacher et Al., 2026*) – também publicado no “XVI Encontro Nacional de Águas Urbanas e VI Simpósio de Revitalização de Rios Urbanos”.

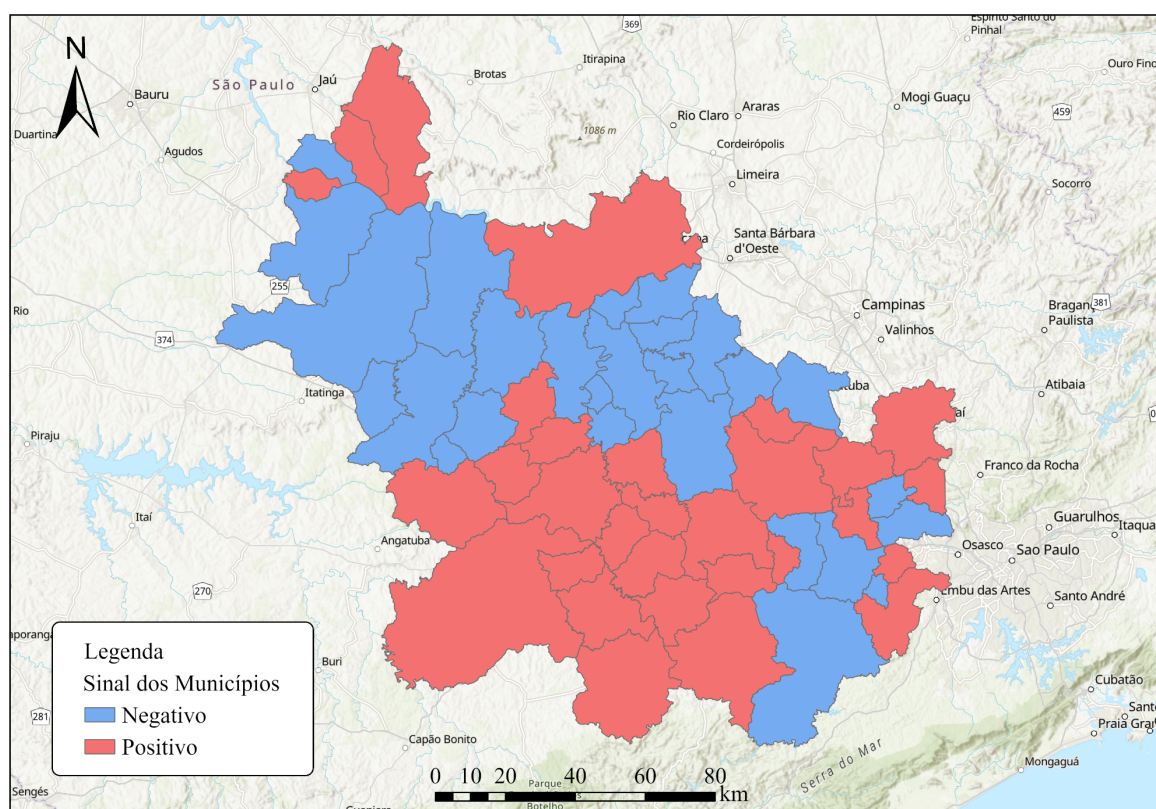


Figura 2. Mapa dos municípios com possível alteração dos padrões de chuvas intensas

A aplicação da metodologia na UGRHI 10 ressalta que a injustiça climática é um fenômeno dinâmico, onde a fragilidade socioeconômica é acentuada pela intensificação dos extremos hídricos. Contudo, a interpretação desses resultados deve considerar as limitações inerentes à modelagem climática e estatística. A principal restrição desta abordagem reside no uso de um único modelo de projeção global, o que pode não capturar toda a amplitude de incertezas presentes nos *ensembles* do CMIP6. Embora o modelo HadGEM3-GC31-LL ofereça uma representação robusta para a região, a

utilização de múltiplos resultados do IPCC permitiria identificar um "sinal de consenso", conferindo maior confiabilidade à detecção das mudanças nos padrões de chuva.

O desafio de lidar com séries não estacionárias impõe reflexões sobre a validade das distribuições estatísticas tradicionais. A mudança da média e da variância ao longo do tempo sugere que o risco de inundação é um "alvo móvel", exigindo que os indicadores de vulnerabilidade sejam atualizados periodicamente para refletir a evolução das ameaças. Para pesquisas futuras, a continuidade deste trabalho deve focar na integração de diversas trajetórias socioeconômicas (SSPs) e no refinamento da capacidade adaptativa, incorporando dados de governança local e infraestrutura verde. A superação da injustiça climática na bacia do Rio Sorocaba dependerá, portanto, da capacidade dos gestores em utilizar essas projeções para antecipar intervenções em áreas onde a exposição física se encontra indissociável da exclusão social.

4. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo aplicar e validar a inclusão de um fator de amplificação climática no Indicador de Vulnerabilidade a Injustiça Climática (IVIC) para as bacias hidrográficas do Rio Sorocaba e Médio Tietê. O teste de hipótese baseado no modelo HadGEM3-GC31-LL revelou um cenário crítico dentro dos 57 municípios analisados, em que mais da metade apresentaram um sinal positivo de alteração severa nos padrões de chuvas intensas com incrementos superiores a 10% na média e na variância das séries de máximas precipitação diária históricas. Como limitação desta etapa preliminar, teve-se uma dependência de um modelo de projeção global único por se tratar de um cenário não estacionário e os indicadores de vulnerabilidade demandarem atualizações dinâmicas e contínuas.

Portanto, conclui-se que o enfrentamento da injustiça climática na bacia do Rio Sorocaba exige romper os modelos genéricos de resiliência urbana. O planejamento territorial e a governança das águas devem integrar a reparação histórica e a equidade social como bases decisórias centrais, utilizando a modelagem preditiva para antecipar intervenções estruturais e de infraestrutura verde onde a exclusão social e a exposição física acabam se sobrepondo. Em estudos futuros, pode-se avaliar a incorporação de parâmetros estatísticos e como proceder o resultado do teste de hipótese para múltiplos resultados dos modelos de projeção do clima em um mesmo cenário.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam sua gratidão à Liga de Adaptação às Mudanças Ambientais e Resiliência (LAMAR) pelo suporte e pelo ambiente de cooperação técnico-científica que

viabilizaram esta pesquisa. A estrutura colaborativa da Liga, fundamentada no tripé ensino, pesquisa e extensão, foi determinante tanto para a maturação intelectual dos pesquisadores quanto para o êxito no desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

- BALLARIN, A.S.; et al. (2023). “CLIMBra - Climate Change Dataset for Brazil”. Scientific Data 10, 47.
- BAUDENBACHER G.M.; et al. (2026). “Indicador de Vulnerabilidade à Injustiça Climática frente a Enchentes Urbanas” in Anais do XVI Encontro Nacional de Águas Urbanas, São Carlos, Set. 2026 (trabalho complementar proposto neste mesmo encontro).
- DI GIULIO, G.M.; et al. (2017). “Mudanças climáticas, riscos e adaptação na megacidade de São Paulo, Brasil”. Sustentabilidade em Debate 8(2), pp. 75 - 87.
- IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. (2023). “Climate Change 2023: Synthesis Report”. Geneva, Switzerland, 36 p.
- JORGENSEN, S. K., & NIELSEN-GAMMON, J. W. (2024). “Nonstationarity in extreme precipitation return values along the US Gulf and southeastern coasts”. Journal of Hydrometeorology, 25(5), 771-788.
- LEE, Y.; HAN, S. (2025). “The geography of structural vulnerability: intersections of climate exposure, ecological insulation, and economic capacity”. npj Urban Sustainability 5(71).
- NAGHETTINI, M.; PINTO, É.J.D.A. (2007). *Hidrologia Estatística*. CPRM, Belo Horizonte - MG, 552 p.
- ROLNIK, R. (2013). “A cidade e a lei: legislação, política urbana e territórios na cidade de São Paulo”. Formação (Online) 1(3).
- SANTOS, J.O. (2015). “Relações entre segregação socioespacial e riscos de inundação”. Mercator 14(3), pp. 117 - 134.
- TUCCI, C.E.M. (2005). “Gerenciamento da drenagem urbana”. RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos 10(1), pp. 5 - 14.
- VALENCIO, N. (2010). “Desastres, ordem social e planejamento em defesa civil: o contexto brasileiro”. Saúde e Sociedade 19(4), pp. 748 - 762.