

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

FELIPPE ZANATTA TANAN

Análise comparativa da disponibilidade e demanda hídrica frente às mudanças
climáticas em bacias hidrográficas paulistas

São Carlos

2025

FELIPPE ZANATTA TANAN

**Análise comparativa da disponibilidade e demanda hídrica frente às mudanças
climáticas em bacias hidrográficas paulistas**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Ambiental

Orientador: Prof. Dr. André Simões Ballarin

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2025

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

T161a Tanan, Felipe Zanatta
Análise comparativa da disponibilidade e demanda
hídrica frente às mudanças climáticas em bacias
hidrográficas paulistas / Felipe Zanatta Tanan;
orientador André Simões Ballarin. São Carlos, 2025.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2025.

1. Mudanças Climáticas. 2. Segurança Hídrica.
3. CLIMBra. 4. SSP-CABra. 5. Vazão. 6. Demanda Hídrica.
I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Felippe Zanatta Tanaú**

Data da Defesa: 13/11/2025

Comissão Julgadora:

Resultado:

André Simões Ballarin (Orientador(a))

APROVADO

Jamil Alexandre Ayach Anache

APROVADO

José Gescilam Sousa Mota Uchôa

APROVADO

Prof. Dr. Marcelo Zaitat

Coordenador da Disciplina 180001 - Trabalho de Graduação

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar agradecendo meus pais, Silvia Zanatta e Adilson Tanan, além da minha irmã mais nova, Giulia Zanatta. Sem eles, sem o que puderam me proporcionar, esse trabalho nunca seria possível. Meus sonhos nunca seriam possíveis. Expresso meus sinceros agradecimentos e meu amor por tudo aquilo que me proporcionaram.

À Sônia, à minha avó Elizabeth, às minhas primas e tias, que, por muitas vezes foram responsáveis por cuidar de mim quando eu era apenas uma criança, me dando todo amor que puderam dar.

Aos professores da Engenharia Ambiental que, apesar de todo o contexto de desmonte e sucateamento das pautas ambientais permanecem defendendo seus ideais e ensinando uma geração inteira de futuros engenheiros ambientais. Aqui coloco um agradecimento especial ao professor André Ballarin, pela oportunidade de orientação no Trabalho de Conclusão de Curso, pelas dicas e ensinamentos no percurso, tornando-o mais suave e possível.

À Universidade de São Paulo, por oferecer um ensino de altíssima qualidade de maneira gratuita e por me abrir as portas para um intercâmbio na França.

À Gabrielle Pedroso, que esteve do meu lado durante o processo do trabalho inteiro, me dando forças quando eu achava que já não tinha mais.

Aos meus amigos de República Feudo - Leo, Matheus, Gabriel, Nelson, Henrique, Cainã, Gustavo, Murilo - e todos os outros que puderam participar do meu dia a dia durante toda a graduação.

Aos amigos que fiz pelo caminho, no GDV, no ETAPA, na USP ou em terras francesas.

À minha psicóloga Lucila, por me escutar e me guiar numa jornada de autoconhecimento.

A todos aqueles que, mesmo de forma rápida, passaram pela minha vida e me ensinaram algo.

Meus sinceros muito obrigado.

RESUMO

TANAN, F. Z. Análise comparativa da disponibilidade e demanda hídrica frente às mudanças climáticas em bacias hidrográficas paulistas. 2025. 56 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

Este trabalho avalia como as mudanças climáticas projetadas podem alterar a segurança hídrica em três bacias representativas do Estado de São Paulo — UGRHI-02 (Paraíba do Sul), UGRHI-09 (Mogi-Guaçu) e UGRHI-11 (Ribeira de Iguape e Litoral Sul) respectivamente, CABra 319, 461 e 731 — combinando oferta climática (o balanço hídrico P – ETo) e oferta hidrológica. Esta última utiliza vazões simuladas por ensembles CMIP6 corrigidos por viés, obtidas da base SSP-CABra (LSTM). O estudo confronta essas ofertas com trajetórias setoriais de demanda da ANA para 2020, 2040 e 2085. A análise considera variabilidade interanual e sazonal e inclui métricas de extremos (máximos anuais e mínimos móveis de sete dias), representando incertezas por faixas multi-modelo. Os resultados indicam que, no horizonte do século, o índice P – ETo permanece estável a levemente negativo nas CABra 319 e 461 e discretamente mais favorável na CABra 731, sem alteração substancial da sazonalidade. As vazões anuais seguem a mesma direção, com leve declínio nas CABra 319 e 461 e tendência moderada de aumento na CABra 731. Já os extremos mostram crescimento de cheias (sobretudo na CABra 731) e sinais heterogêneos para estiagens. Nas demandas, observam-se perfis crescentemente urbano-industriais, com retração da irrigação na CABra 319, expansão industrial na CABra 461 e, na CABra 731, forte queda da irrigação, enquanto os usos urbanos, industriais e de pecuária apresentam acréscimos. Em síntese, a segurança hídrica nas três bacias tende a ser mais condicionada pela recomposição das demandas e pela gestão frente à variabilidade e aos extremos do que por mudanças médias acentuadas da oferta, o que reforça a necessidade de planejamento adaptativo, eficiência setorial e integração entre gestão de demanda e operação de sistemas.

Palavras-chave: Mudanças Climáticas. Segurança Hídrica. CLIMBra. SSP-CABra. Vazão. Demanda Hídrica.

ABSTRACT

TANAN, F. Z. **Comparative analysis of water availability and demand under climate change in São Paulo hydrographic basins.** 2025. 56 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

This study evaluates how projected climate change may alter water security in three representative basins in the State of São Paulo — UGRHI-02 (Paraíba do Sul), UGRHI-09 (Mogi-Guaçu) e UGRHI-11 (Ribeira de Iguape e Litoral Sul) CABra 319, 461, and 731 — by combining climatic supply (the P – Eto water balance) and hydrological supply. The latter uses simulated flows from bias-corrected CMIP6 ensembles, obtained from the SSP-CABra database (specifically the projections from the LSTM machine learning hydrological model). The study compares these supplies with sectoral demand trajectories from the ANA database for 2020, 2040, and 2085. The analysis considers interannual and seasonal variability and includes metrics for extremes (annual maximums and seven-day moving minimums), representing multi-model uncertainties. The results indicate that, over the century, the P – ETo index remains stable to slightly negative in CABra 319 and 461, and slightly more favorable in CABra 731, with no substantial change in seasonality. Annual flows follow the same direction, with a slight decline in CABra 319 and 461 and a moderate upward trend in CABra 731. Meanwhile, extremes show an increase in floods (especially in CABra 731) and heterogeneous signals for droughts. Regarding demands, increasingly urban-industrial profiles are observed, with a retraction of irrigation in CABra 319, industrial expansion in CABra 461, and, in CABra 731, a sharp drop in irrigation, while urban, industrial, and livestock uses show increases. In summary, water security in the three basins tends to be more conditioned by the recomposition of demands and by management in the face of variability and extremes, rather than by marked average changes in supply. This reinforces the need for adaptive planning, sectoral efficiency, and the integration of demand management and system operation.

Keywords: Climate Change. Water Security. CLIMBra. SSP-CABra. Streamflow. Water Demand.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução dos modelos climáticos.....	24
Figura 2 – Localização das bacias hidrográficas CABra 319, 461 e 731	29
Figura 3 – Balanço hídrico climatológico (P – Eto) das bacias hidrográficas CABra 319, CABra 461 e CABra 731.....	37
Figura 4- Vazões totais das bacias hidrográficas CABra 319, CABra 461 e CABra 731.....	39
Figura 5 - Vazões máximas e mínimas das bacias hidrográficas CABra 319, CABra 461 e CABra 731.....	41
Figura 6 – Demanda hídrica total por bacia nos anos de 2020, 2040 e 2085.....	42
Figura 7 – Demanda hídrica por tipologia de consumo para a bacia CABra 319 nos anos de 2020, 2040 e 2085.	43
Figura 8 - Demanda hídrica por tipologia de consumo para a bacia CABra 461 nos anos de 2020, 2040 e 2085.	45
Figura 9 - Demanda hídrica por tipologia de consumo para a bacia CABra 731 nos anos de 2020, 2040 e 2085.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
CABra	Catchments Attributes for Brazil
CLIMBra	Climate Change Dataset for Brazil
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project
ESM	Earth System Model
GCM .	General Circulation Models
IBGE .	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISH	Índice de Segurança Hídrica
LSTM	Long Short Term Memory
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PNSH	Plano Nacional de Segurança Hídrica
QDM .	Quantile Delta Mapping
SSP	Socioeconomic Shared Pathways
UGRHI	Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 OBJETIVOS.....	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1 Mudanças Climáticas	21
3.2 Modelos de Clima e Projeções Climáticas	22
3.3 Modelos Hidrológicos.....	25
3.4 Índice de segurança Hídrica.....	26
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1 Área de estudo	28
4.1.1 Paraíba do Sul – CABra 319	29
4.1.2 Mogi-Guaçu – CABra 461	30
4.1.3 Ribeira de Iguape e Litoral Sul – CABra 731	31
4.1.4 Comparativo entre bacias	32
4.2 Base de dados.....	32
4.2.1 CLIMBra	32
4.2.2 SSP-CABra	33
4.2.3 ANA	34
4.3 Análise de dados	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 Balanço hídrico	36
5.2 Vazões Totais.....	38
5.3 Vazões Máximas e Mínimas.....	40
5.4 Demandas Hídricas para as bacias de estudo.....	42
5.4.1 Demanda Total	42
5.4.2 CABra 319	43

5.4.3 CABra 461	44
5.4.4 CABra 731	45
6 CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A água é elemento estruturador da vida e do funcionamento dos sistemas naturais, sustentando processos ecológicos, a ciclagem de nutrientes e a provisão de serviços ecossistêmicos como abastecimento, depuração da água, regulação climática e controle de cheias (MEA, 2005). Embora cubra a maior parte da superfície terrestre, apenas cerca de 2,5% do total de água disponível é doce e uma fração ainda menor encontra-se prontamente acessível para usos humanos e ecossistêmicos, o que relativiza a ideia de abundância em escala global (ANA, 2019). No âmbito socioeconômico, os recursos hídricos são insumo crítico para agricultura, geração de energia, abastecimento público e atividades industriais, estando diretamente associados à saúde e ao bem-estar, cumprindo papel integral no suporte aos ecossistemas, no desenvolvimento econômico e nas dimensões culturais das sociedades (Gleick, 1998).

No contexto brasileiro, o país possui uma vasta quantidade de recursos hídricos, chegando a aproximadamente 15% da disponibilidade de água no mundo, com uma vazão de 1,5 milhão de m³/s (Shiklomanov et al., 2000). Sua centralidade e finitude são reconhecidas juridicamente pela Lei nº 9.433/1997, definindo a água como bem de domínio público, recurso natural limitado dotado de valor econômico e, em situações de escassez, estabelece prioridade para o consumo humano e a dessementação animal (BRASIL, 1997, art. 1º, I-III). Entretanto, apesar dessa ampla disponibilidade, o país enfrenta sérios desafios decorrentes da distribuição heterogênea dos recursos hídricos e da intensificação de seus usos (Gesualdo et al., 2021). Isto é, devido a intensificação da demanda hídrica, como por exemplo, por conta expansão das atividades agrícolas, e da disponibilidade não uniforme dos recursos nas diferentes regiões do país, o Brasil enfrenta crescentes situações de conflito pelo uso da água, sobretudo em regiões semiáridas e em áreas onde a pressão antrópica é mais intensa.

Diante do contexto de mudanças climáticas somado a impactos antropogênicos, a dinâmica dos recursos hídricos no Brasil e no mundo fica em risco. A expansão urbana, a conversão de uso do solo e o aumento da demanda hídrica alteram a variabilidade e a distribuição temporal das vazões, intensificando períodos secos e chuvosos e pressionando ecossistemas já vulneráveis (Marengo, 2008). Esses processos se expressam no aumento da frequência e da intensidade de extremos hidrometeorológicos — secas mais prolongadas e intensas em algumas regiões, episódios de chuva concentrada com enxurradas e alagamentos em outras — com impactos diretos sobre a recarga de aquíferos, a disponibilidade para

abastecimento e irrigação e a confiabilidade operacional de infraestruturas hídricas e de saneamento (IPCC, 2021).

As mudanças climáticas podem ser compreendidas como alterações persistentes no estado do clima — isto é, em padrões estatísticos como média e variabilidade de elementos do clima (e.g., precipitação e temperatura) — que perduram por décadas ou mais e decorrem tanto da variabilidade natural quanto, de forma dominante no período recente, do aumento decorrente das atividades humanas de gases de efeito estufa.

Além dos extremos - como secas e chuvas intensas - há outros efeitos das mudanças climáticas que afetam a segurança hídrica: temperaturas mais elevadas reduzem o oxigênio dissolvido e a capacidade de autodepuração - além de afetarem as dinâmicas de evapotranspiração, e consequentemente, da disponibilidade hídrica; estiagens prolongadas elevam a concentração de poluentes; e cheias favorecem eventos de contaminação difusa, agravando conflitos de uso e exigindo gestão mais integrada e preventiva (ANA, 2019; Marengo, 2008). Diante de todos esses fatores, se torna inevitável o estudo a respeito das consequências e previsões que mudanças nas dinâmicas climáticas futura podem trazer para a disponibilidade hídrica das bacias hidrográficas.

Em geral, para estimar potenciais trajetórias futuras das variáveis hidroclimatológicas, utilizam-se modelos climáticos, que resolvem, em grade global e local, equações físicas de conservação de massa, energia e quantidade de movimento em diversos compartimentos terrestres, como atmosfera, oceano, criossfera e superfície terrestre, considerando diferentes cenários de emissões com a intenção de prever comportamentos e dinâmicas atmosféricas, além de auxiliar na gestão de políticas públicas a respeito dos recursos hídricos disponíveis (UNESCO/WWAP, 2020).

No Brasil, essas projeções preveem aumento na frequência e na severidade de secas meteorológicas, impulsionado por taxas de evapotranspiração mais altas, menor número de dias chuvosos e redução do excedente de precipitação sobre a evaporação (Ballarin et al., 2024a), bem como aumento na frequência e intensidade de chuvas intensas. Esses acontecimentos, na realidade, já estão sendo observados, como por exemplo, na crise hídrica de 2014–2015 na Região Metropolitana de São Paulo, quando a combinação de precipitação muito abaixo da média, temperaturas mais altas e aumento de demanda levou o Sistema Cantareira a níveis críticos e desencadeou uma emergência de abastecimento crítico (Marengo; Alves, 2016).

O mesmo padrão de vulnerabilidade se expressou no litoral norte paulista, onde as chuvas extremas de 18–19 de fevereiro de 2023 provocaram deslizamentos devastadores em São Sebastião, com destaque para a Barra do Sahy/Vila Sahy, após acumulados superiores a

600 mm em menos de 24 horas e com dezenas de vítimas fatais (Coelho et al., 2024; São Sebastião, 2023). Mais recentemente, as enchentes de abril–maio de 2024 no Rio Grande do Sul registraram totais pluviométricos acima de 500–700 mm em diversos municípios e foram classificadas por órgãos oficiais como um desastre histórico no estado, com vasta documentação técnica e institucional sobre danos humanos, econômicos e de infraestrutura (INMET, 2025; Rio Grande do Sul, 2025).

Embora sínteses em escala global tragam diretrizes importantes, persiste uma lacuna decisiva sobre como a mudança do clima se expressa nos regimes hidrológicos de bacias individuais — sobretudo aquelas vitais ao abastecimento urbano (Mattos et al., 2025). Diante do exposto, isto é, dos impactos das mudanças climáticas e atividades antropogênicas na disponibilidade e, consequentemente, na segurança hídrica, esse trabalho busca avaliar os potenciais alterações nas dinâmicas de (i) balanço hídrico, (ii) demanda hídrica e (iii) eventos extremos de acordo com diferentes cenários futuros em três bacias hidrográficas localizadas no estado de São Paulo. Para isso, serão utilizadas duas bases de dados com projeções de disponibilidade e demanda hídrica a nível de bacia hidrográfica: SSP-CABra (Almagro et al., 2025) e ANA (2019).

Espera-se que esse trabalho possa contribuir para um aprimoramento das práticas de gestão e planejamento dos recursos hídricos através da incorporação de cenários futuros, promovendo maior resiliência frente às incertezas climáticas e aos crescentes conflitos entre usos múltiplos da água.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral avaliar como as mudanças climáticas projetadas podem alterar a segurança hídrica de três bacias paulistas representativas — CABra 319, 461 e 731. Essa análise será baseada em valores de balanço hídrico, demanda hídrica e frequência de eventos extremos.

Pretende-se caracterizar, em primeiro lugar, a oferta climática e hidrológica por meio do índice P – ETo e das vazões simuladas, examinando variações anuais e sazonais e verificando possíveis mudanças em cheias e estiagens por métricas usuais de máximos anuais e mínimos móveis de sete dias; além disso, objetiva-se consolidar as trajetórias setoriais de demanda hídrica, agregadas por bacia para 2020, 2040 e 2085.

Espera-se, com isso, que esse trabalho possa contribuir para um aprimoramento das práticas de gestão e planejamento dos recursos hídricos através da incorporação de cenários futuros, promovendo maior resiliência frente às incertezas climáticas e aos crescentes conflitos entre usos múltiplos da água.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mudanças Climáticas

Mudanças climáticas designam alterações persistentes no estado do clima, ou seja, nos padrões estatísticos de temperatura, precipitação, extremos e variabilidade, em períodos de décadas ou mais, sendo definidas no marco jurídico-político internacional como mudanças atribuíveis direta ou indiretamente à atividade humana que alteram a composição da atmosfera, além da variabilidade natural do clima (United Nations, 1992). Essas alterações são desencadeadas por forçantes climáticas, que podem ter origem natural — como variações na atividade solar e vulcanismo — ou antrópicas.

Dentre as atividades antropogênicas, destacam-se o aumento das concentrações de gases de efeito estufa, as emissões de aerossóis e as mudanças no uso e cobertura da terra, que perturbam o balanço de massa e energia e, consequentemente, a circulação do sistema climático (UNEP, 2023; WMO, 2024). Em termos das manifestações das mudanças climáticas, podem-se citar, mudanças nas características do ciclo hidrológico, com alterações nos regimes de precipitação, alterações na frequência e na ocorrência de extremos hidrometeorológicos, mudanças na criossfera e consequente elevação do nível do mar, com repercussões diretas sobre disponibilidade e qualidade da água, serviços ecossistêmicos e segurança hídrica, o que demanda políticas de adaptação, gestão de riscos e governança integrada (WMO, 2024; UNESCO/WWAP, 2020).

É importante explicitar que clima se avalia em séries mínimas de trinta anos e que variabilidade climática corresponde a flutuações em torno da média climatológica; tendências observadas em janelas curtas não devem ser confundidas com mudanças climáticas, e a própria distinção entre variabilidade e mudança depende da escala temporal adotada. Entretanto, apesar do conhecido impacto da variabilidade natural nas dinâmicas climáticas, evidências diversas, como, análise de padrões históricos, registros paleoclimáticos e simulações geradas por modelos climáticos, sustentam a hipótese das atividades antropogênicas como um forçante climática significativa.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) é um organismo de avaliação científica criado em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, cuja missão é produzir avaliações periódicas sobre a ciência do clima, seus impactos, riscos e opções de mitigação e adaptação; organiza-se em três Grupos de Trabalho — base física, impactos/adaptação/vulnerabilidade e mitigação - com

objetivos distintos buscando melhor compreender a dinâmica do clima bem como desenvolver políticas de adaptação (IPCC, 2024; IPCC/TFI, 2019; IPCC/TFI, 2024).

Em suas avaliações mais recentes, o IPCC conclui que a influência humana é inequívoca e que o ciclo hidrológico se intensifica, com maior probabilidade de extremos como ondas de calor, secas e eventos de precipitação intensa, além de elevação do nível do mar e alterações em componentes criossféricos e oceânicos, implicando riscos crescentes a ecossistemas, infraestrutura e segurança hídrica (IPCC, 2021; IPCC, 2023).

No Brasil, diagnósticos do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas indicam aquecimento expressivo e alterações no regime de chuvas com forte variabilidade regional, inclusive possíveis reduções acentuadas de precipitação em determinados recortes, o que amplia a exposição a secas hidrológicas e a conflitos de uso. A literatura nacional também evidencia que mudanças de uso e cobertura da terra interagem com o clima, afetando a participação de energia e os fluxos de umidade, como documentado em sínteses e estudos de modelagem sobre Amazônia e Cerrado (PBMC, 2014; Marengo, 2018; Foley et al., 2005; Sampaio et al., 2007).

Em diferentes recortes regionais, esses modelos mostram que mudanças futuras na precipitação tenderão a ser explicadas mais pela alteração na frequência de eventos do que por intensificação das magnitudes individuais, o que tem implicações diretas para regimes pluviais sazonais, geração de escoamento e manejo de cheias (Ballarin et al., 2024b). Em paralelo, análises sobre secas meteorológicas indicam intensificação associada a redistribuições intra-anuais e a menos dias chuvosos, mesmo onde a chuva anual possa não apresentar redução significativa, de forma que a disponibilidade hídrica efetiva e os conflitos de uso podem se agravar por descompassos temporais entre oferta e demanda (Ballarin et al., 2024a).

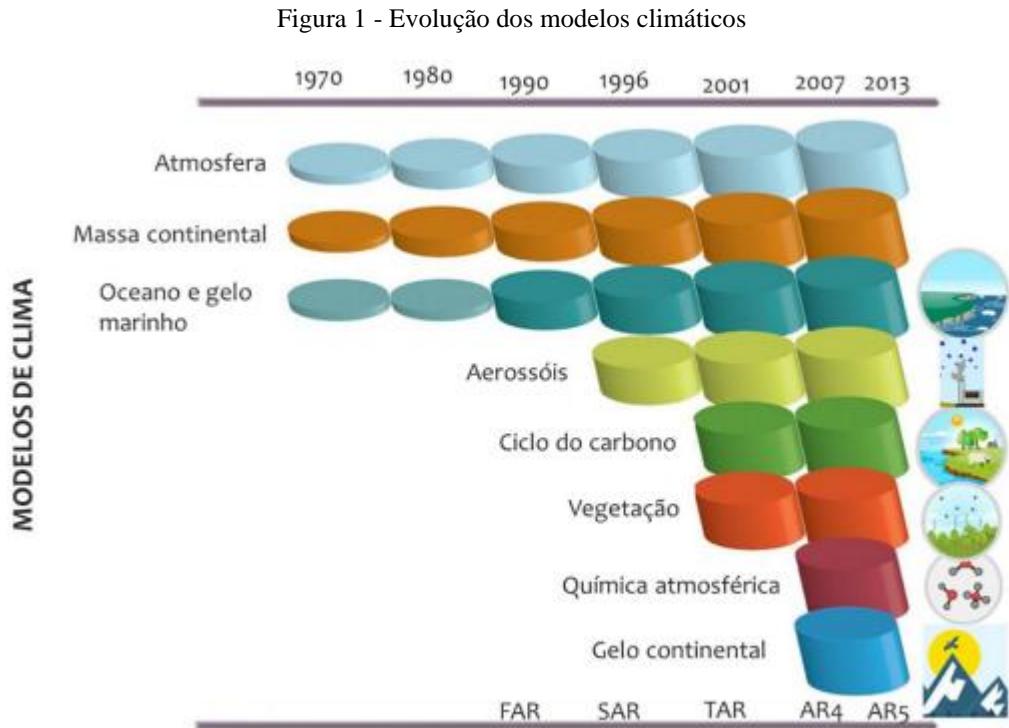
Na prática, a integração de bases climáticas acesso livre, como a base CLIMBra (Climate Change Dataset for Brazil) (Ballarin et al. 2023), com modelos hidrológicos têm permitido quantificar aumentos robustos em variáveis hidrológicas, possibilitando a investigação de cheias e secas meteorológicas sob diferentes cenários e trajetórias futuras (Mattos et al., 2025).

3.2 Modelos de Clima e Projeções Climáticas

Modelos de Clima (ESM - Earth System Model) são representações dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem entre os diferentes compartimentos do sistema terrestre (Maruan et al., 2017a). Esses modelos representam numericamente, com bases físicas,

o acoplamento entre atmosfera, oceanos, superfície continental e criossfera por meio de equações de conservação e parametrizações de processos sub-resolvidos, o que os torna a principal ferramenta para investigar a variabilidade e as tendências do clima em horizontes de décadas (IPCC, 2021). A natureza caótica do sistema climático, as limitações observacionais e a impossibilidade de experimentação controlada em escala planetária justificam o uso desses modelos para construir cenários, mas também explicam a presença de incertezas estruturais e paramétricas, sobretudo quando se busca detalhar precipitação e extremos em escalas regionais (Abgelocci; Sentelhas, 2010).

A evolução dos modelos de clima pode ser entendida como um movimento de crescente complexificação física e integração de componentes do sistema terrestre (Figura 1). Os primeiros modelos (GCMs, General Circulation Models) acoplaram apenas atmosfera, a massa continental e o oceano. Gradualmente, com a evolução científica e tecnológica, passaram a incorporar outros aspectos relevantes, como dinâmicas da criossfera, ciclo do carbono, química e biogeofísica, até constituírem os atuais modelos de sistema terrestre (ESMs), capazes de representar interações físico-químicas e biológicas em múltiplas escalas (Maruan et al., 2017a; Ehret et al., 2012).



Fonte: Traduzido do Quinto Relatório de avaliação do IPCC

Como os produtos de modelos climáticos operam em grades relativamente grosseiras e exibem vieses sistemáticos, emprega-se rotineiramente técnicas de pós-processamento para adequação estatística antes do acoplamento hidrológico, com destaque para técnicas estatísticas de correção de viés que alinham distribuições simuladas às observadas sem apagar os sinais de mudança projetados quando implementadas no esquema delta (Cannon; Sobie; Murdock, 2015). Avaliações comparativas reiteram que a escolha do método, a incerteza observacional e o desencontro de resolução entre grade climática e redes de medição condicionam a fidelidade dos resultados, razão pela qual se recomenda explicitar métricas para médias, quantis e caudas ao validar séries corrigidas (Casanueva et al., 2020; Teutschbein; Seibert, 2012).

Em paralelo à evolução da modelagem climática, o Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (Coupled Model Intercomparison Project - CMIP), vem, constantemente, padronizando e organizando protocolos a fim de delinear os esforços globais de simulação e avaliação climática. Partindo-se das fases mais antigas (por exemplo, a terceira fase - CMIP3) até a fase mais recente (sexta fase, CMIP6), cenários futuros são propostos a fim de avaliar diferentes trajetórias climáticas. Atualmente, na sexta fase, são adotados os cenários futuros chamados de Socioeconomic Shared Pathways - SSP, que combinam trajetórias

socioeconômicas e níveis de forçamento radiativo, com janelas históricas estendidas e documentação mais transparente (IPCC, 2013).

Nessa iniciativa, são padronizados forçantes, cenários e protocolos, permitindo comparações, avaliação de desempenho e construção de ensembles multi-modelo (conjuntos de simulações obtidos a partir de diferentes modelos climáticos) sob conjuntos comuns de cenários, o que dá coerência às projeções usadas em avaliações globais e estudos setoriais (IPCC, 2021). No núcleo de cenários do CMIP6, a iniciativa ScenarioMIP articula as trajetórias socioeconômicas compartilhadas a níveis de forçamento radiativo, como SSP2-4.5 e SSP5-8.5, servindo de base para simulações históricas e futuras considerando diferentes cenários de emissão e desenvolvimento econômico até o final do século (O'Neill et al., 2016). Por exemplo, o primeiro cenário, SSP2-4.5, representa um cenário intermediário, caracterizado por emissões moderadas de gases de efeito estufa e adoção limitada de políticas de mitigação. Já o segundo, SSP5-8.5, representa um cenário extremo, com altas emissões associadas a um desenvolvimento socioeconômico dependente de combustíveis fósseis e ausência de políticas significativas de mitigação.

3.3 Modelos Hidrológicos

Modelos hidrológicos são representações matemáticas dos processos do ciclo da água em bacias hidrográficas que, a partir de princípios físicos e hipóteses simplificadoras, estimam fluxos hidrológicos e permitem simular a resposta da bacia em janelas contínuas ou por eventos, sendo ferramentas centrais para análise, planejamento e gestão ambiental (Almeida, 2017). Em termos funcionais, os modelos chuva–vazão recebem, em geral, precipitação, temperatura e evapotranspiração potencial, e transformam esses dados de entrada em escoamento superficial, subsuperficial e base, reproduzindo o escoamento observado após calibração e validação em série histórica (Kaiser, 2006). Modelos mais complexos, entretanto, podem necessitar de outros dados de entrada, como características de solo e uso e ocupação.

Quanto aos tipos, a literatura distingue, de um lado, modelos empíricos “caixa-preta” que ajustam relações estatísticas entre entradas e saídas; de outro, modelos conceituais que representam reservatórios e trocas de água de forma agregada ou semi distribuída; e, por fim, modelos distribuídos baseados em processos, que discretizar o terreno e resolvem balanços de massa e de energia por células, com maior detalhamento espacial e demanda de dados (Almeida, 2017; Marinho Filho, 2012)

Dentre os modelos empíricos, consolidou-se um ramo com base na ciência de dados, chamados de data-driven, que utiliza técnicas de aprendizado de máquina para mapear as relações precipitação–vazão. Esses esquemas podem atuar isoladamente ou em arquiteturas híbridas com modelos baseados em processos, oferecendo ganhos pontuais de desempenho, sobretudo quando há boa densidade de dados (Yang et al., 2020; Özdoğan-Sarıkoç et al., 2024).

Com os modelos hidrológicos calibrados para representar processos observados locais, procede-se para a etapa seguinte, que consiste em forçar os modelos hidrológicos com variáveis climáticas (por exemplo, precipitação, temperatura e evapotranspiração potencial) projetadas considerando os diferentes cenários futuros, avaliando-os com métricas de desempenho, sobretudo, examinando a robustez dos resultados à escolha do modelo hidrológico e ao spread do ensemble climático, dado que a incerteza dominante costuma advir das próprias simulações de clima (IPCC, 2021).

Estudos recentes no Brasil adotam arquiteturas complementares — modelos conceituais e abordagens data-driven — para estimar respostas de vazões médias e extremas sob cenários futuros contrastantes, fornecendo subsídios para diferentes estudos com base hidrológica no país em um contexto de mudanças climáticas (Almagro et al. 2025).

3.4 Índice de segurança Hídrica

Segurança hídrica, no sentido proposto pelas Nações Unidas, é entendida como a capacidade de salvaguardar acesso sustentável a água em quantidade e qualidade adequadas para o bem-estar humano e o desenvolvimento socioeconômico, proteger contra riscos relacionados à água e preservar ecossistemas, sob níveis aceitáveis de risco; esse é o conceito expressamente adotado no Brasil como baliza do Plano Nacional de Segurança Hídrica – PNSH (UN-Water, 2013; ANA, 2019).

No âmbito do PNSH, o Índice de Segurança Hídrica (ISH) foi concebido como um indicador sintético para retratar, de forma integrada, às diferentes dimensões da segurança hídrica no território brasileiro, oferecendo um referencial comparável para diagnóstico e priorização de ações (ANA, 2019a). Em termos metodológicos, o ISH estrutura-se em três níveis hierárquicos — dimensões, indicadores e variáveis — e integra quatro dimensões de análise: humana, econômica, ecossistêmica e de resiliência (ANA, 2019b).

Na dimensão humana, os indicadores centrais avaliam a garantia de água para abastecimento e a cobertura da rede; na dimensão econômica, são consideradas as garantias para irrigação e pecuária e para a atividade industrial; na dimensão ecossistêmica, entram

quantidade e qualidade adequadas para usos naturais, além de um indicador específico de segurança de barragens de rejeito; por fim, a dimensão de resiliência combina condições naturais e artificiais por meio de reservação artificial, preservação natural, potencial de armazenamento subterrâneo e variabilidade pluviométrica (ANA, 2019b).

O cálculo do ISH procede, em cada unidade hidrográfica de referência, à classificação dos indicadores em faixas graduadas de 1 a 5 e à agregação por média ponderada ao nível de dimensão; na etapa final, o valor do índice resulta da média aritmética simples das quatro dimensões, consideradas em igualdade de condições, com posterior reclassificação para apresentação (ANA, 2019b).

Para além desse arcabouço nacional, a literatura e as práticas internacionais mostram que índices de segurança hídrica são necessariamente contextuais e dependem da disponibilidade e da qualidade dos dados, podendo variar de composições multidimensionais, como as adotadas no PNSH, a medidas mais simplificadas baseadas em balanço entre oferta e pressão de uso (OECD, 2013; UN-Water, 2013). Em cenários de informação limitada, uma alternativa amplamente utilizada é empregar razões simples entre disponibilidade e demanda como indicador de estresse/segurança, explorando séries de disponibilidade renovável média e de retiradas ou demanda média anual para produzir um quociente adimensional de fácil interpretação e comparabilidade temporal (UN-Water/FAO, 2018). Nesse contexto, a análise simplificada reside na comparação entre disponibilidade e demanda hídrica.

No presente estudo, optou-se por essa análise simplificada — isto é, comparar disponibilidade e demanda média — como indicador operacional de segurança hídrica, por refletir o núcleo do risco de escassez e por ser compatível com as bases de dados disponíveis no recorte analisado. Tal escolha mantém coerência metodológica com métricas consagradas de estresse hídrico, como o indicador 6.4.2 dos ODS que relaciona retiradas aos recursos hídricos disponíveis, e permite avaliar tendências e cenários com transparência, deixando explícitas as hipóteses e limitações associadas à resolução temporal e às incertezas hidrológicas subjacentes (UN-Water/FAO, 2018; OECD, 2013).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

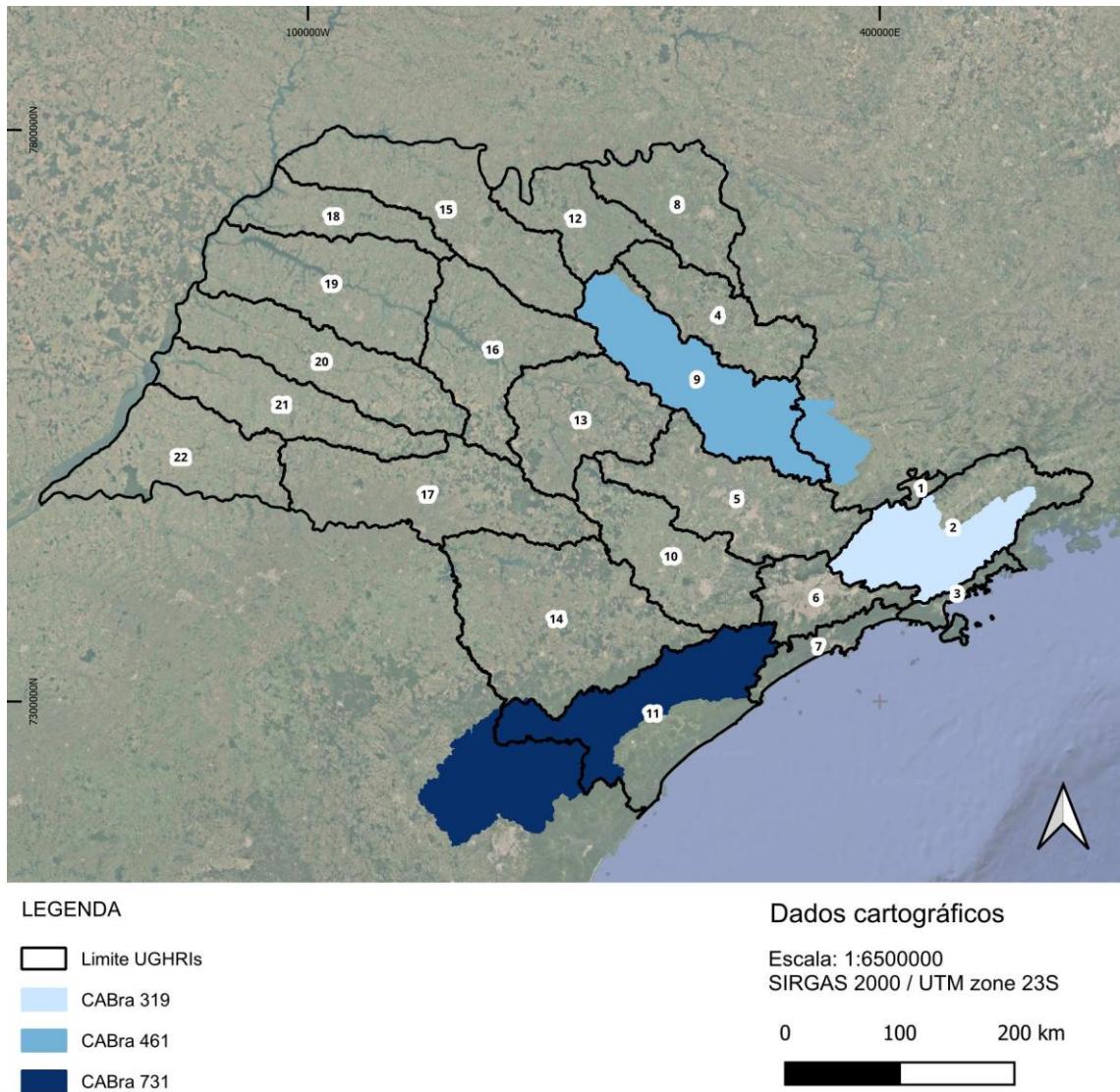
4.1 Área de estudo

O Estado de São Paulo localiza-se na região Sudeste do Brasil, possui área de 248.219,485 km² e população de 44.411.238 habitantes em 2022, com densidade demográfica próxima de 179 hab./km², configurando a unidade federativa mais populosa do país e um polo econômico e urbano de escala nacional (IBGE, 2024). Em termos administrativos, o território é composto por 645 municípios e apresenta elevado grau de urbanização, com cerca de 96–97% da população vivendo em áreas urbanas, o que se traduz em forte pressão sobre os sistemas de abastecimento e de infraestrutura hídrica (IBGE, 2024; SEADE, 2025).

No âmbito da gestão de recursos hídricos, o estado adota o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos e organiza o território em 22 Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI), que cobrem integralmente os municípios paulistas e constituem a base para planejamento, monitoramento e enquadramento de usos em escala de bacia (SIGRH, 2004–2024).

Dentre as 22 UGRHIs paulistas, este estudo seleciona três recortes hidrográficos associados a bacias do conjunto CABra, de forma a abranger contextos contrastantes de clima, uso e cobertura da terra, solos, estrutura hidrográfica e dinâmicas de demanda hídrica: a CABra 319, inserida na UGRHI-02 (Paraíba do Sul); a CABra 461, na UGRHI-09 (Mogi-Guaçu); e a CABra 731, na UGRHI-11 (Ribeira de Iguape e Litoral Sul). Essas bacias combinam diferença de localização no estado (faixa leste de serra, interior agroindustrial e faixa sul litorânea), heterogeneidade de cobertura (urbano-industrial, agropecuária intensiva e Mata Atlântica) e condições hidrológicas distintas, permitindo que a comparação entre elas ofereça uma visão mais geral dos regimes hidroclimáticos representativos do território paulista.

Figura 2 – Localização das bacias hidrográficas CABra 319, 461 e 731



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

4.1.1 Paraíba do Sul – CABra 319

No caso da CABra 319, o recorte corresponde à parte alta da bacia do rio Paraíba do Sul em território paulista, tendo como seção de controle o posto fluviométrico Pindamonhangaba (código ANA 58183000). A região situa-se em transição entre a Serra da Mantiqueira e o Vale do Paraíba, sob clima tropical de altitude, com precipitação média anual em torno de 1.400 a 1.600 mm e concentração das chuvas na primavera-verão (CBH-PS, 2023). O uso e cobertura da terra caracterizam um mosaico típico de vale industrializado, com extensos núcleos urbanos e industriais ao longo do eixo rodoviário e ferroviário, intercalados com áreas de agricultura,

pastagens e fragmentos de vegetação secundária. Relatórios de situação indicam que os setores de abastecimento urbano, indústria e serviços respondem por parcela significativa da demanda hídrica regional (CBH-PS, 2023).

Em termos pedológicos, a área é dominada por Latossolos e Argissolos desenvolvidos sobre rochas cristalinas e coberturas sedimentares, solos profundos e bem drenados que conferem relevante capacidade de armazenamento de água no perfil, favorecendo o escoamento de base (ROSS, 1994; SMA, 2022).

Do ponto de vista hidrológico, o sistema é estruturado pelo rio Paraíba do Sul e seus principais afluentes de montante, como o rio Jaguari e o rio Paraibuna, nos quais se localizam grandes reservatórios multipropósito (Paraibuna, Santa Branca e Jaguari), que exercem papel central na regulação de vazões e no atendimento a usos múltiplos, inclusive interligações com outras bacias (CBH-PS, 2023; ANA, 2024).

Relatórios da UGRHI-02 indicam, ainda, a presença de sistemas aquíferos associados a coberturas sedimentares cenozóicas (Formações Caçapava e Tremembé) e ao embasamento cristalino fraturado, o que fornece dupla fonte de suporte de vazão de estiagem, embora com produtividades distintas (CETESB, 2003; SIGRH, 2004–2024).

4.1.2 Mogi-Guaçu – CABra 461

Na CABra 461, inserida na UGRHI-09, o recorte corresponde à bacia contribuinte ao posto PASSAGEM (código ANA 61915000), situada em planaltos interiores de relevo suave a ondulado. O clima é tropical úmido, com totais anuais de precipitação entre 1.300 e 1.700 mm e sazonalidade marcada, com estação chuvosa no verão e período relativamente seco no inverno (CBH-MOGI, 2023). O uso e cobertura da terra são fortemente dominados pela agroindústria, com grande proporção da área ocupada por agricultura, em especial a cana-de-açúcar, além de silvicultura comercial (eucalipto), pastagens e núcleos urbanos de porte médio, como Mogi Guaçu e Mogi Mirim. Estudos regionais de uso e cobertura indicam que, em boa parte da UGRHI-09, mais de 50–70% da área é destinada à agricultura, com predomínio da canavicultura nas sub-bacias do médio e baixo Mogi-Guaçu (CBH-MOGI, 2023; CORHI, 2004).

Os solos da região são majoritariamente Latossolos Vermelhos e Nitossolos, de textura média a argilosa, bem estruturados e com elevada capacidade de infiltração, o que contribui para regimes de escoamento com componente expressivo de base e maior regularidade em comparação a bacias de relevo mais acidentado (SMA, 2022; EMBRAPA, 2018). A rede de

drenagem é organizada em torno do rio Mogi-Guaçu e de afluentes como rios do Peixe e Jaguari-Mirim, nos quais se inserem diversos barramentos de pequeno e médio porte destinados a abastecimento, irrigação e usos industriais, sem, contudo, a presença de grandes reservatórios de regulação comparáveis àqueles da UGRHI-02 (CBH-MOGI, 2023).

Em termos hidrogeológicos, há sobreposição entre aquíferos sedimentares (como o Sistema Aquífero Bauru) e o embasamento cristalino, o que amplia o potencial de recarga e de captações subterrâneas para abastecimento urbano e rural (CETESB, 2005; CPRM, 2005).

4.1.3 Ribeira de Iguape e Litoral Sul – CABra 731

A CABra 731 situa-se na UGRHI-11, abrangendo parte da bacia do rio Ribeira de Iguape e Litoral Sul até a seção do posto REGISTRO (código ANA 81683000). Trata-se do recorte mais preservado entre os três, com baixa densidade demográfica, predomínio de remanescentes de Mata Atlântica e presença de unidades de conservação em diferentes categorias. O clima é úmido, com precipitações anuais tipicamente entre 1.500 e 1.900 mm, fortemente condicionadas pela interação entre relevo serrano, circulação marítima e frentes frias, resultando em elevada frequência de dias chuvosos e episódios de extremos pluviais (CBH-RB, 2017; FERREIRA et al., 2022).

O uso e cobertura do solo são marcados por extensas áreas de floresta ombrófila densa, além de mosaicos de agricultura familiar, destacando-se a bananicultura e pequenas áreas de chá, bem como áreas de várzea, manguezais e planícies costeiras na porção litorânea da UGRHI (CBH-RB, 2017; UGRHI 11, 2008–2011).

Em termos de solos, estudos regionais apontam a predominância de Argissolos, Cambissolos e Neossolos em relevo fortemente ondulado e montanhoso, com suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa em encostas, mas com grande cobertura vegetal que contribui para proteção superficial e regulação hidrológica (ROSSI et al., 2002; SMA, 2022).

A rede de drenagem do Ribeira de Iguape é tipicamente encaixada, com rios de forte energia, canais estreitos e resposta rápida a eventos de chuva intensa, ainda que modulada pela alta infiltração em áreas florestadas (CBH-RB, 2017; FERREIRA et al., 2022). Do ponto de vista hidrogeológico, esse recorte inclui setores com sistemas aquíferos cársticos no Alto Ribeira e aquíferos fraturados associados ao embasamento cristalino, importantes para recarga e descarga subterrânea em nascentes e trechos de base do rio (PESSOA, 1996; CPRM, 2005).

4.1.4 Comparativo entre bacias

Em síntese comparativa, as três bacias selecionadas representam situações hidrológicas e territoriais claramente distintas dentro do Estado de São Paulo. A CABra 319, em área de vale serrano sob forte urbanização e industrialização, com grandes reservatórios e aquíferos cristalinos e sedimentares, tende a apresentar elevada demanda urbano-industrial, forte dependência de infraestrutura de regulação e memória hidrológica vinculada tanto a escoamentos de base quanto à operação de reservatórios.

A CABra 461, em planaltos agroindustriais, com solos profundos e altamente cultivados, combina elevada demanda agrícola e industrial com regime de vazões relativamente mais regular e forte participação do escoamento de base associado a aquíferos sedimentares.

A CABra 731, por sua vez, constitui uma bacia de Mata Atlântica úmida, com baixa pressão antrópica, cobertura florestal extensa, solos mais rasos e relevo acidentado, regime pluviométrico elevado e rede de drenagem energeticamente intensa, em que a regulação hidrológica depende predominantemente de processos naturais de infiltração, armazenamento no solo e recarga aquífera.

Essas diferenças estruturais entre uso e ocupação predominante (urbano-industrial, agroindustrial e florestal), tipos de solos, sistemas aquíferos, principais rios e reservatórios implicam modos distintos de geração de escoamento, de sensibilidade a extremos e de relação entre disponibilidade e demanda. Ao comparar conjuntamente essas três bacias, o estudo não apenas representa contextos hidrológicos relevantes do Estado de São Paulo, como também permite avaliar como sinais climáticos semelhantes podem produzir respostas contrastantes em termos de balanço hídrico, vazões médias e extremas e segurança hídrica setorial, fornecendo uma visão mais abrangente da vulnerabilidade e da resiliência dos sistemas hídricos paulistas em cenários de mudanças climáticas.

4.2 Base de dados

4.2.1 CLIMBra

O CLIMBra é um conjunto de dados climáticos desenvolvido especificamente para o território brasileiro a partir de projeções CMIP6, disponibilizando séries diárias, tanto brutas quanto corrigidas por viés, de seis variáveis meteorológicas (temperatura máxima, temperatura mínima, precipitação, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar) em duas escalas

de uso: grades regulares de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ e bacias hidrográficas compatíveis com o CABra (Catchments Attributes for Brazil) (Almagro et al. 2021), com cobertura histórica de 1980–2013 e futura de 2015–2100 sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (Ballarin et al., 2023). Para a correção de viés dos produtos brutos gerados pelos modelos climáticos, aplicou-se o método de mapeamento delta quantil (Cannon et al. 2015), buscando tornar as simulações mais representativas do clima local. Isto é, simulações climáticas com propriedades estatísticas mais próximas das observadas no país.

Além do conjunto de dados em malha, a base de dados do CLIMBra fornece projeções em escala pontual para 735 bacias hidrográficas incluídas no conjunto de dados CABra. A análise em escala de bacias hidrográficas permite trabalhar com variáveis climáticas sem que exija um alto esforço computacional. Isso permite que mais estudos acerca das mudanças climáticas sejam realizados, tanto para áreas científicas quanto técnicas. Por isso, o presente estudo também trabalhará com dados em escala de bacias hidrográficas. (Ballarin et al., 2023).

4.2.2 SSP-CABra

O SSP-CABra é um conjunto de simulações de vazão desenvolvido para 735 bacias brasileiras do CABra, com séries que vão de climatologias de longo prazo a dados diários, cobrindo o período histórico de 1980–2013 e o futuro de 2015–2100 sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. As simulações foram geradas para cinco modelos hidrológicos de diferentes níveis de complexidade – variando de funções matemáticas simples até modelos hidrológicos conceituais e com base em técnicas de aprendizado de máquina – e dez projeções climáticas CMIP6 previamente corrigidas por viés, o que viabiliza análises robustas de impactos e adaptação em recursos hídricos (Almagro; Oliveira; Ballarin, 2025).

No presente estudo, são utilizadas somente as simulações de vazão geradas pelo modelo de aprendizado de máquina, especificamente as simulações geradas pelas redes neurais LSTM (Long Short Term Memory), por terem apresentado melhores resultados na representação das dinâmicas hidrológicas no país. Mais detalhes sobre o processo de calibração e sobre o desempenho dos diferentes modelos hidrológicos podem ser encontrados em Almagro et al. (2025). Para garantir coerência entre clima e hidrologia, as forçantes do SSP-CABra são derivadas do CLIMBra; essa integração assegura que as diferenças entre cenários e a variabilidade entre modelos climáticos sejam refletidas de modo consistente nas projeções de vazão utilizadas nas análises subsequentes (Ballarin et al., 2023)

4.2.3 ANA

Para compor a componente de demanda do indicador de segurança hídrica adotado neste estudo, emprega-se a base padronizada da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico como fonte oficial de retiradas consuntivas, como o quociente entre a disponibilidade hídrica e a demanda total (Liu et al., 2017; Van Vliet et al., 2021).

A demanda total é extraída do banco de dados da ANA e organizada em sete macro categorias setoriais delineadas no Manual de Usos Consuntivos: abastecimento humano (urbano e rural), indústria, mineração, água de resfriamento para termelétricas, pecuária e irrigação. Para abastecimento, a informação é desagregada em áreas urbanas e rurais a partir de contagens e estimativas populacionais; no caso industrial, a quantificação deriva do número de empregados por classe industrial em cada município; para mineração, utiliza-se a produção mineral discriminada por tipo ou grupo de substâncias; no resfriamento termoelétrico, as estimativas baseiam-se na geração elétrica efetiva; na pecuária, as séries decorrem dos censos agropecuários; e, para irrigação, combinam-se mapeamentos por sensoriamento remoto com estatísticas dos censos agrícolas nacionais, conforme diretrizes e metadados do Manual (ANA, 2019).

No processamento espacial, as retiradas são inicialmente agregadas em microbacias de referência e, em seguida, reagrupadas para o conjunto de bacias de análise segundo a localização geográfica, procedimento que viabiliza a compatibilização com o recorte hidrográfico utilizado nas projeções de vazão. A evolução temporal para cenários é construída a partir da base de 2020, com projeções intermediárias até 2040 e extrapolação para o futuro distante por ajuste linear, o que permite cotejar, no mesmo horizonte, as mudanças de demanda e as disponibilidades simuladas sob SSP2-4.5 e SSP5-8.5 (Ballarin et al., 2023; ANA, 2019).

4.3 Análise de dados

Utilizando as bases supracitadas, foram avaliadas as condições recentes e as mudanças projetadas nas vazões e demandas hídrica das três bacias por meio de uma integração entre observações hidrológicas, forçantes climáticas e vazões simuladas. Especificamente, as séries observadas de vazão e demanda da ANA foram utilizadas como base observacional para caracterização do período histórico e para verificação básica de consistência e desempenho dos modelos hidrológicos. Isto é, o processo de calibração utilizou essas observações como base para ajuste a fim de gerar um modelo capaz de reproduzir a relação entre clima e hidrologia

observada. As projeções climáticas corrigidas do CLIMBra forneceram entradas meteorológicas comparáveis entre cenários para os modelos calibrados previamente, resultando nas trajetórias hidrológicas forçadas pelos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 disponibilizadas na base SSP-CABra, garantindo coerência espacial no recorte por bacia e temporal entre janelas históricas e futuras (ANA, 2019; Ballarin et al., 2023; Almagro; Oliveira; Ballarin, 2025).

A análise de dados foi organizada em dois eixos complementares. No primeiro, examinou-se o regime e a sazonalidade de vazões por meio de estatísticas anuais e sazonais, com atenção para deslocamentos intra-anuais que possam alterar a oferta ao longo do ano, mesmo quando a soma anual varie pouco; essa leitura é central para a operação de sistemas e para o balanço entre oferta e demanda nas bacias estudadas (Almagro; Oliveira; Ballarin, 2025).

No segundo, investigou-se os extremos hidrológicos associados a cheias e estiagens, utilizando métricas usuais de pico e de baixa vazão em séries diárias, a fim de verificar se há sinais consistentes de intensificação de eventos críticos sob os cenários futuros, aspecto diretamente relacionado ao risco e à resiliência operacional (Almagro; Oliveira; Ballarin, 2025). Seguindo a estrutura proposta por Chagas et al. (2022), séries anuais da vazão mínima de 7 dias e da vazão máxima diária foram utilizadas para representar as vazões de seca e cheia. Essa análise é fundamental para melhor compreensão dos potenciais alterações dos regimes hidrológicos.

Como medida, foi adotada uma comparação simples entre potenciais alterações na demanda e na disponibilidade hídrica (aqui, definida como mudanças na vazão anual). Sendo assim, mudanças nas condições de segurança hídrica foram inferidas a partir da discussão entre mudanças projetadas nas vazões em escala de bacia com as projeções de demanda futura, pautada em informações obtidas pela base de dados da ANA.

As incertezas associadas às projeções foram computadas levando em consideração o caráter multimodelo e multicenário do arranjo adotado. Sendo assim, os resultados foram apresentados levando em conta estatísticas do conjunto, evitando dependência de um único membro e refletindo variabilidade interna, diferenças estruturais entre modelos e sensibilidade às forçantes. As limitações declaradas pelas próprias bases — vieses residuais e eventuais suavizações decorrentes da correção e da média espacial no CLIMBra, além de variação de desempenho dos modelos no SSP-CABra — foram incorporadas à discussão, de modo que as conclusões permaneçam alinhadas às boas práticas adotadas em estudos climáticos (Ballarin et al., 2023; Almagro; Oliveira; Ballarin, 2025; Tebaldi; Knutti, 2007).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

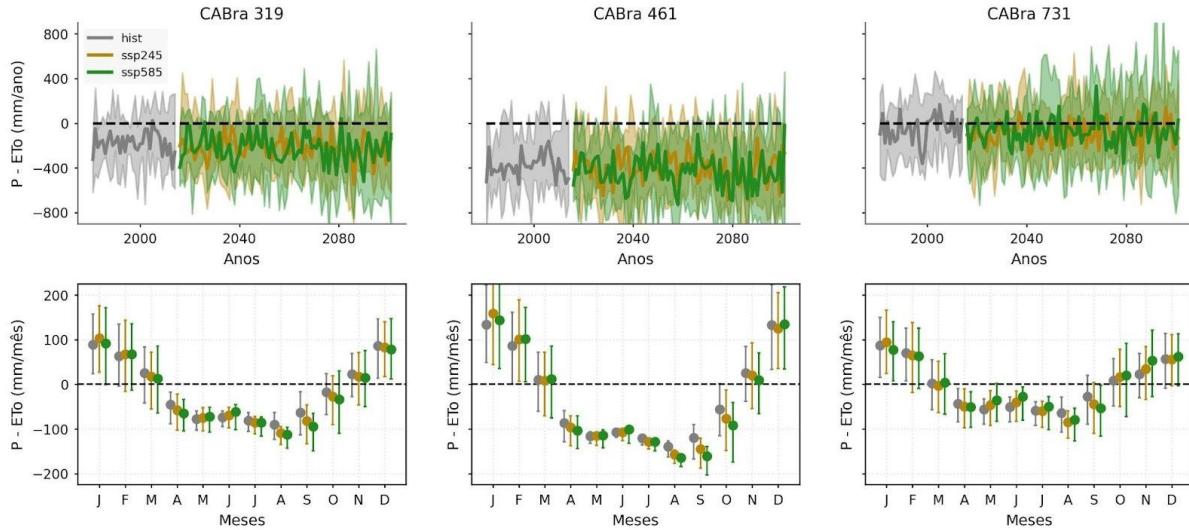
5.1 Balanço hídrico

Para orientar a discussão do presente trabalho se faz necessário, inicialmente, comparar as mudanças nas condições climáticas projetadas para cada uma das bacias. Para este fim, optou-se por caracterizar o balanço hídrico climatológico através da diferença entre a entrada de precipitação (P) e o potencial de evapotranspiração (Eto). Esse índice representa o saldo entre a entrada e a demanda atmosférica de água em uma determinada região, sintetizando, portanto, a relação entre disponibilidade e demanda hídrica sob uma perspectiva do clima.

O balanço hídrico climático representado por P – ETo na Figura 3 indica que a bacia CABra 731, situada mais ao sul do estado, englobando, inclusive, parte da região sul do país, apresenta condições relativamente mais favorável de disponibilidade de água ao longo dos anos do que as bacias CABra 319 e 461. Isso porque a diferença entre precipitação e evapotranspiração de referência se mantém mais próxima de zero na CABra 731, enquanto as projeções médias das outras bacias em questão se mantêm negativas em praticamente toda simulação.

Apesar desse contraste de magnitude, pode-se notar que o ciclo sazonal é semelhante nas três áreas, com déficits mais evidentes de maio a outubro, período que coincide com a estação seca da região Sudeste. Observa-se, desde meados do século XX, aumentos de precipitação no Sul e ausência de mudança perceptível nos totais anuais no Sudeste; a sazonalidade permanece marcada por verão-primavera mais úmidos, e inverno relativamente seco, quando a convecção se retrai para latitudes mais baixas (Marengo, 2008; Reboita et al., 2010; Vera et al., 2006). Destaca-se que essa diferença no balanço hídrico climatológico entre as bacias avaliadas já vem sendo observada historicamente e reflete, portanto, condições climáticas inherentemente diferentes entre as bacias selecionadas.

Figura 3 – Balanço hídrico climatológico ($P - ETo$) das bacias hidrográficas CABra 319, CABra 461 e CABra 731. (Painel superior: Evolução do acumulado anual do índice $P - ETo$ para as bacias avaliadas, no período histórico e futuro. Painel inferior: acumulado mensal da métrica $P - ETo$ para as três bacias avaliadas, comparando os períodos histórico e futuro.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Analisando a evolução temporal, o conjunto de projeções forçadas pelos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 não sugere mudanças drásticas no índice $P - ETo$ até o fim do século. Observa-se leve tendência de redução do balanço hídrico climatológico nas bacias 319 e 461 e, em sentido oposto, uma discreta elevação na 731, sempre dentro de faixas de incerteza que refletem a variabilidade entre modelos climáticos. Esse padrão é coerente com resultados nacionais que apontam maior propensão a ganhos relativos de disponibilidade hídrica em porções mais ao sul do território nacional, ainda que a magnitude e o sinal local dependam do recorte espacial e do método hidrológico empregado (Ballarin et al., 2023).

A variação mensal sugere que não são projetadas grandes mudanças na sazonalidade do índice $P - ETo$, confirmando, além disso, mudanças muitas vezes não substanciais nas condições climatológicas. Isto é, embora sejam esperadas alterações mensais, essas mudanças não são suficientes para alterar a característica de cada mês em relação a déficits (< 0) ou superávits (> 0). No entanto, pode-se notar que as alterações implicam, no geral, que meses secos tendem a ficar mais secos e os chuvosos, mais chuvosos. Em suma, para as três bacias avaliadas, mudanças são esperadas, mas não significativas a ponto de alterar sazonalidade ou condição anual da disponibilidade hídrica loca.

Outro ponto importante é que as incertezas associadas às projeções climáticas aumentam no fim do século, o que se expressa pelo aumento da faixa sombreada que representa a

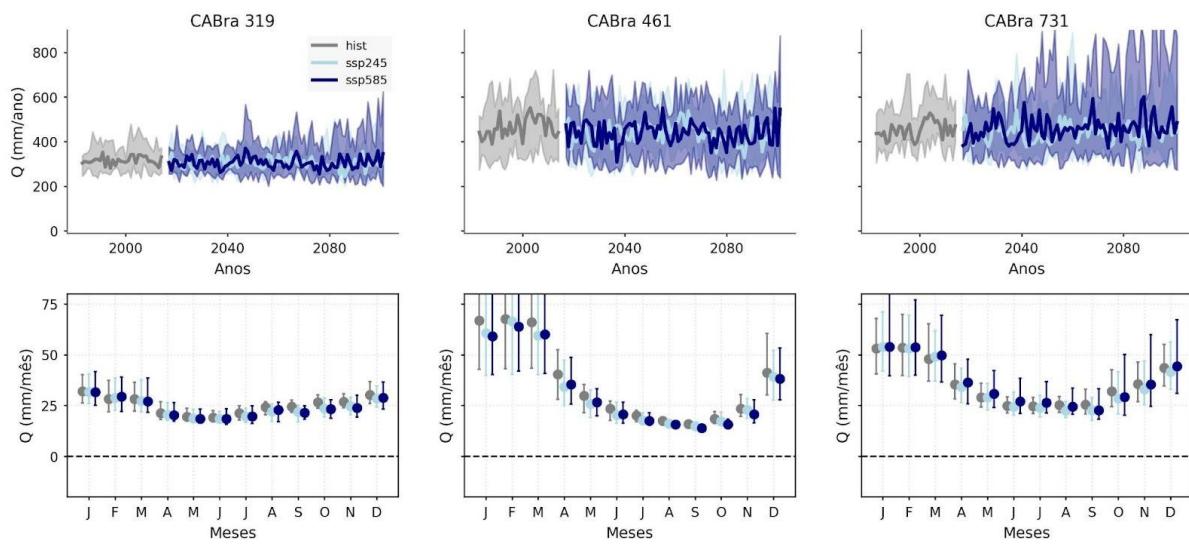
variabilidade dos cenários. Em termos práticos, isso significa que a amplitude dos resultados sob SSP5-8.5 tende a crescer com o avanço temporal, não por instabilidade do método, mas pela divergência inerente às hipóteses dos cenários do CMIP6 (IPCC, 2021; Tebaldi; Knutti, 2007).

5.2 Vazões Totais

A análise anterior nos possibilita avaliar – sob uma perspectiva climatológica – as potenciais alterações na disponibilidade hídrica das bacias avaliadas. Entretanto, para uma discussão mais profunda acerca dos potenciais impactos das mudanças climáticas na região, se faz necessário avaliar a resposta hidrológica das bacias frente a esses potenciais alterações. Isto é, mudanças nas condições de entrada (P) e saída (Eto) de água nas bacias precisam ser traduzidas em termos hidrológicos (Q), através da utilização de modelos hidrológicos, como é o caso do modelo LSTM, presente na base de dados SSP-CABra, e utilizado no presente estudo.

Analisando a vazão total anual Q (Figura 4) ao longo do século, observa-se uma tendência da vazão se manter constante, sem grandes variações. Especificamente, as bacias 319 e 461 apresentam leve declínio em relação à disponibilidade hídrica anual. Em contrapartida, a bacia 731 apresenta uma tendência discretamente positiva de vazão, em coerência com o sinal climático positivo discutido anteriormente. Esses resultados se alinham com as dinâmicas do balanço hídrico climatológico apresentada na (Figura 3). Além disso, pode-se observar novamente o aumento na faixa de incertezas para cenários futuros, principalmente para a bacia CABra 731, exposta na área hachurada em azul escuro do gráfico.

Figura 4 - Vazões totais das bacias hidrográficas CABra 319, CABra 461 e CABra 731. (Painéis superiores: Dados de vazão total anual para cada ano até o final do século. Painéis inferiores: vazão acumulada mensal, para cada mês, considerando os cenários histórico e futuro).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Quando analisadas os potenciais mudanças na vazão acumulada mensal entre período histórico e futuro distante, nota-se que a sazonalidade se mantém praticamente inalterada, alinhando-se com os resultados observados sob uma perspectiva do balanço climático P – Eto. Isto é, em geral, são esperados escoamentos mais altos no verão e início do outono e menores no inverno e primavera, com pequenas modulações em magnitude. Nas CABra 319 e 461, as diferenças entre histórico e futuro são discretas e não são suficientes para reclassificarem meses de déficit ou superávit, preservando a estrutura do ciclo anual. Na CABra 731, observa-se uma faixa de incerteza mais ampla e indícios aumento das vazões de verão, enquanto parte dos meses de primavera pode apresentar valores próximos aos meses secos, sem, contudo, inverter o sinal sazonal; essa combinação aponta para ajustes na amplitude intra-anual mais do que para uma mudança de fase, coerente com a hipótese de que as respostas de Q tendem a ser moderadas quando as alterações em P – Eto são pequenas e espacialmente heterogêneas (Almagro; Oliveira; Ballarin, 2025)

Embora as três bacias apresentam sazonalidade climática bem definida, a variação mensal de vazão é significativamente diferente, sugerindo diferenças na memória hidrológica e estrutura interna das bacias. Isto é, as entradas e saídas climatológicas apresentam um controle diferente nos processos hidrológicos das bacias avaliadas. Por exemplo, apesar de sazonalidade climática bem definida, a bacia CABra 319 apresenta vazões praticamente constantes ao longo do ano, em comparação com as demais bacias, sugerindo maior influência dos escoamentos de base, ou até capacidade de armazenamento e tempo de respostas superiores. Nesse sentido, vale

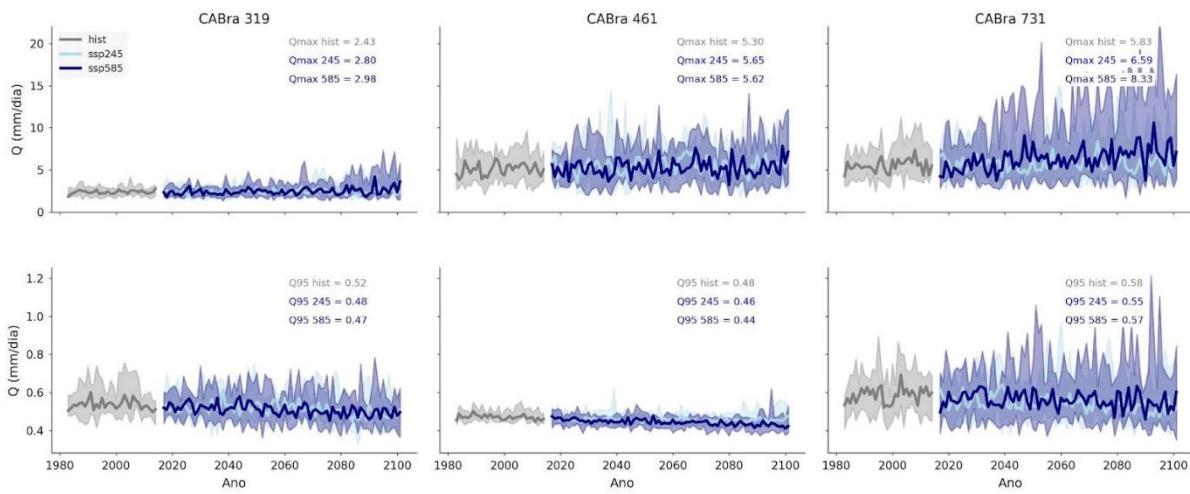
destacar a importância dos estudos focados nas variáveis hidrológicas, visto que mudanças climáticas podem afetar de maneira diferente as bacias hidrográficas, a depender de sua resiliência e resposta a sinais climáticos.

5.3 Vazões Máximas e Mínimas

Outra possibilidade de visualização e interpretação de cenários e mudanças esperadas dá-se por meio das análises de dados relativos a vazão máxima diária anual (Q_{max}) e vazão mínima de 7 dias (Q_7) na Figura 5. Os valores confrontantes são: a vazão máxima média histórica ($Q_{max\ hist}$) para o período passado (1980-2013) e para o final do século (2070-2100), nos cenários SSP2-4.5 SSP5-8.5 (Q_{max} 245 e Q_{max} 585) e a vazão mínima esperada em 95% do tempo na bacia (Q_{95}), também avaliada para os períodos passados e futuro distante.

Essa análise e comparação é fundamental para melhor compreender como as mudanças climáticas podem afetar as dinâmicas hidrológicas. Isso porque, conforme discutido acima, alterações climáticas podem não apresentar mudanças significativas na disponibilidade hídrica em termos de vazões acumuladas anuais e mensais, mas ainda assim influenciarem significativamente a ocorrência de eventos extremos, como vazões de cheia e seca. Isto é, além de potenciais alterações em médias e acumulados, deve-se avaliar mudanças em extremos. Como mostrado por Ballarin et al. (2024), por exemplo, apesar de não apresentarem mudanças significativas na disponibilidade hídrica, muitas bacias deverão experenciar um aumento no número de secas, por conta de alterações nessas ocorrências de eventos extremos e variações intra-anuais.

Figura 5 - Vazões máximas e mínimas das bacias hidrográficas CABra 319, CABra 461 e CABra 731. (Painéis Superiores: evolução temporal de vazão máxima diária anual. Painéis inferiores: Vazão mínima de 7 dias).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Observando a vazão máxima diária anual - isto é, o dia de maior vazão da bacia no seu ano referência - nas bacias CABra 319 e 461 nota-se um pequeno aumento no seu valor ao longo do século, variação essa percebida quando comparada aos valores de Qmax entre os períodos histórico e futuro distante para os dois cenários avaliados (médias dos valores vazão máxima diária anual para cada faixa de estudo). Especificamente, para a bacia 319, projeta-se um aumento de Qmax, saindo de 2,43 mm/dia para 2,98 mm/dia (SSP5-8.5), enquanto que, para a bacia 461, Qmax sairá de 5,30 mm/dia para 5,65 mm/dia (em SSP 245). Por fim, para a bacia CABra 731, os valores de Qmax apresentam alterações consideráveis - enquanto o período de 1980 até 2013 apresenta uma média de vazão máxima diária de 5,83 mm/dia os cenários de final de século SSP2-4.5 apresenta uma Qmax de 6,59 mm/dia e o SSP5-8.5 apresenta 8,33 mm/dia.

Olhando para as mudanças esperadas em vazões de seca, optou-se por utilizar a vazão mínima de 7 dias em cada ano (Q7min). Para obtê-la, é passada uma janela móvel de 7 dias nos dados, e calcula-se a média desses valores. Isto é, para o obter o valor do dia 1º faz-se a média de vazões dos dias 1 ao dia 7 do mês, e assim respectivamente para todos os dias do ano. Posteriormente verifica-se o menor valor de cada ano e encontra-se Q7min.

Os resultados sugerem uma tendência, nas três bacias avaliadas, de redução do valor Q7min até o fim do século, ilustrada pela tendência negativa observada nas projeções realizadas por ambos cenários futuros. Essa alteração se reflete em valores mais baixos da vazão Q95 (vazão superada em 95% do tempo), utilizada como referência para outorgas em diversos

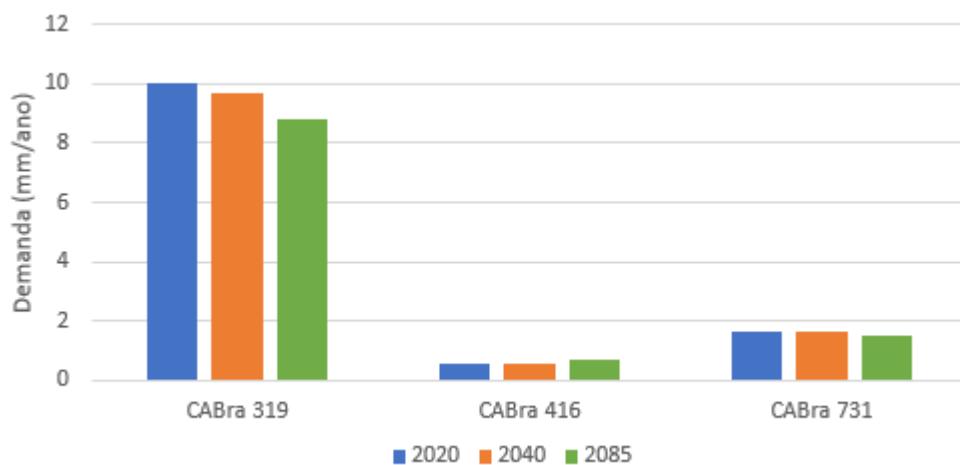
estados do país. Com exceção da bacia 731, que apresentou mudanças não significativas no valor de Q95 no fim do século, mudanças de até 10% da vazão de referência são esperadas. Essas alterações corroboram com estudos recentes que sugerem que a porção mais ao sul do país - onde a bacia 731 está localizada - exibirá, em geral, maior disponibilidade hídrica (Ballarin et al. 2023; Mattos et al., 2025).

5.4 Demandas Hídricas para as bacias de estudo

5.4.1 Demanda Total

Pela leitura do gráfico de demanda hídrica por bacia (Figura 6), a trajetória temporal é distinta entre os três recortes. Na CABra 319 há redução progressiva da demanda entre 2020, 2040 e 2085, sugerindo queda do consumo hídrico e, portanto, alívio relativo da pressão média sobre o sistema caso a oferta se mantenha estável. Na CABra 461 observa-se aumento singelo de 2020 para 2040, com manutenção de patamar semelhante em 2085, configurando um baixo crescimento. Na CABra 731 o consumo específico permanece essencialmente estável no período, com pequenas variações negativas de consumo.

Figura 6 – Demanda hídrica total por bacia nos anos de 2020, 2040 e 2085.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

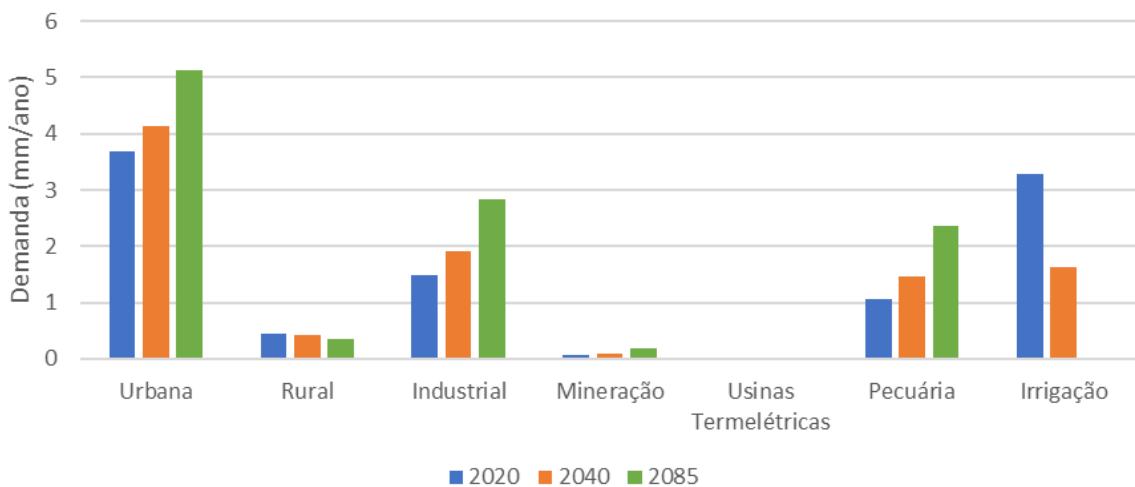
Como as séries estão normalizadas (mm/ano), a comparação entre bacias é direta: a 319 segue como a mais demandante em termos específicos, a 461 mantém níveis baixos, e a 731 situa-se em posição intermediária e praticamente constante. Em conjunto com os resultados climáticos e hidrológicos já discutidos, que não apontaram mudanças drásticas na oferta, essa

nova tendência indica que a razão disponibilidade/demanda tende a melhorar na CABra 319, e permanecer próxima do estado atual na CABra 731 e 461.

5.4.2 CABra 319

Para a Bacia 319, a Figura 7 indica uma reconfiguração do perfil de demanda hídrica entre 2020, 2040 e 2085. Em termos relativos, o abastecimento urbano se consolida como o principal uso ao longo de todo o período e cresce de forma contínua, compatível com projeções populacionais e com a metodologia da ANA que deriva esse componente de contagens e estimativas de população. Em sentido oposto, o abastecimento rural diminui levemente, compatível com a urbanização persistente e com a migração do consumo para a rede pública urbana de abastecimento.

Figura 7 – Demanda hídrica por tipologia de consumo para a bacia CABra 319 nos anos de 2020, 2040 e 2085.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Nos demais usos, a irrigação cai de modo acentuado entre 2020 e 2040, o que, se confirmado, aponta para mudança estrutural no uso do solo; a pecuária, por sua vez, mostra um aumento de consumo em todo o horizonte; a mineração apresenta crescimento ínfimo enquanto a água para resfriamento de termelétricas permanece zerado. Vale ressaltar que as demandas de 2085 foram obtidas por interpolação linear simples das demandas projetadas pela ana em 2020 e 2040. Essa simplificação, portanto, pode não representar a realidade, visto que dificilmente serão esperadas demandas nulas associadas à irrigação na região.

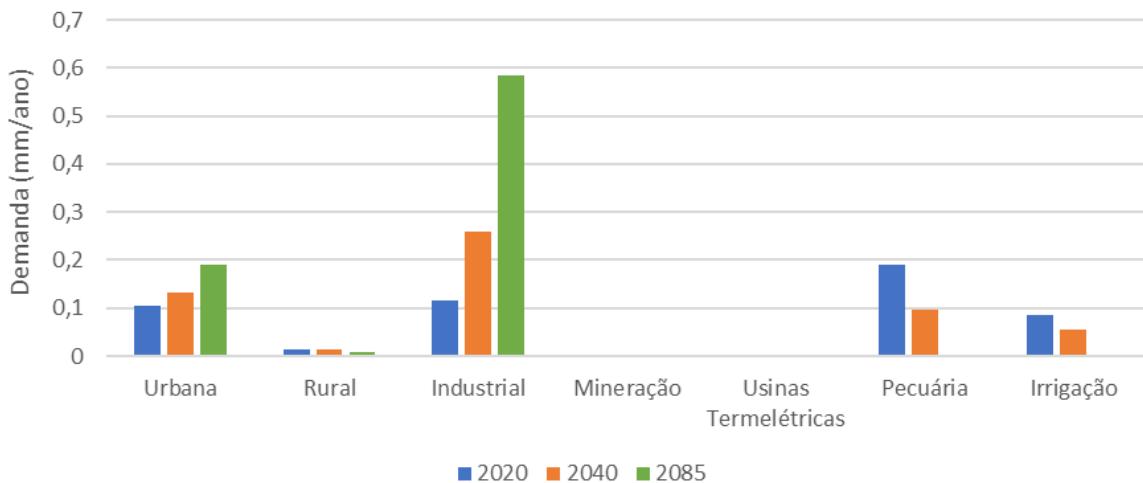
Do ponto de vista da segurança hídrica, esses sinais importam porque deslocam as demandas em direção a usos menos sazonais (urbano e industrial) e potencialmente mais rígidos, ao mesmo tempo em que reduzem um grande consumidor historicamente sensível ao clima (irrigação). Como o balanço climático P – ETo não aponta mudanças drásticas e as vazões simuladas mantêm padrão semelhante ao histórico, a trajetória da razão disponibilidade/demanda na Bacia 319 tenderá a depender mais das escolhas setoriais e do crescimento urbano-industrial do que de alterações fortes na oferta, reforçando a necessidade de gestão da demanda e de eficiência hídrica.

5.4.3 CABra 461

Na CABra 461, o perfil de consumo também projeta uma transição gradual para uma demanda mais “urbano-industrial”, assim como a CABra 319, com mudanças relevantes na composição e menor peso dos usos agropecuários. O abastecimento urbano cresce de forma contínua entre 2020, 2040 e 2085, mantendo-se como componente estrutural da demanda específica; paralelamente, a indústria salta de um patamar intermediário para a maior demanda de forma isolada no fim do século, tornando-se o principal vetor de crescimento da bacia.

Em sentido inverso, o abastecimento rural permanece baixo e declinante, a pecuária perde participação ao longo do período até virtualmente desaparecer em 2085 (por conta principalmente da hipótese da evolução linear das demandas temporais). A irrigação recua de modo persistente, sinalizando menor dependência de um uso historicamente volumoso e sazonal; mineração e água de resfriamento para termelétricas seguem inexpressivas em todo o horizonte.

Figura 8 - Demanda hídrica por tipologia de consumo para a bacia CABra 461 nos anos de 2020, 2040 e 2085.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Essa recomposição é coerente com a metodologia da ANA, que deriva o urbano de população, o industrial de emprego formal por classe e os agropecuários de censos e mapeamentos específicos, agregando por microbacias antes do reagrupamento por bacia, motivo pelo qual mudanças socioeconômicas regionais repercutem diretamente na projeção das demandas setoriais (ANA, 2019).

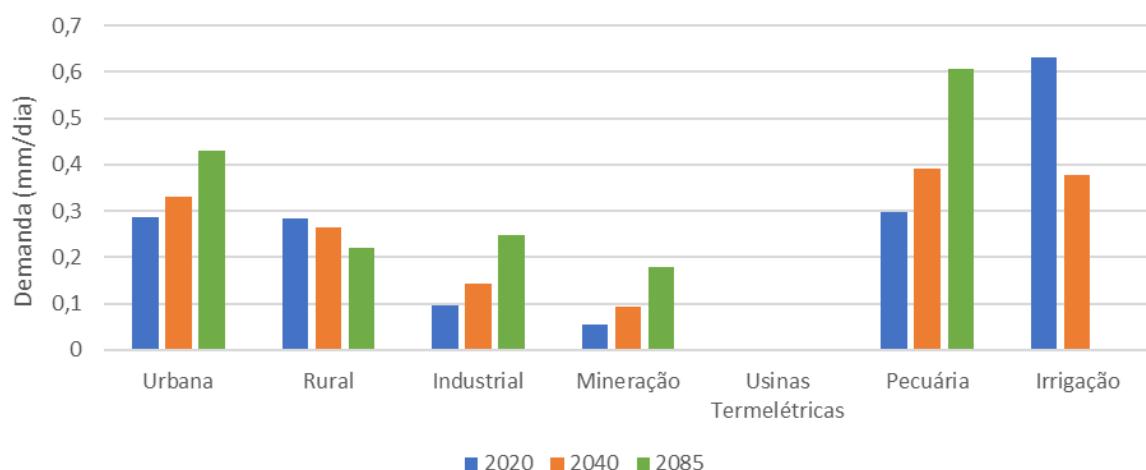
Do ponto de vista da segurança hídrica, a substituição de irrigação e pecuária por um uso urbano e indústria tende a reduzir a sazonalidade da demanda e, ao mesmo tempo, elevar a “carga de base” menos flexível, o que aumenta a necessidade de ganhos de eficiência e controle de perdas para preservar margens operacionais em estiagens. Como os resultados climáticos e hidrológicos discutidos anteriormente não indicaram mudanças drásticas no agregado anual, a trajetória da razão disponibilidade/demandada CABra 461 deverá ser determinada sobretudo pelo crescimento industrial e pelo avanço demográfico na bacia.

5.4.4 CABra 731

Na CABra 731, o perfil de consumo projeta um reequilíbrio consistente do uso da água ao longo do período. O abastecimento urbano cresce de forma contínua de 2020 a 2085, enquanto o abastecimento rural recua gradualmente, coerente com a urbanização regional. A indústria avança de um patamar baixo para valores mais expressivos em 2085 e a mineração também se eleva, embora permaneça secundária; por outro lado, a irrigação sofre queda

acentuada já em 2040 e mantém-se em patamar significativamente inferior no horizonte final, e a água destinada ao resfriamento de termelétricas segue inexistente em todas as janelas.

Figura 9 - Demanda hídrica por tipologia de consumo para a bacia CABra 731 nos anos de 2020, 2040 e 2085.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A pecuária ganha peso de maneira progressiva até 2085, mas sem “compensar” integralmente a retração da irrigação, de modo que a composição da demanda se torna menos dominada por um uso tipicamente sazonal e sensível ao clima (irrigação) e mais distribuída entre usos urbano-industriais e agropecuários de menor variabilidade intra-anual.

Essa recomposição dialoga com as análises hidroclimáticas apresentados para a bacia, onde se observou um balanço P – ETo ligeiramente mais favorável e vazões anuais próximas ao histórico, com indícios de leve reforço no verão e sem mudanças drásticas de sazonalidade, ainda que com incertezas mais amplas nas décadas finais sob o cenário SSP5-8.5.

Nesse contexto, a forte redução da irrigação atua como contrapeso aos incrementos de urbano, indústria e pecuária, mantendo a demanda total específica em níveis estáveis no total agregado e, potencialmente, melhorando a razão disponibilidade/demanda nos meses secos.

Em termos de segurança hídrica, o resultado prático é um sistema menos pressionado por picos sazonais de consumo e mais dependente de uma “carga de base” ligada ao crescimento demográfico e à atividade industrial, o que recomenda políticas de eficiência no uso urbano e industrial combinadas à conservação de mananciais e à gestão preventiva de extremos, dado o aumento projetado das incertezas em horizontes longos (IPCC, 2021).

6 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou como mudanças climáticas projetadas e alterações de consumo e demanda de água podem alterar a dinâmica hídrica em três bacias paulistas (CABra 319, 461 e 731), integrando as bases de dados CLIMBra, SSP-CABra e da ANA. Pelas análises climáticas, o índice P–ETo mantém a sazonalidade típica nas três bacias, com déficits mais evidentes de maio a outubro. As projeções não indicam alterações drásticas até 2100, mas pode-se observar uma leve redução nos balanços médios das bacias CABra 319 e 461 e discreto aumento na CABra 731, com incertezas crescendo no fim do século — sobretudo sob o cenário SSP5-8.5 — em linha com a literatura sobre ensembles e cenários das simulações (IPCC, 2021; Tebaldi; Knutti, 2007).

Essas variações modestas de P–ETo se refletem nas vazões totais anuais simuladas, que permanecem próximas as vazões históricas, com ajustes de amplitude intra-anual mais do que alterações em suas características de déficits e superavits. As mudanças não significativas observadas no balanço hídrico climatológico e nas vazões acumuladas menais e anuais não persistem na perspectiva de eventos extremos. Em geral, há sinais de elevação de picos (Qmáx) mais nítidos na CABra 731, e uma tendência de redução da vazão de seca, sugerindo uma maior variabilidade dos eventos hidrológicos extremos, em contraste com a estabilidade projetada para acumulados mensais e anuais (Almagro; Oliveira; Ballarin, 2025).

As demandas de atividades específicas por bacias, reordenam o perfil de pressão hídrica e são determinantes para o entendimento do futuro uso e ocupação do solo. Na bacia CABra 319, a demanda total específica diminui do período de 2020 para 2085, com forte retração da irrigação e crescimento de usos urbano e industrial e da pecuária. A composição desloca o consumo para usos menos sazonais e mais inelásticos, mas a queda do total específico tende a aliviar a razão disponibilidade/demandas, desde que haja ganhos de eficiência e controle de perdas para amortecer estiagens (ANA, 2019). Na CABra 461, o total cresce, principalmente impulsionado pelo setor industrial, enquanto irrigação e pecuária recuam; combinada à pequena redução climática, essa bacia pode apresentar leve piora relativa da razão disponibilidade/demandas, recomendando antecipação de medidas de eficiência e gestão de outorgas e de obras de infraestrutura hídricas (ANA, 2019; Almagro; Oliveira; Ballarin, 2025).

Para a bacia CABra 731, a demanda total permanece essencialmente estável, com forte queda da irrigação e acréscimos em usos urbanos, industriais e de pecuária; somada ao sinal climático ligeiramente positivo e a vazões anuais próximas ao histórico, a razão

disponibilidade/demanda tende a melhorar modestamente, ainda que a maior dispersão entre modelos no fim do século exija atenção a extremos (IPCC, 2021; Ballarin et al., 2023).

A avaliação integrada de clima, hidrologia e demanda indica que as três bacias estudadas respondem de maneira diferenciada às projeções de mudanças climáticas, com impactos na segurança hídrica condicionados não apenas por sinais climáticos de pequena magnitude, mas, sobretudo, pela recomposição setorial de consumo/demanda. Pensando na gestão individualizada de cada bacia, algumas medidas podem ser consideradas para contribuir com o aprimoramento das práticas de gestão e planejamento dos recursos hídricos; para as bacias CABra 319 e 461, pode ser considerado um foco em gestão da demanda urbana e industrial (eficiência de distribuição, redução de perdas, reuso, tarifação sinalizadora), além de manutenção de infraestrutura verde, protocolos de estiagem e fortalecer instrumentos de alocação (outorga, fiscalização). Para a CABra 731, a prioridade é conservar a folga relativa da demanda/disponibilidade e reduzir riscos de extremos: proteção de mananciais, conservação da vegetação e preparação para picos de cheia e janelas de baixa vazão (ANA, 2019; IPCC, 2021).

No contexto das simulações, algumas limitações importantes devem ser explicitadas: (i) incertezas estruturais dos GCMs e do método de correção de viés (QDM) no CLIMBra; (ii) dependência do modelo hidrológico (LSTM) no SSP-CABra e sua habilidade variável por região; (iii) construção das demandas da ANA a partir de fontes setoriais e projeções agregadas, com extração linear para o futuro distante (ANA, 2019; BALLARIN et al., 2023; ALMAGRO; OLIVEIRA; BALLARIN, 2025). Esses fatores justificam interpretar resultados por estatísticas de conjunto, evitar decisões ancoradas em um único membro e adotar rotas de adaptação flexíveis.

Como agenda de continuidade, sugerem-se: testar famílias de modelos hidrológicos e esquemas alternativos de correção de viés; incorporar operação de reservatórios e vazões ecológicas; representar incertezas socioeconômicas na demanda (cenários alternativos além da extração linear); e aprofundar a leitura de extremos ($Q_{\text{máx}}/Q_7$) com distribuições adequadas de cauda e métricas de risco (IPCC, 2021; Tebaldi; Knutti, 2007).

Em síntese, os achados atendem aos objetivos propostos: caracterizam oferta climática e hidrológica ($P-ETo$, Q), examinam respostas sazonais e extremas e consolidam trajetórias setoriais de demanda para 2020, 2040 e 2085. No conjunto, indicam que, nas áreas estudadas, a segurança hídrica ao longo do século será menos condicionada por mudanças médias marcantes na oferta e mais pela recomposição das demandas e pela gestão frente a extremos e incertezas — reforçando o papel de políticas de eficiência, conservação e governança adaptativa (ANA, 2019; Ballarin et al., 2023; Almagro; Oliveira; Ballarin, 2025; IPCC, 2021).

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2019: Informe Anual. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_informe_anual_2019-versao_web-0212-1.pdf. Acesso em: 14 set. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Manual of consumptive water use in Brazil. Brasília: ANA, 2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Metodologia do Índice de Segurança Hídrica – ISH. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/288f63a3-b461-4ffb-949e-71c1f760f332/attachments/Metodologia_ISH.pdf. Acesso em: 22 set. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Plano Nacional de Segurança Hídrica – PNSH. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/plano-nacional-de-seguranca-hidrica>. Acesso em: 22 set. 2025.

ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; BALLARIN, A. S. SSP-CABra—Streamflow Scenarios Projections for Brazilian Catchments. *Geoscience Data Journal*, v. 12, e70029, 2025. DOI: 10.1002/gdj3.70029.

ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; MEIRA NETO, A. A.; ROY, T.; TROCH, P. CABra: a novel large-sample dataset for Brazilian catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 25, p. 3105–3135, 2021. DOI: 10.5194/hess-25-3105-2021.

ALMEIDA, L. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. *Revista FAE*, Curitiba, v. 20, n. 1, p. 15–28, 2017. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/download/113/435/1469>. Acesso em: 8 out. 2025.

ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. Variabilidade, tendência, anomalia e mudança climática. Material didático LCE-306 – Meteorologia Agrícola. Piracicaba: ESALQ/USP, 2010.

BALLARIN, A. S.; SONE, J. S.; GESUALDO, G. C.; SCHWAMBACK, D.; REIS, A.; ALMAGRO, A.; WENDLAND, E. C.; PAPALEXIOU, S. M. CLIMBra – Climate Change Dataset for Brazil. *Scientific Data*, v. 10, 47, 2023. DOI: 10.1038/s41597-023-01943-3.

BALLARIN, A. S.; VARGAS GODOY, M. R.; ZAERPOUR, M.; ABDELMOATY, H. M.; HATAMI, S.; GAVASSO-RITA, Y. L.; WENDLAND, E.; PAPALEXIOU, S. M. Drought intensification in Brazilian catchments: implications for water and land management. *Environmental Research Letters*, v. 19, n. 5, 054030, 2024a. DOI: 10.1088/1748-9326/ad3e18.

BALLARIN, A. S.; WENDLAND, E.; ZAERPOUR, M.; et al. Frequency rather than intensity drives projected changes of rainfall events in Brazil. *Earth's Future*, v. 12, e2023EF004053, 2024b. DOI: 10.1029/2023EF004053.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

CANNON, A. J.; SOBIE, S. R.; MURDOCK, T. Q. Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, v. 28, p. 6938–6959, 2015. DOI: 10.1175/JCLI-D-14-00754.1.

CASANUEVA, A.; HERRERA, S.; ITURBIDE, M.; LANGE, S.; JURY, M.; DOSIO, A.; et al. Testing bias adjustment methods for regional climate change applications under observational uncertainty and resolution mismatch. *Atmospheric Science Letters*, v. 21, e978, 2020. DOI: 10.1002/asl.978.

CHAGAS, V. B. P. et al. Flood risk assessment of extreme events in South America based on CMIP6 projections. *Weather and Climate Extremes*, v. 38, 100511, 2022. DOI: 10.1016/j.wace.2022.100511.

COELHO, R. D.; et al. Landslides of the 2023 summer event of São Sebastião (SE Brazil). *Brazilian Journal of Geology*, v. 54, e20230048, 2024. DOI: 10.1590/2317-4889202420230048.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO MOGI-GUAÇU (CBH-MOGI). Relatório de Situação 2023 — Ano-base 2022. São Paulo: CBH-Mogi, 2023. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/>. Acesso em: 15 out. 2025.

COMITÊ DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DO PARAÍBA DO SUL (CBH-PS). Relatório de Situação 2023 — Ano-base 2022. Taubaté: CBH-PS, 2023. Disponível em: <https://comiteps.sp.gov.br/>. Acesso em: 15 out. 2025.

COMITÊ DE BACIA DO RIBEIRA DE IGUAPE E LITORAL SUL (CBH-RB). Relatório de Situação 2017 — Ano-base 2016. Registro: CBH-RB, 2017.

DAEE/CTH. SIBH — Cadastro de estações fluviométricas: códigos 58183000, 61915000 e 81683000. São Paulo: DAEE/CTH, 2024.

EHRET, U. et al. HESS Opinions: Should we apply bias correction to global and regional climate model data? *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 16, n. 11, p. 3391–3404, 2012. DOI: 10.5194/hess-16-3391-2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed., rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

FERREIRA, B. C. C.; NÓBREGA, R. S.; et al. Análise dos índices de extremos de precipitação na Bacia do Ribeira de Iguape. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 37, n. 3, p. 285-297, 2022. DOI: 10.1590/0102-77863730009.

FOLEY, J. A. et al. Global Consequences of Land Use. *Science*, v. 309, p. 570–574, 2005. DOI: 10.1126/science.1111772.

FUNDAÇÃO SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS (SEADE). SP Demográfico: um século de dinâmica populacional no Estado de São Paulo. São Paulo:

SEADE, 2025. Disponível em: <https://populacao.seade.gov.br/wp-content/uploads/2025/05/SP-demografico-um-seculo-dinamica-populacional-estado-sao-paulo.pdf>. Acesso em: 15 out. 2025.

GESUALDO, G. C., SONE, J. S., GALVÃO, C. D. O., MARTINS, E. S., MONTENEGRO, S. M. G. L., TOMASELLA, J., & MENDIONDO, E. M. Unveiling water security in Brazil: Current challenges and future perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, v. 66, n. 5, p. 759–768, 2021. DOI: 10.1080/02626667.2021.1896803.

GLEICK, P. H. Water in crisis: paths to sustainable water use. *Ecological Applications*, v. 8, n. 3, p. 571–579, 1998. DOI: 10.2307/2641355.

HE, C., LIU, Z., WU, J., PAN, X., FANG, Z., LI, J., & BRYAN, B. A. Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications*, v. 12, 4667, 2021. DOI: 10.1038/s41467-021-25026-3.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). São Paulo | Cidades e Estados. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/sao-paulo.html>. Acesso em: 15 out. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). São Paulo — Panorama estadual: número de municípios e área territorial. Rio de Janeiro: IBGE/Cidades, 2024. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/>. Acesso em: 15 out. 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Inundação histórica no Rio Grande do Sul completa um ano. Brasília, 5 maio 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>. Acesso em: 14 set. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers. Genebra: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/summary-for-policymakers/>. Acesso em: 8 out. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). About the IPCC. Genebra: IPCC, 2024. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 8 out. 2025.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC); TASK FORCE ON NATIONAL GREENHOUSE GAS INVENTORIES (TFI). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Genebra: IPCC/TFI, 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>. Acesso em: 8 out. 2025.

KAISER, I. M. Modelos chuva–vazão. São Paulo: USP, 2006. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-17042006-222747/publico/3-Modelos.pdf>. Acesso em: 8 out. 2025.

MAPBIOMAS. MapBiomass Coleção 9: mapeamento anual de cobertura e uso da terra no Brasil de 1985 a 2023. São Paulo: MapBiomass, 2024.

MARAUN, D. et al. Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, v. 48, n. 3, RG3003, 2010. DOI: 10.1029/2009RG000314.

MARAUN, D.; SHEPHERD, T. G.; WIDMANN, M.; et al. Towards process-informed bias correction of climate change simulations. *Nature Climate Change*, v. 7, n. 11, p. 764–773, 2017a. DOI: 10.1038/nclimate3418.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. *Estudos Avançados*, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 83–96, 2008. Disponível em: <https://revistas.usp.br/eav/article/view/10289>. Acesso em: 14 set. 2025.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. *Geousp – Espaço e Tempo (Online)*, v. 19, n. 3, p. 485-494, 2016. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2015.101108.

MARENGO, J. A.; SOUZA JR., C. M.; et al. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region. *Frontiers in Earth Science*, v. 6, 228, 2018. DOI: 10.3389/feart.2018.00228.

MARINHO FILHO, G. M. Modelos hidrológicos: conceitos e aplicabilidades. *Revista de Ciências Ambientais, Canoas*, v. 6, n. 1, p. 79–96, 2012. Disponível em: <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/download/268/761/0>. Acesso em: 8 out. 2025.

MATTOS, T. S.; BALLARIN, A. S.; LUCAS, M. C.; ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S. Uneven shifts in flood and drought flows in a Brazilian water supply catchment. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 60, 102498, 2025. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.102498.

MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT (MEA). *Ecosystems and Human Well-being: Wetlands and Water Synthesis*. Washington, DC: World Resources Institute, 2005.

OECD – ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. *Water Security for Better Lives*. Paris: OECD Publishing, 2013.

O’NEILL, B. C.; TEBALDI, C.; VAN VUUREN, D. P.; EYRING, V.; FRIEDLINGSTEIN, P.; HURTT, G.; et al. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, v. 9, p. 3461–3482, 2016. DOI: 10.5194/gmd-9-3461-2016.

ÖZDOĞAN-SARIKOÇ, G.; et al. Physically based vs. data-driven models for streamflow and runoff simulations. *Environmental Modelling & Software*, v. 175, 106004, 2024. DOI: 10.1016/j.envsoft.2024.106004.

PBMC – PAINEL BRASILEIRO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Base científica das mudanças climáticas: Contribuição do GT1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional (RAN1). Rio de Janeiro: PBMC, 2014. Disponível em:

https://www.pbmccoppe.ufrj.br/documentos/RAN1_completo_vol1.pdf. Acesso em: 8 out. 2025.

PESSOA, P. F. P. Hidrogeologia dos aquíferos cársticos do alto e médio curso do rio Ribeira de Iguape, SP. 1996. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 1996.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, n. 2, p. 185-204, jun. 2010. DOI: 10.1590/S0102-77862010000200004.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão. Impactos socioeconômicos dos eventos climáticos extremos de 2024 no Rio Grande do Sul: uma análise após um ano do desastre. Porto Alegre, 2025.

RODRIGUES, R. C. D. B.; et al. Global projections of river flood risk in a 1.5 °C–4 °C warmer world. *Nature Communications*, v. 13, 4971, 2022. DOI: 10.1038/s41467-022-32580-x.

ROSS, J. L. S. Geomorfologia: ambiente e planejamento. 8. ed. São Paulo: Contexto, 2010.

SAMPAIO, G. et al. Regional climate change over eastern Amazonia caused by pasture and soybean cropland expansion. *Geophysical Research Letters*, v. 34, L17709, 2007. DOI: 10.1029/2007GL030612.

SÃO SEBASTIÃO. Prefeitura Municipal. Prefeitura confirma 61 mortos na calamidade. São Sebastião, 25 fev. 2023.

SHIKLOMANOV, I. A. et al. The dynamics of river water inflow to the Arctic Ocean. In: LEWIS, E. L. (Ed.). *The Freshwater Budget of the Arctic Ocean*. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000. p. 281-296.

SISTEMA INTEGRADO DE GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DE SÃO PAULO (SIGRH). Divisão Hidrográfica: Unidades de Gerenciamento (22 UGRHIs). São Paulo: SIGRH, 2004–2024. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/divisaohidrografica>. Acesso em: 15 out. 2025.

TEBALDI, C.; KNUTTI, R. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, v. 365, p. 2053–2075, 2007. DOI: 10.1098/rsta.2007.2076.

TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, v. 456–457, p. 12–29, 2012. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.

TOLLEFSON, J. How climate change is sharpening urban water crises. *Nature*, v. 600, p. 22–25, 2021. DOI: 10.1038/d41586-021-03625-w.

UNESCO; WWAP – WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2020: Água e mudança climática. Resumo executivo. Paris: UNESCO, 2020.

UNESCO; WWAP – WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change. Paris: UNESCO, 2020. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000372985>. Acesso em: 19 set. 2025.

UNITED NATIONS (UN). United Nations Framework Convention on Climate Change. New York: United Nations, 1992. Disponível em: https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf. Acesso em: 19 set. 2025.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). Emissions Gap Report 2023: Broken Record — Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions. Nairobi: UNEP, 2023. Disponível em: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2023>. Acesso em: 19 set. 2025.

UN-WATER. Water Security and the Global Water Agenda: Analytical Brief. Hamilton: UNU-INWEH/UN-Water, 2013. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/water-security-and-global-water-agenda>. Acesso em: 22 set. 2025.

UN-WATER; FAO. Progress on Level of Water Stress – SDG 6.4.2: Update and Acceleration Needs. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018.

VAN VLIET, M. T. H.; JONES, E. R.; FLÖRKE, M.; et al. Global water scarcity including surface water quality and expansions of clean water technologies. *Environmental Research Letters*, v. 16, 024020, 2021. Disponível em: https://pure.iiasa.ac.at/17049/1/van_Vliet_2021_Environ._Res._Lett._16_024020.pdf. Acesso em: 20 out. 2025.

VERA, C.; SILVESTRI, G.; LIEBMANN, B.; GONZÁLEZ, P. Climate change scenarios for seasonal precipitation in South America from IPCC-AR4 models. *Geophysical Research Letters*, v. 33, L13707, 2006. DOI: 10.1029/2006GL025759.

WOOLWAY, R. I.; et al. Intensification of extreme lake heatwaves under climate change. *Nature*, v. 607, p. 90–94, 2022. DOI: 10.1038/s41586-022-04917-5.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). State of the Global Climate 2023. Geneva: WMO, 2024. Disponível em: <https://public.wmo.int/en/resources/state-of-climate>. Acesso em: 19 set. 2025.

YANG, S.; et al. A physical process and machine learning combined hydrological model. *Journal of Hydrology*, v. 590, 125194, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125194.