

Teórico-metodológico para avaliação do risco de impacto das mudanças climáticas em Setores Estratégicos



RECURSOS HÍDRICOS

INPE
São José dos Campos
2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

PENHA, THALES VAZ; PEDRA, GEORGE ULGUIM;
ARCOVERDE, GUSTAVO FELIPE BALUÉ; PINHATI, AIRES DE
SOUZA, SAULO; FILIPE SAMPAIO CASULARI; OMETTO, JEAN
PIERRE HENRY BALBAUD.

p696 Teórico-metodológico para avaliação do risco de impacto das
mudanças climáticas em Setores Estratégicos: Recursos Hídricos
/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. – São José dos
Campos: INPE, 2026.

80 p.; Versão: 08-10-2025,

1. Plataforma AdaptaBrasil. 2. Mudanças climáticas. 3. Risco
climático

CDU: **551.583 (07)**

APRESENTAÇÃO

O Sistema de Informações e Análises sobre Impactos das Mudanças do Clima (AdaptaBrasil) foi instituído pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, por meio da Portaria nº 3.896, de 16 de outubro de 2020, tem como objetivo consolidar, integrar e disseminar informações que possibilitem o avanço das análises dos impactos da mudança do clima, observados e projetados no território nacional, dando subsídios às autoridades competentes pelas ações de adaptação.

O AdaptaBrasil MCTI é desenvolvido por meio de uma cooperação entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a Rede Nacional de Pesquisa e Ensino (RNP) e o Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI). Sua construção envolve especialistas e atores nacionais e internacionais que trazem, através de um arcabouço científico metodológico, dados e informações relevantes à sociedade no contexto das mudanças do clima. Para tal, são utilizadas informações públicas e disponíveis para a composição de indicadores no desenvolvimento de índices agregados para estimativas do risco de impacto das mudanças do clima em diversos setores estratégicos como por exemplo: Água, Energia, Saúde e Alimento.

O INPE é responsável pela aplicação da metodologia, pelas análises e validação dos indicadores e índices, mas destaca-se o relevante papel de instituições parceiras, tais como, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Fundação Oswaldo Cruz (Fiocruz), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Embrapa, Cemaden, Rede Clima, entre outras, na coprodução dos riscos de impacto. Essas parcerias contribuem não apenas na construção da plataforma, mas também na validação dos indicadores por técnicos, acadêmicos e cientistas especializados nas distintas temáticas.

Esse documento apresenta informações referentes aos principais marcos teóricos e conceituais que fundamentam o entendimento do risco de impacto de mudanças climáticas e metodologias empregadas nas etapas de construção de indicadores no **Setor Estratégico (SE) de Recursos Hídricos** para o AdaptaBrasil, versão 2.0 (Risco em Cascata), construção período 2023-2025. Aborda sua estruturação composta pelos riscos relacionados ao **estresse hídrico e risco de escassez hídrica**. Além disso, detalha as metodologias aplicadas em cada etapa de construção de índices e indicadores de risco, assim como os fatores que influenciam esse setor.

Listas de Figuras

Figura 1 – Modelo conceitual para análise do risco de impacto das mudanças climáticas desenvolvido para o AdaptaBrasil MCTI.....	2
Figura 2 – Diferentes fatores ou ameaças relacionadas ao clima.	3
Figura 3 – Falhas climáticas globais em cascata. Este é um diagrama de loop causal, no qual uma linha completa representa uma polaridade positiva (por exemplo, feedback amplificador; não necessariamente positivo no sentido normativo) e uma linha pontilhada denota uma polaridade negativa (significando um feedback atenuante).	6
Figura 4 - Hierarquia teórica do risco de impactos em cascata de estresse hídrico sobre os recursos hídricos em situações de escassez hídrica.....	12
Figura 5 – Diagrama conceitual de escassez hídrica e estresse hídrico na avaliação dos riscos para os recursos hídricos.	14
Figura 6 – Desenho teórico da avaliação dos riscos em cascata de escassez hídrica e do risco de estresse hídrico.....	17
Figura 7 - Pirâmide da informação.	19
Figura 8 – Estrutura hierárquica entre as composições de indicadores e índices de risco de impacto das mudanças climáticas no SE de recursos hídricos.	20
Figura 9 – Integração das dimensões de ameaça climática com vulnerabilidade e exposição na avaliação do risco climático: presente e cenários futuros.	23
Figura 10 – Procedimento de transferências das estatísticas de interesse dos dados climáticos para a BHO na área incremental e agregada ou total.	29
Figura 11 – Esquema metodológico utilizado na avaliação do impacto da mudança climática nos recursos hídricos do Brasil.	30
Figura 12 - Valores abstratos de 0 a 1 para classes de correspondência da vazão Q_{mlt} (m^3/s) no presente (Baixo, Mediano, Alto, Muito Alto e Altíssimo) e da redução na vazão no futuro da variável Δq_{rel} (%) (N, S0, S1, S2, S3, S4, S5) para ottobacias fictícias inseridas em um município.....	34
Figura 13 – Histogramas utilizados para definir os limiares críticos, baseado nos intervalos quartis, para representação das classes de vazão presente (Q_{mlt}), em volume (m^3/s), para todas as ottobacias de cada bioma: (1) Amazônia; (2) Cerrado; (3) Caatinga; (4) Mata Atlântica; (5) Pantanal; (6) Pampa.	36
Figura 14 - Ilustração da intersecção das ottobacias inseridas e associadas no município de Campo Bonito-PR.	40
Figura 15 - Matriz de correspondência entre as dimensões de Ameaça de Risco de escassez hídrica e Vulnerabilidade e Exposição para a construção do Risco de Estresse Hídrico.	41
Figura 16 – Fluxograma das etapas de construção numérica e seleção dos indicadores simples do SE Recursos Hídricos.	45

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	i
1 RISCO DE IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	1
1.1 Risco de impacto em cascata	4
2 Delimitando o setor estratégico de Recursos Hídricos.....	7
2.1 Impactos em cascata dos recursos hídricos (versão 2.0)	10
2.2 Caracterização do risco de escassez hídrica.....	12
2.3 Caracterização do risco de estresse hídrico	15
3 Índices e indicadores: perspectivas teóricas	18
4 Índice de Risco de Impacto às Mudanças Climáticas para Recursos Hídricos ..	19
4.1 Ameaça de escassez hídrica	23
4.1.1 Construção da ameaça de risco de escassez hídrica	24
4.1.2 Modelagem hidrológica	25
4.1.3 Representação municipal de risco à escassez hídrica.....	33
4.1.4 Associação da ottobacia com os municípios.....	39
4.1.5 Agregação dos valores brutos da ottobacia nos municípios	40
4.2 Risco de estresse hídrico.....	41
4.2.1 Identificação e pré-seleção dos indicadores candidatos	42
4.2.3 Construção numérica e seleção dos indicadores	44
4.2.3 Cálculo dos demais níveis hierárquicos	51
4.3 Cálculo dos fatores influenciadores	56
4.3.1 Cálculo da contribuição dos indicadores simples aos Índices de Risco de Impacto (Nível 1 para Nível 5).....	56
4.3.2 Cálculo da contribuição dos indicadores simples às dimensões associadas (Nível 1 para Nível 4)	61
4.3.3 Cálculo da contribuição dos indicadores simples às subdimensões da vulnerabilidade a que estão associadas (Nível 1 para Nível 3).....	63
4.3.4 Cálculo da contribuição dos indicadores simples aos indicadores temáticos a que estão associadas (Categoria 1 para categoria 2).....	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
APÊNDICE A - Composição hierárquica do SE Recursos Hídricos.....	72

1 RISCO DE IMPACTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, sigla em inglês), o risco é “o potencial de consequências adversas para os sistemas humanos e/ou ecológicos, onde é considerado a diversidade de valores e objetivos associados a tais sistemas. Por exemplo, consequências sobre vidas, meios de subsistência, saúde e bem-estar, ativos e investimentos econômicos, sociais e culturais, infraestrutura, serviços (incluindo serviços ecossistêmicos), ecossistemas e espécies” (IPCC, 2022).

No contexto dos impactos das mudanças climáticas, os riscos (climáticos) resultam em interações dinâmicas entre as ameaças climáticas (ou relacionadas ao clima) com a exposição e a vulnerabilidade do sistema socioecológico (SSE)¹ que é potencialmente afetado (interação essa denominada, aqui, como flor de risco – Figura 1). Estas dimensões se inserem em um arcabouço metodológico (framework) que combina conceitos utilizados pelo IPCC (2015, 2022).

A **vulnerabilidade** trata da propensão ou predisposição de um sistema socioecológico ser afetado negativamente, englobando uma variedade de conceitos e elementos, incluindo a sensibilidade ou suscetibilidade a danos e a falta de capacidade de lidar e adaptar-se a uma situação de perturbação climática (IPCC, 2022). Em outras palavras, a situação de vulnerabilidade está relacionada com características intrínsecas de resiliência do SSE em questão, as quais estão relacionadas direta ou indiretamente com a propensão do SSE ser impactado negativamente por uma perturbação climática. Nesse sentido, a vulnerabilidade está relacionada com aspectos a priori e qualitativos do SSE que possuem relação com os danos potenciais da(s) perturbação(ões) climática(s) e, desta forma, o nível de vulnerabilidade pode aumentar ou diminuir o impacto climático. E conforme apontado acima, pode ser desmembrada na dimensão de sensibilidade e de capacidade adaptativa do SSE de análise (GALLOPÍN, 2006; TURNER *et al.*, 2003). A sensibilidade diz respeito ao grau em que o sistema em análise é afetado, adversamente ou beneficamente, por estímulos relacionados ao clima (IPCC, 2022).

¹ Sistema socioecológico diz respeito ao sistema que inclui subsistemas sociais (humanos) e ecológicos (biofísicos) em interação mútua (GALLOPÍN, 1991), ou seja, os sistemas humanos e naturais são entrelaçados, de forma interconectada e interdependente (BIGGS *et al.*, 2021). Pode ser especificado para qualquer escala, desde a comunidade local e seu ambiente circundante até o global (GALLOPÍN, 2006).

A sensibilidade é uma propriedade inerente de um sistema socioecológico, existente antes da ameaça climática, independente (separado) da exposição (GALLOPÍN, 2003; IPCC, 2015). Já a capacidade adaptativa está relacionada à habilidade do sistema socioecológico (considerando cada um dos seus elementos) de se ajustar a um distúrbio ou danos potenciais, aproveitando as oportunidades e lidando com as consequências de uma transformação que ocorra (IPCC, 2015).

Figura 1 – Modelo conceitual para análise do risco de impacto das mudanças climáticas desenvolvido para o AdaptaBrasil MCTI.



Fonte: adaptado de IPCC (2015) por Bezerra (2025).

A **exposição** diz respeito à presença dos elementos que compõem o SSE (pessoas; moradias; espécies; ecossistemas; serviços, recursos e funções ambientais; infraestrutura; bens econômicos, sociais ou culturais) em locais e contextos que possam ser afetados negativamente por uma perturbação climática (IPCC, 2022). A exposição a uma ameaça climática particular pode ser determinada independentemente da vulnerabilidade (ADGER, 2006; GALLOPÍN, 2003; IPCC, 2015; KASPERSON *et al.*, 2005).

As **ameaças climáticas** (ou relacionadas ao clima) são perturbações climáticas que possuem uma tendência ou iminência a acontecer e que pode afetar negativamente o sistema socioecológico em questão. As perturbações climáticas estão associadas aos eventos climáticos extremos definidos a partir de grandes picos

de pressão, além do intervalo normal de variabilidade em que o sistema socioecológico opera e que, geralmente, se originam além do sistema ou local em questão (GALLOPÍN, 2006). Além disso, interagem com o ambiente de análise e possuem capacidade de transformação significativa nesse sistema, seja ela lenta ou repentina.

As ameaças climáticas possuem características exógenas, endógenas ou ambas, dependendo do fenômeno e do SSE em análise (KASPERSON *et al.*, 2005; TURNER *et al.*, 2003) conforme Figura 2. Ao tratarmos de risco climático no AdaptaBrasil, as ameaças do clima são observadas como um agente externo (exógenas) ao SSE, ou conjugado com este sistema, ainda que as causas que provocaram essas ameaças sejam de origem antrópica - emissões de gases de efeito estufa. Essa organização se deve ao fato de que não é possível associar emissões específicas com ameaças climáticas específicas, no tempo e espaço. As ameaças de ordem endógena são caracterizadas na dimensão de vulnerabilidade, conforme o arcabouço que é utilizado pelo IPCC.

Figura 2 – Diferentes fatores ou ameaças relacionadas ao clima.



Fonte: elaborado por Bezerra, 2025).

Os riscos de impacto da mudança climática (riscos climáticos) estão sujeitos à incerteza em termos de magnitude e probabilidade de ocorrência por estarem relacionados às ameaças, exposição e vulnerabilidade que podem mudar ao longo do tempo e do espaço devido a mudanças socioeconômicas e à tomada de decisões humanas (IPCC, 2022). Eles estão se tornando cada vez mais complexos e gerando impactos cada vez mais sistêmicos, multisetoriais e multiescalares. Tal impacto é

produto de um SSE altamente complexo², o que implica uma profundidade de entendimento de ordem sistêmica, multisetorial, multinível e multiescalar. Tais características trazem à tona sobre a necessidade da avaliação precoce dos riscos com o intuito de se antever, precaver ou mesmo adaptar-se aos possíveis impactos, considerando as interações entre os múltiplos impulsionadores do risco e incluindo o papel das respostas de adaptação e mitigação para tal.

1.1 Risco de impacto em cascata

Impactos em cascata de eventos meteorológicos/climáticos extremos ocorrem quando um perigo extremo gera uma sequência de eventos secundários em sistemas naturais e humanos que resultam em perturbações físicas, naturais, sociais ou econômicas, em que o impacto resultante é significativamente maior do que o impacto inicial. Os impactos em cascata são complexos e multidimensionais e estão mais associados à magnitude da vulnerabilidade do que a do perigo (IPCC, 2022).

Em se tratando de riscos climáticos (também chamados de falhas climáticas), eles são considerados sistêmicos quando se iniciam da consequência de impactos diretos – materializando-se como uma cadeia ou cascata de impactos – e se agravam produzindo impactos ainda mais severos para as pessoas e sociedades (GILL; MALAMUD, 2016; TURRENTINE, 2022). Segundo Lawrence, Blackett e Gradock-Henry (2020), eles representam desafios de gestão significativos devido às suas capacidades de cascata e recombinação, que exigem coordenação de respostas e tomada de decisão por atores em vários níveis (Figura 3).

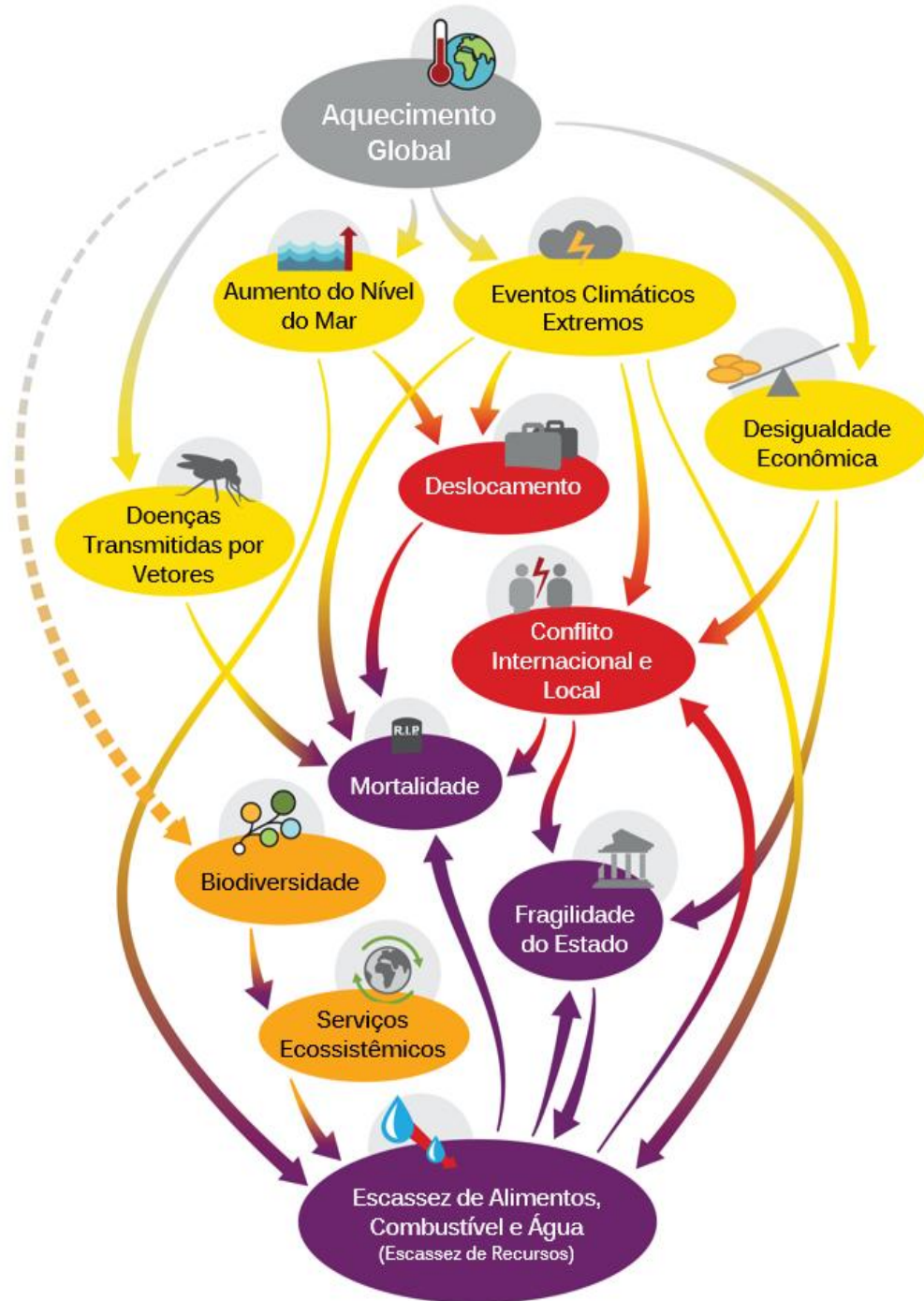
Nessa perspectiva, nem todos os impactos das mudanças climáticas surgirão da mesma forma ou ao mesmo tempo: alguns surgem abruptamente, outros lentamente e são contínuos, podendo haver múltiplos impactos ocorrendo simultaneamente e em diferentes combinações (PESCAROLI; ALEXANDER, 2016; LAWRENCE et al., 2018; LAWRENCE; BLACKETT; CRADOCK-HENRY, 2020). Isso faz com que seja absolutamente necessária a identificação de quando e onde ocorrem (ou ocorrerão) esses impactos, pois há exemplos empíricos que indicam uma propagação dos impactos e suas implicações como cascatas nos sistemas físicos e humanos (KOKS, 2018; LAWRENCE *et al.*, 2016; LAWRENCE; BLACKETT;

² Utilizamos o termo complexo para comunicar a diversidade de interações entre setores e sistemas que podem ampliar ou reduzir os riscos relacionados ao clima.

CRADOCK-HENRY, 2020; MIZRAHI, 2020; ROCHA *et al.*, 2018; WILLNER; OTTO; LEVERMANN, 2018). Por exemplo, o estudo dos efeitos em cascata de inundações na Tailândia (HILLY *et al.*, 2018) podem incluir desde perda de serviços críticos, ativos e bens, até congestionamento de tráfego e atrasos no transporte, perda de negócios e renda, distúrbios e desconforto para os residentes.

A abordagem do risco em cascata, além de tornar explícita a complexidade das interações entre os múltiplos riscos, permite uma visão mais compartimentada e com enfoque nas interações dentro e entre as dimensões de cada risco permitindo, portanto, ajudar a orientar uma avaliação mais detalhada e precisa (GALAZ *et al.*, 2011; LAWRENCE *et al.*, 2018; SIMPSON *et al.*, 2021). Pois os efeitos combinados de estressores interativos podem afetar a capacidade de indivíduos, governos e setor privado de se adaptar a tempo, ou seja, antes que ocorram danos generalizados (LAWRENCE; BLACKETT; CRADOCK-HENRY, 2020; MIZRAHI, 2020).

Figura 3 – Falhas climáticas globais em cascata. Este é um diagrama de loop causal, no qual uma linha completa representa uma polaridade positiva (por exemplo, feedback amplificador; não necessariamente positivo no sentido normativo) e uma linha pontilhada denota uma polaridade negativa (significando um feedback atenuante).



Fonte: adaptado de Kemp *et al.* (2022).

Uma estratégia para lidar com essa grande complexidade na análise e no entendimento do risco de impacto associado às mudanças climáticas, é analisar as dimensões da flor de risco (vulnerabilidade, exposição e ameaça climática - Figura 1) sob um determinado contexto, denominado aqui como Setor Estratégico (SE). Cada SE possui elementos de impacto potencial específicos, portanto, a delimitação conceitual de cada SE é fundamental para a construção dos indicadores e análise de risco de impacto. O AdaptaBrasil MCTI disponibiliza informações para os SE Segurança Alimentar, Segurança Energética, Portos, Saúde, Recursos Hídricos, dentre outros.

Assim sendo, a versão 2.0 do AdaptaBrasil implementou a nova abordagem de avaliação dos riscos de impacto das mudanças climáticas no estudo do SE Recursos Hídricos, a qual será detalhada a seguir.

2 DELIMITANDO O SETOR ESTRATÉGICO DE RECURSOS HÍDRICOS

O Setor Estratégico de Recursos Hídricos refere-se à avaliação de risco de impacto das mudanças do clima nas águas superficiais e subterrâneas disponíveis para o uso humano. O setor avalia os recursos hídricos do ponto de vista da disponibilidade e acesso aos recursos hídricos na perspectiva da garantia da segurança hídrica para os diversos usos da água, incluindo o abastecimento humano, manutenção da saúde e bem-estar, manutenção dos serviços ecossistêmicos de regulação hídrica, e desenvolvimento de atividades socioeconômicas.

No Brasil, os recursos hídricos estão fortemente conectados com o desenvolvimento econômico, social e ambiental do país e são de fundamental importância para a segurança hídrica nacional (ANA, 2019; ANA, 2024). A segurança hídrica se conforma quando há disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficientes para o atendimento às necessidades humanas, à prática das atividades produtivas econômicas e à conservação dos ecossistemas aquáticos (ANA, 2019).

Estimativas apontam que o Brasil detém cerca de 12% a 15% dos recursos hídricos renováveis do mundo (ANA, 2024; GETIRANA; LIBONATI; CATALDI, 2021; MARENGO *et al.*, 2016). Dadas suas dimensões continentais e condições hidroclimáticas, as reservas de água doce do Brasil não são distribuídas de forma homogênea pelo país, sendo altamente heterogêneas no território e dependentes do clima e da variabilidade climática no tempo, com áreas que lidam com o desafio da

escassez de água devido à distribuição extremamente desigual dos recursos hídricos e à intensificação do uso da água (BALLARÍN *et al.*, 2023; GESUALDO *et al.*, 2021; MARENGO, 2008; MARENGO *et al.*, 2016).

Além disso, o Brasil é fortemente dependente da hidroeletricidade: aproximadamente 60% da geração de energia vem desse setor (HUNT; STILPEN; DE FREITAS, 2018). No entanto, espera-se que o país expanda suas áreas irrigadas, o que pode agravar o estresse hídrico (MULTSCH *et al.*, 2020). Essa situação preocupante não afetará apenas o Brasil, mas poderá ter proporções globais. O país desempenha um papel fundamental na segurança alimentar mundial, sendo um dos maiores produtores agrícolas (PEREIRA *et al.*, 2012) e possuindo áreas classificadas como *hotspots* globais de biodiversidade (MYERS *et al.*, 2000). O Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil (2024) gerado anualmente pela ANA, que sintetiza dados, estatísticas e indicadores relacionados à água e fornece à sociedade um panorama detalhado da situação dos recursos hídricos no Brasil, mostrou que em 2023, o país retirou aproximadamente 66,52 trilhões de litros de água, com a irrigação sendo responsável por 50,0% deste volume, seguida pelo abastecimento urbano (23,4%) e uso industrial (9,2%) (ANA, 2024).

Além disso, o referido relatório, baseado nos dados da plataforma S2ID do Ministério de Desenvolvimento Regional, apontou que, de 2021 a 2023, aproximadamente 26,7 milhões de pessoas foram afetadas por secas e estiagens no Brasil, o que corresponde a cerca de 5 vezes mais que por cheias (5,1 milhões). Foram quantificados 4.217 eventos de seca associados a danos humanos, cerca de 2 vezes mais que os de cheias (1.965). Em 2023, mais de 11 milhões de pessoas foram afetadas por secas e estiagens no Brasil, sendo contabilizados 1.497 eventos neste ano (ANA, 2024). Em termos de impactos observados, em 2023, a maior parte dos eventos de secas ocorreu na Região Nordeste (47,6%), seguida pelas regiões Sul (25,1%) e Norte (13,8%). Cerca de 49,3% das pessoas afetadas por estiagens e secas em 2023 vivem na Região Nordeste (ANA, 2024).

Do ponto de vista da resiliência hídrica no Brasil, as reservas de água doce do Brasil são volumosas, porém espacialmente concentradas, com cerca de 80% delas localizadas na região amazônica. Por outro lado, a região semiárida do Nordeste, mesmo incluindo parte da bacia do rio São Francisco, possui apenas 4% dos recursos hídricos do país, mas abriga 35% da população brasileira, composta principalmente

por famílias de baixa renda e onde grande parte das cidades com mais de cinco mil habitantes enfrentarão crise de abastecimento de água para o consumo humano (MARENGO, 2008; MARENGO *et al.*, 2016). O episódio de crise hídrica na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), uma das maiores secas da sua história, entre 2014-2015, resultante da combinação de baixos índices pluviométricos durante o verão 2014 e 2015 e um grande crescimento da demanda de água, que afetou drasticamente a disponibilidade hídrica dos reservatórios do Sistema Cantareira, o principal sistema de abastecimento de São Paulo, responsável pelo abastecimento de 6 milhões de habitantes na região metropolitana, ilustra bem os impactos relacionados ao estresse hídrico (MARENGO; ALVES, 2015).

Nesse sentido, para obtenção de uma avaliação mais completa dos riscos futuros que impactam a disponibilidade e acesso aos recursos hídricos é preciso que sejam contemplados certos preceitos da segurança hídrica, tais como, acesso aos recursos hídricos a um custo acessível e em quantidade e qualidade aceitáveis para atender necessidades básicas, incluindo condições sanitárias e de higiene, e a manutenção da saúde e bem-estar; manutenção dos serviços ecossistêmicos de regulação hídrica; manutenção do desenvolvimento de atividades socioeconômicas relacionadas, governança adequada para lidar com múltiplos usos, atores e interesses (ANA, 2019; ONU, 2013).

Os princípios deste SE seguem os fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei nº 9.433/1997), que considera: (i) a água é um bem de domínio público; (ii) a água é um recurso natural limitado, dotado de valor humano e a dessedentação de animais; (iv) a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas; (v) a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos; (vi) a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades. Considerando tais fundamentos, o acesso à água pela população deve ser a um custo acessível e em quantidade e qualidade aceitáveis para a manutenção da sua subsistência, bem-estar e desenvolvimento socioeconômico, devendo considerar o planejamento da oferta e do uso da água em um país (ANA, 2019; ONU, 2013).

Além disso, a incorporação das vulnerabilidades e exposição dos sistemas

socioecológicos na análise do risco climático futuro, amplia maneiras de estar mais bem preparado para os impactos causados pelo clima considerando as incertezas inerentes ao risco futuro, podendo melhorar a capacidade adaptativa do sistema para impactos não causados pelo clima (OLSEN, 2015) e motivar melhorias na gestão contínua, incluindo monitoramento de secas e cheias, previsão hidrometeorológica, maior conservação da água, etc. (SALAS *et al.*, 2012).

Para lidar com essas complexidades, os procedimentos técnicos, analíticos e de governança para a gestão hídrica devem acompanhar as crescentes demandas da sociedade e a análise de risco climático associadas à mudança climática é uma ferramenta imprescindível para o futuro dos recursos hídricos no Brasil (ANA, 2024). Portanto, o objetivo desta avaliação foi verificar o risco de impacto na disponibilidade e acesso aos recursos hídricos para diversas finalidades no Brasil devido aos efeitos adversos do clima que provocam escassez hídrica e estresse hídrico no sistema socioecológico.

2.1. Impactos em cascata dos recursos hídricos (versão 2.0)

Os riscos climáticos para os recursos hídricos na versão 2.0 do AdaptaBrasil-MCTI estão relacionados à seca (hidrológica) ou escassez hídrica física e são considerados sistêmicos quando se originam da redução da precipitação em uma determinada bacia hidrográfica, que desencadeia uma série de efeitos sobre o sistema hidrológico e, em cascata, ocasiona uma consequência de impactos diretos – materializando-se como uma cadeia ou cascata de impactos – afetando a disponibilidade hídrica e o saldo de oferta/demanda de água que, por sua vez, produz impactos ainda mais severos para a sociedade e os múltiplos usos (estresse hídrico).

Para construir esta avaliação, partiu-se de uma avaliação teórica de impactos em cascata para os recursos hídricos relacionados à seca e à escassez física de água. Em discussão com atores da ANA, MCTI e INPE, construiu-se uma hierarquia de impactos em cascata nos recursos hídricos no tempo (Figura 4). No caso do risco de escassez física da água, deflagrado pelas ameaças climáticas de redução da precipitação e pelo aumento da evapotranspiração potencial, pode impactar diretamente as vazões dos rios em bacias hidrográficas, que são fundamentais para garantir a disponibilidade de água para usos humanos - impacto de primeira ordem.

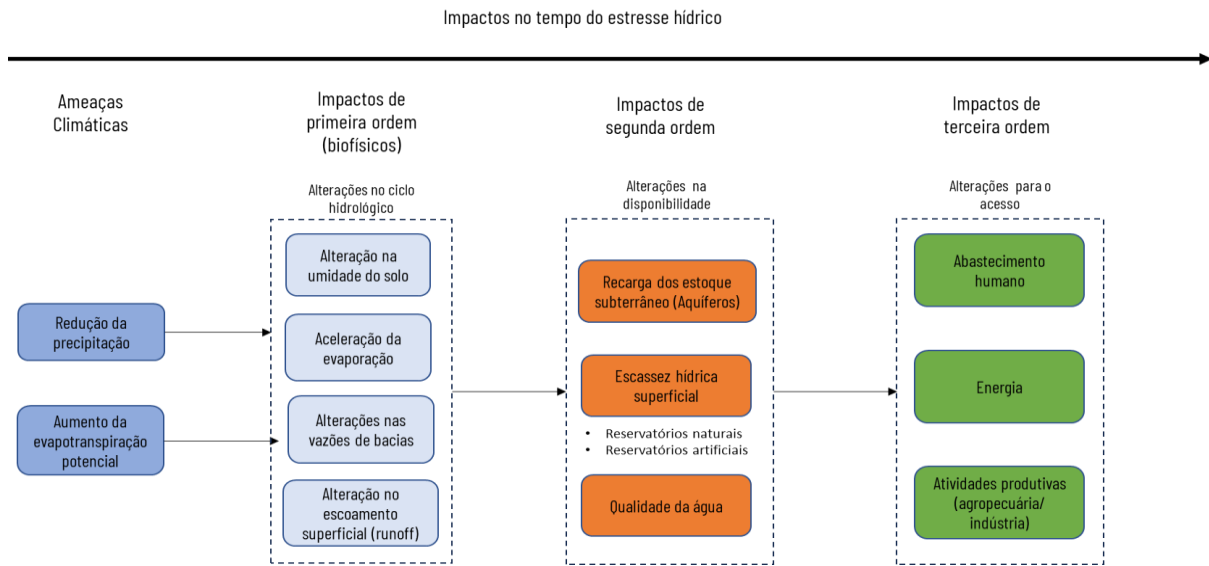
Esses impactos são traduzidos pelo efeito de seca hidrológica³ que provocam alterações mais diretas no sistema biofísico, tais como alterações na umidade do solo, aceleração da evaporação e alterações no escoamento superficial.

Na segunda ordem de impactos, a seca hidrológica provoca alterações no sistema hidrológico vinculado aos sistemas hídricos de abastecimento humano. Esse impacto se caracteriza por um período suficiente para que a falta de precipitação provoque grave desequilíbrio hidrológico (CEMADEN, 2022), interferindo diretamente na disponibilidade hídrica, principalmente na capacidade de armazenamento de água (subterrâneo e superficial) e se persistente, também afeta a qualidade da água – caracterizando a escassez hídrica física.

Na terceira ordem, os impactos da escassez hídrica física afetam diretamente o sistema humano e as formas de acesso à água pelos usos consuntivos, uma vez que, a indisponibilidade hídrica e falta de reservação de água nas bacias hidrográficas, modificam o acesso aos recursos hídricos e as atividades dependentes, desde o abastecimento humano, atividades econômicas e até a produção energética – gerando um saldo negativo entre oferta/demanda da água – caracterizando o estresse hídrico. Desta estruturação teórica, moldou-se a construção dos riscos de estresse hídrico em função do risco de escassez hídrica, detalhados nas próximas seções.

³ Seca hidrológica está relacionada aos impactos do déficit de precipitação acumulado a longo prazo (escala de meses a anos) nos recursos hídricos. Assim, corresponde as anomalias negativas na vazão dos rios, níveis do lençol freático, reservatórios de água, aquíferos ou a perda de área úmida (WILHITE; PULWARTY, 2017).

Figura 4 - Hierarquia teórica do risco de impactos em cascata de estresse hídrico sobre os recursos hídricos em situações de escassez hídrica.



2.2 Caracterização do risco de escassez hídrica

De acordo com o relatório AR6 do IPCC, capítulo 4 sobre Água, a escassez de água (*water scarcity*) é um conceito que pode ser entendido amplamente como uma incompatibilidade entre a demanda por água doce e sua disponibilidade, quantificada em termos físicos (CARETTA *et al.*, 2022). A quantidade de água que pode ser acessada fisicamente varia e intensifica-se à medida que a procura aumenta e/ou à medida que o abastecimento de água é afetado pela diminuição da quantidade ou qualidade da água disponível (UN WATER, 2023). Portanto, a escassez de água pode ser descrita como uma condição de falta de água para atender a demanda básica (*water demand*), aquém do abastecimento de água disponível (*water supply*). Conforme Castro *et al.* (2019), esse desequilíbrio entre demanda e disponibilidade pode considerar apenas o aspecto quantitativo do volume de água (escassez física), como definido na norma ISO 14046 (ISO, 2014), ou abranger aspectos de qualidade da água (uso degradativo) e acesso da população à água, como definido pela FAO (2012).

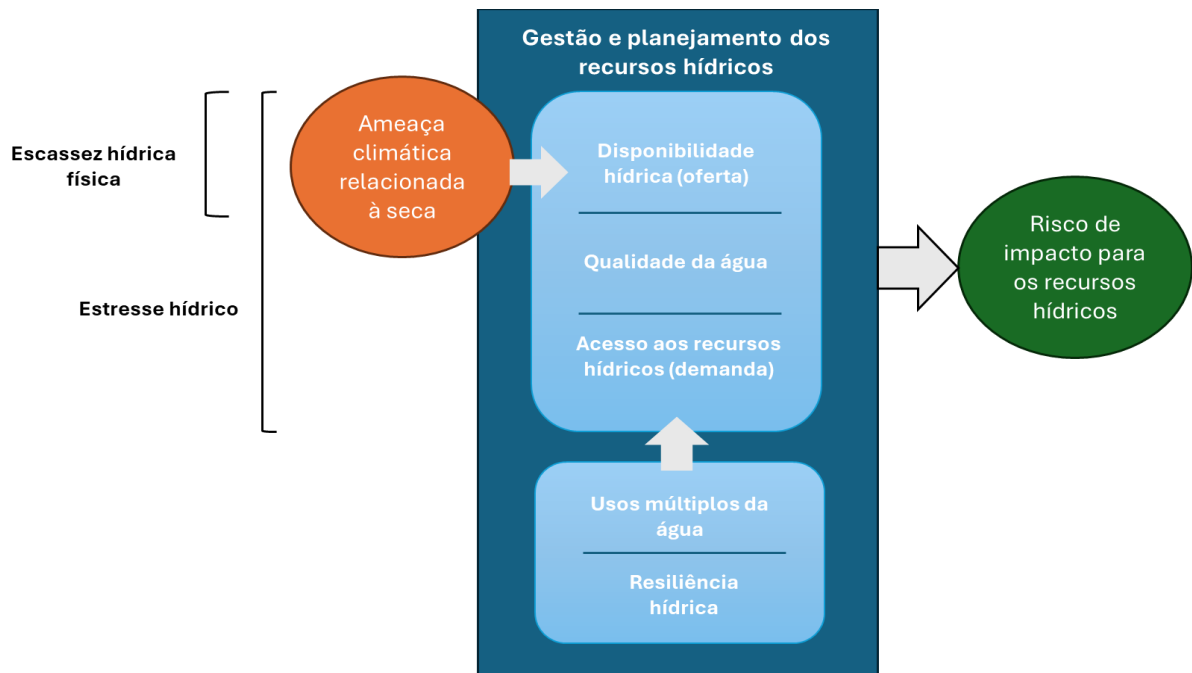
A escassez hídrica emerge de situações em que não há água disponível em fontes superficiais e subterrâneas em volume suficiente para garantir simultaneamente as necessidades humanas e dos ecossistemas. Pode ser resultante tanto de uma falta básica de água, ou seja, escassez física de água (*water scarcity*),

mas também pode resultar da falta de infraestruturas adequadas, tecnologia ou fraca capacidade humana para fornecer acesso aos recursos hídricos disponíveis (*water availability*), a qual pode ser referido como escassez econômica de água (*economic water scarcity*) (BOND *et al.*, 2019; IPCC, 2022; PEREIRA; CORDERY; IACOVIDES, 2009; WHITE, 2014). A escassez física de água, de forma mais ampla, pode ocorrer tanto como resultado de influências de fenômenos naturais (por exemplo, aridez, estiagens prolongadas e secas) como de influências humanas (por exemplo, desertificação, armazenamento deficitário de água), embora estas influências sejam frequentemente acopladas e os impactos de maiores proporções ocorrem sobre o sistema ecológico (BOND *et al.*, 2019; IPCC, 2022; PEREIRA; CORDERY; IACOVIDES, 2009; WHITE, 2014).

Em sistemas ou ambientes sob estresse hídrico, isto é, quando já existe um saldo de demanda superior à oferta regular de água para as atividades humanas, o risco de escassez hídrica física, enquanto uma ameaça ao acesso aos recursos hídricos disponíveis, pode resultar em perdas econômicas e sociais significativas, impactando vários setores, da agricultura ao turismo, com efeitos profundos nas comunidades locais, conforme ilustrado na Figura 5. Acarretam também em problemas que não devem ser avaliados apenas sobre a perspectiva climática ou ambiental, haja vista que são decorrentes de um conjunto de outros problemas de ordem econômica e desenvolvimento social (GLEICK, 2000), tais como fatores de disponibilidade e aumento da demanda, processos inadequados de gestão dos recursos hídricos, falta de planejamento e políticas adequados, estrutura de governança da água e de capacidade institucional de resposta a crises (TUNDISI, 2008).

Assim, déficits hídricos mais frequentes, podem implicar em aumento de custos para a sociedade, necessitando de estratégias de adaptação por parte dos usuários de água para mitigar parte desses custos (ANA, 2024). Tundisi (2008) aponta os principais problemas e processos que têm prejudicado a oferta de água, observada como um recurso finito: (a) intensa urbanização, aumentando a demanda e a contaminação da água; (b) estresse e escassez decorrentes de alterações na disponibilidade e aumento da demanda; (c) fraca infraestrutura na rede de distribuição de água potável, com muitas perdas; (d) problemas de estresse e escassez em razão de mudanças ambientais e climáticas.

Figura 5 – Diagrama conceitual de escassez hídrica e estresse hídrico na avaliação dos riscos para os recursos hídricos.



Fonte: adaptado de Schulte; Morrison (2014) e elaborado por Penha (2025).

Embora sujeitas a incertezas, as projeções de mudança climática indicam possíveis impactos e desafios futuros sobre os recursos hídricos no Brasil. Os impactos projetados variam de acordo com a região do Brasil, no entanto, os estudos convergem e indicam que praticamente em todas as bacias hidrográficas do Brasil existem tendências de diminuição das vazões dos rios no período 2011-2040 e de forma mais geral os modelos concordam com aumentos na temperatura e evapotranspiração (ANA, 2024; SÃO PAULO, 2011). As áreas mais ameaçadas pelo aumento na frequência e intensidade de dias secos consecutivos, por exemplo, compreendem o leste da Amazônia e o Nordeste do Brasil (MARENGO, 2014). Desta forma, a elevação da temperatura e da evapotranspiração poderá acarretar principalmente na mudança da disponibilidade de água para diversos usos e, entre outros efeitos, aumentar a necessidade de irrigação, refrigeração, consumo humano e dessedentação de animais em determinados períodos e regiões do país, afetando a capacidade de reservação e o balanço hídrico (ANA, 2019). Ainda de acordo com estudos científicos, eventos hidrológicos extremos, como as secas e enchentes, poderão tornar-se mais frequentes e mais intensos a cada grau de aquecimento global (CARETTA, 2022; MARENGO *et al.*, 2014). Somadas aos impactos esperados no regime hidrológico nos cenários de mudanças do clima, estão as prováveis mudanças

na demanda de diversos setores e usuários sobre os recursos hídricos, que afetará o balanço hídrico de oferta e demanda, à medida que as previsões realizadas a partir da expectativa de crescimento populacional e desenvolvimento dos países possam se concretizar, o que intensificará a escassez hídrica (AGHAKOUCHEK *et al.*, 2020; BALLARIN *et al.*, 2023; ANA, 2024; HE *et al.*, 2021; LIU *et al.*, 2017).

Nesta avaliação, o risco de escassez hídrica é compreendido como saldo negativo de água no meio físico (hidrologia) que afeta a disponibilidade hídrica em função das variações nas vazões em bacias hidrográficas, resultante das interações dinâmicas entre o sistema hidrológico e a variabilidade climática presente e projetada no futuro (ex: aumentos de temperatura, eventos de menor precipitação, alterações no escoamento superficial e na evapotranspiração potencial), que expressa a escassez física da água no sistema natural.

2.3 Caracterização do risco de estresse hídrico

O estresse hídrico refere-se ao impacto do alto uso de água (retirada e consumo) em relação à disponibilidade de água. Ele considera vários aspectos físicos relacionados aos recursos hídricos, incluindo a disponibilidade de água, a qualidade da água e a acessibilidade da água (ou seja, se as pessoas conseguem usar/acessar os suprimentos de água disponíveis), o que geralmente é uma função da suficiência da infraestrutura (captação) e da acessibilidade da água (consumo), entre outras coisas (SCHULTE; MORRISON, 2014).

O uso de uma grande parte da água pode levar a dificuldades no acesso ao recurso hídrico, incluindo efeitos colaterais, por exemplo, impactos sociais e ambientais. O estresse pode ser visto como uma escassez impulsionada pela demanda, ocorrendo potencialmente mesmo que haja volume de água disponível ou que a população não seja grande o suficiente para causar escassez, uma vez que a intensidade do uso da água é o principal fator de estresse da água (KUMMU; GUILLAUME; MOEL, 2016).

O estresse hídrico, portanto, como conceito pode ser entendido de forma mais genérica como a capacidade deficitária das infraestruturas de suprimento de água de atender às necessidades humanas e ecológicas da água, isto é, o estresse hídrico (insuficiência de água) é uma condição em que a demanda por água excede a oferta

disponível em um determinado local e período. Podendo ser agravado por fatores naturais como secas prolongadas ou pela gestão inadequada dos recursos hídricos.

O estresse hídrico emerge de cenários e situações em que o balanço hídrico dos recursos hídricos é deficitário, isto significa que o saldo de oferta e demanda da água em uma determinada localidade é negativo (o uso humano da água excede o volume de água disponível), sendo incapaz de oferecer uma segurança hídrica para os diversos usos da água, inclusive, o abastecimento humano. Além disso, o impacto das mudanças climáticas sobre os recursos hídricos pode aumentar as tensões relacionadas ao uso da água, particularmente na ausência de uma capacidade institucional estruturada para lidar com os conflitos, cujos interesses sobre o uso prioritário da água pelos diferentes setores e usuários da água são distintos. No entanto, o surgimento ou o aumento do conflito pela água, que também é um fator de estresse, depende de vários fatores socioeconômicos e políticos contextuais (CARETTA *et al.*, 2022).

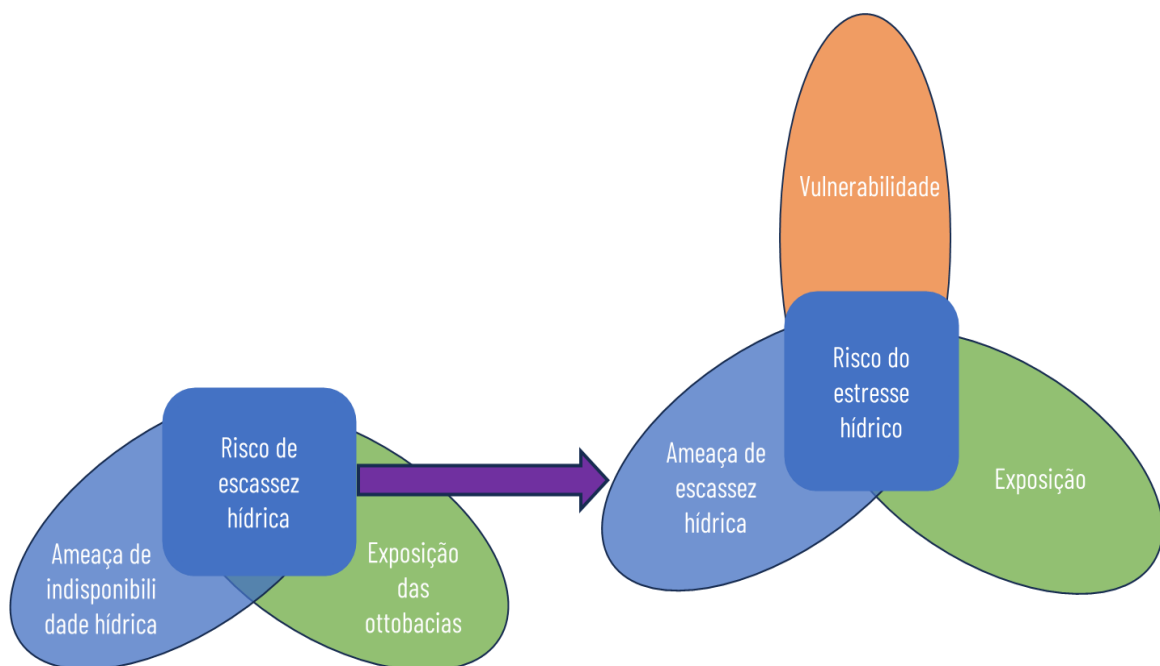
Ao longo do último século, o crescimento substancial da população, das atividades industriais e agrícolas e dos padrões de vida (ou seja, o uso per capita de água) intensificaram o estresse hídrico em muitas partes do mundo (AGHAKOUCHAK *et al.*, 2015; MEHRAN *et al.*, 2017), com diferentes graus de estresse hídrico sendo vivenciados nas condições atuais e em projeções de novas mudanças na disponibilidade regional de água, fortemente impactada pela contínua redução dos aquíferos devido à extração excessiva para fins de irrigação (IPCC, 2022). Com um aumento global da temperatura em aproximadamente 2°C, estima-se que entre 0,9 e 3,9 bilhões de pessoas enfrentarão maior exposição ao estresse hídrico, dependendo dos padrões regionais de mudanças climáticas e dos cenários socioeconômicos considerados (KOUTROULIS *et al.*, 2019).

Como a disponibilidade de água também está intimamente associada às operações da infraestrutura de abastecimento hídrico (como reservatórios de água superficial e usinas de dessalinização) e ao comportamento humano no uso da água (por exemplo, crescimento e ciclos sazonais na demanda por água), o estresse hídrico advém de fatores socioeconômicos e da pressão da demanda pelo uso dos recursos hídricos (MEHRAN *et al.*, 2017; MUNIA *et al.*, 2020). Incorporar a avaliação dessas pressões socioeconômicas é, portanto, muito importante ao analisar o impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos futuros, não se limitando a quantificação

da escassez hídrica física, especialmente ao discutir planos de adaptação para a gestão da água (KIGUCHI *et al.*, 2015). Assim, para o setor de recursos hídricos, as incertezas oriundas da mudança climática incidirão tanto do lado da oferta como também do lado da demanda hídrica (ANA, 2024).

A cadeia de risco de impacto para recursos hídricos (Figura 6) considera que a avaliação do risco de estresse hídrico decorre da combinação entre o risco de escassez hídrica (indisponibilidade de água) nas ottobacias⁴, entendido como a ameaça, e as características de vulnerabilidade e exposição do sistema socioecológico. Esses fatores condicionam o acesso aos recursos hídricos por diversos usuários, incluindo setores produtivos como agropecuária, indústria de transformação, mineração e termoenergia e o abastecimento humano

Figura 6 – Desenho teórico da avaliação dos riscos em cascata de escassez hídrica e do risco de estresse hídrico.



Fonte: elaborado por Penha (2025).

⁴ Ottobacia refere-se a uma unidade de área de drenagem codificada de forma numérica e hierárquica, utilizada como referência em estudos da ANA. O conceito segue a metodologia desenvolvida pelo engenheiro brasileiro Otto Pfafstetter e pode ser aplicado em qualquer escala de representação de rede hidrográfica.

3 ÍNDICES E INDICADORES: PERSPECTIVAS TEÓRICAS

Indicadores são instrumentos que permitem identificar e medir (monitorar/avaliar) aspectos relacionados a um determinado fenômeno ou problema que se materializa na realidade e podem ser considerados como variáveis indiretas, do ponto de vista de que uma variável ou fenômeno não pode ser medido diretamente (GALLOPÍN, 1996).

Devido a essas características, os indicadores têm sido utilizados para traduzir e comunicar fenômenos socioambientais complexos para público amplo (MAGGINO, 2017), mas principalmente aos tomadores de decisão e gestores ambientais, visando monitorar as metas de desenvolvimento sustentável (JANNUZZI, 2005; MIOLLA; SCHILTZ, 2019; VAN BELLEN, 2006). Considerando que sistemas complexos, como o sistema socioecológico, exige um entendimento interdisciplinar, ou mesmo transdisciplinar (OSTROM, 1990), o diálogo e a comunicação entre pesquisadores e setores da sociedade de diferentes áreas do conhecimento permite o aprofundamento do diagnóstico dos elementos de risco climático e por conseguinte a construção de indicadores deste risco.

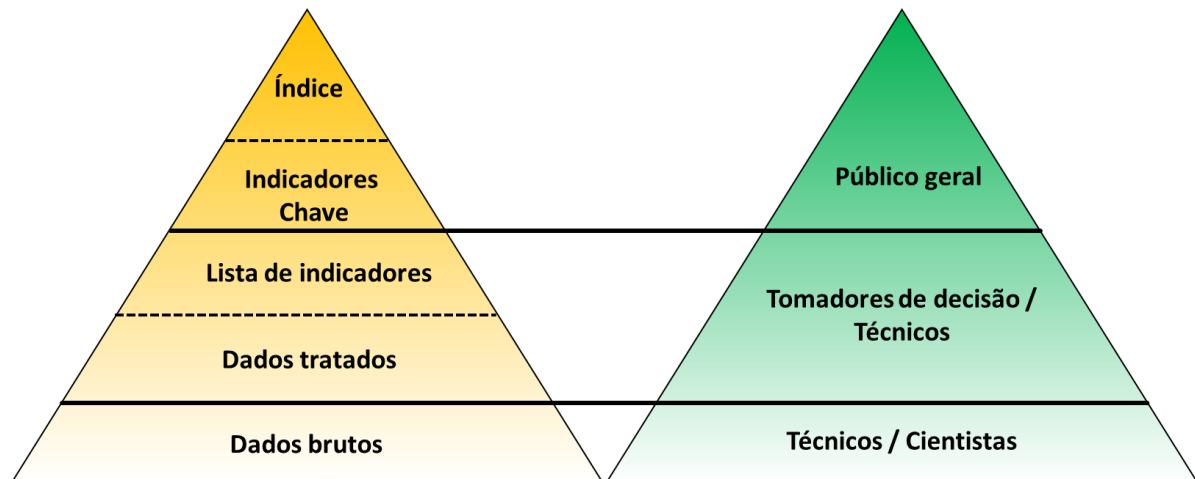
Toda construção de indicadores é baseada em um referencial conceitual-metodológico. A publicação elaborada pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e a *Joint Research Centre* (JRC) (BECKER *et al.*, 2019; OCDE, 2008), propõem um marco metodológico de composição hierárquica de indicadores e índices, que dialoga com a estrutura clássica da pirâmide da informação, conforme Hammond *et al.* (1995).

Nesta estrutura (Figura 7), parte-se do princípio de que dados observados de forma isolada não retratam um fenômeno multidimensional ou complexo e, sendo assim, a informação sintética comunica de forma mais objetiva padrões do fenômeno, principalmente para o público amplo, mas também permite direcionar melhor recursos e ações de tomadores de decisão (JANNUZZI, 2006).

Todavia, a ideia não se trata apenas de comunicar a informação sintética em forma de índices – o topo da pirâmide – mas sim de apresentar a composição hierárquica da informação, de forma que se possa ter uma leitura analítica da composição da pirâmide. Este tipo de leitura pode alinhar informações sintéticas, que apontam um estado mais grave do fenômeno, com elementos de forças e pressões tangíveis que promovem tal estado. Este tipo de tratamento da informação é útil para

tomadores de decisão, pois precisam de informações sinóticas de forma preliminar para agilizar análises focais e poder responder ou se adaptar às ameaças, neste caso, de mudanças climáticas (JACOB; BLAKE, 2010; MEADOWS, 1998).

Figura 7 - Pirâmide da informação.



Fonte: adaptado de Hammond *et al.* (1995).

4 ÍNDICE DE RISCO DE IMPACTO ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS PARA RECURSOS HÍDRICOS

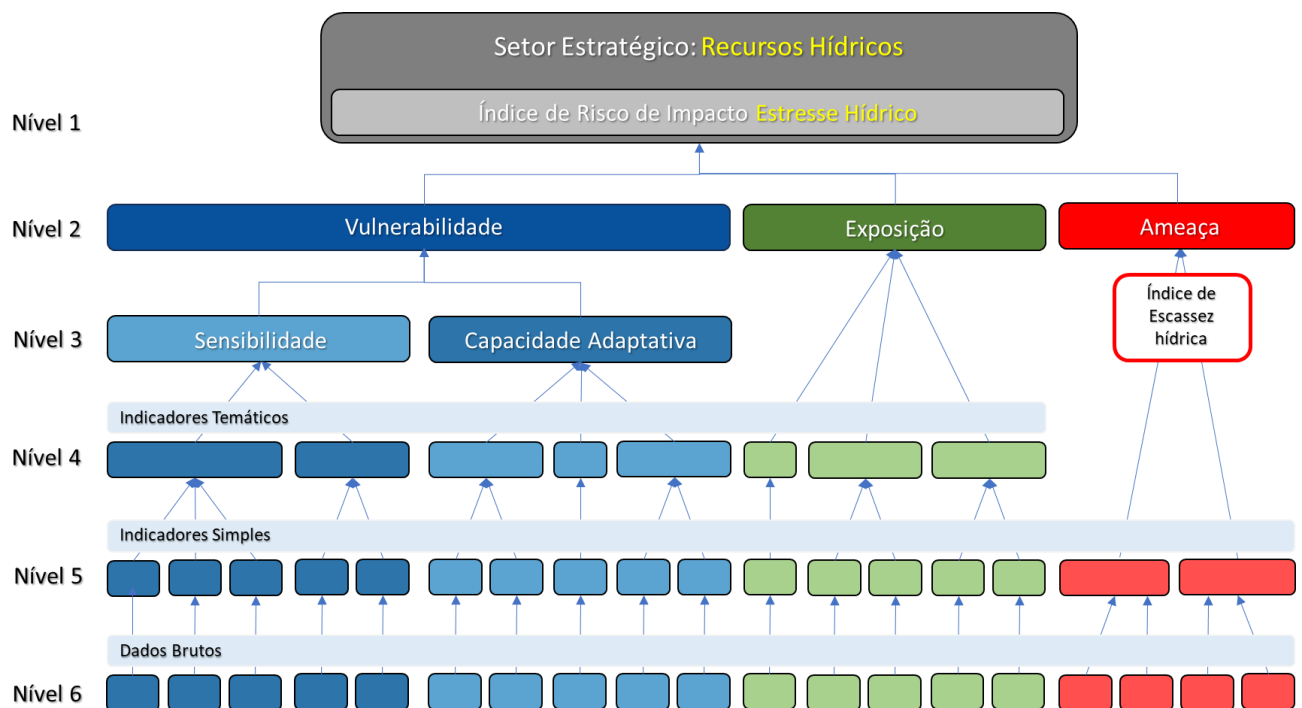
O risco de impacto das mudanças climáticas é o resultado emergente da interação entre três dimensões, a saber, Vulnerabilidade, Exposição e Ameaça, que, por sua vez, estão associadas intrinsecamente às mudanças nos fatores de pressão a que são submetidas. Neste sentido, optou-se por elaborar um sistema de índices e indicadores que fosse capaz de captar as relações de causalidade e influência desses fatores de risco. Essa metodologia incluiu diferentes etapas metodológicas para obtenção do índice de risco de impacto, incluindo a coleta de dados, tratamentos estatísticos, agregações e métodos de análises (pesquisa bibliográfica, aplicações com sistema de informações geográficas, análise estatística etc.), além de contemplar múltiplas escalas espaciais (nacional, regional, estadual e municipal) e temporais (intervalo de análise decadal).

A estrutura de construção da informação foi baseada na pirâmide da informação - abordada no capítulo anterior - dentro do escopo das dimensões de risco,

conforme IPCC (2015). Para tanto, foram consideradas informações desde dados brutos, indicadores simples, indicadores temáticos, índices das dimensões do risco de impacto climático e o índice de risco de impacto climático. Estas informações estão situadas em níveis da composição da informação hierárquica, conforme ilustra a Figura 8 a qual representa a hierarquia dos indicadores para a avaliação de risco de estresse hídrico.

O nível 6 representa a composição de cálculo finalizada para integrar a composição de indicadores, cujos dados são extraídos a partir de fontes primárias e/ou secundárias. Esta camada de informação é denominada como dado bruto e não é apresentada na plataforma AdaptaBrasil MCTI. O dado bruto passa por tratamentos numéricos, tais como, tratamento de outliers, normalizações, possível inversão de valores e ponderações. O propósito é que se tenha uma unidade numérica única entre todos os indicadores e que o significado do indicador possa ser representado na sua respectiva dimensão de risco climático. Ao passar por essas transformações numéricas, o dado bruto passa a ser denominado como indicador simples (ou indicador) e integra a informação mais elementar da Plataforma, de nível 6.

Figura 8 – Estrutura hierárquica entre as composições de indicadores e índices de risco de impacto das mudanças climáticas no SE de recursos hídricos.



Fonte: elaborado por Penha e Bezerra (2025).

A construção de indicadores e índices de risco climático na plataforma segue três esferas de entendimento: (i) sistema socioecológico; (ii) Setor Estratégico, e (iii) tipos de perturbação climática a que o sistema socioecológico e setor estratégico são passíveis de serem submetidos – ameaça climática.

Os sistemas socioecológicos (SSE) foram conceituados no primeiro capítulo. Os estudos em SSE têm canalizado três tipos de visões: (i) como os subsistemas ecológicos podem suprir serviços ecossistêmicos⁵ para as necessidades e bem-estar humano; (ii) como as demandas humanas e a obtenção de recursos ecossistêmicos⁶ podem determinar a integridade do subsistema ecológico, e (iii) como os dois subsistemas podem responder de forma integrada às forças endógenas e exógenas de mudanças do sistema socioecológico (BERRÖUET; MACHADO; VILLEGAS-PALÁCIO, 2018). Nesta última abordagem houve avanços sobre a vulnerabilidade e respostas dos SSE em relação às mudanças climáticas e fenômenos naturais. Na plataforma AdaptaBrasil, os SSE têm sido o grande palco de entendimento sistêmico de vulnerabilidades e riscos associados às possíveis ameaças climáticas, mas considerando um determinado setor estratégico objeto de impacto potencial.

Apesar dos SSE ser um arcabouço sistêmico a ser perseguido, a avaliação de riscos climáticos deve ter um direcionamento para políticas públicas e setores de decisão da sociedade, que, na sua grande maioria, se apresentam de forma setorializada. Além disso, a construção de uma estrutura hierárquica de composição de indicadores e índices é por si um esforço de síntese de um sistema que é complexo. Nesse sentido, a avaliação de riscos climáticos por setores estratégicos é providencial para que a informação possa alcançar os diferentes atores desses setores. Conforme Jones e Boes (2004), a avaliação dos riscos climáticos pode ser calcada na vulnerabilidade do sistema e a partir daí, identificar as ameaças envolvidas. Nesse caso, a vulnerabilidade do sistema é direcionada por Setores Estratégicos (SE) no AdaptaBrasil.

Os objetos concretos de risco de impacto climático que são de interesse do Estado, são, por exemplo, sociedade, recursos naturais, infraestruturas, segurança,

⁵ serviços ecossistêmicos referem-se aos benefícios e às funções ecológicas que sustentam o bem-estar humano, incluindo processos de regulação, provisão, suporte e valores culturais (MEA, 2005; COSTANZA *et al.*, 1997; IPBES, 2019).

⁶ recursos ecossistêmicos correspondem aos bens materiais ou estoques naturais disponibilizados pelos ecossistemas, como água, madeira ou biomassa (MEA, 2005; TEEB, 2010; IPBES, 2019).

ativos, acessos e economia. Tais objetos são passíveis de sofrer impactos negativos relevantes provocados por perturbações climáticas – fator exógeno – e pelas características intrínsecas do objeto de impacto, vulnerabilidade e exposição – fatores endógenos. Cada setor estratégico (SE) do AdaptaBrasil MCTI possui seus objetos de análise de risco climático. Os primeiros SE a serem considerados na plataforma AdaptaBrasil, no ano de 2018, foram Água, Alimentos e Energia, na perspectiva da segurança. Desde então a Plataforma tem buscado priorizar os setores contemplados na Política Nacional de Adaptação do ano de 2016 e, mais recentemente, no Plano Clima – Adaptação (2024/2025), tais como: Agricultura, Recursos Hídricos, Segurança Alimentar e Nutricional, Biodiversidade, Cidades, Gestão de Riscos e Desastre Geohidrológicos, Indústria e Mineração, Infraestrutura (portuária, rodoviária e ferroviária), Povos e Populações Vulneráveis, Saúde e Zonas Costeiras.

Este documento se refere ao SE de Recursos Hídricos que foi desenvolvido pelo INPE em parceria com a ANA para a versão AdaptaBrasil 2.0. O terceiro elemento fundamental para a delimitação do risco climático é o tipo de perturbação ou ameaça climática que está sendo considerada que afeta ou possa afetar o SSE em um dado setor estratégico. A Plataforma apresenta o risco de impacto climático, e sua construção hierárquica de indicadores, para uma ameaça climática específica de forma separada direta, por exemplo, seca, chuvas intensas, ondas de calor, ventos, dentre outros; ou de forma separada indireta, como os eventos hidrológicos. A ameaça climática é codificada na plataforma por um índice final climático, resultante de uma composição de indicadores climáticos, não havendo indicadores temáticos intermediários, conforme ilustração da Figura 8. Na versão AdaptaBrasil 2.0, conforme já explicado anteriormente, a ameaça construída que afeta o Risco de Estresse Hídrico é um produto oriundo de modelagem hidrológica que expressa o Risco de Escassez Hídrica, ao avaliar a disponibilidade hídrica nas vazões de rios devido a interação do sistema hidrológico com a variabilidade climática presente e futura. Este desenvolvimento será tratado em detalhe na próxima seção.

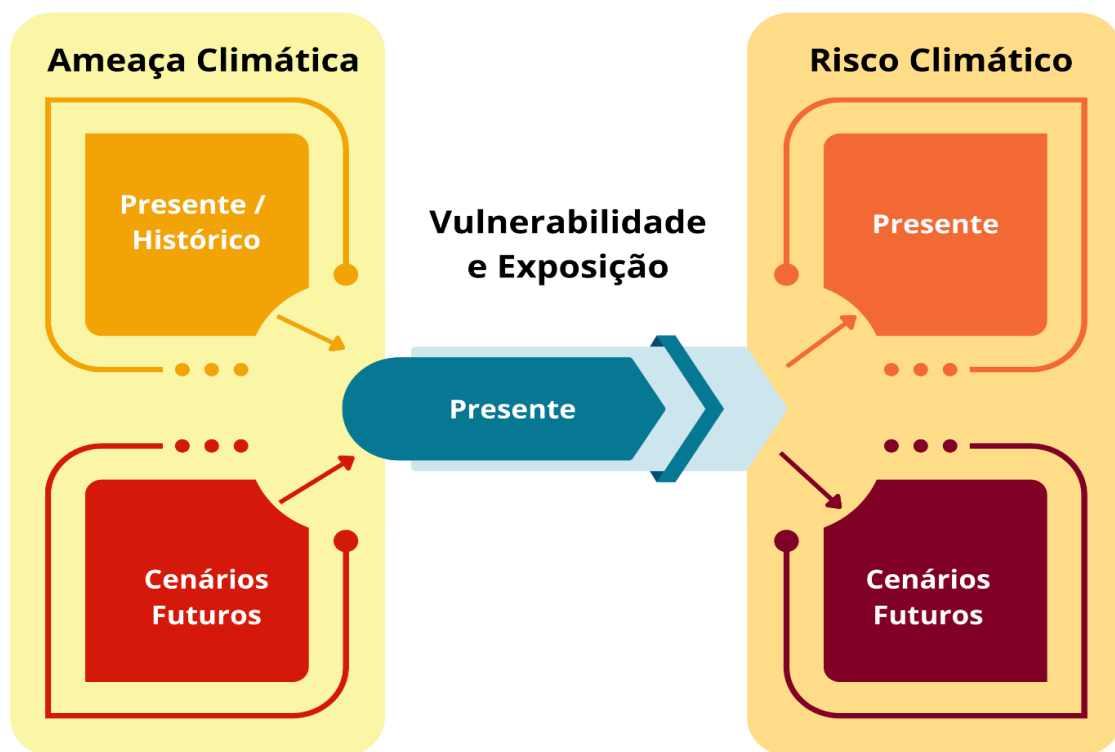
Por fim, cada índice de risco climático na plataforma – nível 1 – deve ser entendido como uma magnitude potencial de impacto climático ao se concretizar o contato do SSE – com sua vulnerabilidade intrínseca - com a perturbação climática – com a sua tendência implícita. Não se deve compreender esse índice como a probabilidade de ocorrência de impacto climático. A construção dos valores de

indicadores e índices de risco climático, que culmina no índice de risco climático, está diretamente associada a um Setor Estratégico e a uma determinada ameaça climática.

4.1 Ameaça de escassez hídrica

No momento, a Plataforma possui um conjunto de indicadores e índices de vulnerabilidade e exposição (indicadores socioecológicos) situados no presente e de ameaças climáticas situados no presente e projetados para o futuro, que se conectam/associam conforme representado na Figura 9.

Figura 9 – Integração das dimensões de ameaça climática com vulnerabilidade e exposição na avaliação do risco climático: presente e cenários futuros.



Fonte: elaborado por Bezerra e Arcoverde (2025).

No contexto dos indicadores socioecológicos, o termo "presente" denota dados oriundos das décadas de 2010 e 2020, levando em consideração a versão mais recente dos dados oficiais disponíveis. Em relação aos dados climáticos, o termo "presente" está vinculado à média do período histórico (baseline) dos modelos climáticos selecionados para o setor (1986-2014), enquanto as projeções abrangem os períodos 2030 (2015-2040) e 2050 (2041-2070).

Para a determinação dos cenários climáticos adotados na Plataforma, foram considerados os cenários de emissões do Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (AR6/IPCC), utilizando o conjunto de modelos do NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6), derivado de modelos gerais de circulação - *General Circulation Model* (GCM) - *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6). Esses cenários incorporam trajetórias plausíveis de concentração de gases, conhecidas como *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs), abrangendo emissões de gases de efeito estufa, emissões de poluentes atmosféricos e mudanças no uso da terra. Os esforços de mitigação são representados pelos cenários SSP2-4.5, caracterizado como intermediário (considerado como Cenário Otimista), e SSP5-8.5, identificado como um cenário de alta emissão de gases de efeito estufa (denominado Cenário Pessimista).

4.1.1 Construção da ameaça de risco de escassez hídrica

A escassez hídrica pode ser entendida no contexto do AdaptaBrasil como uma ameaça que tem origem no clima e que interage com o sistema hidrológico e socioecológico de uma região - ou bacia hidrográfica -, que por sua vez, pode aumentar ou diminuir a escassez hídrica. Desta forma, a escassez hídrica possui um objeto, que é a falta de água ou diminuição prolongada da disponibilidade de água, e um destino, que é o uso humano, em seus diferentes usos.

O risco de escassez hídrica ou da indisponibilidade hídrica, entendido no contexto dos impactos das mudanças climáticas, seria resultante de interações dinâmicas entre as ameaças relacionadas ao clima (por exemplo, aumentos de temperatura, eventos de menor precipitação, alterações no escoamento superficial e na evapotranspiração), com a exposição do sistema hidrológico (ex: bacias hidrográficas, rios, aquíferos etc.). A representação deste fenômeno é complexo e impõe desafios nas escolhas metodológicas, assumindo certos graus de incertezas e limitações para que possam ser trabalhadas (ANA, 2024).

Para estimar os impactos da mudança climática na disponibilidade futura de água, os modelos climáticos globais (MCGs) foram utilizados, porém, por natureza, existe uma simplificação de processos altamente não-lineares (dinâmicos), e há limitações na modelagem principalmente quanto as teleconexões de larga escala que afetam significativamente os extremos hidrológicos (AGHAKOUCHAK *et al.*, 2013;

ASCE, 2018). Devido a estes motivos, a seleção dos MCGs mais adequado é uma fonte também de incerteza, e geralmente é avaliado com base no quão bem eles são capazes de replicar as condições climáticas atuais (ANA, 2024).

Nesse sentido, o trabalho denominado Mudanças Climáticas nos Recursos Hídricos do Brasil desenvolvido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento (ANA, 2024) foi utilizado como base para a construção do índice de risco de escassez hídrica. Conforme descrito neste documento, em escala nacional, a abordagem “*top-down*” é mais adequada para avaliação de disponibilidade hídrica. Essa abordagem, utilizada nesse estudo, envolveu uma melhoria na resolução espacial (“*downscaling*”) das projeções climáticas dos MCGs sob um conjunto de cenários de emissão para fornecer insumos para modelos hidrológicos e de gestão de recursos hídricos estimando impactos potenciais, fornecendo subsídios para definição de estratégias de adaptação.

O estudo da ANA definiu como estratégia metodológica a escolha do tipo de modelagem hidrológica que seria mais adequado para a transformação dos dados de clima em vazão para avaliação da disponibilidade hídrica. Nesse processo, foram considerados diferentes aspectos, tais como, escala do problema, disponibilidade de dados, tempo de execução do estudo, conhecimento da modelagem hidrológica pela equipe da ANA e exigências computacionais. Nesse sentido, optou-se pela modelagem hidrológica menos complexa baseada na hipótese de Budyko (ANA, 2024).

4.1.2 Modelagem hidrológica

A base para geração do índice de ameaça climática de escassez hídrica foi a modelagem hidrológica realizada pela ANA (2024), adaptada para ser incorporada na estrutura metodológica da AdaptaBrasil. Assim, uma das primeiras etapas foi a aproximação entre as metodologias.

A modelagem hidrológica realizada pela ANA é baseada nos métodos de estimativas de elasticidade climática e na hipótese de Budyko (1974) e posteriormente derivado pela equação de Fu (2007). Para alimentar o modelo, dados hidroclimáticos observados (passado e presente) e futuros foram coletados. Os dados observados de referência são oriundos das bases de dados utilizados pela (XAVIER; KING;

SCANLON, 2015). A base HIDRO⁷ contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), reunindo dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos (ANA, 2024). A base XAVIER⁸, corresponde a uma grade regular de 0,25 ° × 0,25 ° de resolução espacial construída a partir de dados interpolados de 9259 estações pluviométricas e 735 estações meteorológicas cobrindo todo o território brasileiro durante o período de 1980-2014 (XAVIER; KING; SCANLON, 2015; 2016). Os dados climáticos projetados de precipitação e evapotranspiração potencial necessários à modelagem hidrológica foram coletados do conjunto de dados NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6)⁹.

Essa abordagem baseada na hipótese de Budyko (Budyko, 1974) quando aplicada a mudança climática, utiliza os conceitos de elasticidade por meio de coeficientes para avaliar a sensibilidade da vazão aos fatores climáticos relevantes. A principal vantagem desse tipo de abordagem, além da parcimônia, é o fato de dispensar a custosa atividade de correção de viés dos dados climáticos dos MCGs, tendo em vista que a abordagem trabalha com valores relativos de mudança (ANA, 2024a). Ainda segundo o relatório da ANA, Budyko (1974) apresentou como a oferta hídrica (representada pela vazão ou precipitação) se relacionava com os componentes básicos do balanço de energia considerando escalas temporais longas (ANA, 2024).

Assim, baseado nas hipóteses levantadas por Budyko e no trabalho de Fu (1981), Zhang *et al.* (2004) derivaram uma equação analítica (Equação 1) no qual incorporaram de forma explícita um parâmetro que consideraria de forma sintética características da bacia que supostamente estariam associadas ao processo de formação das vazões (ANA, 2024).

⁷ <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/>

⁸ <https://utexas.app.box.com/v/Xavier-et-al-IJOC-DATA>

⁹ <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp>

Essa equação, popularmente conhecida como equação de Fu, é expressa por:

$$\frac{E}{P} = 1 + \frac{E_0}{P} - \left[1 + \left(\frac{E_0}{P} \right)^\omega \right]^{\frac{1}{\omega}} \quad (1)$$

Onde:

E corresponde à evapotranspiração real;

P corresponde a precipitação anual, E_0 corresponde a evapotranspiração potencial;

ω é o parâmetro que representa o conjunto das características da bacia, como a vegetação, propriedades do solo, características de relevo e outras características (Zhang et al., 2004). Esse parâmetro ajustável ω nessa equação, altera a proporção de P entre E e Q representando o efeito da soma de todos os processos não englobados em P e E_0 . Tradicionalmente, ω é calculado usando o método dos mínimos quadrados.

Para extrair a elasticidade-clima das vazões com base nas hipóteses de Budyko é necessário inicialmente explicitar a informação da vazão na equação de Fu. Isso é feito a partir da equação do balanço hídrico de longo prazo (Equação 2) e manipulações algébricas na equação de Fu para estimar o escoamento anual (Q) em função da precipitação (P), da evapotranspiração potencial (E_0) e de um parâmetro de controle (ω) que caracteriza as propriedades fisiográficas, climáticas e eco-hidrológicas da otobacia, conforme expresso na Equação 3 (ANA, 2024).

$$P = E + Q \quad (2)$$

Onde:

Q corresponde a vazão Q_{mlt} ou à água que deixa a bacia superficialmente ou subterraneamente;

P representa o volume total de água que chega à bacia atmosféricamente por tipos de precipitação;

E representa a evapotranspiração real que é a perda de água do sistema para a atmosfera por evaporação do solo e corpos d'água, e pela transpiração das plantas.

$$Q = [P^\omega + E_0^\omega] \frac{1}{\omega} - E_0 \quad (3)$$

Por fim, assumindo que as características da bacia que afetam o processo de geração das vazões não mudam ao longo do tempo, ou seja, parâmetro ω é constante, a mudança relativa na vazão de longo termo devido a mudanças relativas à precipitação e evapotranspiração potencial é dado pela Equação 4 (ANA, 2024).

$$\frac{dQ}{Q} = \varepsilon_1 \frac{dP}{P} - \varepsilon_2 \frac{dE_0}{E_0} \quad (4)$$

Onde:

Q = balanço hídrico expresso em valores de vazão média de longo termo (Qmlt);

P = Precipitação; E_0 = Evapotranspiração potencial;

ω = parâmetro que representa o conjunto de características da bacia;

ε_1 e ε_2 = correspondem aos coeficientes de elasticidade-precipitação e elasticidade-evapotranspiração potencial da vazão, respectivamente.

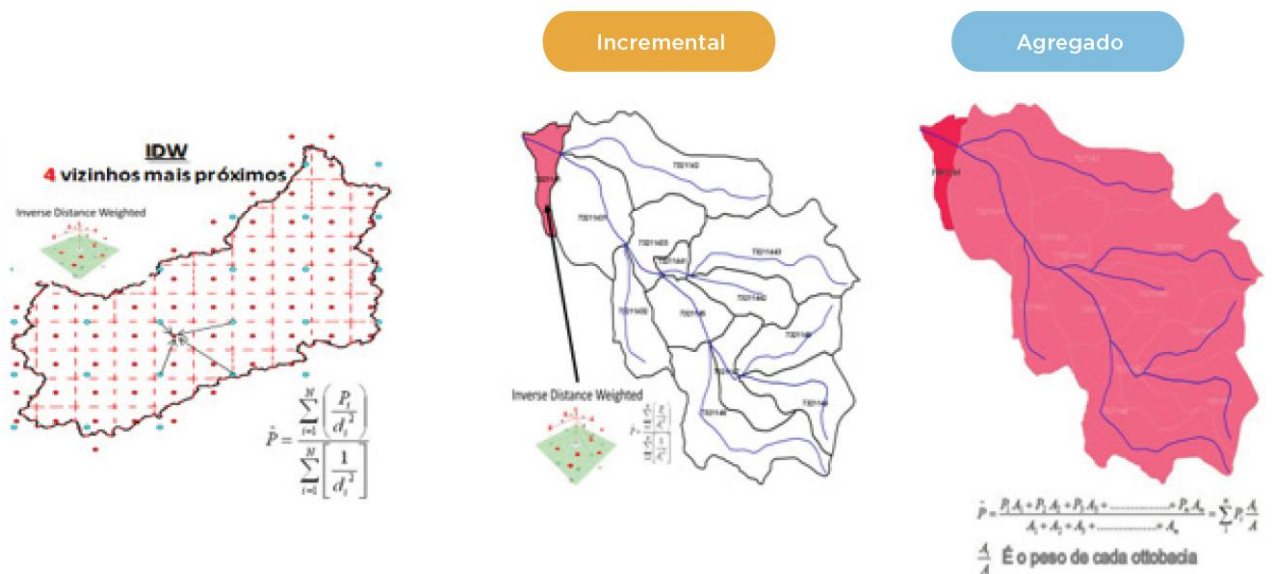
Todos os cálculos relativos à modelagem hidrológica foram realizados para a base hidrográfica otocodificada (BHO) 2017 5k de referência da ANA¹⁰, cujo nível hierárquico das bacias segundo a classificação *Otto Pfafstetter* corresponde ao nível 7. Desta forma, com base em dados climáticos observados (HIDRO e Xavier) e projetados para o futuro (NEXGDDP), foram definidos pela ANA as estatísticas de interesse em todo o Brasil que ajustam e alimentam a modelagem hidrológica. As estatísticas de interesse para análise foram: tamanho da série (n), média (med), desvio padrão (dp), mínimo (min), máximo (max), mediana (q50), centil 25% (q25) e centil 75% (q75) para cada tipo de dado climático, respeitando a resoluções temporais e espaciais de cada dado original (ANA, 2024).

Em seguida, foi realizada a transferência dessas estatísticas para a BHO. O procedimento de transferência utilizado foi o inverso do quadrado da distância (IDW) considerando os 4 vizinhos mais próximos ao ponto de interesse, ou seja, os 4 pontos de grade ou estações mais próximas do centroide de cada ottobacia (que está associado a cada trecho da hidrografia), sendo denominada pela ANA como informação incremental, que representa os valores médios das estatísticas das variáveis relevantes apenas na área de ottobacia. Por fim, para atender a modelagem hidrológica, realizou-se uma agregação da informação incremental de cada estatística considerando toda a área de drenagem de cada ottobacia – calculando a média ponderada de determinada estatística de todas as ottobacias à montante (Figura 10).

¹⁰ Disponível em:

https://dadosabertos.ana.gov.br/datasets/6ca094abfa654e8facde83e8f66acd18_0/about. Acessado em setembro de 2025.

Figura 10 – Procedimento de transferências das estatísticas de interesse dos dados climáticos para a BHO na área incremental e agregada ou total.



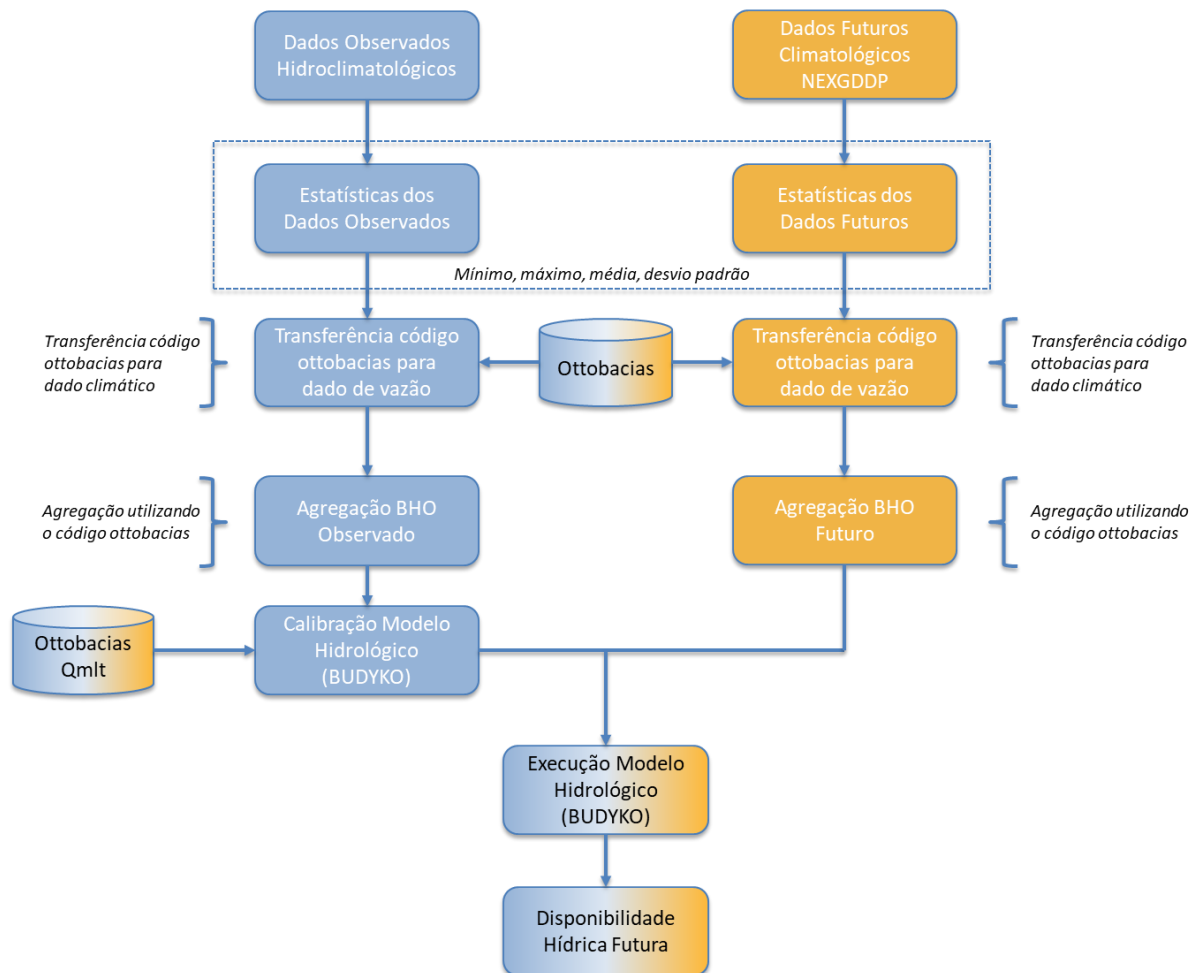
Fonte: adaptado de ANA (2024).

Uma vez obtidas as variáveis brutas de todas as bases de dados climáticos (precipitação (P) e evapotranspiração potencial (E) presente e futuro) para todas as ottobacias do Brasil, estimou-se a disponibilidade hídrica atual disponível na BHO, seguido da calibração e ajustes nos parâmetros do modelo hidrológico baseado na hipótese de Budyko. Por fim, esse modelo ajustado foi aplicado na variação relativa (P e E) do clima futuro em relação ao presente para obtenção das vazões e disponibilidade hídrica futura, dado em valores percentuais negativos ou positivos (%) de variação da vazão no futuro em relação ao *baseline* (ANA, 2024). A Figura 11 mostra o fluxograma de procedimentos metodológicos adotados e são minuciosamente detalhados em ANA (2024).

As saídas do modelo hidrológico correspondem aos valores de vazão média de longo termo (Qmlt) em cada ottobacia para os tempos presentes e futuros. Por meio deste método estima-se as mudanças percentuais da vazão (Qmlt) de uma bacia hidrográfica devido às mudanças na precipitação (P) e evapotranspiração potencial (E), correspondendo a oferta hídrica de uma bacia baseada no balanço hídrico. A disponibilidade hídrica futura (vazões) foi gerada a partir dos dados de precipitação e evapotranspiração potencial para todos os 34 modelos disponíveis do NEX-GDDP-

CMIP6¹¹. No entanto, para adequar a metodologia de índices do AdaptaBrasil foi selecionado um subconjunto para representação dessas projeções no Brasil.

Figura 11 – Esquema metodológico utilizado na avaliação do impacto da mudança climática nos recursos hídricos do Brasil.



Fonte: adaptado de ANA (2024).

A seleção dos modelos mais adequados para representação climática do Brasil, foi realizada com base em uma análise interna de sensibilidade dos MCGs, avaliados por meio de testes estatísticos, que subsidiaram a seleção do subconjunto de 5 modelos climáticos descritos no Quadro 1. Assim, de todos os 34 modelos disponíveis que foram calculados a modelagem hidrológica, selecionaram-se 5 que demonstraram maior aderência estatística e padrão climático aos dados observados de referência, segundo análise interna do INPE (Quadro 1). A partir desta avaliação foi possível

¹¹ Disponível em: <https://nex-gddp-cmip6.s3.us-west-2.amazonaws.com/index.html#NEX-GDDP-CMIP6/>

extrair esse subconjunto de modelos climáticos para a representação da vazão presente e futura, respeitando a construção metodológica proposta por ANA (2024). Sendo geralmente este tipo de abordagem por seleção de conjunto uma estratégia de maior preferência nos estudos de mudanças climáticas (STEINSCHNEIDER; WI; BROWN, 2015).

Quadro 1 – Subconjunto de modelos selecionados do conjunto global (34 modelos) do NEX-GDDP-CMIP6, na qual realizou-se a modelagem hidrológica para representação da disponibilidade hídrica futura.

Modelo	Origem
GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
INM-CM5	Marchuk Institute of Numerical Mathematics of the Russian
MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute Japan Meteorological Agency
NorESM2-MM	Norwegian Earth System Model

Fonte: elaborado por Penha e Pedra (2025).

Importante salientar que mesmo que a abordagem seja considerada uma condição necessária, não implica em confiabilidade absoluta das projeções climáticas realizada por estes modelos (ANA, 2024). Há pouco consenso na comunidade científica sobre como se deve escolher modelos adequados (BORGOMEIO *et al.*, 2018; KUNDZEWICZ; STAKHIV, 2010). Desta forma, todo resultado advindo de projeções climáticas deve ser observado com parcimônia, considerando as incertezas inerentes dos modelos e outros possíveis vieses das escolhas metodológicas, o que não inviabiliza qualquer análise, mas requer ressalvas na interpretação dos resultados.

Outra seleção importante oriunda da modelagem hidrológica foram os recortes temporais e as trajetórias socioeconômicas e climáticas (Quadro 2). Assim, os períodos temporais considerados nesta avaliação foram o histórico ou baseline (1980-2014), período centrado no horizonte 2030 (intervalo médio de 2015 a 2040) e período centrado no horizonte 2050 (intervalo médio de 2041 a 2070).

As trajetórias socioeconômicas selecionadas, combinadas aos níveis de forçantes radiativas, foram o SSP2-4.5 para representar um cenário mais otimista (trajetória de mitigação moderada) e o SSP5-8.5 para representar um cenário mais pessimista (trajetória de altas emissões e aquecimento acentuado). Definidos estes recortes, o passo seguinte foi reinterpretar as saídas do modelo hidrológico e

representar ao nível municipal (recorte de análise da AdaptaBrasil) para gerar, por fim, o índice de ameaça de escassez hídrica.

Quadro 2 – Subconjunto de modelos selecionados do conjunto global (34 modelos) do NEX-GDDP-CMIP6, na qual realizou-se a modelagem hidrológica para representação da disponibilidade hídrica futura.

Recorte temporal	Trajетórias de mudanças climáticas	Períodos
Presente	-	1980-2014
Futuro Otimista 2030	SSP2-4.5	2015-2040
Futuro Pessimista 2050	SSP2-4.5	2041-2070
Futuro Pessimista 2030	SSP5-8.5	2015-2040
Futuro Pessimista 2050	SSP5-8.5	2041-2070

Fonte: elaborado por Penha (2025).

Por fim, as variáveis geradas pela modelagem hidrológica e que foram analisadas para representar a disponibilidade hídrica futura e, portanto, o risco à escassez hídrica, são descritas no Quadro 3. Destas, optou-se por mostrar para o usuário final apenas a variação de mudança da vazão média de longo tempo (ΔQ) que corresponde a ameaça de risco de escassez hídrica.

Quadro 3 – Variáveis oriundas da modelagem hidrológica para representação da disponibilidade hídrica futura.

Variável	Descrição	Equação
ΔE_0	Relação entre a Evap. Potencial Total Anual Média presente (p) e futura (f)	$[E_0(p) - E_0(f)] / E_0(p)$
ΔPr	Relação entre a Precipitação Total Anual Média presente (p) e futura (f)	$[Pr(p) - Pr(f)] / Pr(p)$
ΔQ	Relação entre a Vazão Média de Longo Termo presente (p) e futura (f)	$[Q(p) - Q(f)] / Q(p)$

Fonte: elaborado por Penha (2025).

4.1.3 Representação municipal de risco à escassez hídrica

A representação dos resultados da modelagem hidrológico foi realizado em três etapas principais: (1) representação da vazão no presente; (2) representação da indisponibilidade hídrica (vazão) no futuro; e (3) transformação dos resultados da modelagem de ottobacias para representação do índice de Ameaça municipal. Para cada uma das representações, escolhas metodológicas foram adotadas e são detalhadas a seguir.

A representação espacial da vazão (disponibilidade hídrica), variável Q_{mlt} , no presente foi definida com base no valor médio dos 5 modelos climáticos selecionados, compondo o ensemble, para representar resposta de valor médio de Q_{mlt} (m^3/s) em cada ottobacias e posteriormente calculada a mediana da proporção de cada ottobacias pertencente a um município. Primeiro, este cálculo foi realizado em nível de ottobacias e posteriormente transformado para municípios, seguindo a metodologia desenvolvida pela ANA de ponderação pela demanda e proporção de ottobacias no município.

A representação municipal da indisponibilidade hídrica (vazão) no futuro, variável Δ_{rel} , se deu através de uma sequência de etapas, uma vez que a saída do modelo de vazão futura corresponde a um valor percentual (%) de mudança da disponibilidade no presente em relação ao futuro. Assim, posto o desafio, propôs-se aplicar uma matriz de correspondência, ou Análise de correspondência - um método estatístico para visualizar a relação entre variáveis categóricas em uma tabela - entre as classes do presente de vazão e as classes de vazão no futuro. O método de matriz de correspondência advém da expertise da ANA em estudos pretéritos, como por exemplo, o Índice de Segurança Hídrica (ISH), que utilizou desta abordagem porque permite adotar categorias de análise (avaliação quali-quantitativa), atribuindo limiares de valores para valores quantitativos para reclassificar um dado do tipo contínuo como a vazão (Q_{mlt}) tanto no presente quanto no futuro. A Figura 12 apresenta um resultado abstrato de vazão (Q_{mlt}) para exemplificar como funciona a matriz de correspondência para uma ottobacia fictícia.

Figura 12 - Valores abstratos de 0 a 1 para classes de correspondência da vazão Q_{mlt} (m³/s) no presente (Baixo, Mediano, Alto, Muito Alto e Altíssimo) e da redução na vazão no futuro da variável deltaqrel (%) (N, S0, S1, S2, S3, S4, S5) para ottobacias fictícias inseridas em um município.

	N	S0	S1	S2	S3	S4
Baixo	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Mediano	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Alto	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Muito Alto	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Altíssimo	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5

Condição	Formatação
Se valor <= 0,2	1
Se 0,2 > valor <= 0,4	2
Se 0,4 > valor <= 0,6	3
Se 0,6 > valor <= 0,8	4
Se 0,8 > valor <= 1,0	5

Fonte: elaborado por Penha e Pedra (2025)

O resultado dessa matriz de correspondência advém da definição de limiares críticos para a representação da vazão Q_{mlt} no presente, em categorias que variam de vazão Baixo ao Altíssimo (Quadro 4), e para a mudança na vazão no futuro, variável deltaqrel, que foi realizada com base no fatiamento em classes com valores fixos de redução de vazão no futuro até atingir o limiar crítico de 20% para ambas as trajetórias (SSP2 4.5 e SSP5 8.5), uma vez que o intuito foi identificar situações de escassez hídrica (Quadro 5). Dado o volume de dados e especificidades do regime hidrológico de cada região brasileira, adotou-se a estratégia de definir os limiares críticos de vazão (Q_{mlt} e deltaqrel) para cada bioma brasileiro, considerando as ottobacias inseridos nos respectivos biomas. Para tal, observou-se os histogramas da variável Q_{mlt} no presente de todas as ottobacias em cada bioma (Figura 13) e definiram-se os limiares críticos de vazão de acordo com os intervalos quartis mostrados na Quadro 4.

Desta forma, o uso da matriz de correspondência demanda que sejam classificados em intervalos tanto os valores de vazão no presente quanto no futuro. Para classificar o período presente (baseline) foi utilizada unicamente a primeira coluna (N) que é definida pelos intervalos de limiares críticos de vazão no presente em cada bioma (Quadro 4). Já para os recortes referente as trajetórias de vazão futura

foram utilizadas todas as colunas (N, S0, S1, S2, S3, S4) utilizando os limiares críticos definidos na Quadro 5. Propôs-se aplicar o conhecimento específico da ANA e estatístico na definição destas classes, fazendo uso da matriz para cada bioma brasileiro (com o intuito de conservar a representação relativa das vazões em cada região brasileira).

Quadro 4 – Limiares críticos, baseado nos intervalos quartis, para representação das classes de vazão presente (Qmlt), em volume (m³/s), para todas as otobacias de cada bioma.

Classe	Amazônia	Cerrado	Caatinga	Mata Atlântica	Pantanal	Pampa
Baixo (Mínimo - 1º Quartil)	de 72,84 até 544,94 m ³ /s	de 1,89 até 154,84 m ³ /s	de 1,89 até 16,71 m ³ /s	de 19,86 até 212,86 m ³ /s	de 19,86 até 71,90 m ³ /s	de 615,89 até 640,49 m ³ /s
Mediano (1º Quartil - 2º Quartil)	de 544,94 até 761,90 m ³ /s	de 154,84 até 274,67 m ³ /s	de 16,71 até 35,00 m ³ /s	de 212,86 até 391,04 m ³ /s	de 71,90 até 72,84 m ³ /s	de 640,49 até 645,35 m ³ /s
Alto (2º Quartil - 3º Quartil)	de 761,90 até 924,32 m ³ /s	de 274,67 até 387,89 m ³ /s	de 35,00 até 74,10 m ³ /s	de 391,04 até 507,72 m ³ /s	de 72,84 até 184,02 m ³ /s	de 645,35 até 650,27 m ³ /s
Muito Alto (3º Quartil - 4º Quartil)	de 924,32 até 1256,39 m ³ /s	de 387,89 até 507,09 m ³ /s	de 74,10 até 93,97 m ³ /s	de 507,72 até 700,09 m ³ /s	de 184,02 até 210,97 m ³ /s	de 650,27 até 726,90 m ³ /s
Altíssimo (4º Quartil - Máximo)	de 1256,39 até 2840,16 m ³ /s	de 507,09 até 1284,77 m ³ /s	de 93,97 até 334,19 m ³ /s	de 700,09 até 1284,77 m ³ /s	de 210,97 até 1009,15 m ³ /s	de 726,90 até 884,58 m ³ /s

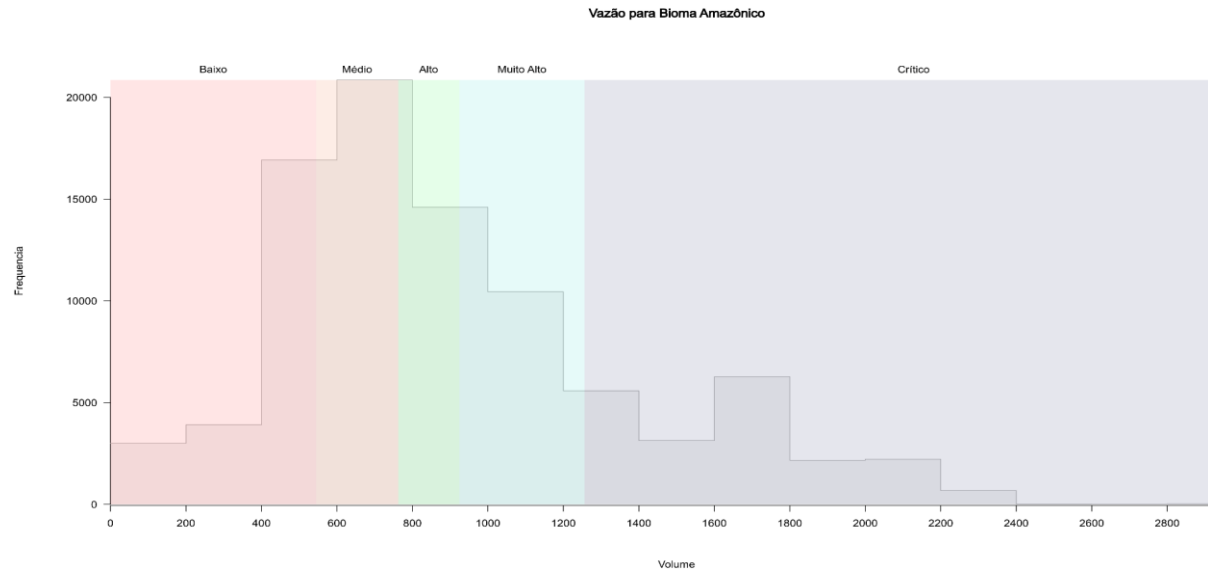
Fonte: elaborado por Penha e Pedra (2025).

Quadro 5 - Intervalos de classes de mudança de alteração na vazão do futuro (deltaqrel).

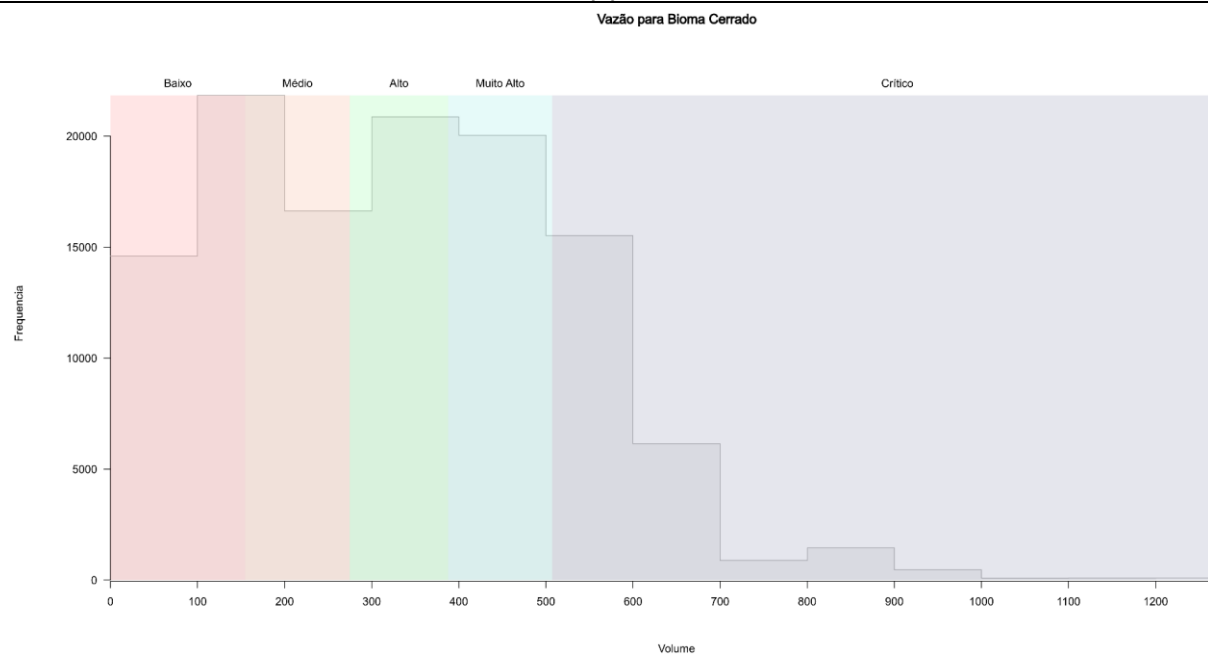
Classe	Nome da classe	Alteração percentual da vazão no futuro
N	Normalidade (Sem escassez hídrica)	valores positivos até 0%
S0	Redução Muito Leve da vazão (Muito leve)	0% - 5%
S1	Redução Leve da vazão (Leve)	5%- 10%
S2	Redução Moderada da vazão (Moderada)	10% - 15%
S3	Redução Intensa da vazão (Alta)	15 - 20%
S4	Redução Extrema da vazão (Muito alta)	acima de 20%

Fonte: elaborado por Penha e Pedra (2025).

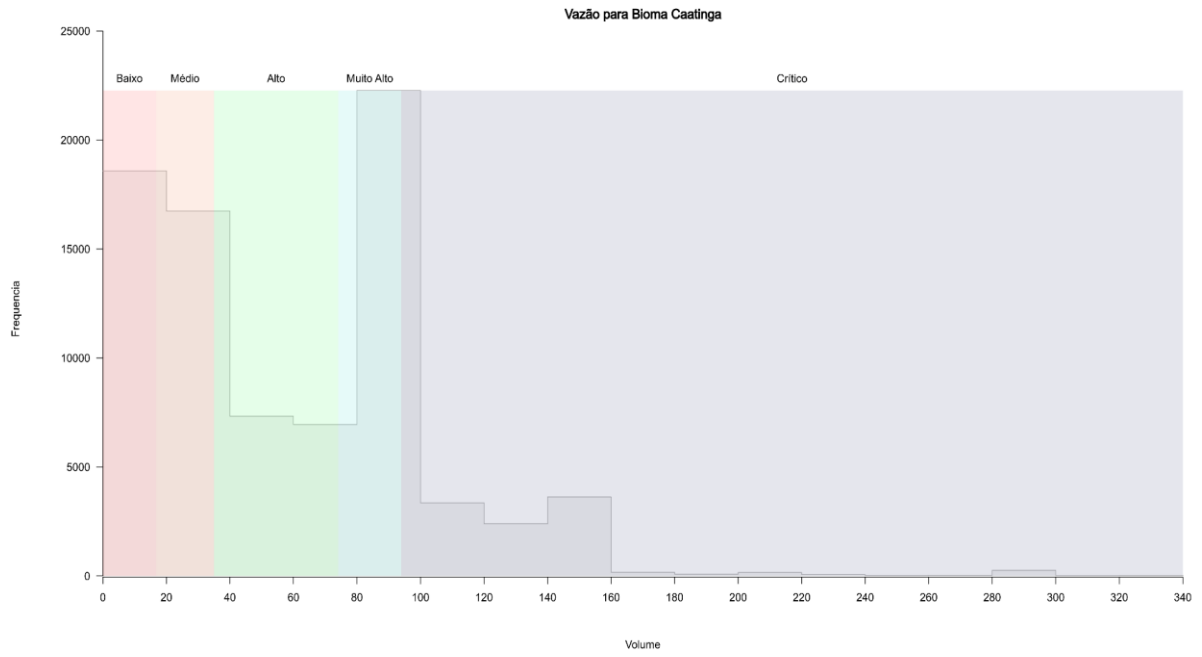
Figura 13 – Histogramas utilizados para definir os limiares críticos, baseado nos intervalos quartis, para representação das classes de vazão presente (Qmlt), em volume (m³/s), para todas as otobacias de cada bioma: (1) Amazônia; (2) Cerrado; (3) Caatinga; (4) Mata Atlântica; (5) Pantanal; (6) Pampa.



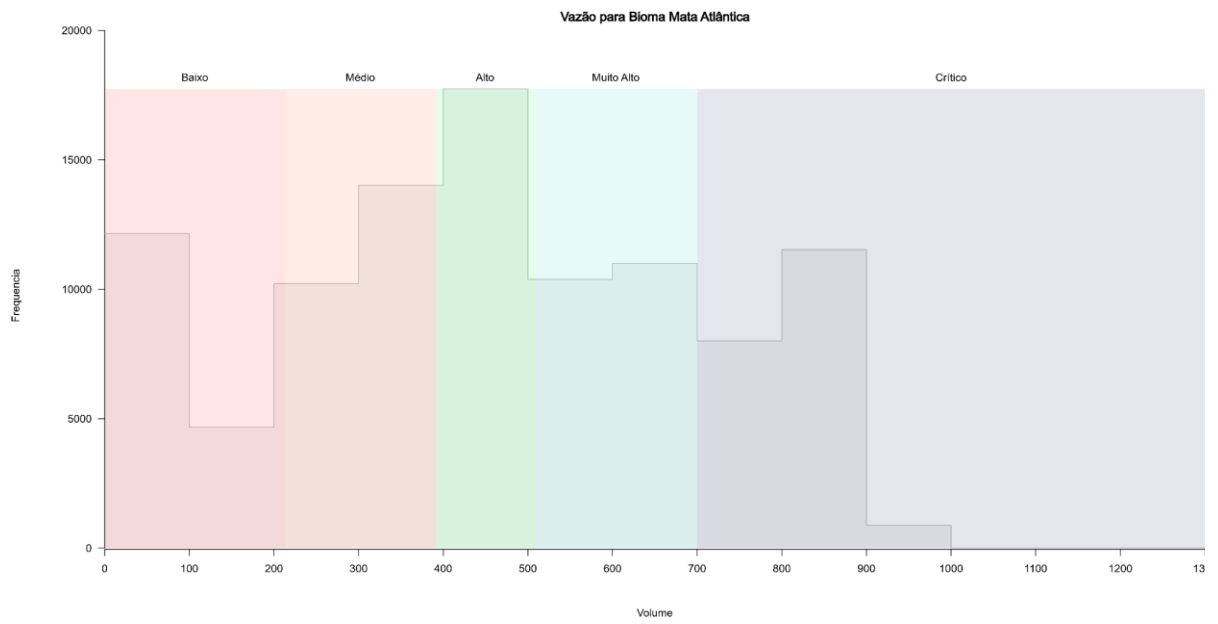
(1)



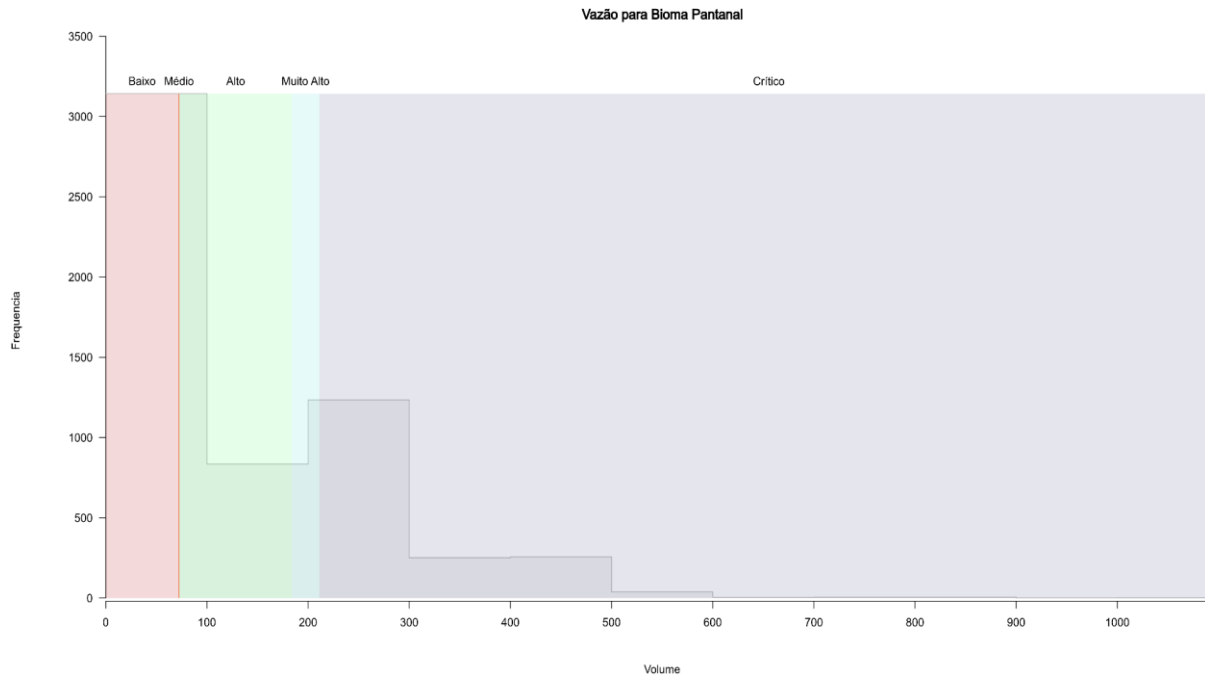
(2)



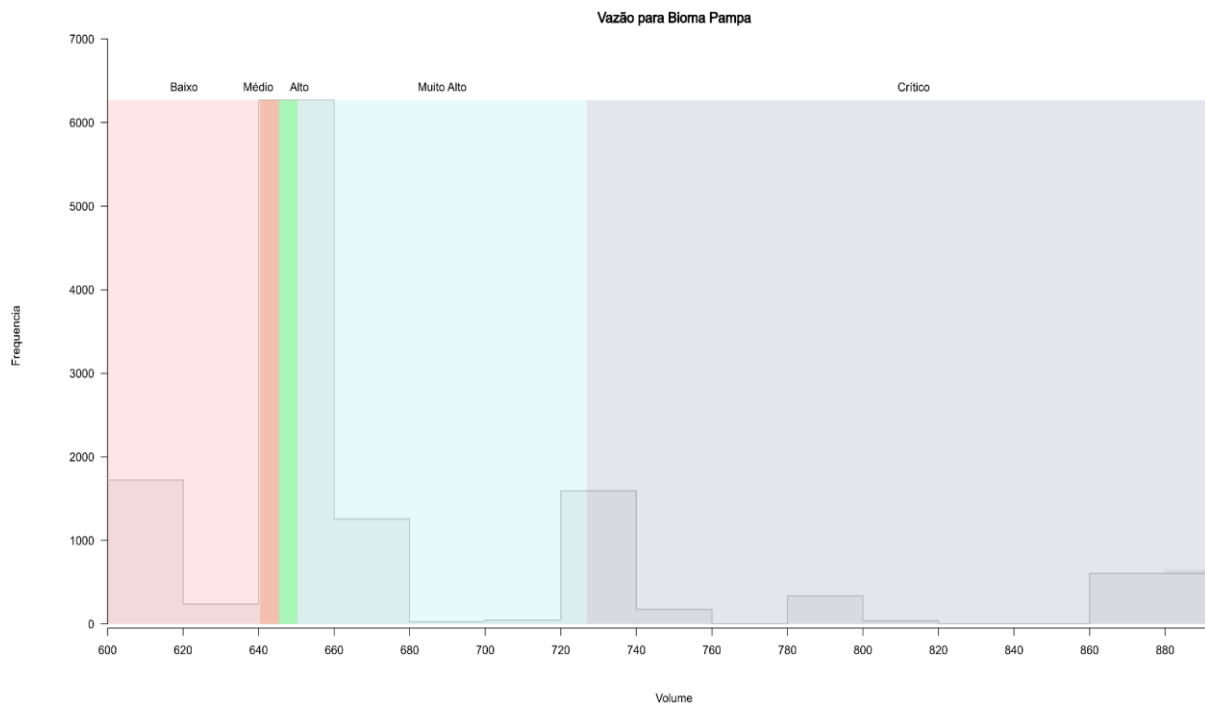
(3)



(4)



(5)



(6)

Fonte: elaborado por Penha (2025).

Uma vez aplicada a matriz de correspondência para cada uma das ottobacias contidas em um bioma, extraiu-se as informações relativas à disponibilidade hídrica no presente e futuro (escassez hídrica) para cada município. Para cada município,

aplicou-se um método de conversão dos valores calculados de disponibilidade hídrica nas ottobacias para município, detalhado a seguir.

O método de transformação de valores calculados em ottobacias para municípios é composto por duas etapas principais: (1) associação de cada ottobacias com o município correspondente, respeitando a proporção de área de cada ottobacia inserido no município; (2) ponderação do valor proporcional da ottobacia no município pela demanda hídrica existente na ottobacia.

4.1.4 Associação da ottobacia com os municípios

A estimativa de áreas dos municípios inseridas em cada ottobacia foi realizada a partir do cruzamento dos arquivos vetoriais das ottobacias (BHO) com os limites municipais da Base Cartográfica do IBGE, utilizando linguagem de programação em R. A interseção espacial entre as duas camadas, isto é, entre os polígonos de ottobacias e os polígonos do município, foi realizada utilizando o critério de pertencimento da proporção de área de uma ottobacia dentro dos limites municipais (Figura 14).

A proporção de área e de demanda hídrica da ottobacia dentro de cada município foi sempre considerado nas ponderações e agregações dos indicadores simples cuja origem dos dados eram de uma camada de ottobacias, aplicando, quando necessário, a um indicador o método de agregação no município considerando a média ponderada pelas demandas de cada ottobacia e do total de todos os trechos associados ao município (Equação 5). Assim, as ottobacias foram associadas aos municípios, baseando-se tanto no valor de demanda em cada ottobacia¹² associado a uma fração do município, quanto a proporção de área de cada município – permitindo a agregação de qualquer valor bruto calculado em nível de ottobacia (BHO) obter uma representação de valor único municipal – conservando as características do dado gerado nas BHO.

$$M = \sum \frac{\text{Área}_{BHO}}{\text{Área}_{Tot}} \times \frac{\text{Dem}_i}{\text{Dem}_{Tot}} \quad (5)$$

Onde:

M corresponde ao valor único de representação municipal;

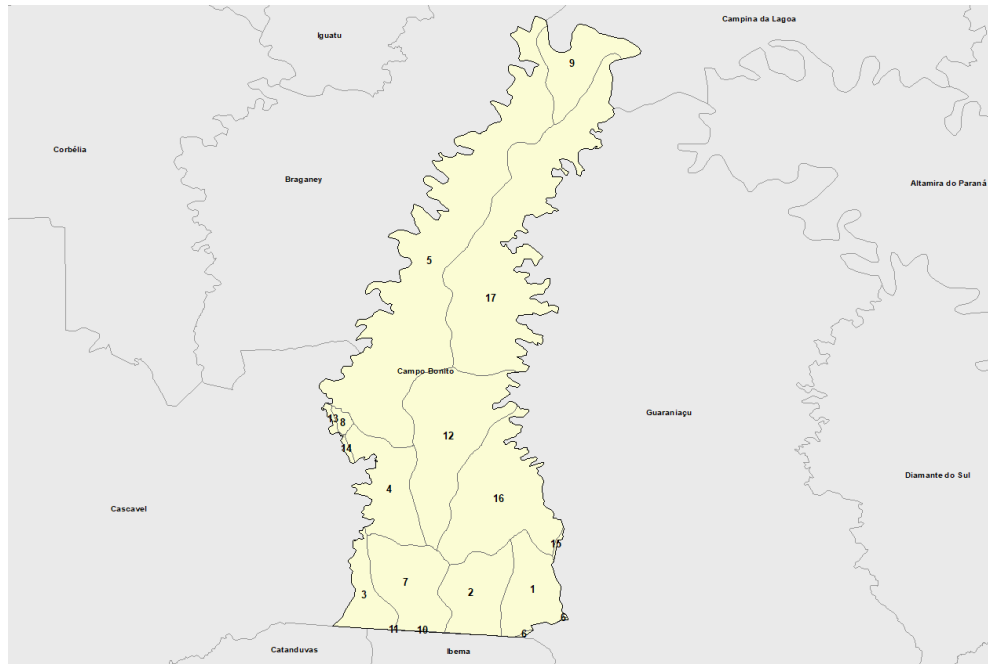
Área_{BHO} é a fração de área de ottobacia (BHO);

Área_{Tot} corresponde à área total da ottobacia;

¹² Demanda hídrica oriunda do dado denominado “Base_Demandas_BHO_ano2023.gpkg” que se refere ao saldo total de vazão de retirada (m²/s) nas ottobacias brasileiras fornecido pela ANA

Dem_i e a fração de demanda hídrica de uma ottobacia;
 Dem_{Tot} corresponde à demanda hídrica total da ottobacia.

Figura 14 - Ilustração da intersecção das ottobacias inseridas e associadas no município de Campo Bonito-PR.



Fonte: elaborado por Penha (2025).

4.1.5 Agregação dos valores brutos da ottobacia nos municípios

A partir dos valores associados de cada município com a ottobacia que continha os resultados da vazão, efetuou-se a agregação ottobacia-município, ponderando cada trecho de ottobacia pela estimativa proporcional da demanda hídrica em cada ottobacia. Baseado no valor de demanda em cada ottobacia associado a uma fração do município, agrega-se os valores brutos calculados em cada ottobacia associados a proporção de área de cada município, por mediana ou moda a fim de representar um valor único municipal. Desta forma, respeitando os cálculos efetuados com maior granularidade espacial (escala de maior detalhe) nas ottobacias, porém representando municipalmente as dinâmicas hidrológicas em todo o território.

4.2 Risco de estresse hídrico

O Risco de impacto das mudanças climáticas no balanço hídrico dos sistemas socioecológicos em função do estresse hídrico, ou simplesmente risco de estresse hídrico, se caracteriza quando o balanço hídrico dos recursos hídricos é deficitário, isto significa que o saldo de oferta e demanda da água em uma determinada localidade é negativo, ou seja, o uso humano da água excede o volume de água disponível, sendo incapaz de oferecer uma segurança hídrica para os diversos usos da água, inclusive, o abastecimento humano.

O Risco de estresse hídrico é resultante da interação entre as três dimensões (Ameaça, Vulnerabilidade e Exposição), considerando a Ameaça como o saldo negativo de vazão (indisponibilidade hídrica) nas bacias hidrográficas, que configura o risco relacionado à escassez hídrica, conforme detalhado na seção anterior. A componente de Vulnerabilidade, por sua vez, explicita as características do sistema socioecológico propensas a sofrer dano; e a Exposição, explicita os elementos em superfície diretamente impactados, como, por exemplo, os usuários dos recursos hídricos. Para composição do índice de Risco de estresse hídrico aplicou-se uma matriz de correspondência entre as dimensões de Ameaça de risco de escassez hídrica, Vulnerabilidade e Exposição conforme ilustra a Figura 15.

Figura 15 - Matriz de correspondência entre as dimensões de Ameaça de Risco de escassez hídrica e Vulnerabilidade e Exposição para a construção do Risco de Estresse Hídrico.

Dimensões do Risco de Estresse Hídrico		Classes dos índices de Vulnerabilidade e Exposição					
		Muito baixo	Muito baixo	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
Classes de Ameaça	Sem escassez hídrica	0,00	0,01 – 0,19	0,20 - 0,39	0,40 – 0,59	0,60 – 0,79	0,80 – 1,00
	Muito leve	0,01 – 0,19					
	Leve	0,20 – 0,39					
	Moderada	0,40 – 0,59					
	Alta	0,60 – 0,79					
	Muito alta	0,80 – 1,00					

Fonte: elaborado por Penha (2025).

Nessa avaliação, o estresse hídrico é entendido como a condição em que o sistema socioecológico é afetado pela escassez de água, resultante de um déficit hídrico prolongado ou abrupto. Esse déficit pode ocorrer devido à redução da precipitação por um ou mais períodos consecutivos (como estações do ano), comprometendo o equilíbrio entre a oferta e a demanda de recursos hídricos e tornando-o deficitário. O estresse hídrico resulta em perdas econômicas e sociais significativas para diversos setores, desde a agricultura, abastecimento humano, indústrias, energia ao turismo, provocando efeitos profundos nas comunidades locais. Déficits mais frequentes implicarão em aumento de custos para a sociedade, necessitando de estratégias de adaptação por parte dos usuários de água (ANA, 2024).

Nesta seção, para fins didáticos, a metodologia de obtenção dos dados de vulnerabilidade e exposição e cálculo hierárquico de valores até a obtenção do risco de estresse hídrico foi dividida em quatro etapas: (4.2.1) Identificação e pré-seleção dos indicadores candidatos; (4.2.2) Construção numérica e seleção dos indicadores; (4.2.3) Cálculo dos indicadores, índices parciais e final; e (4.2.4) Cálculo dos fatores influenciadores. As fases de identificação e construção numérica de indicadores simples e temáticos e de índices seguem vários preceitos metodológicos de composição de indicadores e índices de Becker *et al.* (2019) e OCDE (2008).

4.2.1 Identificação e pré-seleção dos indicadores candidatos

Inicialmente, foi realizado um levantamento de indicadores candidatos a partir de estudos científicos já realizados para o Brasil, apoiados em artigos e publicações técnicas que contemplasse as exigências teóricas e operacionais referentes aos aspectos de vulnerabilidade, impacto e adaptação associados ao tema. Todavia, observou-se alguns requisitos mínimos de ordem técnica: (1) dados disponíveis em fontes oficiais e públicas; (2) representatividade em escala municipal (preferencialmente) e (3) escala temporal passível de atualização.

Foram considerados os indicadores que já foram construídos e validados no SE de Recursos Hídricos em sua primeira versão (1.0), como uma pré-seleção de indicadores para esta versão (2.0). Essa pré-seleção de indicadores foi apresentada a em oficinas com atores chave entre setembro e dezembro de 2023, com a participação de representantes do Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e da Agência Nacional

de Águas e Saneamento Básico (ANA). Nesse período um total de 2 reuniões e 3 workshops foram realizados de modo a selecionar os indicadores mais adequados para compor o Setor de Recursos Hídricos atual. Nas referidas ocasiões, os especialistas foram convidados a contribuir com a seleção e a alocação mais adequada dos indicadores nas respectivas dimensões, levando em consideração a caracterização do setor estratégico analisado e sua relevância nacional e/ou regional.

O sistema de índices e indicadores utilizado para a avaliação do risco em recursos hídricos, pela própria característica multidisciplinar do impacto, não somente equaciona as forçantes relacionadas ao clima, mas inclui nas análises fatores socioecológicos pertinentes. Desta forma, temáticas relacionadas ao abastecimento humano, a eficiência de uso da água, o balanço hídrico relacionado a atividades produtivas dependentes do uso da água, fatores de degradação ambiental, da qualidade da água, da capacidade de armazenamento de água, bem como, políticas e gestão para recursos hídricos e perfil de renda da população foram contemplados pelo universo de indicadores elencados.

O banco de dados construído reuniu informações provenientes de fontes secundárias, extraídas de bases institucionais consolidadas. Para cada variável considerada, foi realizada uma análise rigorosa da qualidade e da consistência dos dados disponíveis, assegurando a confiabilidade das informações utilizadas. Como resultado, o banco passou a integrar conteúdos quantitativos e qualitativos robustos, aptos a sustentar uma avaliação técnica precisa e detalhada. Essa base sólida de dados constitui um pilar essencial para o desenvolvimento das etapas subsequentes do estudo.

Entre as principais instituições consultadas estão:

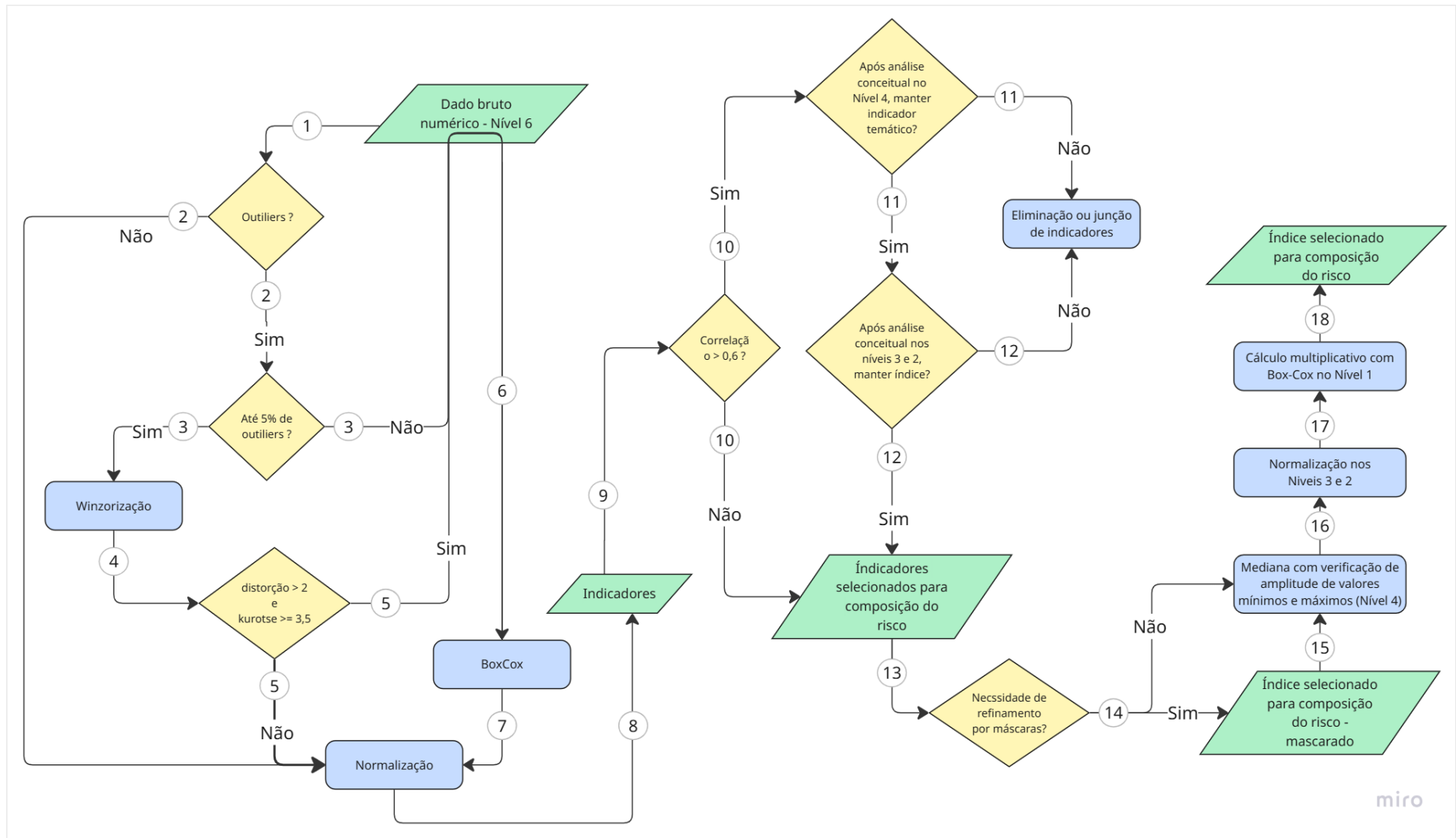
- Agência Nacional de Águas (ANA);
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE);
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE);
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Solos (Embrapa Solos);
- Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)/Ministério das Cidades;
- Portal de informações sobre Saúde (DATASUS)/Ministério da Saúde;
- Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil (SEDEC)/Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional;

- Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento/Universidade Federal de Goiás (Lapig/UFG);
- Portal da Transparência da Controladoria-Geral da União (CGU); e
- Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço dos Estados Unidos (NASA).

4.2.3 Construção numérica e seleção dos indicadores

A construção numérica dos indicadores simples, que compõem as dimensões de vulnerabilidade e exposição, seguiu os procedimentos metodológicos representados na Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma das etapas de construção numérica e seleção dos indicadores simples do SE Recursos Hídricos.



Fonte: elaborado por Arcoverde e Barreto (2025).

A geração dos indicadores simples obedece a um protocolo sistemático de transformações numéricas aplicadas aos dados brutos de entrada. Esses dados são classificados em duas categorias: dados discretos (identificados como scores) e dados contínuos (numéricos).

No caso dos dados discretos, os valores são diretamente atribuídos com base em limites definidos para cada indicador, geralmente variando entre um mínimo e um máximo — comumente 0 e 1, respectivamente. No entanto, esses limites podem ser ajustados conforme a lógica de associação entre o desempenho do indicador e o tema ou dimensão a que pertence. Por exemplo, podem ser utilizados limiares como 0,3 para o valor mínimo e 0,7 para o valor máximo. Nesses casos, o indicador simples recebe esses valores diretamente, sem a necessidade de outras transformações numéricas.

Os dados numéricos passaram por etapas sucessivas de verificação de outliers, aplicação de winsorização total (quando necessário) e avaliação de curtose e distorção. Quando identificadas distorções, aplica-se a transformação Box-Cox antes da normalização final. Esse fluxo metodológico assegura a consistência estatística e a comparabilidade entre os indicadores utilizados na composição das dimensões de análise. Os critérios individuais de aplicação de cada etapa serão explicados abaixo.

a) Identificação e tratamento de valores outliers

O cálculo dos indicadores em cada subsetor passa por um tratamento inicial que verifica a presença de outliers nos dados, ou seja, valores que se encontram fora do padrão normal de uma distribuição (SMITI, 2020). A existência de valores extremos em uma variável pode comprometer a precisão dos procedimentos estatísticos, causar perda de informações relevantes ou até distorcer o resultado final.

O método consiste na substituição dos valores extremos pelos valores válidos mais próximos dentro dos limites definidos pelo intervalo interquartil (IQR). Ele é recomendado principalmente quando os outliers correspondem a uma pequena proporção do total de observações — aproximadamente até 5% das unidades.

A identificação de outliers foi realizada com base no método do intervalo interquartil (IQR), uma técnica robusta e amplamente utilizada em análises estatísticas. As fórmulas aplicadas (Equação 6) são descritas a seguir:

$$IQR = Q3 - Q1 \quad (6.1)$$

$$Lim_{inf} = Q1 - 1,5 * IQR \quad (6.2)$$

$$Q1 = PERCENTIL(X_1: X_n; 0,25) \quad (6.3)$$

$$Lim_{sup} = Q3 + 1,5 * IQR \quad (6.4)$$

$$Q3 = PERCENTIL(X_1: X_n; 0,75) \quad (6.5)$$

Onde:

IQR é o valor do intervalo interquartil;

Lim_{inf} é o valor do limite inferior para identificação de outliers;

Lim_{sup} é o valor do limite superior para identificação de outliers;

Q1 é o valor médio do primeiro quartil;

Q3 é o valor médio do terceiro quartil;

X_1 é o valor da variável X no primeiro município da série;

X_n é o valor da variável X no último município da série.

Valores que ultrapassam esses limites são classificados como outliers estatísticos e, portanto, passíveis de tratamento. Neste processo foi utilizada a técnica de Winsorization, onde valores situados acima do limite superior do intervalo interquartil (IQR) foram ajustados para o próprio valor deste limite. Da mesma forma, valores que se encontram abaixo do limite inferior do IQR foram redefinidos para o limite inferior correspondente (Equação 7). Assim:

$$I_{jp} = Lim_{sup} \quad e \quad I_{jm} = Lim_{inf} \quad Eq.7$$

Este procedimento garante um tratamento criterioso de valores atípicos, equilibrando a preservação da informação original com a necessidade de manter a robustez e a confiabilidade dos indicadores utilizados nas análises.

A aplicação desse método mostrou-se adequada ao contexto, dado que as séries de dados associadas a cada subsetor frequentemente apresentam distribuições não normais, refletindo a variabilidade inerente a fatores climáticos, econômicos e sociais.

b) Avaliação de curtose e distorção dos dados e aplicação do Box-Cox

A avaliação da distribuição dos dados é uma etapa fundamental para garantir a consistência estatística dos indicadores utilizados, especialmente em processos que envolvem normalização e combinação de variáveis. Nesse contexto, foram analisadas

duas medidas descritivas essenciais: Distorção (ou assimetria) e curtose, que permitem avaliar a forma da distribuição dos dados em relação à distribuição normal.

A distorção mede o grau de simetria da distribuição de uma variável em torno de sua média. Uma distribuição perfeitamente simétrica apresenta valor de assimetria igual a zero. Valores positivos indicam que a cauda da distribuição está deslocada para a direita (assimetria positiva), enquanto valores negativos indicam deslocamento para a esquerda (assimetria negativa). Assimetrias acentuadas podem comprometer a interpretação e a robustez de análises estatísticas baseadas em pressupostos de normalidade, além de indicar concentração de valores em um dos extremos da série.

A curtose, por sua vez, está relacionada à altura e à forma da curva da distribuição. Quando uma distribuição possui uma aparência semelhante à da distribuição normal, diz-se que ela tem uma curtose padrão (valor igual a 3). Valores superiores a 3,5 indicam distribuições com curvatura muito alongada e maior concentração de valores extremos nas caudas (leptocúrticas), enquanto valores inferiores podem indicar distribuições mais achatadas (platicúrticas). Curtoses elevadas sugerem variabilidade atípica que pode influenciar desproporcionalmente os resultados e obscurecer padrões relevantes.

Além dessas medidas, a presença de outliers tem papel importante na decisão de transformar os dados. A transformação Box-Cox é especialmente indicada quando a distribuição apresenta forte assimetria, caudas pesadas e elevada proporção de valores extremos. Isso porque os outliers, quando numerosos, afetam significativamente a média e a variância, prejudicando análises que dependem desses parâmetros. Nessas situações, técnicas simples como a *Winsorization* podem não ser suficientes para corrigir as distorções da distribuição, sendo necessário aplicar uma transformação mais abrangente, como a Box-Cox, que suaviza o impacto dos valores extremos e melhora a aproximação da distribuição à normalidade.

A aplicação da transformação Box-Cox é realizada nos dados brutos (Nível 6), considerando alguns critérios presentes nos dados que já passaram por *winsorization*:

- A proporção de outliers deve ser superior a 5%, indicando que o simples tratamento por *Winsorization* não seria suficiente para estabilizar a distribuição;

- O valor de distorção deve estar acima de 2 e valor de curtose deve ser superior a 3,5, evidenciando uma distribuição inclinada e sinalizando a presença de caudas extremas, respectivamente.

Indicadores que atendem o primeiro ou o segundo critério são submetidos à transformação Box-Cox, com o objetivo de melhorar a aderência à normalidade e aumentar a comparabilidade entre variáveis. Esse procedimento contribuiu significativamente para a homogeneização do banco de dados e para a confiabilidade das análises posteriores.

c) Normalização dos dados

Para garantir a consistência e a comparabilidade dos dados, aplica-se a normalização, transformando-as em uma escala que varia entre zero e um. Este procedimento faz parte do processo de composição de indicadores, pois gera uma unidade comum (adimensional) e uma escala de valores comum. Isso facilita a comunicação, a comparação e a composição de diferentes indicadores, possibilitando a construção de uma hierarquia de classes de risco de impacto para os municípios estudados. Assim, valores mais próximos de zero indicam situações de menor risco, enquanto valores mais próximos de um representam condições mais críticas, conforme a metodologia adaptada de Lima *et al.* (2009). Nesta perspectiva, para a normalização das variáveis selecionadas utilizou-se a seguinte expressão matemática, quando o indicador tem relação direta com a dimensão a que pertence:

$$I_{ji} = \frac{I_{ai} - I_{jm}}{I_{jp} - I_{jm}} \quad (7)$$

Onde:

I_{ji} é o valor padronizado do indicador j no i -ésimo município;

I_{ai} é o valor do indicador no i -ésimo município;

I_{jp} representa o valor do indicador j no município em pior situação;

I_{jm} é o valor do indicador j no município em melhor situação.

Em algumas situações, o indicador pode apresentar uma relação inversa com a dimensão que ele representa, ou seja, valores mais elevados podem reduzir o valor final do índice ou indicador temático. Nesses casos, é necessário realizar um ajuste

nos dados normalizados para garantir que eles estejam alinhados com a respectiva dimensão de risco climático. Esse ajuste visa facilitar a interpretação do indicador, de modo que os maiores valores sempre reflitam um aumento no risco da dimensão à qual o indicador está associado, tornando a leitura mais intuitiva e coerente.

d) Análise de correlação dos indicadores candidatos

A análise de correlação entre os indicadores candidatos teve como objetivo identificar possíveis redundâncias e aprimorar a qualidade e parcimônia do conjunto final de variáveis. Após a construção e normalização do banco de dados preliminar, foi aplicada a correlação de *Spearman* entre os pares de indicadores, a fim de detectar sobreposições informacionais. Coeficientes de correlação iguais ou superiores a 0,6 foram considerados indicativos de alta correlação, sinalizando potenciais redundâncias e, portanto, a necessidade de análise para possível exclusão (BECKER *et al.*, 2019).

A seleção dos indicadores a serem excluídos foi orientada por três critérios hierárquicos e objetivos, com o intuito de preservar tanto a representatividade temática quanto a integridade das dimensões analíticas?

- **Critério 1:** avaliação da correlação entre indicadores entre diferentes dimensões, buscando eliminar redundâncias internas sem comprometer a coerência conceitual do grupo;
- **Critério 2:** avaliação da correlação entre indicadores pertencentes a um mesmo grupo temático, buscando eliminar redundâncias internas sem comprometer a coerência conceitual do grupo;
- **Critério 3:** avaliação da totalidade da hierarquia de indicadores, permitindo a exclusão de variáveis com menor relevância relativa na estrutura geral do modelo.

Como resultado desse processo de filtragem cuidadoso e técnico, apenas um número restrito de indicadores foi excluído, garantindo a robustez e a consistência do modelo analítico.

A lista final dos indicadores selecionados, organizados por subsetor, encontra-se detalhada no Apêndice A.

e) **Elaboração do indicador simples**

Os indicadores simples foram calculados diretamente a partir dos dados brutos, utilizando os procedimentos estabelecidos, ilustrados na Figura 16. A composição hierárquica final pode ser observada no Apêndice A.

Os indicadores simples, após devidamente ajustados e harmonizados em escala municipal, tornam-se os insumos fundamentais para a construção dos demais níveis hierárquicos. A próxima etapa envolve a agregação estruturada desses indicadores simples dentro de seus respectivos grupos temáticos, respeitando a lógica hierárquica do modelo conceitual adotado, de modo a permitir o cálculo coerente dos índices parciais, índices de vulnerabilidade e exposição e, por fim, do índice final de risco de impacto.

4.2.3 Cálculo dos demais níveis hierárquicos

No SE de Recursos Hídricos no AdaptaBrasil 2.0, adotou-se uma estrutura hierárquica composta por cinco níveis ou por quatro níveis principais, além dos indicadores simples: a) Indicadores temáticos (nível 5), que agrupam indicadores simples segundo temas específicos (nível 4); b) Índices parciais de vulnerabilidade, representados pelos componentes de Sensibilidade e Capacidade Adaptativa, que refletem dimensões complementares da vulnerabilidade (nível 3); c) Índices das dimensões do risco, que integram os índices de vulnerabilidade e de exposição (nível 2); d) E, por fim, o Índice de Risco de Impacto Final, que consolida todas as dimensões anteriores, oferecendo uma visão integrada do risco climático enfrentado pelos municípios (nível 1).

A principal finalidade dessa estrutura é facilitar a análise e a gestão de fenômenos complexos, sintetizando grandes volumes de dados em métricas agregadas. Esse processo de simplificação, realizado por meio de métodos estatísticos e técnicas específicas de agregação, é essencial para apoiar decisões estratégicas, sobretudo em contextos marcados por vulnerabilidades sociais e riscos climáticos.

A construção dos indicadores temáticos e dos índices nos níveis superiores seguiu os procedimentos metodológicos ilustrados na Figura 16.

A seguir, são descritas as etapas e critérios adotados no cálculo de cada nível hierárquico, com exceção dos indicadores simples, já tratados no item 4.2.2. Cada etapa foi cuidadosamente planejada para assegurar coerência metodológica, consistência estatística e aderência temática ao contexto do risco climático analisado.

a) Indicadores temáticos

Os indicadores temáticos foram construídos a partir da mediana dos valores dos indicadores simples que os compõem. Esse procedimento foi adotado para assegurar que os valores representassem de forma robusta o comportamento central dos dados, minimizando a influência de valores extremos. A utilização da mediana, em vez da média, é especialmente útil em contextos em que os dados podem apresentar distribuições assimétricas ou serem sensíveis a valores extremos.

O cálculo da mediana foi realizado conforme a expressão abaixo (Equação 8), e cada indicador temático reflete, assim, uma agregação dos indicadores simples que compõem sua categoria temática, proporcionando uma visão mais consolidada e representativa das condições de risco climático.

$$IT_{ji} = MED (I_{ji}, \dots, I_{ni}) \quad (8)$$

Onde:

IT_{ji} é o indicador temático j do i-ésimo município;

I_{ji} é o indicador simples j do i-ésimo município;

I_{ni} é o indicador simples n do i-ésimo município.

Após o cálculo dos indicadores temáticos, é realizada uma análise dos seus valores máximos e mínimos. Quando os dados se apresentam concentrados em uma faixa intermediária — isto é, quando o valor mínimo é superior a 0,1 e/ou o valor máximo inferior a 0,9 —, aplica-se uma transformação adicional com o objetivo de ajustar o gradiente de variação e garantir maior contraste e sensibilidade do indicador.

Essa transformação teve como base a normalização linear, que buscou expandir ou deslocar os valores para os extremos desejados ($\leq 0,1$ e $\geq 0,9$). Para isso, foram calculados dois coeficientes para ajuste de cada situação de acordo com o Quadro 6 (Equações 9).

Quadro 6 – Cálculo dos coeficientes de inclinação (a) e deslocamento (b) para normalização dos valores de indicadores temáticos.

Ajuste dos valores mínimos	Ajuste dos valores máximos	Ajuste dos valores mínimos e máximos
Coefficiente a		
$a = \frac{(IT_{jm}-0,1)}{(IT_{jm}-IT_{jp})}$ (9.1)	$a = \frac{(0,9-IT_{jp})}{(IT_{jm}-IT_{jp})}$ (9.2)	$a = \frac{(0,1-0,9)}{(IT_{jp}-IT_{jm})}$ (9.3)
Coefficiente b		
$b = 0,1 - (IT_{jp} \times a)$ (9.4)	$b = 0,9 - (IT_{jm} \times a)$ (9.5)	$b = 0,9 - (IT_{jm} \times a)$ (9.6)

Fonte: elaborado por Rocha (2025).

Onde:

a é o coeficiente de inclinação da reta;

b é o coeficiente de deslocamento da reta;

IT_{ji} é o indicador temático j do i-ésimo município;

IT_{jm} é o valor máximo do indicador temático j;

IT_{jp} é o valor mínimo do indicador temático j.

Com esses parâmetros, o valor ajustado do indicador temático foi então obtido pela fórmula:

$$IT_{ajust} = (IT_{ji} \times a) + b \quad (10)$$

Onde: IT_{ajust} é o valor ajustado do indicador temático j no i-ésimo município.

b) Índices parciais de vulnerabilidade

Os índices parciais da dimensão vulnerabilidade, definidos como sensibilidade (IS) e capacidade adaptativa (ICA), foram calculados a partir da mediana dos valores dos indicadores temáticos que os compõem, conforme equação abaixo. A escolha da mediana para a agregação dos indicadores temáticos foi feita para garantir maior robustez frente à presença de dados extremos e para refletir de maneira mais fiel o comportamento central das variáveis de interesse.

$$IP_{ji} = MED (IT_{ji}, \dots, IT_{ni}) \quad (11)$$

Onde:

IP_{ji} é o índice parcial j do i -ésimo município, considerando j como índice de sensibilidade (IS) ou índice de capacidade adaptativa (ICA);

IT_{ji} é o indicador temático j do i -ésimo município; IT_{ni} é o indicador temático n do i -ésimo município.

Após a obtenção dos valores de IS e ICA, foi aplicado um procedimento de reescalamento por normalização linear simples, ajustando os valores mínimo e máximo para 0 e 1, respectivamente. Essa etapa visa padronizar os índices parciais em uma mesma escala, facilitando a comparação entre municípios e garantindo coerência nas etapas subsequentes de integração dos componentes da vulnerabilidade.

Esse método de construção assegura que as características específicas de cada subsetor temático sejam representadas de forma proporcional e consistente. Assim, os índices parciais sintetizam de maneira clara e objetiva as dimensões fundamentais da vulnerabilidade, fornecendo subsídios essenciais para a análise da resiliência dos sistemas socioambientais avaliados.

c) Índices das dimensões do risco

Os índices de dimensão – vulnerabilidade (IV), exposição (IE) e ameaça climática (IAC) - foram calculados de forma independente e diferenciada entre si. A vulnerabilidade (IV) está em função da sensibilidade (IS) e capacidade adaptativa (ICA) e foi obtida conforme expressões abaixo:

$$IV_i = \frac{1+(IS_{ji}-ICA_{ji})}{2} \quad (12)$$

Onde: IV_i é o índice de vulnerabilidade do i -ésimo município; IS_{ji} é o índice de sensibilidade do i -ésimo município; ICA_{ji} é o índice de capacidade adaptativa do i -ésimo município.

A exposição (IE) foi obtida pelo cálculo dos valores médios de seus indicadores temáticos componentes, conforme expressão abaixo:

$$IE_i = MED (IT_{j1}, \dots, IT_{ni}) \quad (13)$$

Onde: IE_i é o índice de exposição do i -ésimo município; IT_{ji} é o indicador temático j do i -ésimo município; IT_{ni} é o indicador temático n do i -ésimo município.

d) Índice de risco de impacto final

O Índice de Risco de Impacto (IRI_i) foi construído com base em uma estrutura dinâmica que integra as dimensões de exposição (IE), vulnerabilidade (IV) e ameaça climática (IAC). Essa abordagem permite representar de forma mais realista os possíveis impactos associados a eventos climáticos, considerando simultaneamente a suscetibilidade dos sistemas analisados, sua capacidade de resposta e a intensidade das ameaças envolvidas.

A construção do IRI foi realizada por meio da multiplicação direta dos valores normalizados de suas três dimensões componentes, conforme expressa a seguinte equação:

$$IRI_i = (IV_i \times IE_i \times IAC_{ji}) \quad (14)$$

Onde:

IRI_i é o índice de risco de impacto do i-ésimo município;

IV_i é o índice de vulnerabilidade do i-ésimo município;

IE_i é o índice de exposição do i-ésimo município;

IAC_{ji} é o índice de ameaça climática j do i-ésimo município.

Essa formulação multiplicativa foi adotada por refletir, de forma mais fiel, a interdependência entre as dimensões que compõem o risco. Isso significa que o risco de impacto não é resultado isolado de uma única dimensão, mas sim da combinação entre vulnerabilidade, exposição e ameaça climática. Por exemplo, mesmo em contextos de alta exposição, o risco pode ser relativamente baixo se a vulnerabilidade for reduzida ou se a intensidade da ameaça climática for limitada. Da mesma forma, uma elevada vulnerabilidade associada a uma ameaça significativa pode gerar alto risco, mesmo em situações de exposição moderada. Assim, a abordagem multiplicativa permite capturar essas interações, evitando superestimação ou subestimação que poderiam ocorrer em modelos aditivos.

Após o cálculo do IRI para cada município, foi aplicada uma normalização linear simples, realizada separadamente para cada cenário e período de análise. Essa etapa considerou como referência os valores mínimo e máximo do período presente, reescalando os resultados para a faixa compreendida entre 0 e 1. O objetivo desse procedimento foi garantir a comparabilidade dos valores ao longo do tempo, além de

evidenciar de forma proporcional os incrementos ou reduções projetadas para os cenários futuros.

4.3 Cálculo dos fatores influenciadores

Na versão AdaptaBrasil 2.0, o "fator influenciador" foi revisado quanto a sua metodologia, tornando as análises mais precisas e adaptadas às crescentes demandas por dados complexos e integrados. Esse fator descreve a contribuição percentual dos indicadores simples na formação de um índice selecionado.

O cálculo desse fator é realizado a partir da decomposição logarítmica como fator de escalonamento de cada componente dentro de um sistema hierárquico, procedimento essencial em contextos em que indicadores afetam o índice agregado de maneira desigual (WANG; ANG; BIN SU, 2017). O AdaptaBrasil ajustou essa técnica para calcular a contribuição proporcional dos indicadores simples em diferentes níveis, permitindo uma análise detalhada do impacto de cada fator nos índices agregados.

4.3.1 Cálculo da contribuição dos indicadores simples aos Índices de Risco de Impacto (Nível 1 para Nível 5)

Para garantir que os indicadores simples reflitam corretamente suas contribuições para o valor final do risco normalizado, foram necessárias 5 etapas: Cálculo das contribuições "brutas" das dimensões para o risco final; Cálculo do fator de escalonamento ou de ajuste da normalização; Cálculo das contribuições ajustadas das dimensões para o risco final; Cálculo das contribuições "brutas" dos indicadores simples para o risco final; e Cálculo das contribuições "ajustadas" dos indicadores simples para o risco final.

Etapa 1 - Cálculo das contribuições "brutas" das dimensões para o risco final

Considerando que o índice de risco (IRI_i) é obtido por uma função multiplicativa das suas dimensões (Equação 14) (ver Nível 5 – Índice final), o cálculo das contribuições proporcionais de cada dimensão para o risco deve utilizar uma transformação logarítmica (Equações 15 e 16). Esta tem a propriedade de converter multiplicações em somas, o que simplifica a análise de como cada variável contribui

para o valor total do risco. Ao aplicar o logaritmo natural (\ln) em ambos os lados da equação multiplicativa do risco, temos:

$$\ln (IRI_i) = \ln (IV_i \times IE_i \times IAC_{ji}) \quad (15)$$

Pela propriedade dos logaritmos:

$$\ln \ln (IRI_i) = \ln \ln (IV_i) + \ln (IE_i) + \ln (IAC_{ji}) \quad (16)$$

Essa fórmula permite que as contribuições relativas de V, E, e A sejam avaliadas separadamente, facilitando a decomposição logarítmica das dimensões. Em vez de calcular diretamente a multiplicação dos valores brutos, os valores logarítmicos individuais são somados, fornecendo uma maneira prática de calcular a elasticidade parcial de cada dimensão em relação ao risco total.

Em seguida, foi possível calcular as contribuições relativas de cada dimensão ao índice bruto, utilizando as fórmulas (Equação 17):

- Contribuição da vulnerabilidade $C (IV_i)$:

$$C (IV_i) = \frac{\ln \ln (IV_i)}{\ln (IRI_{bruto}(t))} \quad (17.1)$$

- Contribuição da vulnerabilidade $C (IE_i)$:

$$C (IE_i) = \frac{\ln \ln (IE_i)}{\ln (IRI_{bruto}(t))} \quad (17.2)$$

- Contribuição da vulnerabilidade $C (IAC_{ji})$:

$$C (IAC_{ji}) = \frac{\ln \ln (IAC_{ji})}{\ln (IRI_{bruto}(t))} \quad (17.3)$$

É importante destacar que a aplicação do logaritmo natural (\ln) às dimensões do risco (vulnerabilidade, exposição e ameaça climática) deve ser realizada antes da normalização do índice final de risco, ou seja, no valor do índice de risco bruto (IRI_{bruto}). Isso ocorre porque a transformação logarítmica é mais eficaz quando aplicada aos valores brutos, permitindo que as contribuições relativas de cada dimensão sejam calculadas com precisão.

No entanto, após a normalização do índice, o valor do risco é ajustado para se enquadrar em uma escala predeterminedada utilizada no AdaptaBrasil (valores entre 0 a 1). Esse processo de normalização altera a magnitude do índice, o que torna necessário o uso de um fator de escalonamento.

Etapa 2 - Cálculo do fator de escalonamento ou de ajuste da normalização

O fator de escalamento é uma técnica utilizada para ajustar a magnitude das contribuições individuais das dimensões para garantir que o somatório dessas contribuições esteja alinhado com o valor final do risco (após a normalização). Seu uso é especialmente importante quando os valores das contribuições não somam ao valor esperado ou apresentam variações indesejadas.

O fator de escalamento funciona como uma constante multiplicativa que é aplicada a cada contribuição individual das dimensões, de modo que o somatório final das contribuições seja proporcional ao valor do desejado.

- A fórmula básica do fator de escalamento é dada por:

$$F(t) = \frac{IRI_{normalizado}(t)}{IRI_{bruto}(t)} \quad (18)$$

Onde:

$F(t)$ é o fator de escalonamento no tempo t no i -ésimo município;

$IRI_{normalizado}(t)$ é o valor do índice de risco no tempo t do i -ésimo município após a normalização;

$IRI_{bruto}(t)$ é o valor do índice de risco no tempo t do i -ésimo município antes da normalização.

Etapa 3 - Cálculo das contribuições ajustadas das dimensões para o risco final

Após a normalização, o valor do risco é ajustado para ficar entre 0 e 1, mas a relação entre as dimensões não se altera de forma direta. Para ajustar as contribuições de forma adequada, levando em conta o efeito da normalização com limites, você pode usar o seguinte método:

- Contribuição da vulnerabilidade $C'(IV_i)$:

$$C'(IV_i) = F(t) \times C(IV_i) \quad (19.1)$$

- Contribuição da vulnerabilidade $C'(IE_i)$:

$$C'(IE_i) = F(t) \times C(IE_i) \quad \text{Eq.19.2}$$

- Contribuição da vulnerabilidade $C'(IAC_{ji})$:

$$C'(IAC_{ji}) = F(t) \times C(IAC_{ji}) \quad \text{Eq.19.3}$$

Onde: $C'X(t)$ é a contribuição ajustada da dimensão X (IV, IE ou IAC) no valor do risco final no tempo t, ou seja, após a normalização.

Etapa 4 - Cálculo das contribuições “brutas” dos indicadores simples para o risco final

Para calcular as contribuições dos indicadores simples ao risco, é essencial considerar toda a cadeia de agregação, que começa nos indicadores temáticos e culmina no risco total (ver Figura 16). O processo está relacionado à compreensão que cada indicador simples exerce uma influência indireta sobre o risco e que cadeia de agregação assegura que o impacto de cada indicador simples seja avaliado não isoladamente, mas dentro do contexto de suas interações e contribuições ao sistema como um todo.

Nesse contexto, a contribuição bruta de cada indicador simples no valor final do risco é condicionada pelas variações nas contribuições de suas respectivas dimensões (vulnerabilidade, exposição e ameaça). Isso significa que o valor de um indicador simples pode ser amplificado ou reduzido conforme as características de suas dimensões agregadoras. Assim, o impacto de cada indicador simples no risco final não é direto, mas moderado pelo comportamento e peso relativo das subdimensões e dimensões intermediárias dentro do modelo hierárquico. A Equação 20 foi utilizada para “estimar” esse efeito indireto.

- Contribuição dos indicadores simples relacionados à sensibilidade (C_{ISS}) e à capacidade adaptativa (C_{ISca}) - dimensão de vulnerabilidade:

$$C_{ISS} = \frac{ISS}{IRI_{normalizado}(t)} * C'(IV_i) \quad (20.1)$$

$$C_{ISca} = \frac{1-ISca}{IRI_{normalizado}(t)} * C'(IV_i) \quad (20.2)$$

- Contribuição dos indicadores simples relacionados à dimensão de exposição (C_{ISe}):

$$C_{ISe} = \frac{ISe}{IRI_{normalizado}(t)} * C'(IE_i) \quad (20.3)$$

Onde:

C_{ISX} é a contribuição bruta do indicador simples x (s ou ca) no valor do risco final no tempo t, ou seja, após a normalização;

ISx é o valor do indicador simples x (s, ca ou e);

IRI normalizado (t) é o valor do índice de risco no tempo t do i-ésimo município após a normalização;

$C'X(t)$ é a contribuição ajustada da dimensão X (V ou E) no valor do risco final no tempo t, ou seja, após a normalização.

A versão 2.0 da plataforma AdaptaBrasil ilustra as relações de impactos em cadeia, ou também chamados, impactos em cascata. Isso significa que os subsetores cujos impactos não são "primários" possuem hierarquias diferenciadas dentro do modelo de avaliação. Isto ocorre para a ameaça de escassez hídrica, oriunda de modelagem hidrológica, e, portanto, não possui indicadores simples diretamente relacionados à ameaça climática (Nível 3), a contribuição da dimensão de ameaça no cálculo do risco final não pode ser obtida da mesma forma que nas outras dimensões do risco (vulnerabilidade e exposição) com indicadores simples (nível 5) com relação direta (nível 3).

Para contornar essa ausência, utilizamos o próprio valor da ameaça no lugar do indicador simples (Nível 6), condicionado à variação da sua contribuição primária, ou seja, à contribuição de sua dimensão associada no Nível 3. Esse ajuste permite que a ameaça climática seja adequadamente representada no cálculo do risco final. Dito isso, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$C_{AC}(t) = AC_x(t) * C'(IAC_{ji}) \quad (21)$$

Onde:

$C_{AC}(t)$ é a contribuição bruta/redimensionada da ameaça climática no valor do risco final no tempo t, ou seja, após a normalização;

$AC_x(t)$ é o valor da ameaça climática no município x;

$C'(IAC_{ji})$ é a contribuição ajustada da dimensão de ameaça climática no valor do risco final no tempo t, ou seja, após a normalização.

Etapa 5 - Cálculo das contribuições “ajustadas” dos indicadores simples para o risco final

Para garantir que a soma das contribuições individuais seja igual a 1 (ou 100%), é necessário ajustar os valores das contribuições brutas de cada indicador simples. Esse ajuste assegura que cada contribuição seja proporcional em relação ao valor total do risco ou da métrica que está sendo calculada. O ajuste é realizado por meio de um processo de normalização, que redistribui as contribuições relativas, preservando as proporções originais entre elas. Segue a fórmula:

$$C_{i_{ajustado}}(t) = \frac{C_i(t)}{\sum C_i(t)} \quad (22)$$

Onde:

$C_{i_{ajustado}}(t)$ é a contribuição ajustada de cada indicador simples no valor do risco final no tempo t , ou seja, após a normalização;

$C_i(t)$ é o valor da contribuição “bruta” dos indicadores simples para o risco final.

4.3.2 Cálculo da contribuição dos indicadores simples às dimensões associadas (Nível 1 para Nível 4)

A metodologia de cálculo desta relação se dá em duas etapas principais: Cálculo das contribuições “brutas” dos indicadores simples para as dimensões do risco e Cálculo das contribuições “ajustadas”.

Etapa 1 - Cálculo das contribuições “brutas” dos indicadores simples para as dimensões do risco

A contribuição bruta dos indicadores simples para a dimensão de vulnerabilidade considera o cálculo diferenciado para os indicadores associados à sensibilidade (s) e à capacidade adaptativa (ca). Assim:

- Contribuição dos indicadores simples relacionados à sensibilidade (C_{ISS}) e à capacidade adaptativa (C_{ISca}) - dimensão de vulnerabilidade:

$$C_{ISS} = \frac{ISs}{IV} \quad (23.1)$$

$$C_{ISca} = \frac{1-ISca}{IV} \quad (23.2)$$

- Contribuição dos indicadores simples à dimensão de exposição:

$$C_{ISe} = \frac{ISe}{IE} \quad (24)$$

- Co-Contribuição dos indicadores simples à dimensão de ameaça climática:

$$C_{ISac}(t) = \frac{ISac(t)}{IAC(t)} \quad (25)$$

Onde:

C_{ISx} é a contribuição bruta do indicador simples x no valor da dimensão a que ele está associado;

ISx é o valor do indicador simples x; IV, IE ou IAC é o valor da dimensão do risco após a normalização.

Por ser uma dimensão dinâmica, para o cálculo da contribuição dos indicadores simples para a ameaça climática em um momento específico (tempo t1), todas as variáveis que compõem esse cálculo devem estar relacionadas e refletir as condições desse mesmo período temporal.

Etapa 2 - Cálculo das contribuições “ajustadas” dos indicadores simples para as dimensões a que se relacionam

O cálculo da contribuição dos indicadores simples para as dimensões seguiu a mesma metodologia descrita pela Equação 22, conforme verificado anteriormente (tópico 4.3.1, etapa 5). Foram aplicados os mesmos princípios e fórmulas para determinar as proporções relativas de cada indicador dentro do sistema.

4.3.3 Cálculo da contribuição dos indicadores simples às subdimensões da vulnerabilidade a que estão associadas (Nível 1 para Nível 3)

A metodologia de cálculo desta relação se dá em duas etapas principais, detalhadas abaixo.

Etapa 1 - Cálculo das contribuições “brutas” dos indicadores simples para cada subdimensão pertencente

Para o cálculo contribuição bruta dos indicadores simples à subdimensão de sensibilidade (S) ou capacidade adaptativa (CA) foi utilizada a seguinte metodologia:

$$C_{ISx} = \frac{ISx}{X} \quad (26)$$

Onde:

C_{ISx} é a contribuição bruta do indicador simples x no valor da subdimensão a que ele está associado;

ISx é o valor do indicador simples x; X é o valor da subdimensão do risco.

Etapa 2 - Cálculo das contribuições “ajustadas” dos indicadores simples para as subdimensões a que se relacionam

O cálculo da contribuição dos indicadores simples para as dimensões seguiu a mesma metodologia descrita pela Equação 22, conforme verificado anteriormente (tópico 4.3.1, etapa 5). Foram aplicados os mesmos princípios e fórmulas para determinar as proporções relativas de cada indicador dentro do sistema.

4.3.4 Cálculo da contribuição dos indicadores simples aos indicadores temáticos a que estão associadas (Categoria 1 para categoria 2)

A metodologia de cálculo destas relações se dá em duas etapas: Cálculo das contribuições “brutas” dos indicadores simples para cada indicador temático pertencente; e Cálculo das contribuições “ajustadas”.

Etapa 1 - Cálculo das contribuições “brutas” dos indicadores simples para cada subdimensão pertencente

Para estimar a contribuição “bruta” de cada indicador simples utilizou-se a seguinte equação:

$$C_{ISx} = \frac{ISx}{Ty} \quad (27)$$

Onde:

CISx é a contribuição bruta do indicador simples x no valor do indicador temático no i-ésimo município a que ele está associado;

ISx é o valor do indicador simples x no i-ésimo município;

Ty é o valor do indicador temático do i-ésimo município.

Etapa 2 - Cálculo das contribuições “ajustadas” dos indicadores simples para os indicadores temáticos a que se relacionam

O cálculo da contribuição dos indicadores simples para as dimensões seguiu a mesma metodologia descrita pela Equação 22, conforme verificado anteriormente (tópico 4.3.1, etapa 5). Foram aplicados os mesmos princípios e fórmulas para determinar as proporções relativas de cada indicador dentro do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADGER, W. N. Vulnerability. **Global Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 268–281, ago. 2006.

AGHAKOUCHAK, A., CHIANG, F., HUNING, L. S., LOVE, C. A., MALLAKPOUR, I., MAZDIYASNI, O., et al. (2020). Climate extremes and compound hazards in a warming world. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, 48(1), 519–548. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-071719-055228>

ANA - Agência Nacional de Águas. **Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil** / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA, 2024a. Disponível em: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/31604c98-5bbe-4dc9-845d-998815607b33/attachments/Mudancas_Climaticas_25012024.pdf. Acessado em agosto de 2025.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil** / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA, 2024b. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura2024_04122024.pdf. Acessado em agosto de 2025.

ANA - Agência Nacional de Águas. **Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil** / Agência Nacional de Águas. - Brasília: ANA, 75 p.: il. ISBN: 978-85-8210-057-8. 2019. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/central-depublicacoes/ana_manual_de_usos_consuntivos_da_agua_no_brasil.pdf/view. Acessado em agosto de 2025.

ASCE - American Society of Civil Engineers. **Climate-resilient infrastructure: Adaptive design and risk management** (B. M. Ayyub, Ed.). Committee on Adaptation to a Changing Climate. 2018.

BALLARIN, A. S. *et al.* Brazilian water security threatened by climate change and human behavior. **Water Resources Research**, 59(7), e2023WR034914. 2023.

BECKER, W. *et al.* **COIN Tool User Guide**, EUR 29899 EN, Publications Office of the European Union. 2019. Disponível em: <https://ec.europa.eu/jrc/en/coinhttps://composite-indicators.jrc.ec.europa.eu/EUScienceHubhttps://ec.europa.eu/jrc>. Acessado em: 15 set. 2024.

BIGGS, R; VOS, A. *et al.* **The Routledge Handbook of Research Methods for Socioecological Systems**. Nova York: Routledge, 2021.

BOND, N. R. *et al.* **Water scarcity as a driver of multiple stressor effects**. In *Multiple stressors in river ecosystems*. Elsevier. pp. 111-129. 2019.

BORGOMEIO, E. *et al.* Risk, robustness and water resources planning under uncertainty. **Earths Future**, 6(3), 468–487. 2018.

BUDYKO, M. I. "Climate and life". Academic Press, Nova Iorque. 1974.

CARETTA, M.A. *et al.* Water. In: **Climate Change: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 551–712. 2022. doi:10.1017/9781009325844.006.

CASTRO, A.L.A.; ANDRADE, E.P.; UGAYA, C.M.L.; FIGUEIREDO, M. C. B. Escassez Hídrica. In: UGAYA, C.M.L.; NETO, J.A.A.; FIGUEIREDO, M. C. B (Org). **Recomendações de Modelos de Avaliação de Impacto para o Contexto Brasileiro**. Brasília: IBICT / ACV, 2019. Disponível em: <https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2019/07/Relatório-de-Recomendações-de-Modelos-de-Avaliação-de-Impacto-para-o-Contexto-Brasileiro.pdf>. Acesso em: 1 out. 2025.

COSTANZA, R. *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, v. 387, p. 253–260, 1997.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATIONS OF THE UNITED NATIONS. **Coping with water scarcity: an action framework for agriculture and food security**. Rome: FAO, 2012. Disponível em: <https://www.fao.org/4/i3015e/i3015e.pdf>. Acesso em: 1 out. 2025.

FU; GUOBIN; CHARLES, S. P.; CHIEW, F. H. S. "A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow." In: *Water Resources Research*, 43 (11) (November 24): 1–12. 2007.

GALAZ, V. *et al.* Institutional and political leadership dimensions of cascading ecological crises. **Public Administration**, 89, p. 361-380. 2011.

GALLOPÍN, G. C. Environmental and sustainability indicators and the concept of situational indicators. A system approach. **Environmental Modelling & Assessment**, v.1, p.101-117, 1996.

GALLOPÍN, G. C. Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. **Global Environmental Change**, v. 16, p. 293-303, 2006.

GALLOPÍN, G. C. Box 1: A systemic synthesis of the relations between vulnerability, hazard, exposure and impact, aimed at policy identification. In: **Economic Commission for Latin American and the Caribbean (ECLAC)**. Handbook for Estimating the Socio-Economic and Environmental Effects of Disasters. Mexico, D.F.: ECLAC, LC/MEX/G.S., p. 2–5, 2003.

GALLOPÍN, G. C. Human dimensions of global change: linking the global and the local processes. **International Social Science Journal**, v. 130, p. 707–718, 1991.

GESUALDO, G. C *et al.* Unveiling water security in Brazil: Current challenges and future perspectives. **Hydrological Sciences Journal**, 66(5), 759–768. 2021. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1899182>

GETIRANA, A.; LIBONATI, R.; CATALDI, M. Brazil is in water crisis - it needs a drought plan. **Nature**. 2021 Dec. 600(7888):218-220. doi: 10.1038/d41586-021-03625-w. PMID: 34880440.

GILL, J. C.; MALAMUD, B. D. Hazard interactions and interaction networks (cascades) within multi-hazard methodologies. **Earth System Dynamics**, 7, p. 659-679. 2016.

GLEICK, P. H. **The world's water**. 2000-2001. Report on Freshwater Resources. Island Press, 2000. 315p.

HAMMOND, A. *et al.* **Environmental indicators: a systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development**. Washington DC: World Resources Institute, 1995, 43p.

HE, C. *et al.* Future global urban water scarcity and potential solutions. **Nature Communications**, 12(1), 1–11. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3>

HILLY, G. *et al.* Methodological framework for analyzing cascading effects from flood events: the case of Sukhumvit Area, Bangkok, Thailand. **Water**, v. 10, n. 81, 2018.

HUNT, J. D.; STILPEN, D.; DE FREITAS, M. A. V. A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 88(October 2017), 208–222. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.030>

IPBES – Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services. Bonn: IPBES Secretariat, 2019.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. 2015.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., 2022.

ISO. International Organization for Standardization. ISO 14046 - **Environmental Management – Water Footprint – Principles, Requirements and Guidelines**. Geneva, Switzerland, 2014.

JACOB, K.; BLAKE, R. Chapter 7: Indicators and monitoring. **Ann. N.Y. Acad. Sci.** v.1196, p. 127–141, 2010.

JANNUZZI, P. D. M. Indicadores para Diagnóstico, Monitoramento e Avaliação de Programas Sociais no Brasil. **Revista do Serviço Público**, v. 56, n. 2, p. 137–160, 2005.

JANNUZZI, P. M. **Indicadores Sociais no Brasil: conceitos, fontes de dados e aplicações**. Campinas: Editora Alínea/PUC-Campinas, 141 p. 2006.

KASPERSON, J. X. *et al.* Vulnerability to global environmental change. In: KASPERSON, J. X.; KASPERSON, R. E. (Eds.). **Social Contours of Risk**. vol. II. Earthscan, London, p. 245–285. 2005.

KEMP, L. *et al.* Climate endgame: Exploring catastrophic climate change scenarios. **Proceedings of the National Academy of Sciences**. 119: e2108146119. 2022.

KIGUCHI, M.; SHEN, Y.; KANAE, S; OKI, T. Reevaluation of future water stress due to socio-economic and climate factors under a warming climate. **Hydrological Sciences Journal**. 60:1. p.14-29, 2015. DOI: 10.1080/02626667.2014.888067.

KOKS, E. Moving flood risk modelling forwards. **Nature Climate Change**, 8, p. 561-562. 2018.

KOUTROULIS, A. G. *et al.* Global water availability under high-end climate change: A vulnerability-based assessment. **Global and Planetary Change**, 175, 52-63. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.01.013>.

KUMMU, M., GUILLAUME, J., de MOEL, H. The world's road to water scarcity: shortage and stress in the 20th century and pathways towards sustainability. *Sci Rep* 6, 38495. 2016. <https://doi.org/10.1038/srep38495>.

KUNDZEWICZ, Z. W.; STAKHIV, E. Z. Are Climate Models 'ready for Prime Time' in Water Resources Management Applications, or Is More Research Needed? **Hydrological Sciences Journal**. 55 (7): 1085–89. 2010.

LAWRENCE, J.; BLACKETT, P.; CRADOCK-HENRY, N.; NISTOR, B.J. **Climate Change: The Cascade Effect**. Cascading impacts and implications for Aotearoa New Zealand, 2018. Wellington: Deep South Challenge.

LAWRENCE, J.; BLACKETT, P.; CRADOCK-HENRY, N. A. Cascading climate change impacts and implications. **Climate Risk Management**, v. 29, 2020.

LAWRENCE, J.; BLACKETT, P.; CRADOCK-HENRY, N.; FLOOD, S.; GREENAWAY, A.; DUNNINGHAM, A.. Synthesis Report RA4: **Enhancing capacity and increasing coordination to support decision making**. Climate Change Impacts and Implications (CCII) for New Zealand to 2100. Wellington: NZCCRI, Victoria University of Wellington; NIWA; Landcare Research, 2016.

LIMA, P. V. P. S. *et al.* A propensão à degradação ambiental na mesorregião de Jaguaribe no Estado do Ceará. **Economia do Ceará em Debate** 2008, p. 27–43, 2009.

LIU, J. *et al.* Water scarcity assessments in the past, present, and future. **Earth's Future**, 5(5), 549–559. 2017. <https://doi.org/10.1002/2016EF000518>

MAGGINO, F. **Complexity in society: from indicators construction to their Synthesis**. 1º ed. Roma, Itália: Springer, 2017.

MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v.22, n. 63, p. 83-96, 2008.

MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. **Revista USP**. n. 103. p. 25. 2014.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M. Crise Hídrica em São Paulo em 2014: Seca e Desmatamento. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, São Paulo, Brasil, v. 19, n. 3, p. 485–494, 2015. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geosp.2015.100879. Disponível em: <https://revistas.usp.br/geosp/article/view/100879>. Acesso em: 18 ago. 2025.

MARENGO, J.A., TOMASELLA, J., NOBRE, C.A. (2017). Climate Change and Water Resources. In: de Mattos Bicudo, C., Galizia Tundisi, J., Cortesão Barnsley Scheuenstuhl, M. (eds) **Waters of Brazil**. **Springer, Cham**. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41372-3_12

MEA – Millennium Ecosystem Assessment. **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis**. Washington, DC: Island Press, 2005.

MEADOWS, D. Indicators and Information Systems for Sustainable Development. Hartland/VT: **Sustainability Institute**. 1998.

MEHRAN, A. *et al.* Compounding Impacts of Human-Induced Water Stress and Climate Change on Water Availability. **Sci Rep** 7. 6282. 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06765-0>

MIZRAHI, S. Cascading disasters, information cascades and continuous time models of domino effects. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.49, 2020.

MULTSCH, S. *et al.* Assessment of potential implications of agricultural irrigation policy on surface water scarcity in Brazil. **Hydrology and Earth System Sciences**, 24(1), 307–324. 2020. <https://doi.org/10.5194/hess-24-307-2020>

MYERS, N. *et al.* Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, 403(403), 853–858. 2000. <https://doi.org/10.1038/35002501>

OLSEN, J.R. Adapting Infrastructure and Civil Engineering Practice to a Changing Climate. **American Society of Civil Engineers**. 2015.

OSTROM, E. **Governing the commons: the evolution of institutions for collective action**. Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town: Cambridge University Press, 1990.

PEREIRA, L.S., CORDERY, I., IACOVIDES, I. Coping with Water Scarcity: Addressing the Challenges. **Springer Science & Business Media**. 2009.

PEREIRA, P. A. A. *et al.* The development of Brazilian agriculture and future challenges. *Agriculture and Food Security*, 1(April), 1–12. 2012. Retrieved from <http://www.agricultureandfoodsecurity.com/content/1/1/4>

PESCAROLI, G.; ALEXANDER, D. Critical infrastructure, panarchies and the vulnerability paths of cascading disasters. **Nat Hazards**, 82, p. 175-192. 2016.

ROCHA, J. C.; PETERSON, G. D.; BODIN, O.; LEVIN, S. A. Cascading regime shifts within and across scales. **bioRxiv**, 364620. Preprint. 2018.

SALAS, J., B.; RAJAGOPALAN, L.; SAITO, e BROWN, C. Special Section on Climate Change and Water Resources: Climate Non-Stationarity and Water Resources Management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 138 (5): 385–88. 2012.

SÃO PAULO. Mudanças climáticas e água no Brasil: iniciativas de adaptação. São Paulo, 2011.

SCHULTE, P.; MORRISON, J. Driving Harmonization of Water-Related Terminology: Discussion Paper. Oakland, CA: CEO Water Mandate / Pacific Institute, 2014. (18 p.). Disponível em: <https://ceowatermandate.org/wp-content/uploads/2019/11/terminology.pdf>. Acesso em: 25 de setembro de 2025.

SIMPSON, N. P. *et al.* A framework for complex climate change risk assessment. **One Earth**, v. 4, P. 489–501. 2021.

SMITI, A. A critical overview of outlier detection methods. **Computer Science Review**, v. 38. 2020.

STEINSCHNEIDER, S.; WI, S.; e BROWN, C. The integrated effects of climate and hydrologic uncertainty on future flood risk assessments: flood risk under hydrologic and climate uncertainty. **Hydrol. Process.**, 29(12), 2823–2839. 2015.

TEEB – The Economics of Ecosystems and Biodiversity. **Ecological and Economic Foundations**. London: Earthscan, 2010.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p.7–16, 2008.

TURNER, B. L. *et al.* **A framework for vulnerability analysis in sustainability science**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 100, n. 14, p. 8074–9, 2003.

TURRENTINE, J. **IPCC: We Cannot Look Away—Climate Risks Are Cascading**. Natural Resources Defense Council (NRDC). 2022. Disponível em: <https://www.nrdc.org/stories/ipcc-we-cannot-look-away-climate-risks-are-cascading>.

UN WATER. Water Scarcity. Available at: <https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity>.

UNITED NATIONS UNIVERSITY/ INSTITUTE FOR WATER, ENVIRONMENT & HEALTH (UNU/INWEH). Water security & the global water agenda: A UN-water analytical brief. Hamilton: ONU, 2013. 45p

VAN BELLEN, H. M. **Indicadores de Sustentabilidade: uma análise comparativa**. 2º ed. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

WANG, H.; ANG, B. W.; BIN SU. Multiplicative structural decomposition analysis of energy and emission intensities: Some methodological issues. **Energy**, v. 123, p. 47-63, 2017.

WHITE, C. Understanding water scarcity: Definitions and measurements. In: **Global Water: Issues and Insights**. 161:28. 2014.

WILHITE, D.; PULWARTY, R. S. eds. Drought and Water Crises: Integrating Science, Management, and Policy. CRC Press. 2017).

WILLNER, S.; OTTO, C.; LEVERMANN, A. Global economic response to river floods. **Nat. Clim. Change**, 8, p. 594-598. 2018.

XAVIER, A.; KING W.; SCANLON, B. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980–2013). **International Journal of Climatology**, 36:2644– 2659. 2015.

XAVIER, A.; KING, C.; SCANLON, B. An update of Xavier, King and Scanlon. Daily precipitation gridded data set for the Brazil. In: **Conference proceedings**, pp 562–569. 2016.

ZHANG, L. *et al.* A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration. In: **Water Resources Research**, 40 (2): W02502. 2004.

APÊNDICE A - COMPOSIÇÃO HIERÁRQUICA DO SE RECURSOS HÍDRICOS.

Setor Estratégico	Índice de Risco	Dimensão	Categoria	Indicadores Temáticos	Indicadores Simples	
Impactos para Recursos Hídricos	Índice de Risco de Estresse Hídrico	Índice de Vulnerabilidade	Índice de Sensibilidade	Insegurança do abastecimento humano	Ineficiência na produção da água	
						Ineficiência na distribuição da água
						Consumo médio per capita de água
				Balanço hídrico das atividades produtivas	Balanço hídrico para agropecuária	
						Balanço hídrico para indústria
				Efeitos sobre a saúde humana	Doenças devido ao saneamento inadequado	
					Qualidade da água	
			Pressão antrópica e qualidade ambiental	Áreas degradadas e/ou desmatadas		
				Áreas com solos susceptíveis à erosão		
				Vazão ecológica para usos ecossistêmicos		
			Índice de Capacidade Adaptativa	Gestão dos recursos hídricos	Segurança das barragens e rejeitos da mineração	
						Plano municipal de saneamento básico
					Nível de atuação em comitês de bacia	
					Ações de prevenção relacionadas à seca	
		Planejamento para recursos hídricos		Alternativas ao abastecimento de água		
					Investimentos em recursos hídricos	
					Investimentos em políticas de adaptação	
		Resiliência hídrica		Programa cidades resilientes		
					Programa cisternas: água para consumo	
					Reservação natural	
		Capacidade dos setores produtivos	Reservação artificial			
				Potencial de armazenamento subterrâneo		
			Participação agropecuária no PIB			
	Participação industrial no PIB					
Capacidade socioeconômica familiar	Renda não afetada pelo preço da água					
		Renda superior a dois salários-mínimos				
Índice de Exposição	População exposta		Densidade populacional			
			Usuários urbanos expostos			
	Usuários dos recursos hídricos expostos		Usuários rurais expostos			
			Usuários industriais expostos			
			Usuários da mineração expostos			
			Usuários da termoeletricidade expostos			
			Usuários da criação animal expostos			
			Usuários da irrigação expostos			
Índice de Ameaça	Risco de escassez hídrica					