

**COOPERAÇÃO EM TECNOLOGIAS PARA
ANÁLISES HIDROLÓGICAS EM ESCALA
NACIONAL**

SUBPROJETO – CLIMA

**Impacto de Mudanças Climáticas na
Segurança Hídrica
Relatório Final**

IPH-ANA-HGE-CLIMA-A4

**Porto Alegre - RS
Abril 2024**

ESTE MATERIAL FAZ PARTE DE UM CONJUNTO DE RELATÓRIOS ELABORADOS NO CONTEXTO DO PROJETO DE COOPERAÇÃO EM TECNOLOGIAS PARA ANÁLISES HIDROLÓGICAS EM ESCALA NACIONAL, ENTRE O INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS (IPH-UFRGS) E A AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA)

AUTORES: Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, Walter Collischonn, Júlia Brusso Rossi.

COMO CITAR: Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Rossi, J. B., 2023. Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional. CLIMA: Impacto de Mudanças Climáticas na Segurança Hídrica – Relatório Final. IPH-ANA-HGE-CLIMA-A4. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].,

Porto Alegre – RS

Abril 2024

Sumário

1. Apresentação	1
2. Introdução e contexto	2
3. Revisão sobre Segurança Hídrica e Impacto de mudanças climáticas	4
3.1 O que é segurança hídrica?	4
3.2 Visão geral das variáveis relacionadas	6
3.3 Indicadores e métricas para a segurança hídrica	7
Cheias e secas	9
3.4 O Plano Nacional de Segurança Hídrica – PNSH	12
Índice de Segurança Hídrica.....	12
3.5 Segurança hídrica e mudanças climáticas no Brasil e no mundo	14
3.6 Riscos climáticos e impactos na segurança hídrica	18
Episódios recentes de eventos extremos e crise hídrica no Brasil.....	19
Impactos das mudanças climáticas.....	20
4. Índice de risco climático para a avaliação da insegurança hídrica	23
4.1 Proposição e seleção de indicadores e variáveis	24
Disponibilidade Hídrica	25
Secas	26
Cheias.....	26
4.2 Descrição do índice e métricas utilizadas	26
4.3 Métodos	30
América do Sul: hidrologia e disponibilidade hídrica.....	30
Projeções climáticas.....	31
Modelagem hidrológica	32
4.4 Resultados e discussões	33
Disponibilidade hídrica em cenários futuros	33
Impactos em eventos extremos de cheias e secas	36
Aumento da Insegurança Hídrica em Eventos de Secas e Cheias	39
Aumento da Insegurança Hídrica devido às Mudanças Climáticas.....	40
Potenciais e Limitações.....	43
4.5 Conclusões	44
5. Referências	45

1. APRESENTAÇÃO

Este documento apresenta o relatório “Impacto de Mudanças Climáticas na Segurança Hídrica – Relatório Final” do subprojeto “Clima”, no contexto do projeto “Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional”, na forma de um Termo de Execução Descentralizada (TED) entre o Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Este relatório apresenta:

- 1) Revisão bibliográfica sobre segurança hídrica, o Plano Nacional de Segurança Hídrica – PNSH, índices de segurança hídrica e indicadores relacionados a mudanças e variabilidade climática e impactos sobre os recursos hídricos, disponibilidade hídrica, estiagens e usos de água;
- 2) Proposição e seleção de indicadores relacionados a variabilidade e mudança climática e seus impactos sobre a disponibilidade hídrica, cheias e estiagens;
- 3) Estimativa e mapeamento de indicadores em escala nacional, relacionados a mudanças climáticas e impactos sobre a disponibilidade hídrica, cheias e estiagens;
- 4) Proposição de um índice para avaliação do aumento da insegurança hídrica devido as mudanças climáticas;
- 5) Análise crítica da representatividade dos indicadores, e interpretação dos resultados para diferentes regiões do Brasil.

2. INTRODUÇÃO E CONTEXTO

Conforme o Plano Nacional de Segurança Hídrica (ANA, 2019) e a definição da Organização das Nações Unidas (UN-Water, 2013), a Segurança Hídrica existe quando há disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficientes para o atendimento às necessidades humanas, à prática das atividades econômicas e à conservação dos ecossistemas aquáticos, acompanhada de um nível aceitável de risco relacionado a secas e cheias. Os fatores que ameaçam uma desejada situação de equilíbrio são o aumento populacional, principalmente nas áreas urbanas, e o crescimento econômico, que geram ampliação da demanda de água, bem como as mudanças climáticas e os seus efeitos nos eventos hidrológicos extremos. Esses fatores de desequilíbrio de balanço hídrico, associados à ausência de planejamento e ações institucionais coordenadas e de investimentos em infraestrutura hídrica e saneamento, desencadeiam cenários de Insegurança Hídrica.

Dada a grande dimensão e diversidade hidrológica brasileira, existem grandes desafios para o planejamento dos Recursos Hídricos em escala nacional. Neste sentido, o Plano Nacional de Segurança Hídrica busca produzir diagnósticos e estudos para subsidiar o planejamento integrado e consistente de infraestrutura hídrica com natureza estratégica e relevância regional, para redução dos impactos de secas e cheias.

Os estudos do Plano Nacional de Segurança Hídrica são apoiados no Índice de Segurança Hídrica, calculado para os anos de 2017 e 2035, e que atualmente considera as dimensões Humana, Econômica, Ecológica e Resiliência. Cada uma das dimensões é baseada em diversos indicadores, como: pontos de captação para abastecimento humano, mapeamento de áreas irrigadas, variabilidade pluviométrica, grau de reserva natural e artificial, entre outros.

A vulnerabilidade e riscos potenciais advindos de mudanças climáticas são atualmente considerados através da variabilidade pluviométrica, estimada com a rede de estações pluviométricas nacional. Entretanto, os cenários de impactos de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos, de estudos existentes (e.g. Brêda et al., 2020) ou em desenvolvimento, ainda não foram considerados. Neste sentido, existe uma clara oportunidade de incorporar os resultados de estudos recentes e das análises deste projeto acerca de sensibilidade e impactos de mudanças climáticas e variabilidade climática em extremos de vazão como cheias e estiagens.

A insegurança hídrica pode ser causada por fatores hidroclimáticos como: (i) excesso ou falta de água, em média (fator amplamente estudado e.g., Kaur et al., 2019; Rodrigues et al., 2014; Veetil et al., 2022), (ii) variabilidade natural entre os anos, e (iii) efeito adicional das alterações climáticas. Considerando que o atual ISH abrange o primeiro fator, neste relatório iremos focar no segundo e terceiro fatores, relacionados com a

variabilidade natural da disponibilidade de água e o potencial de aumento da insegurança hídrica devido aos impactos das alterações climáticas.

O objetivo deste estudo é propor e calcular indicadores relacionados a mudanças climáticas sobre a disponibilidade hídrica, cheias e estiagens para serem usados no Índice de Segurança Hídrica.

3. REVISÃO SOBRE SEGURANÇA HÍDRICA E IMPACTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

O presente capítulo trata da revisão bibliográfica sobre segurança hídrica, índices de segurança hídrica e indicadores relacionados às mudanças e variabilidade climática e impactos sobre os recursos hídricos, disponibilidade hídrica, cheias e secas.

3.1 O QUE É SEGURANÇA HÍDRICA?

A segurança hídrica pode ser definida como a condição quando *“todas as pessoas têm acesso a água potável suficiente a um custo acessível para levar uma vida limpa, saudável e produtiva, garantindo ao mesmo tempo que o ambiente natural seja protegido e melhorado”* (Global Water Partnership, 2000). Ainda, segundo a *United Nations Water* (UN-Water, 2013) a segurança hídrica é definida como:

A capacidade de uma população de preservar o acesso sustentável a quantidades adequadas de água de qualidade aceitável para sustentar os meios de subsistência, o bem-estar humano e o desenvolvimento socioeconômico, para garantir a proteção contra a poluição da água e os desastres relacionados à água e para preservar os ecossistemas em um clima de paz e estabilidade política.

Os principais elementos necessários para alcançar e manter a segurança hídrica, definidos por UN-Water (2013), são:

- Acesso a água potável de forma segura e suficiente, a um custo acessível para satisfazer as necessidades básicas, que incluem o saneamento e higiene, e a garantia de saúde e bem-estar;
- Proteção dos meios de subsistência, direitos humanos e valores culturais e recreativos;
- Preservação e proteção dos ecossistemas nos sistemas de alocação e gestão da água, a fim de manter sua capacidade de fornecer e sustentar o funcionamento dos serviços ecossistêmicos essenciais
- Fornecimento de água para atividades e desenvolvimento socioeconômico (como energia, transporte, indústria, turismo);
- Coleta e tratamento de esgoto para proteger a vida humana e o meio ambiente da poluição;
- Abordagens colaborativas para a gestão de recursos hídricos transfronteiriços pelos países e entre os países, para promover a sustentabilidade e a cooperação pela água doce;
- Capacidade de lidar com incertezas e riscos de perigos relacionados à água, como inundações, secas e poluição, entre outros;

- Boa governança e responsabilidade, e a devida consideração dos interesses de todas as partes interessadas através de: regimes jurídicos adequados e eficazes; instituições transparentes, participativas e responsáveis; infraestrutura adequadamente planejada, operada e mantida; e desenvolvimento de capacidades.

O termo “segurança hídrica” tem sido amplamente utilizado e, sendo um conceito relativamente novo, as suas definições parecem ainda estar amadurecendo (Grey et al., 2013; Lautze e Manthritilake, 2012). Neste sentido, Gerlak et al. (2018) analisaram um conjunto de 124 estudos científicos (de 2010 a 2015), para avaliar os padrões e tendências nas pesquisas sobre o tema segurança hídrica. Os autores observaram que o termo “segurança hídrica” é utilizado simultaneamente para definir uma condição a ser medida, uma estrutura de tomada de decisões, e um objetivo político.

De acordo com Hoekstra et al. (2018), os principais focos quando se define a segurança hídrica tratam do uso da água para aumentar o bem-estar econômico, aumentar a equidade social, avançar para a sustentabilidade ou reduzir os riscos relacionados à água. Considerando a definição de segurança hídrica relacionado ao risco, Grey et al. (2013) aponta a segurança hídrica como o nível tolerável de risco relacionado à água para a sociedade, sendo o risco (uma situação que envolve a exposição ao perigo ou ameaça) compensado pela segurança (o estado de estar livre de perigo ou ameaça). O risco é uma combinação de perigo, exposição e vulnerabilidade (Garrick e Hall, 2014), conforme mostra a Figura 3.1. Possíveis perigos incluem, por exemplo, secas, inundações e deterioração da qualidade da água, a exposição, por sua vez, trata da concentração de pessoas e ativos (sendo sempre relativamente alta em áreas urbanas), e a vulnerabilidade considera a falta de uma adaptação adequada em termos de infraestruturas (Hoekstra et al., 2018).

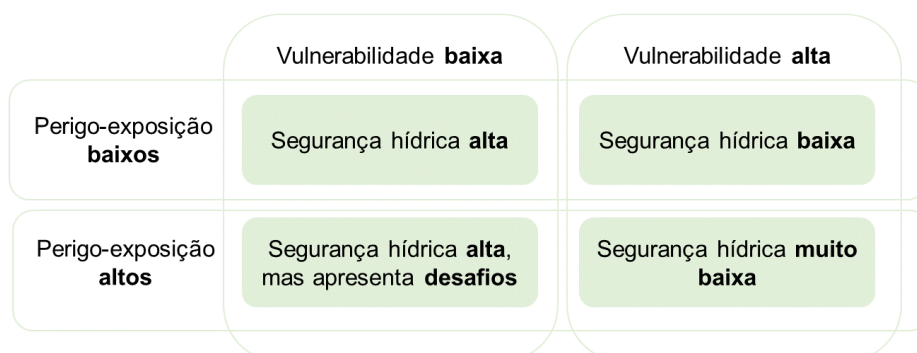


Figura 3.1. Esquema da relação entre perigo, exposição e vulnerabilidade para a segurança hídrica. Fonte: adaptado de Hoekstra et al. (2018).

A análise das inter-relações entre vulnerabilidade, risco e resiliência, em diferentes escalas e setores, é complexa e se apresenta como um desafio no estudo da segurança

hídrica (Bakker, 2012). Um sistema de recursos hídricos terá uma série de estados relacionados à água, em termos de quantidade e qualidade de água, definidos em uma gama de escalas espaciais e temporais (Hall e Borgomeo, 2013). Lautze e Manthritlake (2012) identificam cinco componentes importantes para o conceito de segurança hídrica: (i) necessidades básicas, (ii) produção agrícola, (iii) meio ambiente, (iv) gestão de riscos e (v) independência. Os autores consideram importante a avaliação desses cinco componentes para viabilizar muitos dos resultados ligados à segurança hídrica, como consumo adequado de alimentos, pessoas saudáveis, desenvolvimento econômico e conservação ambiental (Lautze e Manthritlake, 2012).

Outros conceitos relacionados à segurança hídrica, tratam da escassez de água e do estresse hídrico. Quando muitas pessoas em uma área estão sem água por um período significativo de tempo, então essa área pode ser chamada de escassa em água (Rijsberman, 2006). O estresse hídrico, especialmente em regiões semiáridas ao redor do mundo, coloca em risco o abastecimento de água doce e a segurança hídrica (Daneshi et al., 2021).

No Brasil, em 2019, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), em parceria com o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR), desenvolveu o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH). No âmbito do PNSH foram consideradas quatro dimensões de Segurança Hídrica (Humana, Econômica, Ecológica e de Resiliência) para formar o Índice de Segurança Hídrica. Cada dimensão é composta de um ou mais indicadores, e cada indicador é formado por uma combinação de variáveis ou atributos mensuráveis. O PNSH assegura ao Brasil um planejamento de estudos, projetos e obras de infraestrutura hídrica, para redução dos impactos de secas e cheias, até o ano de 2035 (ANA, 2019). O Brasil precisa de investimentos em infraestrutura de água e saneamento, contudo, a segurança hídrica não depende apenas de infraestrutura (Cunha Libanio, 2020). Diversos autores apontam para a necessidade de sistemas adequados de governança hídrica, para garantia da segurança hídrica, principalmente em cenários de crise hídrica (Empinotti et al., 2019; Tundisi e Tundisi, 2016).

3.2 VISÃO GERAL DAS VARIÁVEIS RELACIONADAS

Para a gestão adequada da água, são necessárias informações sobre a qualidade e quantidade deste recurso em determinada região de interesse, e sobre como estes aspectos variam com o tempo. A segurança hídrica está relacionada às variáveis climáticas e hidrológicas, e aspectos sociais, econômicos e demográficos. De forma geral, as variáveis hidrológicas mais críticas para a segurança hídrica são a precipitação, a umidade do solo, a evapotranspiração, o escoamento superficial/vazão dos rios, as águas subterrâneas, e a qualidade da água e sedimentos fluviais (Lawford et al., 2013).

- Precipitação: este é um fator determinante para a segurança hídrica, pois a ausência de chuvas leva a secas, comprometendo o fornecimento de água, enquanto o excesso de chuvas pode resultar em cheias, deslizamentos de terra e danos a infraestruturas (Lawford et al., 2013);
- Umidade do solo: está relacionada a garantia da produção de alimentos, pois as áreas de agricultura devem ter uma umidade de solo adequada, principalmente na temporada de crescimento das culturas, e o déficit de umidade do solo pode resultar em uma seca agrícola, levando a quebra de safras (Lawford et al., 2013; Wilhite e Glantz, 1985);
- Evapotranspiração: está relacionada a perdas de água do solo por evaporação e das plantas por transpiração. A evaporação também está associada a perdas de água em lagos, reservatórios e áreas úmidas;
- Escoamento superficial/vazão dos rios: este é um fator determinante para a garantia de abastecimento de água, pois representa a água efetivamente disponível para uso no sistema (Lawford et al., 2013);
- Águas subterrâneas: é especialmente relevante para a garantia de abastecimento de água em regiões onde a precipitação, o escoamento e o armazenamento superficial de água são insuficientes para atender as demandas. Eventuais anomalias negativas nas águas superficiais e subterrâneas podem resultar em uma seca hidrológica (Lawford et al., 2013; Wilhite e Glantz, 1985);
- Qualidade da água e sedimentos fluviais: está relacionada a garantia da qualidade da água para determinados usos, como para o abastecimento humano, considerando que a concentração de poluentes e contaminantes na água pode restringir seus usos (Lawford et al., 2013).

3.3 INDICADORES E MÉTRICAS PARA A SEGURANÇA HÍDRICA

A segurança hídrica, conforme visto anteriormente, está relacionada a múltiplos fatores. Para garantir a manutenção da segurança hídrica, é necessário, primeiro, estabelecer um meio de quantificá-la. Os desafios relacionados a garantia da segurança hídrica podem variar conforme a região de interesse, podendo estar relacionados a quantidade de água disponível, a qualidade da água, a sazonalidade ou fatores socioeconômicos e demográficos (Octavianti e Staddon, 2021).

Em vista disso, diversas ferramentas podem ser aplicadas para avaliar os diferentes fatores envolvidos com a segurança hídrica, auxiliando na gestão dos recursos hídricos à medida que representam as regiões de maior risco para a segurança hídrica. Apesar das diversas métricas existentes, Gerlak et al. (2018) apontam que a quantidade de água, ou seja, a escassez em relação à demanda, é um aspecto dominante nos estudos de segurança hídrica. Ainda assim, pesquisas recentes resultaram em uma grande

diversidade de indicadores e métricas relacionados à segurança hídrica, conforme apresentado a seguir.

Babel et al. (2020) propuseram uma estrutura metodológica para avaliação da segurança hídrica (Figura 3.2), utilizando a abordagem DPSIR (em inglês, *Driving forces– Pressure – State – Impact – Response*), desenvolvida pela Agência Ambiental Europeia (Smeets e Weterings, 1999). Isso resulta em um índice geral de segurança hídrica que compreende várias dimensões levando em consideração as forças que têm impacto na segurança hídrica. As dimensões são representadas por um ou mais indicadores, que por sua vez, são quantificados através de variáveis. A escolha das variáveis mais apropriadas depende da situação e dos dados do local em que o índice será aplicado. Este método se aproxima do que foi proposto e apresentado no ISH do Brasil (ANA, 2019), que é detalhado no item a seguir.

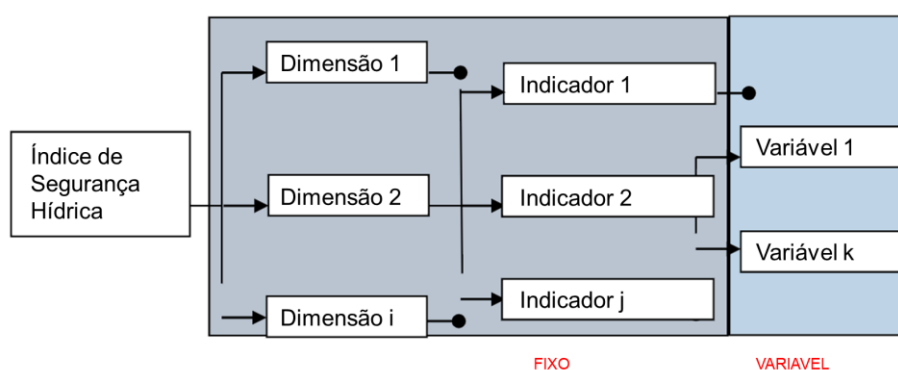


Figura 3.2. Estrutura de avaliação de segurança hídrica para análise em escala de cidade. As letras i, j e k se refere, ao número de dimensões, indicadores e variáveis, respectivamente

Fonte: Babel et al. (2020).

Ainda, os autores propuseram cinco dimensões para serem consideradas no índice de segurança hídrica, e seus respectivos indicadores, sendo (dimensão – indicadores): 1) Abastecimento de água e saneamento – disponibilidade de água, acessibilidade, qualidade da água fornecida, higiene e saneamento; 2) Produtividade da água – valor econômico da água; 3) Desastres relacionados à água – mitigação de desastres, preparação para desastres; 4) Meio Ambiente – estado dos corpos d'água naturais, efeito de fatores poluentes; 5) Governança da água – gestão geral do setor de água, potencial para se adaptar a mudanças futuras, apoio do cidadão para a segurança hídrica (Babel et al., 2020).

Alguns autores propõem índices específicos para a segurança hídrica, como: Índice de Escassez de Água (ou Índice de Falkenmark) (Falkenmark, 1989); Índice de Pobreza Hídrica (Sullivan, 2002); Resiliência de Provisão de Água (Milman e Short, 2008); Escassez de Água Azul (*Blue water scarcity*) (Hoekstra et al., 2011); Escassez de Água Verde (*Green water scarcity*) (Hoekstra et al., 2011); Vulnerabilidade de Água Azul (*Blue water vulnerability*) (Rodrigues et al., 2014); Vulnerabilidade de Água Verde (*Green*

water vulnerability) (Rodrigues et al., 2014); Índices e Indicadores de Segurança Hídrica Urbana (Jensen e Wu, 2018), entre outros. Em geral, os indicadores ainda utilizam poucas informações de variáveis hidrológicas, sendo mais comum a vazão média, e em alguns casos o armazenamento de água, a evapotranspiração e a umidade do solo. Os indicadores de segurança hídrica normalmente são quantificados com base na disponibilidade hídrica, na população, no consumo e nos usos da água (Veetil et al., 2022).

Cheias e secas

Cheias e secas estão entre os desastres hidrológicos mais frequentes e causam severos impactos sociais, ecológicos e econômicos (Figura 3.3). Neste sentido, deveriam ser considerados em indicadores de segurança hídrica, avaliando a sua magnitude, frequência, sazonalidade e extensão espacial (Brunner et al., 2021).

Inundações são o desastre natural mais frequente e danoso (Blöschl, 2022; Mishra et al., 2022). Podem ser causadas por processos naturais como precipitações intensas, ou pela falha de estruturas hidráulicas como barragens (ICOLD, 2022; Merz et al., 2021). As cheias causam a elevação das vazões e níveis d'água nos rios, podendo atingir altos níveis, inundando áreas urbanas e rurais e causando danos a infraestrutura e a vidas humanas (Blöschl, 2022). Por outro lado, as cheias são o principal forçante de processos ecológicos de ecossistemas aquáticos como em rios e planícies de inundação (Junk et al., 1989; Poff et al., 1997).

As cheias podem ser quantificadas em termos de vazões, níveis d'água ou mapa de áreas inundadas (Mishra et al., 2022). Do ponto de vista do hidrograma de vazões, podem ser caracterizadas em termos de vazão máxima, volume e duração (Brunner et al., 2021), onde normalmente a magnitude e impactos estão associados à vazão máxima (Figura 3.4). Além da magnitude, as cheias podem ser caracterizadas em termos de sua frequência ou tempo de retorno. O tempo de retorno é definido pelo intervalo médio em anos entre duas ocorrências de um evento igual ou de maior magnitude e é equivalente ao inverso da probabilidade deste evento ser superado em um ano qualquer.

Secas são eventos extremos caracterizados pela falta de disponibilidade hídrica em frente a padrões de longo prazo. São comumente classificadas em secas (i) meteorológicas, (ii) agrícolas, (iii) hidrológicas e (iv) socioeconômicas (Wilhite e Glantz, 1985). O fenômeno se dá pela falta de precipitação e impacta progressivamente a umidade do solo, a vazão nos rios, os níveis de lagos e de aquíferos e, por fim, a esfera social, causando, dentre outros, prejuízos no abastecimento humano e na geração de energia. Se tratando de um evento que possui grande influência sobre a gestão de

recursos hídricos, sua caracterização e seu monitoramento adequados são de extrema relevância.



Figura 3.3. Eventos hidrológicos extremos no Brasil: a) zona rural de Feira de Santana (BA) sofre com estiagem prolongada em 2017 (Foto: Alan Tiago Alves/G1¹), b) açude seca no interior de Frederico Westphalen (RS) em função da estiagem de 2022 (Foto: Lauro Alves/Agência RBS²), c) cheia deixa a cidade de Boca (AC) debaixo d'água em 2021 (Foto: Defesa Civil do Amazonas³), d) bairro inundado pela cheia em Capivari (SP) em 2023 (Foto: Tonny Machado⁴).

Vazões baixas ocorrem em rios durante épocas de estiagem, podendo durar longos períodos e alcançar valores extremamente baixos ou nulos em rios intermitentes. As vazões dos rios são responsáveis por sustentar ecossistemas e usos d'água como abastecimento humano, irrigação, produção de energia, industrial e navegação (Laaha et al., 2013). Embora os ecossistemas e seres humanos se adaptem às condições de estiagem, a previsão da disponibilidade de água durante estes períodos críticos é fundamental para diversas ações de gestão de recursos hídricos.

¹ Fonte: <https://g1.globo.com/bahia/noticia/2017/04/pior-seca-em-73-anos-traz-fome-e-faz-populacao-dividir-agua-com-animais.html>

² Fonte: <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2022/01/perdas-nas-lavouras-acudes-secos-e-acionamento-de-agua-o-cenario-na-regiao-mais-atingida-pela-falta-de-chuva-no-rs-ckyebd6wm0008015p87ed1ylh.html>

³ Fonte: <https://g1.globo.com/am/amazonas/noticia/2021/05/13/enchente-dos-rios-inunda-cidades-no-amazonas-fotos.ghtml>

⁴ Fonte: <https://g1.globo.com/sp/piracicaba-regiao/noticia/2023/01/03/apos-maior-enchente-da-historia-de-capivari-rio-baixa-e-familias-comecam-a-voltar-para-casas.ghtml>

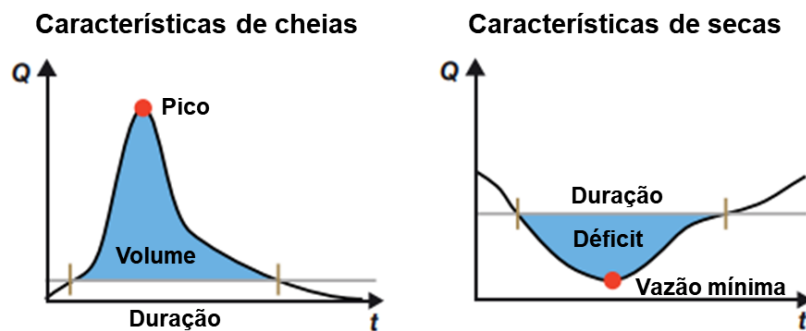


Figura 3.4. Hidrograma de vazões e características de cheias e secas. Fonte: modificado de Brunner et al. (2021).

Conforme a Figura 3.4, as secas podem ser caracterizadas pelo hidrograma de vazões em termos da sua magnitude e valor mínimo, duração e severidade como o déficit total de água que é o produto entre a duração e a diferença entre um limiar que define a seca e a vazão. As vazões mínimas são tipicamente definidas por meio de:

Curva de frequência de vazões mínimas: a vazão mínima anual média de uma determinada duração é relacionada com um determinado tempo de retorno (e.g. $Q_{7,10}$, vazão mínima com 7 dias duração e 10 anos de tempo de retorno).

Curva de permanência: A vazão mínima é definida como a que é naturalmente superada na maior parte do tempo (e.g. Q_{95} , vazão que é superada em 95% dos dias).

Outros índices voltados a quantificação das secas também podem ser considerados no contexto de segurança hídrica. Um grupo de índices para seca são os “índices de seca padronizados”, que representam anomalias em relação a situação normal, de forma padronizada, expressando a severidade dos eventos (Van Loon, 2015). Entre estes índices, destaca-se o Índice de Precipitação Padronizado (em inglês: *Standardized Precipitation Index* - SPI), e outros índices derivados deste, como: Índice de Escoamento Padronizado (em inglês: *Standardized Runoff Index* - SRI) (Shukla e Wood, 2008); Índice de Evapotranspiração e Precipitação Padronizado (em inglês: *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* - SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010); Índice de Vazão Padronizado (em inglês: *Standardized Streamflow Index* - SSI) (Vicente-Serrano et al., 2012); Índice de Umidade do Solo Padronizado (em inglês: *Standardized Soil Moisture Index* - SSI) (Hao e AghaKouchak, 2013); Índice de Nível da Água Subterrânea Padronizado (em inglês: *Standardized Groundwater level Index* - SGI) (Bloomfield e Marchant, 2013), entre outros.

3.4 O PLANO NACIONAL DE SEGURANÇA HÍDRICA – PNSH

Alinhado ao conceito de segurança hídrica, em 2019, a ANA, em parceria com o MDR, desenvolveu o PNSH (ANA, 2019). O PNSH assegura ao Brasil um planejamento de estudos, projetos e obras de infraestrutura hídrica, para redução dos impactos de secas e cheias, até o ano de 2035. Para isso, é apresentado um Índice de Segurança Hídrica (ISH), calculado para os anos de 2017 e 2035, para todo o território nacional (dividido em otobacias).

Índice de Segurança Hídrica

O ISH elaborado e apresentado no PNSH trata do risco hídrico no Brasil, combinando quatro dimensões da segurança hídrica relacionada a garantia de água, inspirados no conceito de segurança hídrica da *United Nations Water* (UN-Water, 2013) (Figura 3.5). As dimensões do ISH são compostas por um ou mais indicadores, relacionados a variáveis de interesse, sendo quantificados para classificação da segurança hídrica. As dimensões e os respectivos indicadores do ISH são apresentados na Tabela 3.1. As dimensões humana e econômica estão relacionadas a quantificação dos déficits no atendimento às demandas efetivas (abastecimento humano e setor produtivo) e riscos associados, enquanto as dimensões ecossistêmica e de resiliência possibilitam identificar as áreas mais críticas e vulneráveis (ANA, 2019).



Figura 3.5. Dimensões da segurança hídrica no Plano Nacional de Segurança Hídrica. Fonte: ANA (2019) adaptado de UN-Water (2013).

Como parte do processo metodológico para determinação do ISH, é calculado o balanço hídrico para todo o Brasil. O balanço hídrico superficial considera o somatório das demandas de retirada desses cinco setores usuários: humano urbano, humano rural, animal, indústria e irrigação; e relaciona com a quantidade de água disponível. Enquanto o balanço hídrico subterrâneo é utilizado apenas no âmbito da Dimensão Humana. Após

o cálculo do balanço hídrico, são calculados os fatores de risco em cada ottobacia, e os riscos hídricos são valorados em termos de número de pessoas na dimensão humana, e de valores monetários na dimensão econômica (ANA, 2019).

Foram atribuídos pesos aos respectivos indicadores que compõe cada uma das quatro dimensões, para cálculo da média simples ou ponderada e normalização do índice. O ISH foi calculado a partir da média aritmética simples dos resultados das 4 dimensões, para cada ottobacia, nos cenários de 2017 e 2035. O índice foi dividido em cinco intervalos de classe dos graus de segurança hídrica, sendo: mínimo (intervalo de 1,00 a 1,5); baixo (de 1,51 a 2,5); médio (de 2,51 a 3,5); alto (de 3,51 a 4,5), e; máximo (de 4,51 a 5,0) (ANA, 2019).

Tabela 3.1. Relação das dimensões e respectivos indicadores para o ISH do Brasil. Fonte: ANA (2019).

Dimensões	Indicadores
Humana	Garantia de água para o abastecimento humano
Econômica	Garantia de água para irrigação e pecuária, e para atividade industrial
Ecosistêmica	Quantidade e qualidade adequada de água para usos naturais, e segurança de barragens de rejeito de mineração
Resiliência	Reservação natural e artificial, potencial de armazenamento subterrâneo e variabilidade pluviométrica

O ISH do Brasil identificou as áreas com menor segurança hídrica no cenário de 2035 (Figura 3.6). A região Nordeste possui baixa disponibilidade hídrica com impacto nos indicadores das dimensões ecossistêmica e de resiliência. Isso também é observado na bacia do rio São Francisco, que ainda sofre com a demanda para irrigação, refletindo nos indicadores da dimensão econômica. A metade sul do Rio Grande do Sul sofre pressão pela irrigação de lavouras de arroz. Ainda, algumas regiões metropolitanas possuem uma baixa segurança hídrica associada ao grande número de habitantes e a baixa qualidade das águas (ANA, 2019).

A vulnerabilidade e riscos potenciais advindos de mudanças climáticas são atualmente considerados através da variabilidade pluviométrica estimada com a rede de estações pluviométricas nacional. Entretanto, os cenários de impactos de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos de estudos existentes (e.g. Brêda et al., 2020) ou em desenvolvimento ainda não foram considerados.

Mais informações e atualizações a respeito do PNSH podem ser consultadas no site oficial <https://pnsh.ana.gov.br/home>, desenvolvido em colaboração da ANA com o MDR.

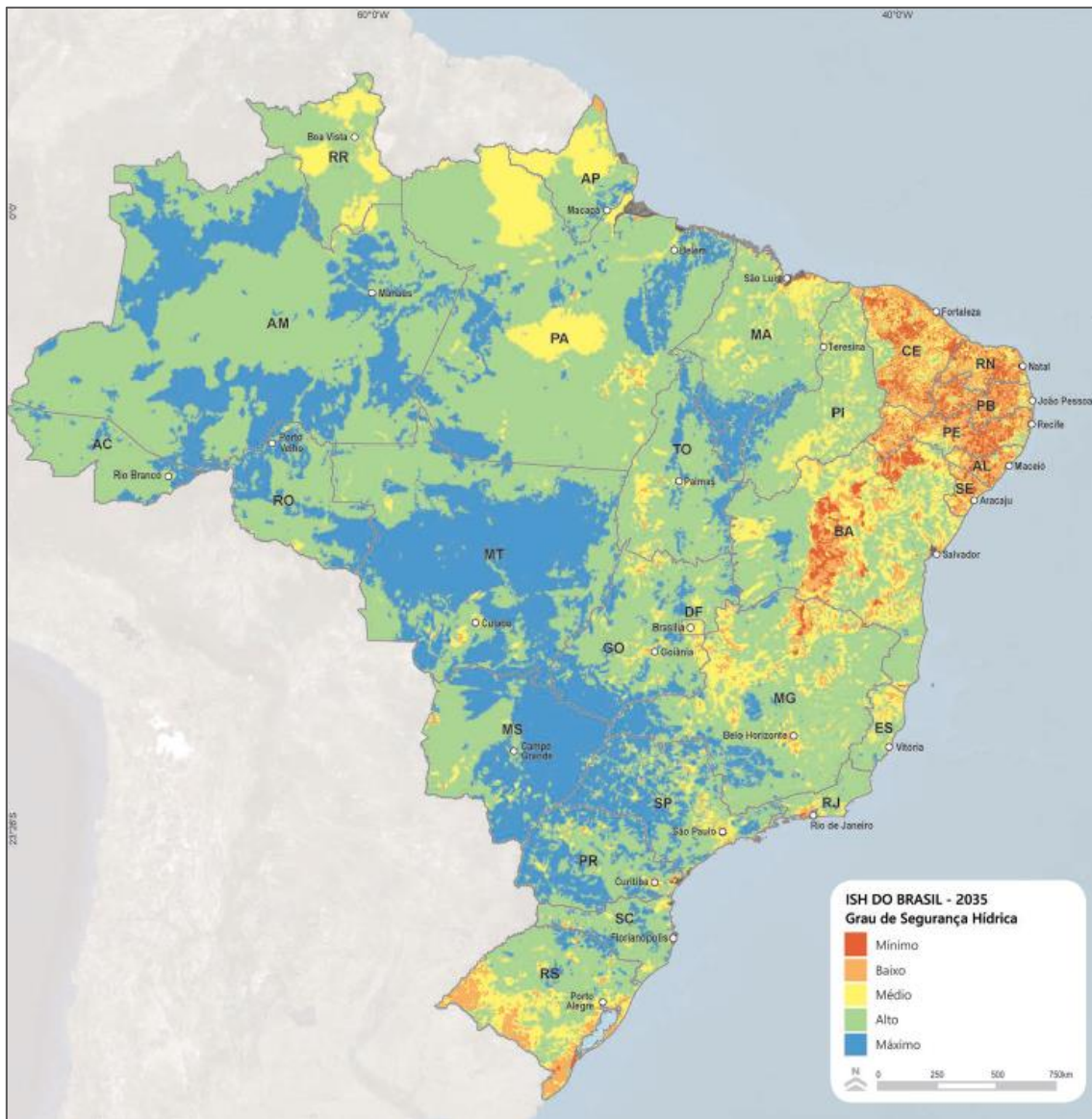


Figura 3.6. Índice de Segurança Hídrica do Brasil no cenário de 2035.

3.5 SEGURANÇA HÍDRICA E MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL E NO MUNDO

Neste item são apresentados alguns estudos que avaliaram a segurança hídrica, em escala global e regional. Em alguns casos, o potencial impacto de mudanças climáticas foi abordado.

Em 2010, Vörösmarty et al. (2010) publicaram um estudo pioneiro no tema, apresentando uma síntese mundial a respeito da segurança hídrica, considerando aspectos humanos e de biodiversidade. Esta análise computou 23 variáveis (*drivers*) representando quatro temas principais (distúrbios na captação, poluição,

desenvolvimento de recursos hídricos e fatores bióticos) para a geração de mapas de ameaça aos sistemas fluviais em escala global. As estimativas revelaram que quase 80% da população mundial (para o ano de 2000) estava exposta a altos níveis de ameaça à segurança hídrica. Ainda, os autores verificaram que 65% das vazões globais de rios estavam sob níveis de ameaça de moderado a alto. A ameaça à segurança hídrica humana e da biodiversidade é apresentada na Figura 3.7 em uma escala de baixa (*low*) a alta (*high*) ameaça, em nível mundial.

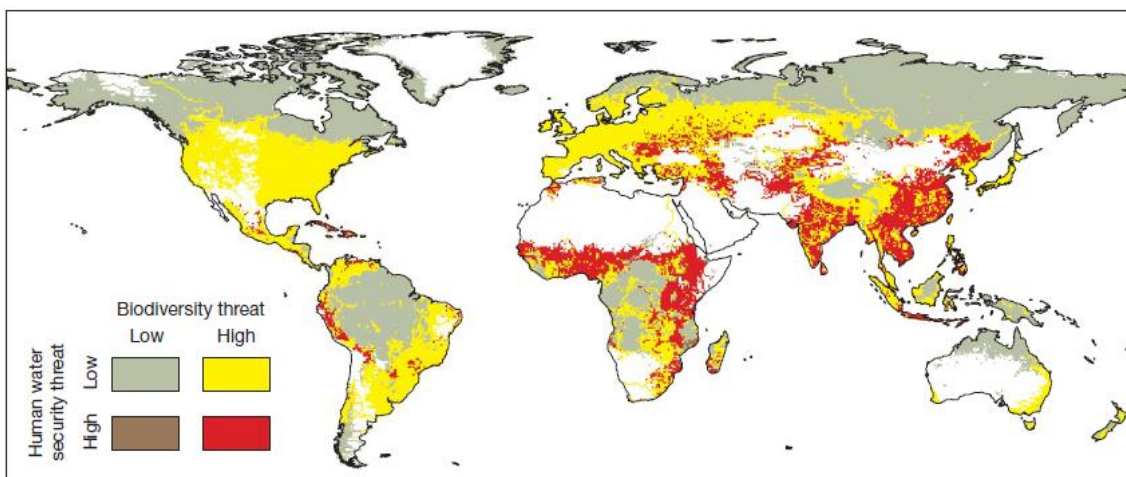


Figura 3.7. Padrões predominantes de ameaça à segurança hídrica humana (*human water security threat*) e à biodiversidade (*biodiversity threat*). Fonte: Vörösmarty et al. (2010).

Lautze e Manthritilake (2012) identificaram cinco componentes chaves da segurança hídrica (necessidades básicas domésticas, produção de alimentos, fluxos ambientais, gestão de riscos, e independência), e os utilizaram como indicadores numéricos, aplicados a todos os países da Ásia-Pacífico, para desenvolver um índice de segurança hídrica em nível nacional (Figura 3.8). Os autores apontam que essa análise pode ser útil para comparar a segurança hídrica dos países em relação uns aos outros.

Estudos mais recentes como Dubey et al. (2020) utilizaram o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) para avaliar a segurança hídrica em uma bacia no semiárido na Índia, considerando três períodos futuros, com cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, a partir de três modelos de circulação global. O índice de segurança hídrica foi baseado na disponibilidade hídrica. Os autores identificaram as tendências futuras para diferentes zonas da bacia, verificando a variabilidade espacial da disponibilidade de água.

Shi et al. (2021) desenvolveram um modelo de avaliação da segurança hídrica urbana, que foi aplicado a uma cidade na China. Os autores utilizaram um sistema de indicadores com base em quatro aspectos (desenvolvimento social, situação dos recursos hídricos, poluição da água e gestão de recursos hídricos), e os resultados encontrados indicaram que a segurança hídrica na área de estudo estava em estado crítico.

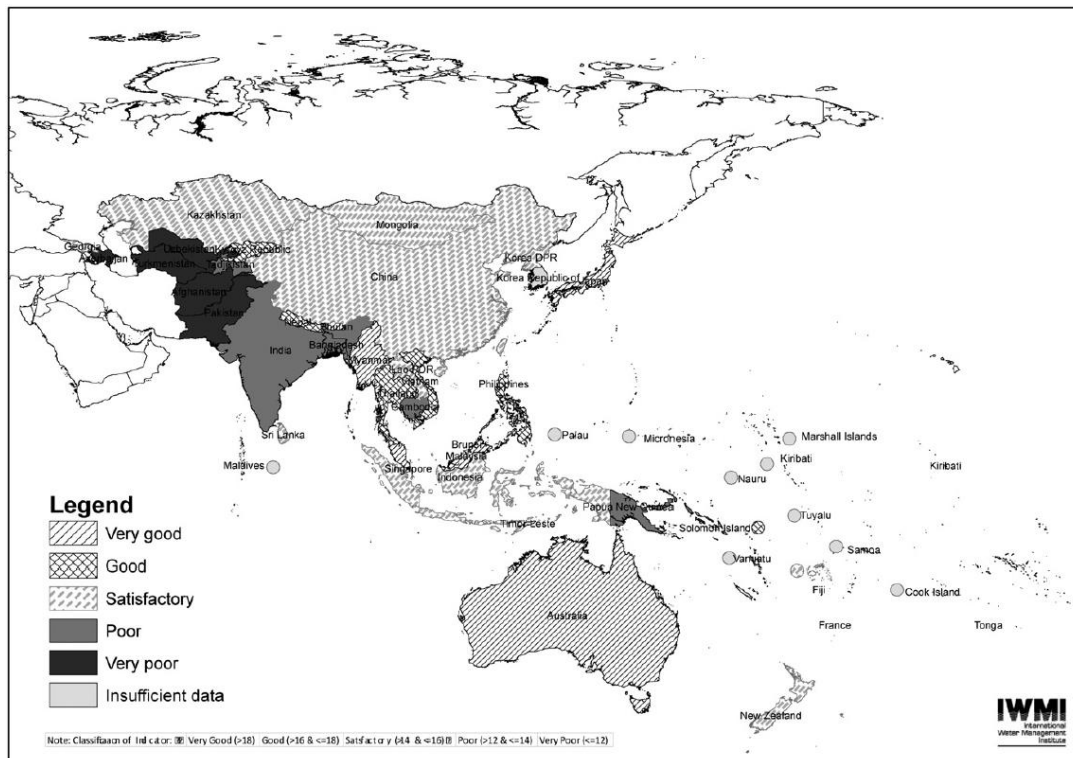


Figura 3.8. Índice de segurança hídrica em países da Ásia-Pacífico. Legenda: muito bom (*very good*), bom (*good*), satisfatório (*satisfactory*), ruim (*poor*), muito ruim (*very poor*) e dados insuficientes (*insufficient data*) Fonte: Lautze e Manthritilake (2012).

MacDonald et al. (2021) apresentaram um estudo de segurança hídrica considerando o armazenamento de águas subterrâneas. Os autores quantificaram as taxas médias de recarga de água subterrânea, distribuídas a longo prazo, em toda a África, para o período 1970-2019. Os resultados demonstraram que a segurança hídrica no país é reforçada pelo armazenamento e recarga das águas subterrâneas, considerando que a maioria dos países africanos com pouco armazenamento de água subterrânea tem alta precipitação anual e, portanto, recarga regular, enquanto países com baixa precipitação possuem um armazenamento considerável de água subterrânea.

O estudo de Daneshi et al. (2021) se destaca por utilizar uma modelagem que combina os impactos dos cenários de mudanças climáticas e das mudanças no uso da terra na segurança hídrica, gerando um Índice de Estresse Hídrico, utilizando um modelo de disponibilidade hídrica, aplicado para uma bacia hidrográfica que drena para o Mar Cáspio no norte do Irã. Para avaliação da segurança hídrica, o Índice de Estresse Hídrico foi definido pela relação entre a demanda (*water consumption*) e a disponibilidade de água (*water yield*) em cada sub-bacia, resultando em cinco categorias de nível de escassez hídrica: “sem estresse”, “baixo estresse”, “estresse leve”, “estresse alto” e “estresse severo”. Os autores identificaram que a produção de água é afetada negativamente pelos cenários de mudança climática, enquanto a mudança de uso da terra tem um pequeno impacto positivo na produção de água, mas um impacto negativo

mais forte no consumo e abastecimento de água e, conseqüentemente, no estresse hídrico.

No Brasil, Rodrigues et al. (2014) utilizaram o modelo hidrológico SWAT na bacia do Rio Cachoeira (localizada no Sistema Cantareira), para avaliar os padrões espaciais e temporais de vazão, umidade do solo, e evapotranspiração (*Blue Water and Green Water*), durante um período de 23 anos (1987 a 2009). Os autores realizaram uma análise mensal considerando quatro indicadores: Escassez de Água Azul (*Blue water scarcity*), Escassez de Água Verde (*Green water scarcity*), Vulnerabilidade de Água Azul (*Blue water vulnerability*), Vulnerabilidade de Água Verde (*Green water vulnerability*) relacionado ao uso e a disponibilidade de água na bacia (Figura 3.9). As águas azuis são representadas como a disponibilidade de água (*water yield*) e o armazenamento de águas subterrâneas, e as águas verde como a evapotranspiração real e o teor de umidade no solo.

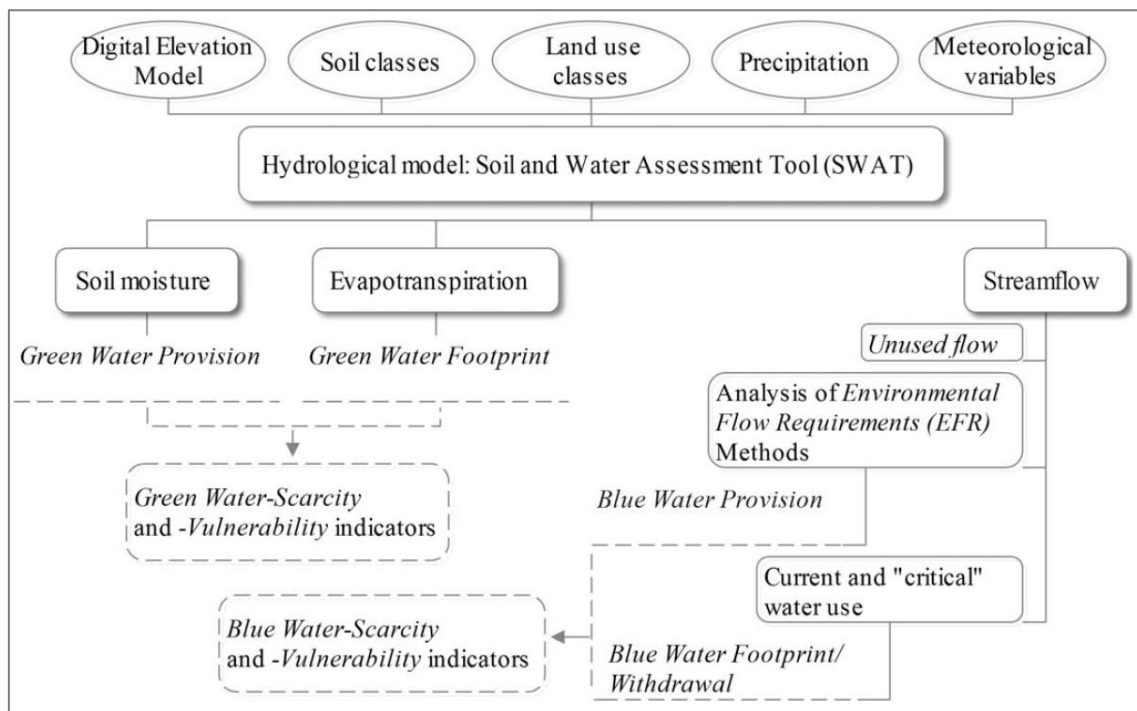


Figura 3.9. Estrutura para contabilizar as águas azul/verde para avaliação da segurança hídrica. Fonte: Rodrigues et al. (2014).

Tucci e Chagas (2017) apresentam uma conceituação de segurança hídrica considerando a gestão de riscos, e a partir disso, propõem estratégias de segurança hídrica para o estado de Minas Gerais, com um plano de ação e propostas de investimentos. Segundo os autores, a segurança hídrica deve ser entendida como a “gestão de risco da escassez da água e das inundações para a sociedade, meio ambiente e economia”. No caso, a gestão de risco envolve dois cenários de vulnerabilidade: (i) segurança de projeto, para um nível de probabilidade de atendimento ou de falha; e, (ii) segurança na emergência, para quando ocorre um evento com probabilidade inferior à de projeto.

Cunha Libanio (2020) apresenta uma revisão da segurança hídrica no Brasil, considerando o PNSH. Segundo o autor, falta no país investimentos em infraestrutura de água e saneamento, contudo, ele ressalta que a segurança hídrica não depende apenas de infraestrutura, mas também, do estabelecimento de sistemas adequados de governança hídrica, que avancem em iniciativas de conservação da água. Empinotti et al. (2019) e Tundisi e Tundisi (2016) também apontam para a importância da governança na garantia da segurança hídrica, principalmente em cenários de crise hídrica (secas).

Gesualdo et al. (2021) avaliaram a segurança hídrica em diferentes regiões do Brasil, considerando fatores como disponibilidade e qualidade da água, efeitos climáticos (impactos de eventos extremos) e pressão antropogênica. Os autores ressaltam a falta de segurança hídrica em grandes centros urbanos no norte e nordeste brasileiro, e ainda, a possibilidade do aumento de conflitos pelo uso da água no Brasil, em função das estimativas de aumento de eventos extremos combinada à expansão da agricultura e de áreas irrigadas.

Ballarin et al. (2023) analisaram a segurança hídrica no Brasil considerando as mudanças climáticas (utilizando projeções de 10 modelos climáticos do CMIP6) e o consumo de água (utilizando projeções de demanda de água da ANA). A segurança hídrica foi avaliada através do cálculo da razão entre a demanda e a disponibilidade de água. Os autores estimaram uma redução na segurança hídrica, até o ano de 2100, em 81% das bacias hidrográficas analisadas, das quais, 37% apresentaram redução devido a disponibilidade futura de água, enquanto 63% apresentaram redução devido ao aumento do uso humano da água.

3.6 RISCOS CLIMÁTICOS E IMPACTOS NA SEGURANÇA HÍDRICA

A segurança hídrica pode ser impactada por riscos climáticos associados a variabilidade e mudança climática. Estas são definidas pelo Glossário Hidrológico Internacional Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2012) como:

Variabilidade climática: Desvio de estatísticas climáticas durante um determinado período (mês, estação ou ano) das estatísticas climáticas de longo prazo relativas ao período correspondente do calendário.

Mudança climática: Modificação de longo prazo do clima resultante de um ou mais dos seguintes fatores: (i) mudanças internas no sistema climático; (ii) interação entre os componentes climáticos; (iii) mudanças nas forças externas causadas por fenômenos naturais ou por atividades humanas.

O sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças no Clima – IPCC (Arias, 2021) apresenta evidências de mudanças climáticas antropogênicas causadas por

emissões de gases de efeito estufa (GEE), resultando no aquecimento da atmosfera e em alterações no regime de chuvas e do clima.

Episódios recentes de eventos extremos e crise hídrica no Brasil

Eventos hidrológicos extremos, como secas e cheias, podem gerar impactos sociais, ecológicos e econômicos significativos, por representarem risco ao abastecimento de água, produção de alimentos, geração de energia elétrica e segurança humana (Brunner et al., 2021; Getirana, 2016). Por um lado, o Brasil é particularmente vulnerável a eventos de seca, que comprometem a água superficial e subterrânea, podendo afetar o abastecimento humano, irrigação e a produção agrícola e elétrica (Getirana, 2016). Por outro, eventos de precipitação extrema também causam impactos negativos consideráveis, uma vez que inundações repentinas podem ser os mais destrutivos dos eventos extremos (Marengo et al., 2009).

O Brasil experienciou diversas ocorrências de secas extremas nos últimos 10 anos. Na região norte, em especial, na Amazônia, destacam-se os eventos de 2005, 2010, 2015/2016 e 2023 (Costa e Marengo, 2023; Jiménez-Muñoz et al., 2016; Lewis et al., 2011; Marengo et al., 2011; Panisset et al., 2017). Na Amazônia, a seca pode afetar o abastecimento, a agricultura, a pesca, o transporte fluvial e a geração hidrelétrica e pode favorecer incêndios e a mortalidade de árvores (Marengo et al., 2018; Marengo e Espinoza, 2016). Ainda, em 2023, a seca extrema no Lago Tefé, no Amazonas, resultou na morte de mais de 150 botos e tucuxis (IDSM e ICMBio, 2023).

Na região nordeste, uma grande seca atuou de 2010 a 2017 (Marengo et al., 2018; Melati et al., 2019), comprometendo o abastecimento de água e energia e a agricultura de subsistência (Marengo et al., 2018). A região centro-oeste, em especial o Pantanal, sofreu com a seca em 2019-2020, o que gerou impactos sociais, ecológicos e econômicos, principalmente devido à incêndios que afetaram a biodiversidade, além da agricultura e da pesca (Marengo et al., 2021b).

Ainda, na região sudeste em 2014 e 2015 (Marengo et al., 2015), na região sul em 2020 (Grimm et al., 2020), e em ambas regiões em 2021 (Rao et al., 2022), a seca impactou a disponibilidade hídrica, com destaque para o abastecimento humano, e a produção agrícola e de energia elétrica (Getirana, 2016; Grimm et al., 2020). Em 2021, a seca afetou principalmente a bacia do Prata (Naumann et al., 2021).

Em relação as cheias no país, estas estão se tornando mais frequentes e intensas em regiões caracterizadas por condições úmidas, em especial, as regiões norte, sul e partes do sudeste (Bartiko et al., 2019). Entre 2012 e 2015, foram reportadas cheias severas na Amazônia, que afetaram agricultores, pescadores e comunidades ribeirinhas (Espinoza et al., 2014; Marengo e Espinoza, 2016), e um evento recorde de cheia foi reportado em

2021 na região (Rao et al., 2022). No começo de 2020, um evento extremo de chuva ocorreu na região sudeste do país, atingindo principalmente o estado de Minas Gerais, e deixando mortos e desabrigados devido a alagamentos e deslizamentos de terra (Dalagnol et al., 2022).

O início de 2022 também foi marcado por um grande evento de cheia na região sudeste, mais especificamente no estado do Rio de Janeiro, resultando, novamente, em mortes por deslizamentos de terra (Alcântara et al., 2022). Bartiko et al. (2019) identificaram uma forte sazonalidade nos eventos de cheias no país, com predomínio de eventos ocorrendo no verão, nas regiões sudeste, centro-oeste e nordeste, no inverno na região sul e no outono na região norte do Brasil.

Mais recentemente, entre 2022 e 2023 ocorreram diversas cheias extremas em diversas regiões do Brasil, incluindo Amazonas, bacia do rio Branco no Acre, Maranhão, Santa Catarina, Bahia, litoral paulista. Na Bacia do rio Taquari-Antas, no Rio Grande do Sul, mais de 40 mortes foram confirmadas devido às fortes chuvas que causaram uma cheia histórica na região, em setembro de 2023 (Goldenfum et al., 2023).

Impactos das mudanças climáticas

As mudanças no clima, decorrentes do aquecimento do planeta, podem levar a alterações na frequência, intensidade, extensão e duração de eventos extremos, podendo resultar em extremos climáticos sem precedentes (Hoegh-Guldberg et al., 2022; Seneviratne et al., 2012).

Marengo et al. (2021a) avaliam os impactos do aquecimento global (acima de 1.5°C) em eventos de precipitação extrema, e apontam para o aumento dos riscos de deslizamentos de terra e inundações, especialmente nas regiões sul e sudeste e na porção leste da região nordeste. Segundo os autores, os eventos de chuva extrema devem ser mais frequentes e intensos, e as populações em regiões metropolitanas estariam mais expostas a estes eventos.

Em relação a secas, Marengo et al. (2020) apontam para o risco de aumento da área sob condição de estresse hídrico no nordeste brasileiro, especialmente no semiárido, em cenários de aquecimento global. Os autores alertam que um aumento da temperatura até 4°C, poderia resultar no prevalecimento de condições áridas no nordeste do país, colocando em risco a população local.

Recentemente, Brêda et al. (2020) avaliaram projeções de futuros impactos de mudanças climáticas (2070 a 2100) nas precipitações e vazões médias na América do Sul simuladas com o modelo MGB e cenários do IPCC AR5. Conforme ilustrado na Figura 3.10, observa-se projeção de reduções de precipitação e vazões médias na região Norte

e aumento no Sul do Brasil. Os resultados foram publicados na base de dados SACCI (South American Climate Change Impacts on water resources dataset), disponível em <https://www.ufrgs.br/sacci/>.

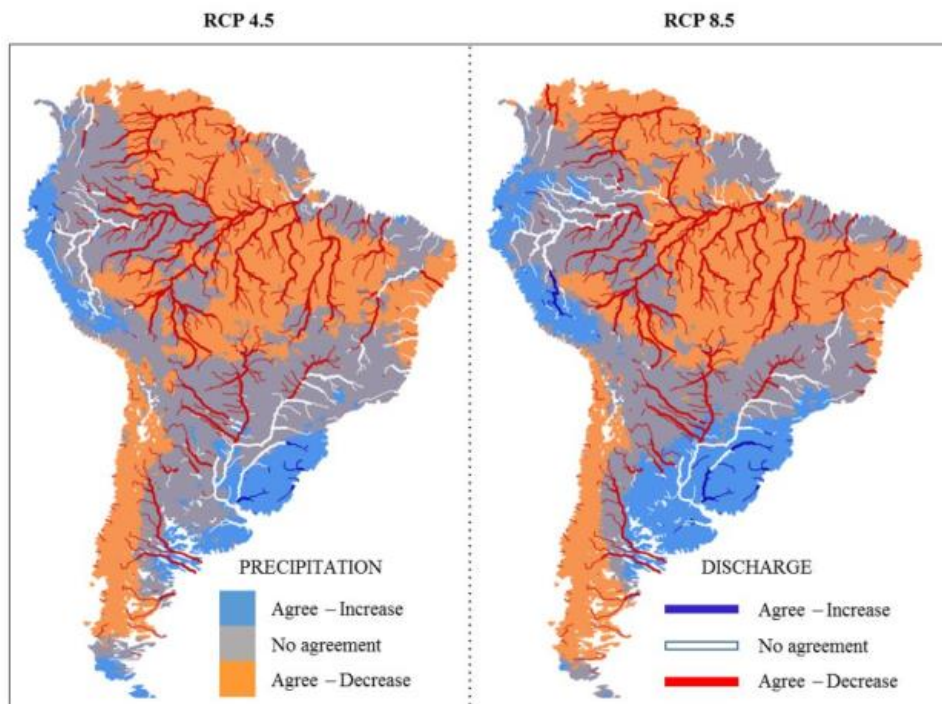


Figura 3.10. Projeções de mudanças na precipitação e vazão média na América do Sul. Grau de concordância entre previsões com MGB usando diferentes modelos climáticos globais. Fonte: Brêda et al. (2020).

Um trabalho recente, com foco sobre vazões máximas na América do Sul (bacias > 1000 km²), foi apresentado por Brêda et al. (2023). Os autores utilizaram o modelo hidrológico MGB com dados de quatro modelos climáticos, analisando alterações potenciais nas vazões máximas. Os resultados de Brêda et al. (2023) são apresentados na Figura 3.11, onde se observa que há razoável concordância entre os modelos de que as vazões máximas de baixo tempo de retorno (2 anos) vão diminuir no centro do Brasil, e aumentar na região Sul. No caso dos tempos de retorno maiores (22 anos), o quadro apresentado é semelhante, mas com um pouco menos de concordância entre os modelos.

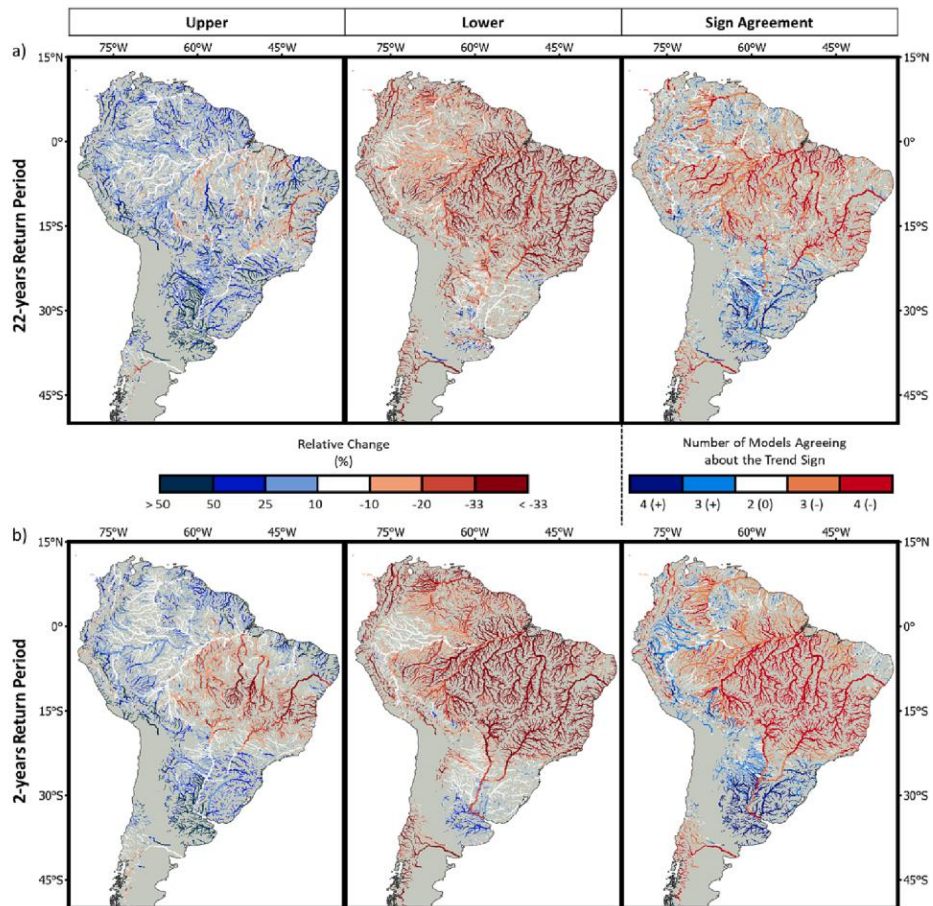


Figura 3.11. Projeção de alteração das vazões máximas de 2 anos e 22 anos de tempo de retorno. Os painéis esquerdo e central mostram os resultados da envoltória inferior e superior do conjunto de 4 modelos climáticos, e os painéis da direita indica a concordância entre esses modelos em relação à mudança de sinal. Fonte: Brêda et al. (2023).

4. ÍNDICE DE RISCO CLIMÁTICO PARA A AVALIAÇÃO DA INSEGURANÇA HÍDRICA

A segurança hídrica é definida pela *United Nations Water* como a capacidade de preservar o acesso a água, em quantidade e qualidade adequadas, de forma a garantir o bem-estar humano, os meios de subsistência, o desenvolvimento socioeconômico, a proteção contra a poluição da água e os desastres naturais, e a preservação dos ecossistemas (UN-Water, 2013). Em um estudo pioneiro sobre segurança hídrica, Vörösmarty et al. (2010) estimaram que quase 80% da população mundial (no ano base de 2000) estava exposta a altos níveis de ameaça à segurança hídrica, e 65% das vazões globais de rios estavam sob níveis de ameaça de moderado a alto. As mudanças climáticas podem ocasionar impactos no ciclo da água, ameaçando as infraestruturas hídricas existentes e tornando a população mais vulneráveis a eventos extremos e à insegurança hídrica (UN-Water, 2013).

A segurança hídrica pode ser descrita como o nível tolerável de risco relacionado à água para a sociedade, sendo o risco (situação envolvendo exposição ao perigo) compensado pela segurança (estado livre de perigo) (Grey et al., 2013). O risco é uma combinação de perigo, exposição e vulnerabilidade (Garrick e Hall, 2014). O perigo inclui ocorrências de secas e cheias, a exposição trata da concentração de pessoas, e a vulnerabilidade considera a falta de adaptação em termos de infraestruturas e governança adequadas (Hoekstra et al., 2018).

Eventos extremos podem causar impactos sociais, econômicos e ambientais. Por um lado, as secas comprometem a oferta de água para abastecimento humano, produção agrícola e geração de energia, por outro, eventos de cheias podem causar impactos negativos consideráveis pela ocorrência de inundações e deslizamentos. Ambos os eventos estão entre os desastres hidrológicos mais frequentes e, portanto, devem ser considerados nos índices de segurança hídrica.

A segurança hídrica climática está relacionada a múltiplos fatores, sendo necessário estabelecer um meio de quantificá-la através da aplicação de ferramentas que auxiliem na representação das regiões de maior risco às mudanças climáticas. Para analisar a ocorrência de eventos extremos, propriedades como magnitude e área afetada podem ser avaliadas por meio da duração do evento, da vazão mínima (para secas) e do pico de vazão (para cheias) (Brunner et al., 2021).

Em 2019, foi publicado pela ANA, em parceria com o MDR, o PNSH. Para formar o ISH, o PNSH considera quatro dimensões para a segurança hídrica (Humana, Econômica, Ecológica e de Resiliência), sendo cada dimensão composta de um ou mais indicadores, e cada indicador formado por uma combinação de variáveis ou atributos mensuráveis (ANA, 2019). Considerando os resultados do ISH, o PNSH apresenta

planejamentos de projetos e obras de infraestrutura hídrica até o ano de 2035, visando a redução dos impactos de secas e cheias no país. Ainda, autores apontam que a segurança hídrica não depende apenas de infraestrutura, mas também de sistemas adequados de governança hídrica, principalmente em cenários de crise hídrica (Cunha Libanio, 2020; Empinotti et al., 2019; Tundisi e Tundisi, 2016).

O ISH do PNSH atualmente considera os riscos potenciais das mudanças climáticas através da variabilidade pluviométrica estimada com a rede de estações pluviométricas nacional. Entretanto, as projeções de impactos das mudanças climáticas nas variáveis do balanço hídrico não são consideradas. Desse modo, a integração de análises de impactos das mudanças climáticas ao ISH se apresenta como um recurso para a investigação dos riscos associados a eventos extremos de secas e cheias nos próximos anos.

Para compreender o impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica na América do Sul, e se os eventos de secas e cheias se tornarão mais intensos e capazes de atingir maiores extensões de área no futuro, foi elaborado um Índice para Avaliação da Insegurança Hídrica devido a Mudanças Climáticas. Foram avaliadas as projeções de 28 modelos climáticos do CMIP6 utilizando um modelo hidrológico-hidrodinâmico (MGB-AS). As análises foram conduzidas para três períodos de 50 anos, sendo o período histórico de referência (1951–2000), e dois cenários futuros (2016–2065 e 2051–2100). Esta definição de períodos para a análise procura manter o período histórico de referência anterior aos eventos extremos observados no século XXI (Grimm et al., 2020; Jiménez-Muñoz et al., 2016; Lewis et al., 2011; Libonati et al., 2022; Voosen, 2021).

O índice foi proposto a partir da alteração projetada nos valores médios anuais de variáveis relacionadas à precipitação (P), vazão (Q), evapotranspiração (ET) e armazenamento de água terrestre (TWS). A variabilidade natural (coeficiente de variação) e a concordância do conjunto de modelos também foram quantificadas para estimar os impactos das mudanças climáticas nas variáveis disponibilidade de água, secas e cheias.

4.1 PROPOSIÇÃO E SELEÇÃO DE INDICADORES E VARIÁVEIS

O ISH apresentado no PNSH retrata os riscos associados aos usos da água em todo o território nacional. Os riscos climáticos são abordados no ISH através do indicador de “variabilidade pluviométrica”, que é estimada com a rede de estações pluviométricas nacional. Contudo, os cenários de impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos não são considerados atualmente. Dessa forma, novos indicadores devem ser incorporados ao ISH com o objetivo de representar os riscos associados as mudanças climáticas e eventos extremos nas dimensões humana, econômica, ecossistemas e resiliência.

A disponibilidade de água e a ocorrência de secas e cheias foram consideradas como indicadores de risco climático. Para expressar esses indicadores, foram selecionadas variáveis hidrológicas relacionadas à P, Q, ET e TWS, conforme mostra a Tabela 4.1. Foram selecionadas variáveis hidrológicas para as quatro dimensões definidas pelo PNSH (humana, econômica, ecossistemas e resiliência). Os resultados foram baseados em valores anuais das variáveis.

Tabela 4.1. Indicadores e variáveis hidrológicas para avaliação da segurança hídrica do Brasil, conforme as dimensões definidas pelo PNSH.

Indicador	Variável	Definição	Dimensões			
			Humana	Econômica	Ecossistemas	Resiliência
Disponibilidade Hídrica	$P_{média}$	Chuva média anual	x	x	x	
	$Q_{média}$	Vazão média anual	x	x	x	x
	$ET_{média}$	ET médio anual		x	x	x
	$TWS_{médio}$	Armazenamento médio anual		x	x	x
Secas	CDD	Dias secos consecutivos	x	x	x	x
	$Q_{95\%}$	Vazão mínima anual	x	x	x	x
Cheias	$P_{máx}$	Precipitação máxima anual em um dia			x	x
	$Q_{máx}$	Vazão máxima anual em um dia			x	x

Nota: sendo, P a precipitação, Q a vazão, ET a evapotranspiração e TWS o armazenamento de água terrestre.

As variáveis médias do balanço hídrico ($P_{média}$, $Q_{média}$, $ET_{média}$, $TWS_{médio}$) foram selecionadas para representar a disponibilidade hídrica. A análise das cheias se concentrou em sua magnitude, representada pelos valores máximos de pico $P_{máx}$ e $Q_{máx}$. Por outro lado, a análise de secas considerou a duração do evento, representada pelo número máximo de dias secos consecutivos (CDD, sigla em inglês “*consecutive dry days*”), e a magnitude das secas foi representada pelas vazões mínimas (vazão com 95% de permanência no tempo, Q_{95}).

Os indicadores e variáveis são descritos a seguir.

Disponibilidade Hídrica

$P_{média}$: a precipitação média anual ($P_{média}$) é determinada pela média das chuvas no ano.

$Q_{média}$: a vazão média anual ($Q_{média}$) é determinada pela média das vazões no ano.

$ET_{\text{média}}$: a evapotranspiração real média anual ($ET_{\text{média}}$) representa a estimativa da evapotranspiração anual que ocorre em determinada região.

$TWS_{\text{médio}}$: o armazenamento total de água médio ($TWS_{\text{médio}}$) inclui estoques de águas superficiais naturais, no solo, e subterrâneas, sendo determinado pela média no período analisado.

Secas

CDD: o número de dias secos consecutivos (CDD) é utilizado para representar a duração máxima de dias consecutivos secos (com taxa de precipitação diária <1 mm).

Q_{95} : A vazão com 95% de permanência no tempo (Q_{95}) representa a vazão mínima, sendo utilizada para representar a vazão de referência de disponibilidade hídrica nos períodos de estiagem. Essa variável se refere a vazão que é igualada ou superada em 95% do tempo.

Cheias

$P_{\text{máx}}$: a precipitação máxima anual em um dia ($P_{\text{máx}}$) é utilizada para representar chuvas intensas.

$Q_{\text{máx}}$: a vazão máxima anual ($Q_{\text{máx}}$) é determinada pela vazão máxima em um dia e representa risco para ocorrência de cheias.

4.2 DESCRIÇÃO DO ÍNDICE E MÉTRICAS UTILIZADAS

A insegurança hídrica pode ser causada por fatores hidroclimáticos como: (i) excesso ou falta de água, em média, (ii) variabilidade natural entre os anos, e (iii) efeito adicional das alterações climáticas. O primeiro fator tem sido amplamente estudado ao redor do mundo, geralmente considerando a disponibilidade de água *versus* a demanda de água (e.g., Kaur et al., 2019; Rodrigues et al., 2014; Veetil et al., 2022). Inclusive, as atuais dimensões do ISH abrangem o primeiro fator. Deste modo, aqui, iremos focar no segundo e terceiro fatores, relacionados com a variabilidade natural da disponibilidade de água e o potencial de aumento da insegurança hídrica devido aos impactos das alterações climáticas. Assim, desenvolvemos um índice para avaliar o aumento da insegurança hídrica devido às mudanças climáticas. Esta seção descreve as métricas aplicadas no índice.

A fim de considerar os riscos climáticos, as variáveis serão avaliadas em termos de:

Referência: o valor de referência médio considerando o histórico recente;

Variabilidade Climática: a variabilidade no histórico recente (coeficiente de variação) representando a variabilidade climática, e

Mudanças Climáticas: alteração projetada nas próximas décadas devido às mudanças climáticas.

Três métricas foram utilizadas para avaliação dos indicadores do índice: a concordância entre os modelos, o coeficiente de variação (CV), e a alteração projetada (Δp).

A concordância entre os modelos foi abordada para avaliar adequadamente as incertezas das 28 projeções climáticas utilizadas na análise. Foi assumida como concordância a condição em que dois terços dos modelos apresentam o mesmo sinal para Δp , indicando condições mais secas ou mais úmidas nos períodos futuros.

O CV foi utilizado para avaliar a variabilidade climática natural de cada região, ou seja, essa métrica considera apenas o cenário histórico (1950–2000). O CV é determinado como o desvio padrão dos valores anuais no período histórico dividido pela média dos valores anuais no período histórico, representando a variabilidade interanual.

Δp é a métrica estatística para avaliar a magnitude das mudanças climáticas (Equação 1) avaliando as alterações nas variáveis no futuro em comparação com o período histórico:

$$\Delta p_{(x,i)} = \frac{\bar{X}_{f(x,i)} - \bar{X}_{h(x,i)}}{\bar{X}_{h(x,i)}} \quad (1)$$

onde $\Delta p_{(x,i)}$ (%) é calculado para uma localização (mini-bacia) (x) e modelo climático (i) específicos, \bar{X}_h e \bar{X}_f representam as variáveis anuais, em média, para o período histórico ($\bar{X}_{h(x,i)}$) e futuro ($\bar{X}_{f(x,i)}$), respectivamente. O período histórico corresponde ao período de referência (1951–2000) e o futuro aos dois diferentes períodos analisados (2016–2065 e 2051–2100). Assim, foram obtidos resultados de Δp para ambos os períodos futuros de interesse.

O índice da componente de mudança climática para aumento da insegurança hídrica foi baseado no Δp para as variáveis de seca (CDD e Q_{95}) e de cheia ($P_{m\acute{a}x}$ e $Q_{m\acute{a}x}$). Foram utilizadas duas variáveis para cada tipo de evento (secas e cheias), sendo uma variável relacionada à P e outra à Q. As cheias foram representadas pela magnitude (valores máximos) e as secas pela duração (dias consecutivos) e pela magnitude (valores mínimos) do evento. Desse modo, as variáveis médias do balanço hídrico, utilizadas para representar a disponibilidade hídrica, não foram englobadas no índice final, que teve por foco a representação de secas e cheias.

O cálculo do Δp obteve, primeiramente, as variáveis anuais por projeção dos modelos climáticos globais (GCM, em inglês), para gerar a concordância entre os modelos. Para o CDD, foram selecionados apenas valores positivos de Δp (Equação 2), e para a Q_{95} ,

apenas valores negativos de Δp (Equação 3) (representando condições de aumento de secas). Além disso, para $P_{m\acute{a}x}$ (Equação 4) e $Q_{m\acute{a}x}$ (Equação 5), apenas valores positivos de Δp foram selecionados (representando condições de aumento de cheias).

$$CDD\Delta p_{(x,i)} = \frac{\overline{CDD}f_{(x,i)} - \overline{CDD}h_{(x,i)}}{\overline{CDD}h_{(x,i)}} > 0 \quad (2)$$

$$Q_{95}\Delta p_{(x,i)} = \frac{\overline{Q_{95}}f_{(x,i)} - \overline{Q_{95}}h_{(x,i)}}{\overline{Q_{95}}h_{(x,i)}} < 0 \quad (3)$$

$$P_{m\acute{a}x}\Delta p_{(x,i)} = \frac{\overline{P_{m\acute{a}x}}f_{(x,i)} - \overline{P_{m\acute{a}x}}h_{(x,i)}}{\overline{P_{m\acute{a}x}}h_{(x,i)}} > 0 \quad (4)$$

$$Q_{m\acute{a}x}\Delta p_{(x,i)} = \frac{\overline{Q_{m\acute{a}x}}f_{(x,i)} - \overline{Q_{m\acute{a}x}}h_{(x,i)}}{\overline{Q_{m\acute{a}x}}h_{(x,i)}} > 0 \quad (5)$$

Em seguida, os resultados das projeções GCM foram agregados por média, para obter um único valor para cada variável, em cada mini-bacia, para cada período futuro de interesse (sendo 2016–2065 e 2051–2100).

Foram definidos intervalos de Δp para facilitar as operações e a classificação do grau de segurança hídrica. Diversas distribuições dos valores de Δp foram testadas para definição dos intervalos, considerando a visualização final no mapa da componente de mudança climática para aumento da insegurança hídrica. Foram definidos diferentes intervalos de Δp para as variáveis de seca e cheia, uma vez que as variáveis de seca possuem maior magnitude de Δp do que as variáveis de cheia (para ilustração ver Figura 1A). Assim, a classificação para secas assumiu intervalos de Δp maiores do que a classificação para cheias. Ainda, para a Q_{95} foram aplicados os mesmos critérios do que para o CDD (para valores negativos de Δp).

Para cada intervalo de Δp , foi atribuído um valor arbitrário de 0 a 5, para ser utilizado em um cálculo de média das variáveis de seca e das variáveis de cheia. Foi calculada uma média dos valores de CDD e Q_{95} para a análise de seca ($Indice_{secas(x)}$, Equação 6) e o mesmo foi aplicado para valores de $P_{m\acute{a}x}$ e $Q_{m\acute{a}x}$ para a análise de cheias ($Indice_{cheias(x)}$, Equação 7). Os resultados nesta fase foram utilizados para determinar o aumento da insegurança hídrica devido à eventos de secas e cheias, separadamente.

$$\acute{I}ndice_{secas(x)} = \overline{(CDD\Delta p_{(x)}, Q_{95}\Delta p_{(x)})} \rightarrow \text{valor de 0 a 5} \quad (6)$$

$$\acute{I}ndice_{cheias(x)} = \overline{(P_{m\acute{a}x}\Delta p_{(x)}, Q_{m\acute{a}x}\Delta p_{(x)})} \rightarrow \text{valor de 0 a 5} \quad (7)$$

O último passo foi agrupar os resultados do índice de secas ($\text{Índice}_{secas(x)}$) e de cheias ($\text{Índice}_{cheias(x)}$) em um único índice de aumento da insegurança hídrica. O desafio nesta etapa foi manter bem representadas as regiões com maior risco de secas e/ou cheias. Ainda, o valor médio de seca e de cheia foi reclassificado para corresponder as classes do ISH do PNSH, de modo que, valores iguais a 5 (maiores alterações) passaram a ser classificados como valor 1 (menor grau de segurança hídrica).

Dessa forma, foi realizada uma classificação final do índice (Equação 8) para manter apenas os valores inteiros máximos do índice de seca e do índice de cheias. A Figura 1B apresenta a matriz final para classificação dos valores de secas e cheias e definição do grau de segurança hídrica para a componente de mudança climática.

$$\text{Índice}_{(x)} = \text{máx}(\text{Índice}_{secas(x)}, \text{Índice}_{cheias(x)}) \quad (8)$$

O grau (valor) de segurança hídrica da componente de mudança climática foi classificado sendo: mínimo (1), baixo (2), médio (3), alto (4), máximo (5). Assim, o índice foi capaz de representar as regiões de segurança (que apresentam projeções de alteração mais baixas para secas e cheias) e regiões de insegurança (com projeções de alteração mais elevadas para secas e/ou cheias).

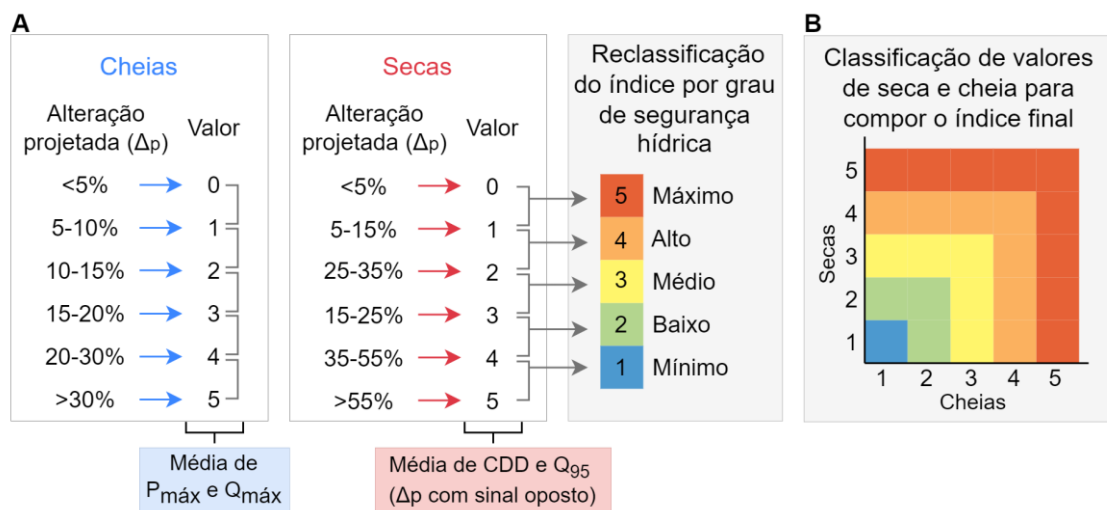


Figura 4.1. Estrutura para obtenção do índice de secas e cheias (A) e do índice final (B).

Resultados com concordância entre projeções GCM inferiores a dois terços não foram removidos da análise, considerando que o índice é uma composição de diferentes variáveis, o que resultaria muitos locais sem dados. Além disso, ao adotar uma metodologia que considera a média do conjunto de modelos, as regiões com menor concordância resultaram em menores valores de Δp e, portanto, menor risco climático.

4.3 MÉTODOS

América do Sul: hidrologia e disponibilidade hídrica

A América do Sul fornece cerca de 30% do escoamento continental total que chega aos oceanos (Clark et al., 2015). A maior bacia da América do Sul é a bacia Amazônica (Figura 4.2A), que está localizada entre os Andes Tropicais a oeste, os escudos do Brasil e das Guianas a leste, e a planície amazônica, que cobre quase metade da área total da bacia (Brêda et al., 2020). A precipitação média anual em toda a bacia amazônica é de cerca de 2.200 mm (Nobre et al., 2016). A segunda maior bacia do continente é a bacia do Prata, formada pelos Andes a oeste e pelo Planalto Brasileiro e a Serra do Mar a nordeste e leste (Berbery e Barros, 2002). A bacia do Prata consiste basicamente em três grandes sub-bacias, correspondentes aos rios Paraná, Paraguai e Uruguai.

Os três principais tipos climáticos que abrangem a América do Sul são o tropical A (60,1%), seguido do temperado C (24,1%) e do árido B (15,0%), segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (Figura 4.2B). O tipo climático Polar E é encontrado nos Andes, principalmente como resultado da elevada altitude (ver Figura 4.2C), ao longo do extremo sul do Chile e da Argentina (Peel et al., 2007). A Cordilheira dos Andes é uma formação que ocorre continuamente perto da costa oeste do continente com elevações acima de 4 km (Garreaud et al., 2009).

A América do Sul possui cerca de 54 mil lagos e reservatórios (com área superior a 0,1 km²), cobrindo uma área de aproximadamente 140 mil km² (Messenger et al., 2016) (Figura 4.2D). Seus grandes rios mais importantes são o Amazonas, Orinoco, Paraná, Paraguai, Magdalena e São Francisco, sendo que todos, exceto o São Francisco, são acompanhados por extensas planícies adjacentes de várzea (Junk, 2013). Além disso, as áreas úmidas cobrem cerca de 12% da superfície da América do Sul (Fleischmann et al., 2023; Fluet-Chouinard et al., 2015) (Figura 4.2D).

O continente possui cerca de 300 reservatórios, cobrindo uma área de aproximadamente 36.232 km² (Messenger et al., 2016) (Figura 4.2E). Estas estruturas fornecem água para diversos usos como abastecimento de água à população (Figura 4.2F), geração de energia, agricultura, entre outros. No que diz respeito à agricultura, nas últimas décadas, ocorreu uma expansão das terras agrícolas nas regiões baixas da América do Sul, em países como Brasil, Argentina, Paraguai, Bolívia e Uruguai, e grande parte da região dos Pampas foi convertida em paisagens agrícolas homogêneas (Potapov et al., 2022) (Figura 4.2E).

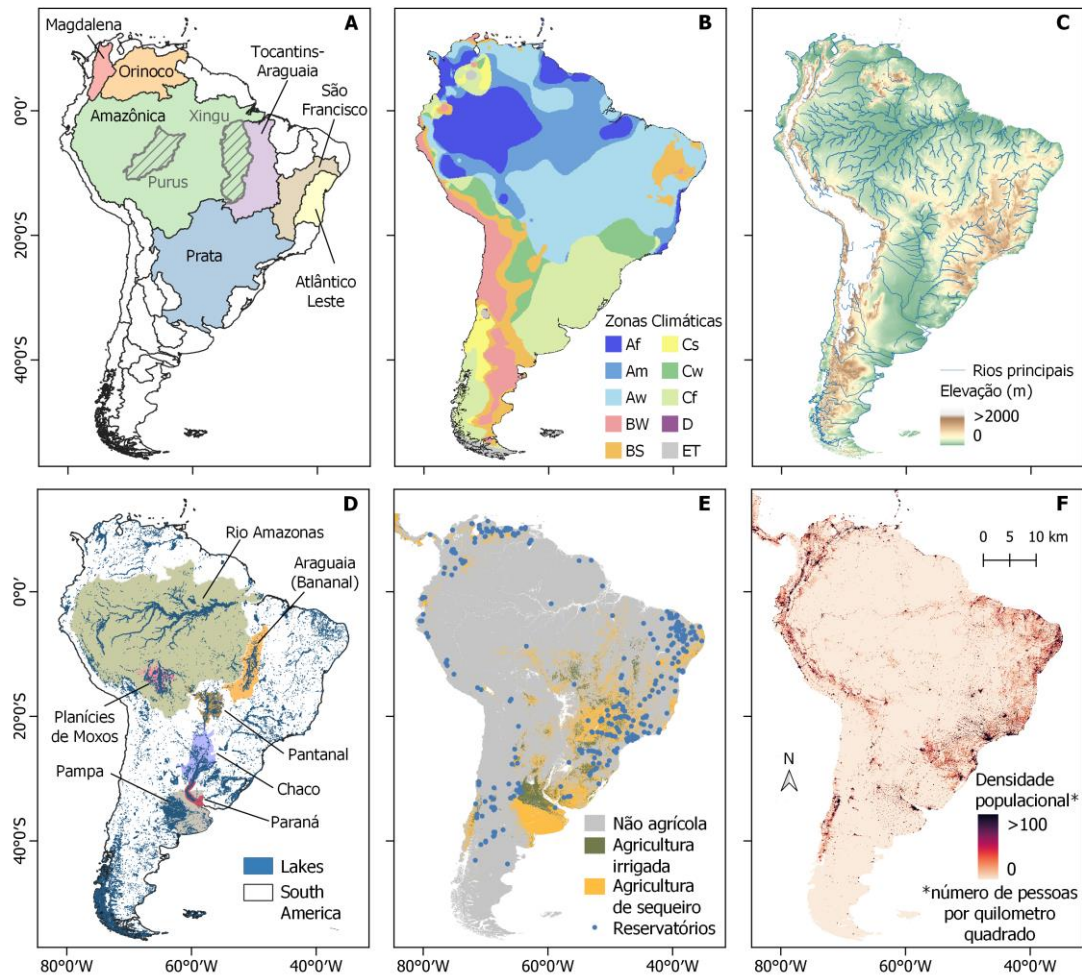


Figura 4.2. Características da América do Sul. A, maiores bacias hidrográficas. B, classificação climática atualizada de Köppen-Geiger de Peel et al. (2007). C, mapa de relevo baseado em dados digitais de elevação SRTM de Jarvis et al. (2008), incluindo os principais rios. D, lagos, com área superficial maior que 10 ha (Messenger et al., 2016) e grandes zonas húmidas (com base na classificação de Fleischmann et al. (2023) e nas ecorregiões de Dinerstein et al. (2017)). E, áreas de cultivo de sequeiro e irrigadas (Teluguntla et al., 2023) e reservatórios (Messenger et al., 2016). F, densidade populacional, em número de pessoas por quilômetro quadrado (CIESIN, 2018). Os símbolos climáticos de Köppen são definidos como (Peel et al., 2007): Af – Floresta tropical, Am – Monção tropical, Aw – Savana tropical, BW – Deserto árido, BS – Estepe árida, Cs – Verão temperado seco, Cw – Temperado de inverno seco, Cf – Temperado sem estação seca, D – Frio e ET – Tundra Polar.

Projeções climáticas

As projeções dos GCM foram obtidas da base de dados *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) (Thrasher et al., 2022), com base nos resultados do CMIP6. Esta base de dados globais contém projeções de diversas variáveis climáticas, com viés corrigido e resolução espacial de 0,25°. Os dados NEX-GDDP-CMIP6 estão disponíveis em: <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6>. Cada uma das projeções climáticas compreende

variáveis médias diárias para os períodos 1950–2000 (“histórico”) e 2015–2100 (“futuro”).

A base de dados de referência para remoção de viés foi o *Global Meteorological Forcing Dataset for Land Surface Modeling* (GMFD) (Sheffield et al., 2006). Variáveis meteorológicas diárias de 28 GCM, como precipitação, temperatura do ar, radiação incidente de ondas curtas e velocidade do vento, foram utilizadas como dados de entrada no modelo hidrológico. O cenário de emissões selecionado foi o SSP2-4.5 (O’Neill et al., 2016).

Modelagem hidrológica

O MGB-SA é um modelo hidrológico-hidrodinâmico, conceitual e semidistribuído, para o domínio continental da América do Sul (Siqueira et al., 2018). Este modelo hidrológico de grande escala foi selecionado por representar os principais processos hidrológicos de grandes bacias sul-americanas, sendo utilizado em estudos de mudanças climáticas (Brêda et al., 2023, 2020). Os resultados do MGB-SA foram obtidos para redes de drenagem discretizadas em trechos de rios com 15 km de extensão, que produzem mais de 30.000 mini-bacias para todo o continente, com áreas de drenagem maiores que 1.000 km² (Brêda et al., 2023).

Considerando que a base de dados NEX-GDDP-CMIP6 teve seu viés corrigido considerando os dados de precipitação da base GMFD como referência, foi realizada uma recalibração do MGB-SA com dados do GMFD para evitar vieses e reduzir erros sistemáticos e incertezas nos resultados. Os parâmetros do MGB-SA forçados com dados de precipitação do GMFD foram recalibrados quando necessário e os resultados foram avaliados em estações fluviais localizadas nos principais rios da América do Sul, para o período 1980-2000. O modelo MGB-SA recalibrado apresenta melhor precisão na representação dos fluxos fluviais.

Cada uma das 28 projeções de GCM do NEX-GDDP-CMIP6 foram utilizadas como dados de entrada no MGB-SA, incluindo a precipitação. Os principais resultados hidrológicos obtidos foram vazão, evapotranspiração e armazenamento de água terrestre, para cada modelo. Em seguida, as análises foram conduzidas com três períodos distintos de 50 anos, um período de histórico de referência (1950–2000), e dois períodos futuros (2016–2065 e 2051–2100). A Figura 3 resume o processo de análise de dados para avaliar os indicadores de segurança hídrica.

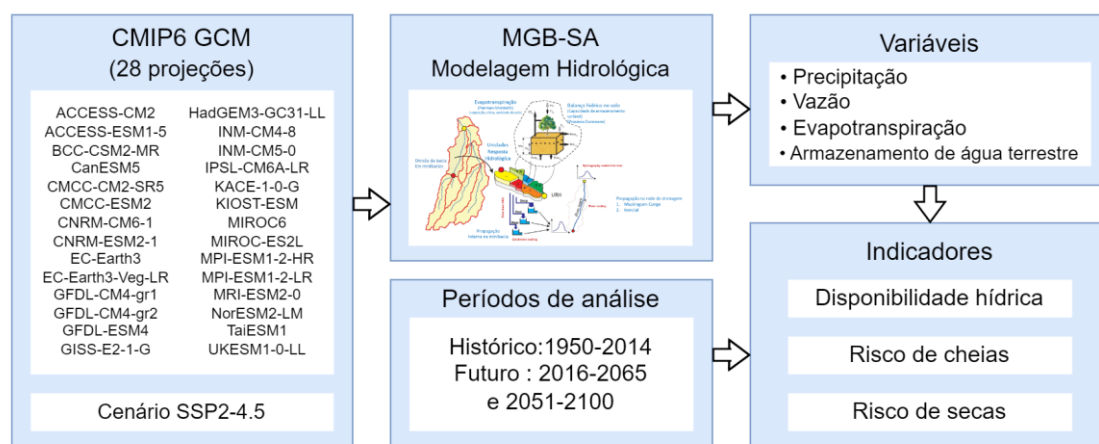


Figura 4.3. Fluxograma utilizado neste estudo para processamento de dados e avaliação de indicadores de segurança hídrica.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Disponibilidade hídrica em cenários futuros

A variabilidade natural (CV), a alteração projetada (Δp) e a concordância entre os modelos foram estimadas, em valores médios anuais, para as variáveis médias do balanço hídrico ($P_{médica}$, $Q_{médica}$, $ET_{médica}$ e $TWS_{médico}$), para avaliar os impactos das mudanças climáticas na disponibilidade de água em diferentes regiões da América do Sul nos períodos de 2016–2065 (Figura 4.4) e 2051–2100 (Figura 4.5).

O CV apresenta sinal mais forte para $Q_{médica}$ quando comparado às demais variáveis analisadas, principalmente na região Nordeste brasileira (maior que 50%) e na região entre os Andes e a Patagônia (alcança 100%). A região Nordeste brasileira é caracterizada pela baixa disponibilidade hídrica, sendo uma das regiões com menor segurança hídrica do país segundo o Plano Nacional de Segurança Hídrica (ANA, 2019). As projeções climáticas nos Andes são divididas em duas regiões, conforme observado por Brêda et al. (2020), com sinal positivo (mais úmido) nos Andes Tropicais, e sinal negativo (mais seco) entre os Andes e a Patagônia. Contudo, destaca-se a incerteza do modelo hidrológico nesta região, devido à não representação do derretimento das geleiras (Brêda et al., 2020).

As projeções de $P_{médica}$ foram de redução (entre 0 e -20%) do centro para o norte da América do Sul, e na região sul do continente, entre os Andes e a Patagônia, com concordância entre os modelos, exceto para parte da região Nordeste do Brasil. No Uruguai, sul do Brasil e norte da Argentina foram observadas projeções de aumento (entre 0 e 10%) na $P_{médica}$, com concordância entre os modelos. Esses resultados foram observados em ambos os períodos futuros (2016–2065 e 2051–2100), com maiores magnitudes para o período de 2051–2100.

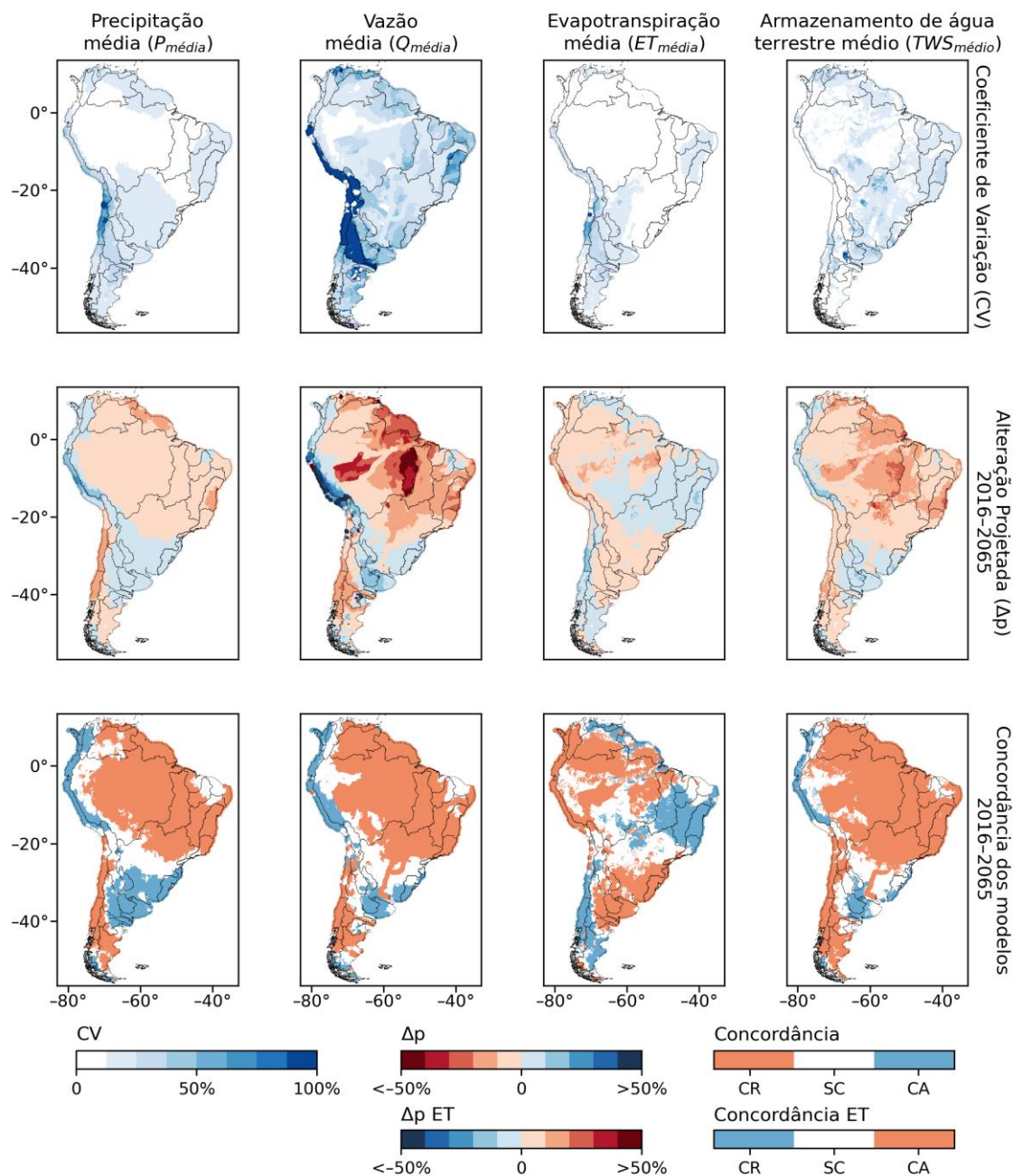


Figura 4.4. Coeficiente de variação (CV) e alteração projetada (Δp) para variáveis de disponibilidade hídrica (P, Q, ET e TWS) na América do Sul (período de 2016–2065). O CV é referente ao período histórico. A concordância entre os modelos para Δp é apresentada e categorizada em três classes: CR – concordância para redução, SC – sem concordância e CA – concordância para aumento.

A maior parte do Brasil mostra sinais de redução projetada na $Q_{m\acute{e}dia}$, com reduções inferiores a -50% sendo observadas na Bacia Amazônica (para ambos os períodos futuros) e na Bacia da Costa Atlântica Leste e nas regiões dos Andes e da Patagônia para o período de 2051–2100. Por outro lado, na região Sul do Brasil, espera-se que as vazões médias aumentem no período futuro, como também mostrado em Ribeiro Neto et al. (2016), provavelmente por consequência do aumento das chuvas na região.

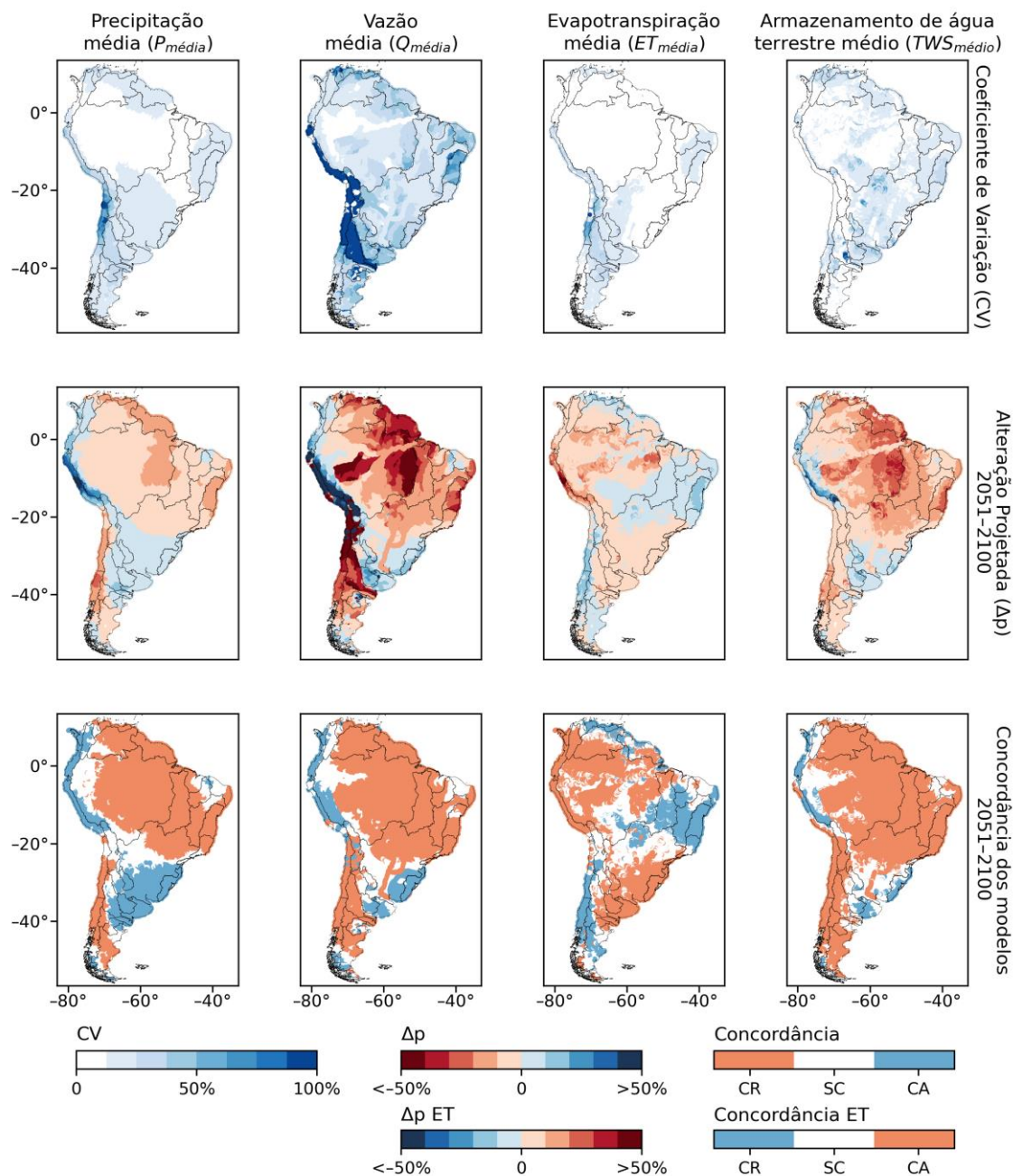


Figura 4.5. Coeficiente de variação (CV) e alteração projetada (Δp) para variáveis de disponibilidade hídrica (P, Q, ET e TWS) na América do Sul (período de 2051–2100). O CV é referente ao período histórico. A concordância entre os modelos para Δp é apresentada e categorizada em três classes: CR – concordância para redução, SC – sem concordância e CA – concordância para aumento.

Para a $ET_{m\acute{e}dia}$, foi observado sinal de aumento na bacia Amaz\~{o}nica e regi\~{a}o dos Andes Tropicais (atingindo valores acima de 10%) e no sul do Brasil, Uruguai e norte da Argentina (at\~{e} 10%), com concord\~{a}ncia entre os modelos. Nesse sentido, Br\~{e}da et al. (2020) mostraram que a bacia amaz\~{o}nica \~{e} muito \~{u}mida e parcialmente composta por \~{a}reas \~{u}midas, portanto, anomalias negativas de P n\~{a}o limitariam a \~{a}gua dispon\~{i}vel para a ET. Al\~{e}m disso, Br\~{e}da et al. (2023), apontam proje\~{c}\~{o}es de redu\~{c}\~{a}o da umidade do solo na maior parte do continente. Em rela\~{c}\~{a}o ao $TWS_{m\acute{e}dio}$, foram verificadas proje\~{c}\~{o}es de

redução na maior parte da América do Sul, com sinal muito semelhante ao da $Q_{\text{média}}$, porém, com menor magnitude.

Impactos em eventos extremos de cheias e secas

A alterações projetadas (Δp) nas variáveis significativas para secas (CDD e Q_{95}) e cheias ($P_{\text{máx}}$ e $Q_{\text{máx}}$) foram estimadas em valores médios anuais, para a análise de impactos projetados sobre eventos extremos na América do Sul para os períodos de 2016–2065 (Figura 4.6) e 2051–2100 (Figura 4.7).

Em relação às secas, o CDD revela um aumento na maior parte da América do Sul (exceto nos Andes Tropicais), com ênfase na região norte do continente (com aumentos superiores a 50%, especialmente no período 2051–2100), com concordância entre os modelos. Ao mesmo tempo, foram verificadas projeções de redução significativa nas vazões mínimas (Q_{95}), na maior parte do continente, alcançando valores inferiores a -50% na porção norte do continente (bacias do Amazonas e do Orinoco, e a região nordeste do Brasil), e na região da Patagônia (especialmente para o período de 2051–2100).

Para as cheias, um aumento na $P_{\text{máx}}$ (valores principalmente entre 0 e 20%, alcançando valores maiores no período de 2051–2100) foi observado em praticamente toda a América do Sul (exceto na região entre os Andes e a Patagônia e parte da região nordeste brasileira), com concordância entre os modelos. Para o período de 2021 a 2065, Brêda et al. (2023) apontaram um aumento de P extrema mais concentrado na bacia do Uruguai (sudeste da América do Sul), e ainda, na Amazônia ocidental.

Além disso, foi observado aumento projetado para a $Q_{\text{máx}}$ na região do Uruguai, sul do Brasil, norte da Argentina e na Amazônia Ocidental. O mesmo comportamento foi observado por Brêda et al. (2023) para fluxos máximos com tempo de retorno de 2 anos. A região da costa norte do nordeste do Brasil também aponta para aumento na $Q_{\text{máx}}$. Por outro lado, foram observadas projeções de reduções na $Q_{\text{máx}}$ em parte da bacia Amazônica, com destaque para a região das bacias do Purus e do Xingu.

Assim, as projeções futuras indicam secas de alta magnitude, considerando Δp para CDD e Q_{95} , nas regiões centro-norte da América do Sul e na região mais ao sul do continente, entre os Andes e a Patagônia. Em termos de impactos de cheias, foi projetado aumento na magnitude desses eventos para a região do Uruguai, sul do Brasil, norte da Argentina e Amazônia Ocidental/Andes tropicais, considerando o Δp para $P_{\text{máx}}$ e $Q_{\text{máx}}$. Os impactos projetados de secas e cheias futuras foram particularmente elevados para o período 2051–2100.

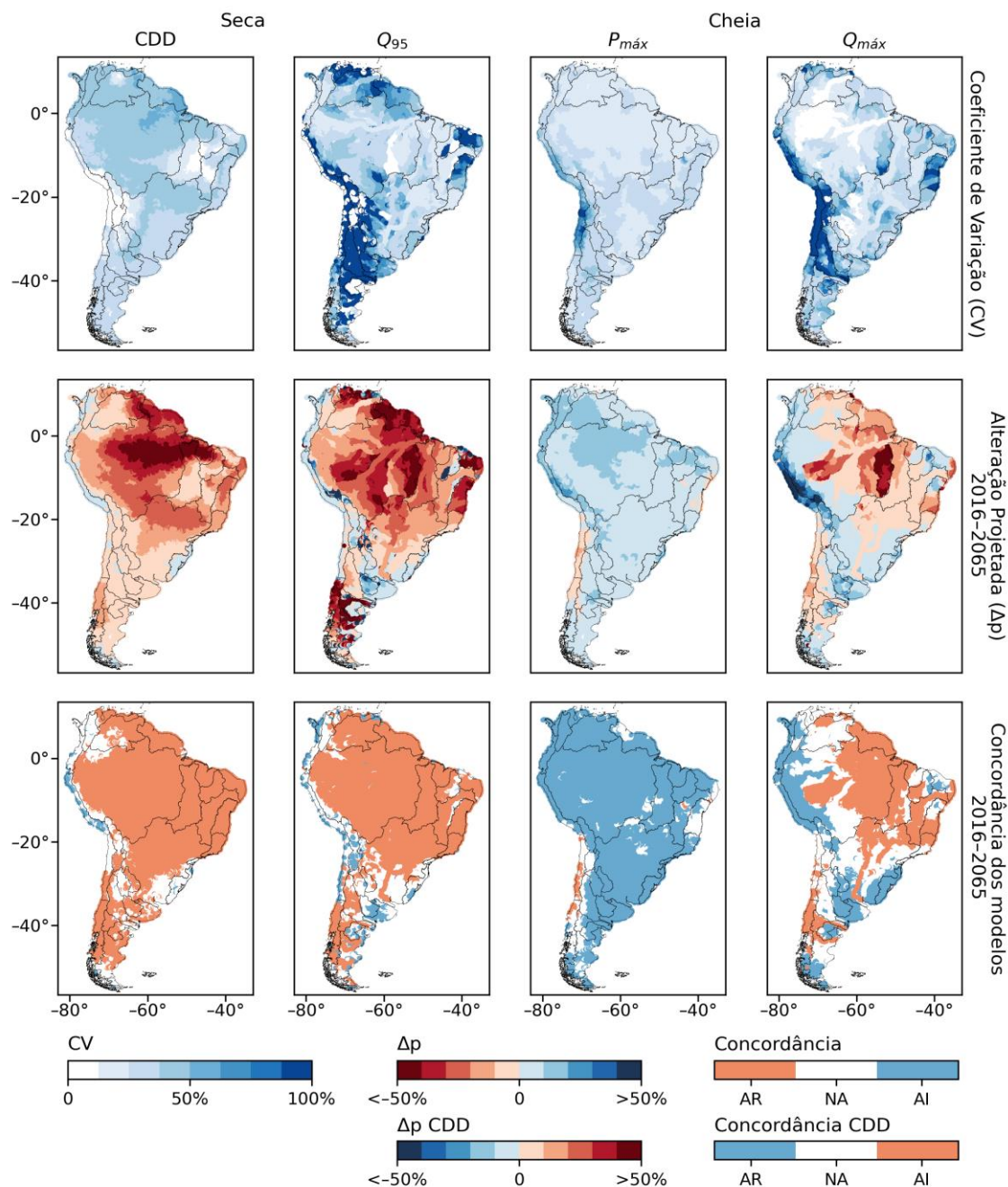


Figura 4.6. Coeficiente de variação (CV) e alteração projetada (Δp) para variáveis de seca (CDD e Q_{95}) e cheia ($P_{máx}$ e $Q_{máx}$) na América do Sul (período de 2016–2065). O CV é referente ao período histórico. A concordância entre os modelos para Δp é apresentada e categorizada em três classes: CR – concordância para redução, SC – sem concordância e CA – concordância para aumento.

Cabe destacar que as projeções indicam redução da Q_{95} e aumento da $P_{máx}$ em praticamente todo o continente. A redução da Q_{95} poderá resultar em impactos significativos para o ecossistema e para a população, bem como afetar o uso da água. O Informe Anual de Conjuntura dos Recursos Hídricos de 2022 da ANA aponta que nas bacias semiáridas a maioria dos rios seca durante as estações secas, portanto a garantia do abastecimento de água só pode ser alcançada a partir de reservatórios artificiais ou

por transferência de água de outras bacias (ANA, 2023). Com a estimativa de redução futura na Q_{95} , entende-se que poderá haver uma maior demanda por reservação hídrica na região Nordeste brasileira.

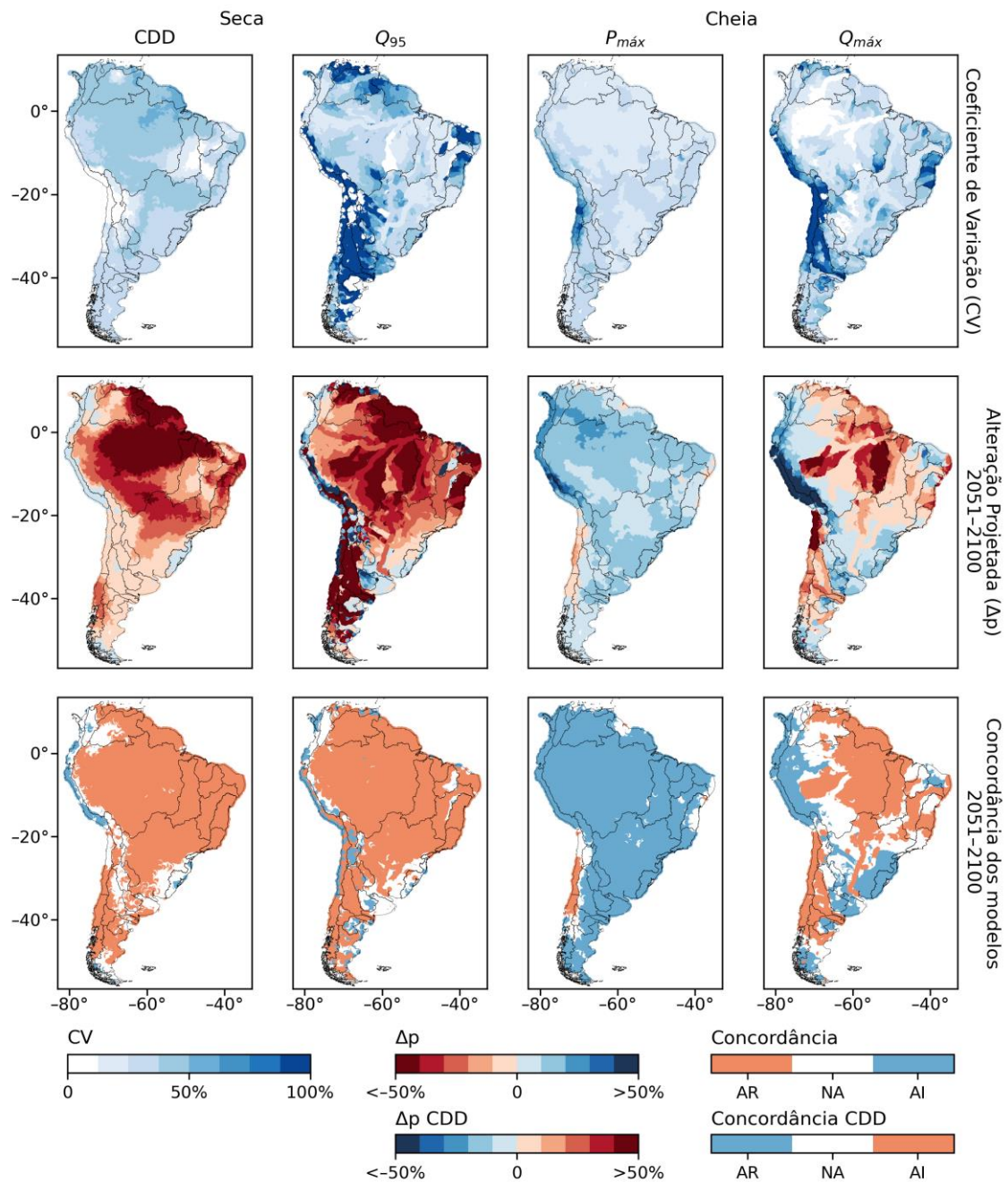


Figura 4.7. Coeficiente de variação (CV) e alteração projetada (Δp) para variáveis de seca (CDD e Q_{95}) e cheia ($P_{m\acute{a}x}$ e $Q_{m\acute{a}x}$) na América do Sul (período de 2051–2100). O CV é referente ao período histórico. A concordância entre os modelos para Δp é apresentada e categorizada em três classes: CR – concordância para redução, SC – sem concordância e CA – concordância para aumento.

Aumento da Insegurança Hídrica em Eventos de Secas e Cheias

O mapa do índice de secas e cheias para aumento da insegurança hídrica na América do Sul foi obtido pela agregação dos valores de Δp para variáveis de secas (CDD e Q_{95}) e de cheias ($P_{m\acute{a}x}$ e $Q_{m\acute{a}x}$). Os resultados do componente de mudança climática para os períodos de 2016–2065 e 2051–2100 são apresentados na Figura 4.8.

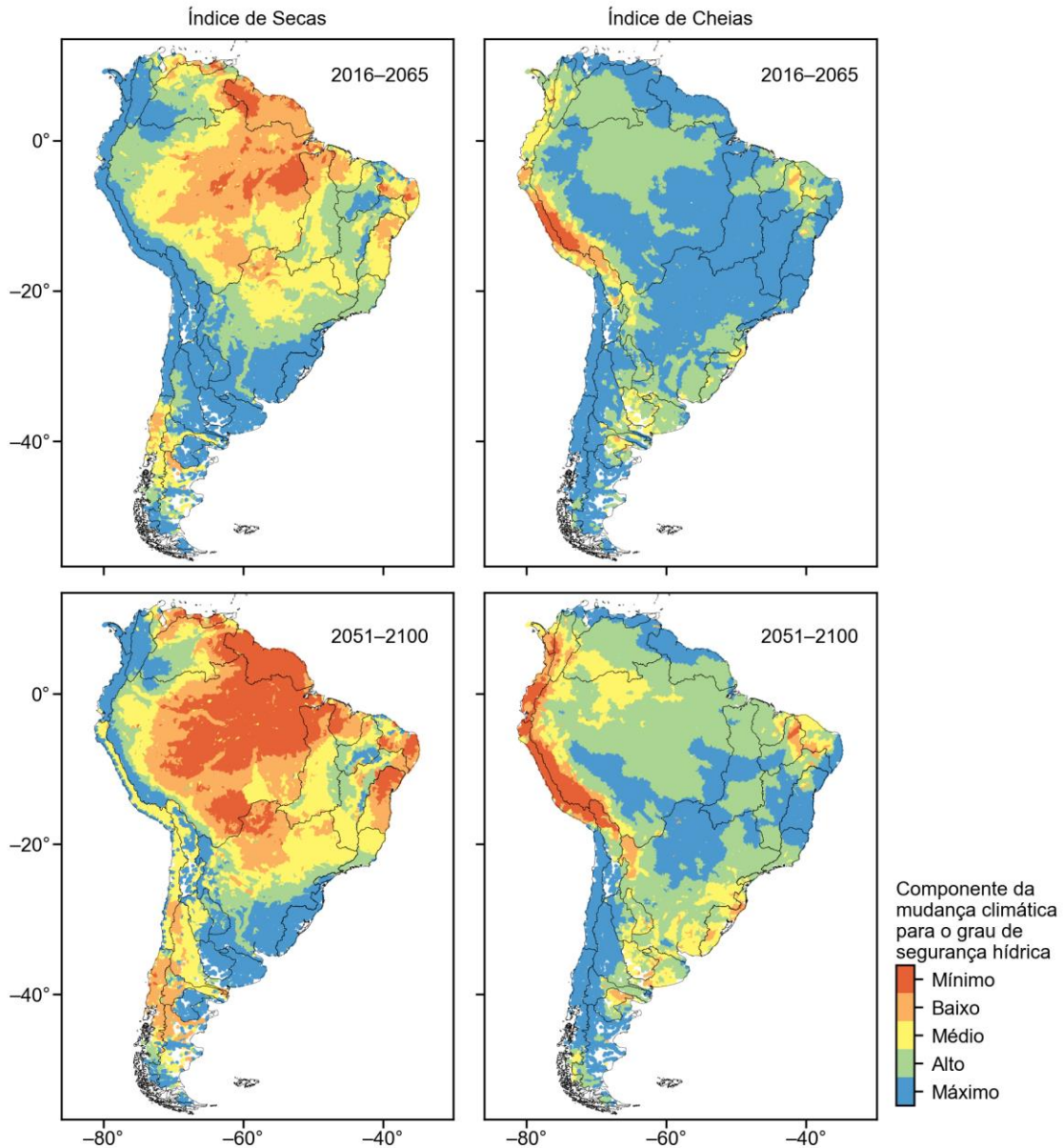


Figura 4.8. Componente da mudança climática para o grau de segurança hídrica por secas (esquerda) e cheias (direita) na América do Sul para os períodos de 2016–2065 (acima) e 2051–2100 (abaixo).

Para as secas, o mapa mostra as áreas com maior aumento projetado no CDD e redução na vazão mínima (Q_{95}). As regiões com baixa segurança hídrica para secas concentram-se nas regiões norte, nordeste e centro da América do Sul, com grande impacto na região amazônica, especialmente no rio Amazonas e suas áreas inundáveis, e em outras áreas

úmidas como a Planície de Moxos e o Pantanal. Neste sentido, Chagas et al. (2022) já observaram tendências de secas na região sul da Amazônia nos últimos anos (1980–2015), considerando a análise da vazão mínima anual de 7 dias de duração. Na Amazônia, as secas meteorológicas (relacionadas à P) favorecem os incêndios florestais e a mortalidade de árvores, levando à reversão da condição da floresta de sumidouro a fonte de carbono (Marengo and Espinoza, 2016). A região entre os Andes e a Patagônia também apresentou um sinal de baixa segurança hídrica para secas.

Em relação às cheias, destaca-se a região dos Andes Tropicais e Amazônia Ocidental, onde se projeta que $P_{máx}$ e $Q_{máx}$ aumentem, resultando em baixíssima segurança hídrica para cheias. Além disso, as cheias também foram projetadas para aumentar na região nordeste do continente e na região do Uruguai, sul do Brasil e norte da Argentina. De acordo com Breda et al., 2023, espera-se que a umidade do solo seja reduzida na maior parte do continente, exceto no sudeste da América do Sul, onde se espera que a $P_{máx}$ anual aumente. De fato, estudos de tendências de cheias dos últimos anos já apontam para tendências positivas na região sul/sudeste do Brasil e oeste da Amazônia, considerando vazões anuais máximas (Chagas et al., 2022; Merz et al., 2021).

De modo geral, observou-se para o período da segunda metade do século (2051–2100) que a região norte da América do Sul deverá sofrer mais com secas extremas, enquanto o Uruguai, o norte da Argentina e o sul do Brasil deverão experimentar eventos de cheias extrema mais intensos. Além disso, a região nordeste do Brasil deverá sofrer os impactos de eventos de seca (principalmente na costa leste) e cheias (costa norte) mais intensos. No nordeste brasileiro a precipitação anual está na faixa de 500 mm (áreas semiáridas) a mais de 1.500 mm (litoral e noroeste) (Oliveira et al., 2017). Assim, espera-se que as secas aumentem na região naturalmente mais úmida.

Aumento da Insegurança Hídrica devido às Mudanças Climáticas

Para combinar os índices de secas e cheias em um único índice de risco climático, foram consideradas as regiões com maior risco para ambos os eventos, para os períodos de 2016–2065 e 2051–2100 (Figura 4.9A-B). As regiões com grau mínimo de segurança hídrica pelo componente de mudança climática, causadas por secas e/ou cheias, são identificadas na Figura 4.9C-D.

O índice final é importante para destacar as regiões com maior risco de aumento da insegurança hídrica devido às mudanças climáticas. Regiões com mínima e baixa segurança hídrica devem ser prioridade para ações dos agentes gestores de águas e para criação de políticas públicas. Nesse sentido, as regiões do Rio Amazonas, Amazônia Ocidental, Sul da Amazônia e o nordeste brasileiro foram consideradas *hotspots* de mudança para extremos climáticos (Figura 4.9A-B).

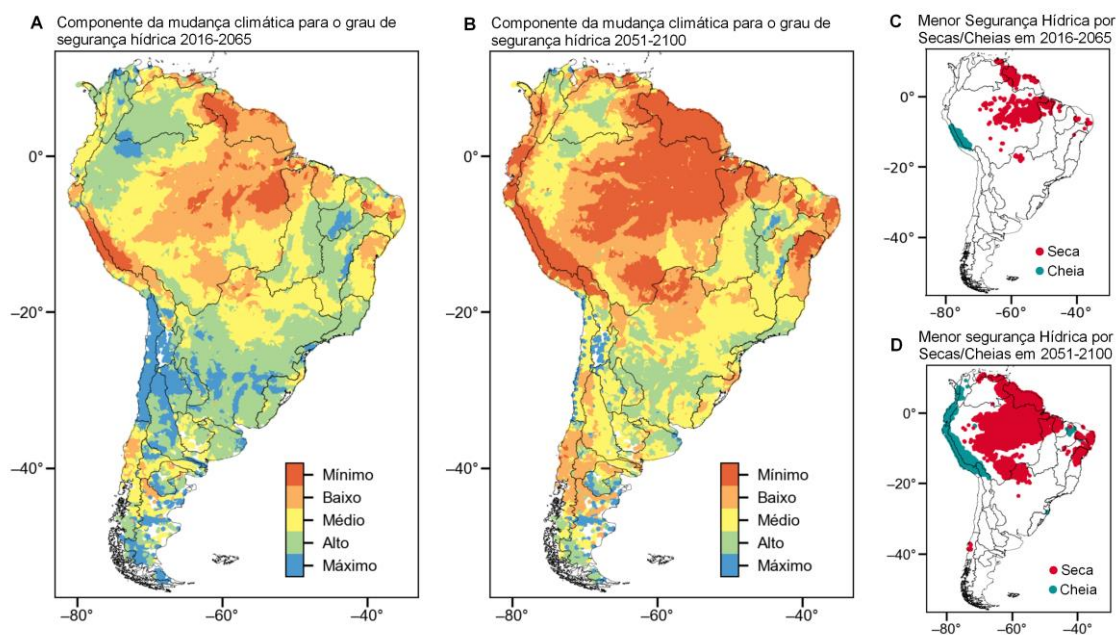


Figura 4.9. Componente da mudança climática para o grau de segurança hídrica na América do Sul, nos períodos de 2016–2065 (A, C) e 2051–2100 (B, D). A, B: A legenda do índice refere-se a condições em que secas e/ou cheias resultam em grau de segurança hídrica máximo, alto, médio, baixo ou mínimo. C, D: Regiões com grau mínimo de segurança hídrica causada por secas e/ou cheias.

Em relação ao aumento da insegurança hídrica devido às mudanças climáticas, o nordeste brasileiro provavelmente sofrerá com os efeitos de episódios mais intensos de secas e cheias no futuro, especialmente mais perto do litoral. O índice de segurança hídrica do PNSH (ANA, 2019), para o cenário 2035, mostrou que o nordeste do Brasil, incluindo a bacia do São Francisco, apresenta risco à segurança hídrica devido à baixa disponibilidade hídrica. No entanto, como mostra na Figura 4.9, não se espera que a bacia do rio São Francisco experimente um aumento significativo na insegurança hídrica pelo componente de mudança climática.

Neste sentido, é importante observar as regiões com elevada variabilidade natural para variáveis de seca e cheias, pois um alto CV pode resultar em uma segurança hídrica “aparentemente” alta. Porém, isso ocorre basicamente devido à região ter baixa disponibilidade hídrica natural. Por exemplo, a bacia do rio São Francisco, no Brasil, caracterizada por um clima árido, tem CV (para secas) superior a 75%, sendo mostrada como uma região de alta segurança hídrica no mapa da Figura 4.9. Ainda, ao se avaliar uma região específica, é importante revisar os valores de Δp de cada variável utilizada para compor o índice final, de modo a compreender qual variável possui maior impacto para aumento da insegurança hídrica na região de interesse.

Ainda, o ISH do PNSH (ANA, 2019) aponta ainda para o risco de secas no sul do país, devido ao uso de água para irrigação. Por outro lado, este estudo mostrou que as alterações climáticas deverão resultar em maiores eventos de cheias nesta região. Ao se

comparar os dois índices, é possível visualizar que regiões do Brasil que atualmente não são inseguras em termos hídricos, poderão se transformar em áreas críticas de segurança hídrica na segunda metade do século.

Em relação às áreas úmidas, destaca-se a elevada alteração projetada, especialmente no Rio Amazonas e na Planície dos Moxos (na Bacia Amazônica), e no Pantanal. O aumento da insegurança hídrica devido às secas pode levar à perda de diversidade nestas zonas húmidas. Por exemplo, uma seca em grande escala já afetou o Pantanal em 2020, desencadeando os incêndios mais impactantes já registrados na região, que destruíram grande parte do bioma (Fleischmann et al., 2023; Libonati et al., 2020).

Para a bacia Amazônica, nas últimas décadas diversos eventos de seca extrema foram registrados (2005, 2010, 2015/2016), com destaque para a seca de 2023 que resultou no aumento da temperatura das águas e consequente morte de peixes e mamíferos aquáticos, além de ter provocado a redução no abastecimento de água, e interrompido o transporte fluvial de diversas comunidades (Costa e Marengo, 2023; IDSM e ICMBio, 2023). Breda et al. (2023) apontam que grandes bacias hidrográficas são mais suscetíveis a sinais negativos de precipitação extrema na América do Sul, portanto, espera-se que os eventos de precipitação extrema que levam a cheias em grandes rios diminuam. O cenário para a segurança hídrica da Amazônia é ainda mais preocupante com o intenso uso das florestas e a crescente ocupação das cidades (Marengo e Espinoza, 2016).

No geral, a parte norte da América do Sul concentra as regiões com grau mínimo de segurança hídrica para secas e cheias (Figura 4.9C-D). O aumento conjunto da severidade de cheias e secas é um fenômeno chamado “aceleração” do componente do ciclo da água (Chagas et al., 2022). Considerando a tendência dos últimos anos (1980–2015), Chagas et al. (2022) já apontam para a ocorrência de aceleração em cerca de 29% do Brasil, principalmente na região sul da Amazônia. Conforme observado na Figura 4.9, o fenômeno da aceleração (cheias e secas mais severas) é considerável na região sul da Amazônia.

Apesar da relevância do índice final (Figura 4.9A-B), é importante lembrar que este índice agrega secas e cheias por áreas de menor segurança hídrica, portanto, não representa primariamente se o risco ocorre devido à ocorrência de secas, de cheias ou ambas. Portanto, é importante que o mapa final seja utilizado como uma primeira ferramenta de análise, e posteriormente, para compreender de forma mais ampla os fatores que levaram à insegurança hídrica em cada região, podem ser consultados os mapas anteriores de cada variável, que foram utilizados para gerar o mapa final.

Potenciais e Limitações

O desenvolvimento de um índice para avaliar o componente de mudança climática para aumento da insegurança hídrica na América do Sul pode beneficiar a gestão regional e continental dos recursos hídricos e a gestão de riscos relacionados a água. Com isso, este estudo revelou quatro *hotspots* de alteração na América do Sul: o Rio Amazonas, a Amazônia Ocidental, o sul da Amazônia e o nordeste do Brasil. Para garantir a segurança hídrica no futuro, em regiões com previsão de aumento de secas e cheias, é necessário pensar em estratégias no presente.

Cunha Libanio (2020) destacou que a segurança hídrica não depende apenas de infraestruturas, mas também do estabelecimento de sistemas adequados de governança hídrica, que promovam iniciativas de conservação da água. Empinotti et al. (2019) e Tundisi e Tundisi (2016) também mostram a importância da governança para garantir a segurança hídrica, especialmente em cenários de crise hídrica. Marengo e Espinoza (2016) apontaram para a necessidade de desenvolver e implementar políticas e estratégias de gestão de risco que possam abordar as particularidades regionais. A estrutura proposta neste estudo é capaz de representar as alterações projetadas mais baixas e mais elevadas para as variáveis de secas e cheias em uma análise de grande escala, fornecendo informações sobre áreas críticas para mudança climática, que requerem maior atenção da governança hídrica.

Como limitação do método utilizado, destaca-se a falta de concordância no conjunto de modelos para determinadas variáveis em algumas regiões do continente. Contudo, regiões com menor concordância do modelo tendem a apresentar valores mais baixos de alteração projetada. Pela metodologia adotada neste estudo, ao combinar a alteração projetada de mais de uma variável em um índice, regiões com menor concordância resultaram em menor risco. Assim, as regiões com maior insegurança hídrica são as regiões de concordância dos modelos. Isso reforça a importância do estudo, apontando as regiões de maior risco em períodos futuros. Além disso, recomenda-se para próximos estudos a avaliação de mais variáveis (para aumentar a robustez da análise de secas e cheias extremas) e o foco em análises regionais (para melhor compreender os processos que levam ao risco em cada local).

Por fim, também houve limitações na modelagem hidrológica. O desempenho do MGB-SA é melhor em grandes rios e regiões úmidas, e pior em climas áridos e semiáridos. Além disso, o MGB-SA apresenta limitações na Cordilheira dos Andes devido à influência do degelo e da complexa orografia da região. No entanto, o modelo MGB-SA foi aplicado e teve bom desempenho em estudos anteriores na América do Sul (e.g., Breda et al, 2023, 2020, Siqueira 2018) e é uma alternativa aos modelos globais para superar as limitações das estimativas de vazões globais em escala continental (Siqueira 2018).

4.5 CONCLUSÕES

Neste estudo desenvolvemos um índice para avaliar o componente de mudança climática para aumento da insegurança hídrica na América do Sul. Variáveis meteorológicas diárias de 28 modelos climáticos foram utilizadas como dados de entrada no modelo hidrológico MGB-SA. Para análises de disponibilidade hídrica, secas e cheias, foram avaliadas oito variáveis relacionadas a P, Q, ET e TWS. Desse modo, foi possível identificar as áreas de maior risco para secas e cheias no continente.

As principais conclusões do estudo foram:

- As projeções indicam que P, Q e TWS médios terão redução no centro e norte da América do Sul e nos Andes Tropicais (alcançando até -50% de redução na Q média em algumas regiões);
- A região norte da América do Sul deverá enfrentar secas extremas mais intensas, enquanto o Uruguai, o sul do Brasil e o norte da Argentina deverão enfrentar mais cheias extremas;
- O Nordeste do Brasil deverá enfrentar eventos mais intensos, tanto de secas (na costa leste), quanto de cheias (costa norte);
- O Rio Amazonas, a Amazônia Ocidental, o sul da Amazônia e o nordeste do Brasil foram identificados como *hotspots* de alteração projetada para secas e cheias na América do Sul;
- As regiões com grau mínimo de segurança hídrica da componente de mudança climática, para secas e cheias, estão concentradas na parte norte do continente;
- O mapa da componente de mudança climática para aumento da insegurança hídrica é uma ferramenta para identificar as regiões de maior risco, no entanto, para compreender de forma mais ampla os fatores que levaram à insegurança hídrica em cada região, devem ser consultados os mapas anteriores de cada variável do índice.

Avaliar as mudanças projetadas nas variáveis relacionadas com secas e cheias é importante para quantificar o aumento esperado na severidade de eventos extremos futuros. Ainda, para próximos estudos recomenda-se avaliar mais variáveis hidrológicas e focar em regiões específicas de interesse. Apesar de existirem algumas limitações nos modelos, este estudo demonstra a relevância de combinar GCM e modelo hidrológico para análise em grande escala de eventos extremos. O desenvolvimento de um índice baseado em um componente de mudança climática para aumento da insegurança hídrica foi útil para compreender os impactos das mudanças climáticas na América do Sul. Espera-se que este índice contribua para estratégias de gestão de recursos hídricos para estabelecer sistemas adequados de governança hídrica.

5. REFERÊNCIAS

- Alcântara, E., Marengo, J.A., Mantovani, J., Londe, L., San, R.L.Y., Park, E., Lin, Y.N., Mendes, T., Cunha, A.P., Pampuch, L., Seluchi, M., Simões, S., Cuartas, L.A., Massi, K., Alvalá, R., Moraes, O., Filho, C.S., Mendes, R., Nobre, C., 2022. Deadly disasters in Southeastern South America: Flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* 2022, 1–27. <https://doi.org/10.5194/nhess-2022-163>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), 2023. Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022: informe anual / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília.
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), 2019. Plano Nacional de Segurança Hídrica / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília.
- Arias, P.A., N. Bellouin, E. Coppola, R.G. Jones, G. Krinner, J. Marotzke, V. Naik, M.D. Palmer, G.-K. Plattner, J. Rogelj, M. Rojas, J. Sillmann, T. Storelvmo, P.W. Thorne, B. Trewin, K. Achuta Rao, B. Adhikary, R.P. Allan, K. Armour, G. Bala, R. Barimalala, S. Berger, J.G. Canadell, C. Cassou, A. Cherchi, W. Collins, W.D. Collins, S.L. Connors, S. Corti, F. Cruz, F.J. Dentener, C. Dereczynski, A. Di Luca, A. Diongue Niang, F.J. Doblas-Reyes, A. Dosio, H. Douville, F. Engelbrecht, V. Eyring, E. Fischer, P. Forster, B. Fox-Kemper, J.S. Fuglestedt, J.C. Fyfe, N.P. Gillett, L. Goldfarb, I. Gorodetskaya, J.M. Gutierrez, R. Hamdi, E. Hawkins, H.T. Hewitt, P. Hope, A.S. Islam, C. Jones, D.S. Kaufman, R.E. Kopp, Y. Kosaka, J. Kossin, S. Krakovska, J.-Y. Lee, J. Li, T. Mauritsen, T.K. Maycock, M. Meinshausen, S.-K. Min, P.M.S. Monteiro, T. Ngo-Duc, F. Otto, I. Pinto, A. Pirani, K. Raghavan, R. Ranasinghe, A.C. Ruane, L. Ruiz, J.-B. Sallée, B.H. Samset, S. Sathyendranath, S.I. Seneviratne, A.A. Sörensson, S. Szopa, I. Takayabu, A.-M. Tréguier, B. van den Hurk, R. Vautard, K. von Schuckmann, S. Zaehle, X. Zhang, and K. Zickfeld, 2021: Technical Summary. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144. doi:10.1017/9781009157896.002.
- Babel, M.S., Shinde, V.R., Sharma, D., Dang, N.M., 2020. Measuring water security: A vital step for climate change adaptation. *Environ. Res.* 185, 109400. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109400>
- Bakker, K., 2012. Water Security: Research Challenges and Opportunities. *Science* (80-.). 337, 914–915. <https://doi.org/10.1126/science.1226337>
- Ballarin, A.S., Sousa Mota Uchôa, J.G., dos Santos, M.S., Almagro, A., Miranda, I.P., da Silva, P.G.C., da Silva, G.J., Gomes Júnior, M.N., Wendland, E., Oliveira, P.T.S., 2023. Brazilian Water Security Threatened by Climate Change and Human Behavior.

Bartiko, D., Oliveira, D.Y., Bonumá, N.B., Chaffe, P.L.B., 2019. Spatial and seasonal patterns of flood change across Brazil. *Hydrol. Sci. J.* 64, 1071–1079. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1619081>

Berbery, E.H., Barros, V.R., 2002. The Hydrologic Cycle of the La Plata Basin in South America. *J. Hydrometeorol.* 3, 630–645. [https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2002\)003<0630:THCOTL>2.0.CO;2](https://doi.org/https://doi.org/10.1175/1525-7541(2002)003<0630:THCOTL>2.0.CO;2)

Bloomfield, J.P., Marchant, B.P., 2013. Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 4769–4787. <https://doi.org/10.5194/hess-17-4769-2013>

Blöschl, G., 2022. Three hypotheses on changing river flood hazards. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 26, 5015–5033. <https://doi.org/10.5194/hess-26-5015-2022>

Brêda, J.P.L.F., Cauduro Dias de Paiva, R., Siqueira, V.A., Collischonn, W., 2023. Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. *J. Hydrol.* 619, 129284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129284>

Brêda, J.P.L.F., de Paiva, R.C.D., Collischon, W., Bravo, J.M., Siqueira, V.A., Steinke, E.B., 2020. Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Clim. Change* 159, 503–522. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9>

Brunner, M.I., Slater, L., Tallaksen, L.M., Clark, M., 2021. Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review. *WIREs Water* 8, e1520. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wat2.1520>

Chagas, V.B.P., Chaffe, P.L.B. & Blöschl, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nat Commun* 13, 5136 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32580-x>

CIESIN, 2018. Gridded Population of the World, Version 4 (GPWv4): Population Density, Revision 11. Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University. <https://doi.org/10.7927/H49C6VHW>.

Clark, E.A., Sheffield, J., van Vliet, M.T.H., Nijssen, B., Lettenmaier, D.P., 2015. Continental Runoff into the Oceans (1950–2008). *J. Hydrometeorol.* 16, 1502–1520. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0183.1>

Costa, F., Marengo, J., 2023. Statement on the 2023 Amazon Drought and its Unforeseen Consequences. *The Amazon We Want*. https://www.theamazonwewant.org/wp-content/uploads/2023/12/231207-AMAZON-DROUGHT-STATEMENT_ENGLISH.pdf.

- Cunha Libanio, P.A., 2020. Water reforms in Brazil: Challenges and opportunities for promoting water security in a continental-sized country. *World Water Policy* 6, 230–245. <https://doi.org/10.1002/wwp2.12042>
- Dalagnol, R., Gramscianinov, C.B., Crespo, N.M., Luiz, R., Chiquetto, J.B., Marques, M.T.A., Neto, G.D., de Abreu, R.C., Li, S., Lott, F.C., Anderson, L.O., Sparrow, S., 2022. Extreme rainfall and its impacts in the Brazilian Minas Gerais state in January 2020: Can we blame climate change? *Clim. Resil. Sustain.* 1, e15. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/cli2.15>
- Daneshi, A., Brouwer, R., Najafinejad, A., Panahi, M., Zarandian, A., Maghsood, F.F., 2021. Modelling the impacts of climate and land use change on water security in a semi-arid forested watershed using InVEST. *J. Hydrol.* 593, 125621. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125621>
- Dinerstein, E., Olson, D., Joshi, A., Vynne, C., Burgess, N.D., Wikramanayake, E., Hahn, N., Palminteri, S., Hedao, P., Noss, R., Hansen, M., Locke, H., Ellis, E.C., Jones, B., Barber, C.V., Hayes, R., Kormos, C., Martin, V., Crist, E., Sechrest, W., Price, L., Baillie, J.E.M., Weeden, D., Suckling, K., Davis, C., Sizer, N., Moore, R., Thau, D., Birch, T., Potapov, P., Turubanova, S., Tyukavina, A., de Souza, N., Pinteá, L., Brito, J.C., Llewellyn, O.A., Miller, A.G., Patzelt, A., Ghazanfar, S.A., Timberlake, J., Klöser, H., Shennan-Farpón, Y., Kindt, R., Lillesø, J.-P.B., van Breugel, P., Graudal, L., Vogé, M., Al-Shammari, K.F., Saleem, M., 2017. An Ecoregion-Based Approach to Protecting Half the Terrestrial Realm. *Bioscience* 67, 534–545. <https://doi.org/10.1093/biosci/bix014>
- Dubey, S.K., Sharma, D., Babel, M.S., Mundetia, N., 2020. Application of hydrological model for assessment of water security using multi-model ensemble of CORDEX-South Asia experiments in a semi-arid river basin of India. *Ecol. Eng.* 143, 105641. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105641>
- Empinotti, V.L., Budds, J., Aversa, M., 2019. Governance and water security: The role of the water institutional framework in the 2013–15 water crisis in São Paulo, Brazil. *Geoforum* 98, 46–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.09.022>
- Espinoza, J.C., Marengo, J.A., Ronchail, J., Carpio, J.M., Flores, L.N., Guyot, J.L., 2014. The extreme 2014 flood in south-western Amazon basin: the role of tropical-subtropical South Atlantic SST gradient. *Environ. Res. Lett.* 9, 124007. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/12/124007>
- Falkenmark, M., 1989. The Massive Water Scarcity Now Threatening Africa: Why Isn't It Being Addressed? *Ambio* 18, 112–118.
- Fleischmann, A.S., Laipelt, L., Papa, F., Paiva, R.C.D. de, de Andrade, B.C., Collischonn, W., Biudes, M.S., Kayser, R., Prigent, C., Cosio, E., Machado, N.G., Ruhoff, A., 2023. Patterns and drivers of evapotranspiration in South American wetlands. *Nat. Commun.* 14, 6656. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42467-0>

- Fluet-Chouinard, E., Lehner, B., Rebelo, L.-M., Papa, F., Hamilton, S.K., 2015. Development of a global inundation map at high spatial resolution from topographic downscaling of coarse-scale remote sensing data. *Remote Sens. Environ.* 158, 348–361. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.015>
- Garreaud, R.D., Vuille, M., Compagnucci, R., Marengo, J., 2009. Present-day South American climate. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 281, 180–195. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2007.10.032>
- Garrick, D., Hall, J.W., 2014. Water Security and Society: Risks, Metrics, and Pathways. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 39, 611–639. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-013012-093817>
- Gerlak, A.K., House-Peters, L., Varady, R.G., Albrecht, T., Zúñiga-Terán, A., de Grenade, R.R., Cook, C., Scott, C.A., 2018. Water security: A review of place-based research. *Environ. Sci. Policy* 82, 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.01.009>
- Gesualdo, G.C., Sone, J.S., Galvão, C. de O., Martins, E.S., Montenegro, S.M.G.L., Tomasella, J., Mendiondo, E.M., 2021. Unveiling water security in Brazil: current challenges and future perspectives. *Hydrol. Sci. J.* 66, 759–768. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1899182>
- Getirana, A., 2016. Extreme Water Deficit in Brazil Detected from Space. *J. Hydrometeorol.* 17, 591–599. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-15-0096.1>
- Global Water Partnership, 2000. *Towards Water Security: A Framework for Action*. GWP, Stockholm.
- Goldenfum, J.A., Ruhoff, A., Fan, F.M., Paiva, R., Collischonn, W., Dornelles, F., Meirelles, F., Michel, G.P., Kobiyama, M., 2023. Nota sobre a cheia ocorrida nos dias 4 e 5 de setembro na Bacia do rio Taquari-Antas. Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.
- Grey, D., Garrick, D., Blackmore, D., Kelman, J., Muller, M., Sadoff, C., 2013. Water security in one blue planet: twenty-first century policy challenges for science. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 371, 20120406. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0406>
- Grimm, A.M., Almeida, A.S., Beneti, C.A.A., Leite, E.A., 2020. The combined effect of climate oscillations in producing extremes: the 2020 drought in southern Brazil. *RBRH* 25. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020200116>
- Hall, J., Borgomeo, E., 2013. Risk-based principles for defining and managing water security. *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 371, 20120407. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0407>
- Hao, Z., AghaKouchak, A., 2013. Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model. *Adv. Water Resour.* 57, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2013.03.009>

- Hoegh-Guldberg, O., Jacob, D., Taylor, M., Bindi, M., Brown, S., Camilloni, I., Diedhiou, A., Djalante, R., Ebi, K.L., Engelbrecht, F., J.Guiot, Hijioka, Y., Mehrotra, S., Payne, A., Seneviratne, S.I., Thomas, A., Warren, R., Zhou, G., 2022. Impacts of 1.5°C Global Warming on Natural and Human Systems, in: *Global Warming of 1.5°C*. Cambridge University Press, pp. 175–312. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.005>
- Hoekstra, A.Y., Buurman, J., van Ginkel, K.C.H., 2018. Urban water security: A review. *Environ. Res. Lett.* 13, 53002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaba52>
- Hoekstra, A.Y., Chapagain, A.K., Aldaya, M.M., Mekonnen, M.M., 2011. *The water footprint assessment manual: Setting the global standard*. Earthscan, London, UK.
- ICOLD, C.I.G.B., 2022. *Dam Surveillance-Lessons Learnt from Case Histories: Bulletin 180*. <https://doi.org/10.1201/9781003274841>
- IDSM e ICMBio, 2023. Mais de 150 botos morrem no interior do Amazonas devido à seca extrema (Boletim Técnico). Instituto de Desenvolvimento Sustentável Mamirauá (IDSM) e Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio).
- Jarvis, A., Reuter, H.I., Nelson, A., Guevara, E., 2008. Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m [WWW Document]. URL <https://srtm.csi.cgiar.org>
- Jensen, O., Wu, H., 2018. Urban water security indicators: Development and pilot. *Environ. Sci. Policy* 83, 33–45. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.02.003>
- Jiménez-Muñoz, J.C., Mattar, C., Barichivich, J., Santamaría-Artigas, A., Takahashi, K., Malhi, Y., Sobrino, J.A., Schrier, G. van der, 2016. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Sci. Rep.* 6, 33130. <https://doi.org/10.1038/srep33130>
- Junk, W., Bayley, P., Sparks, R., 1989. The Flood Pulse Concept in River-Floodplain Systems, *Can. Spec. Public Fish. Aquat. Sci.*
- Junk, W.J., 2013. Current state of knowledge regarding South America wetlands and their future under global climate change. *Aquat. Sci.* 75, 113–131. <https://doi.org/10.1007/s00027-012-0253-8>
- Kaur, B., Shrestha, N.K., Daggupati, P., Rudra, R.P., Goel, P.K., Shukla, R., Allataifeh, N., 2019. Water Security Assessment of the Grand River Watershed in Southwestern Ontario, Canada. *Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su11071883>
- Laaha, G., Demuth, S., Hisdal, H., Kroll, C.N., van Lanen, H.A.J., Nester, T., Rogger, M., Sauquet, E., Tallaksen, L.M., Woods, R., Young, A., 2013. Prediction of low flows in ungauged basins, in: Bloeschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., Savenije, H. (Eds.), *Runoff Prediction in Ungauged Basins*. Cambridge University Press, United Kingdom, pp. 163–188.
- Lautze, J., Manthritlake, H., 2012. *Water security: Old concepts, new package, what*

value? Nat. Resour. Forum 36, 76–87.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.2012.01448.x>

Lawford, R., Strauch, A., Toll, D., Fekete, B., Cripe, D., 2013. Earth observations for global water security. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 5, 633–643.
<https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.11.009>

Lewis, S.L., Brando, P.M., Phillips, O.L., van der Heijden, G.M.F., Nepstad, D., 2011. The 2010 Amazon Drought. *Science* (80). 331, 554 LP – 554.
<https://doi.org/10.1126/science.1200807>

Libonati, R., DaCamara, C.C., Peres, L.F., Sander de Carvalho, L.A., Garcia, L.C., 2020. Rescue Brazil’s burning Pantanal wetlands. *Nature* 588, 217–219.
<https://doi.org/10.1038/d41586-020-03464-1>

Libonati, R., Geirinhas, J.L., Silva, P.S., Russo, A., Rodrigues, J.A., Belém, L.B.C., Nogueira, J., Roque, F.O., DaCamara, C.C., Nunes, A.M.B., Marengo, J.A., Trigo, R.M., 2022. Assessing the role of compound drought and heatwave events on unprecedented 2020 wildfires in the Pantanal. *Environ. Res. Lett.* 17, 015005.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac462e>

MacDonald, A.M., Lark, R.M., Taylor, R.G., Abiye, T., Fallas, H.C., Favreau, G., Goni, I.B., Kebede, S., Scanlon, B., Sorensen, J.P.R., Tijani, M., Upton, K.A., West, C., 2021. Mapping groundwater recharge in Africa from ground observations and implications for water security. *Environ. Res. Lett.* 16, 34012.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd661>

Marengo, J.A., Alves, L.M., Alvala, R.C.S., Cunha, A.N.A.P., Brito, S., Moraes, O.L.L., 2018. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *An. da Acad. Bras. Ciências (Annals Brazilian Acad. Sci.* 90, 1973–1985.

Marengo, J.A., Camarinha, P.I., Alves, L.M., Diniz, F., Betts, R.A., 2021a. Extreme Rainfall and Hydro-Geo-Meteorological Disaster Risk in 1.5, 2.0, and 4.0°C Global Warming Scenarios: An Analysis for Brazil. *Front. Clim.* .

Marengo, J.A., Cunha, A.P., Cuartas, L.A., Deusdará Leal, K.R., Broedel, E., Seluchi, M.E., Michelin, C.M., De Praga Baião, C.F., Chuchón Angulo, E., Almeida, E.K., Kazmierczak, M.L., Mateus, N.P.A., Silva, R.C., Bender, F., 2021b. Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts . *Front. Water.*

Marengo, J.A., Cunha, A.P.M.A., Nobre, C.A., Ribeiro Neto, G.G., Magalhaes, A.R., Torres, R.R., Sampaio, G., Alexandre, F., Alves, L.M., Cuartas, L.A., Deusdará, K.R.L., Álvala, R.C.S., 2020. Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4 °C. *Nat. Hazards* 103, 2589–2611.
<https://doi.org/10.1007/s11069-020-04097-3>

Marengo, J.A., Espinoza, J.C., 2016. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *Int. J. Climatol.* 36, 1033–1050.

<https://doi.org/10.1002/joc.4420>

- Marengo, J.A., Jones, R., Alves, L.M., Valverde, M.C., 2009. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *Int. J. Climatol.* 29, 2241–2255. <https://doi.org/10.1002/joc.1863>
- Marengo, J.A., Nobre, C.A., Seluchi, M.E., Cuartas, A., Alves, L.M., Mendiondo, E.M., Obregón, G., Sampaio, G., 2015. A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Rev. USP* 0, 31–44. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9036.v0i106p31-44>
- Marengo, J.A., Tomasella, J., Alves, L.M., Soares, W.R., Rodriguez, D.A., 2011. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophys. Res. Lett.* 38. <https://doi.org/10.1029/2011GL047436>
- Melati, M.D., Fleischmann, A.S., Fan, F.M., Paiva, R.C.D., Athayde, G.B., 2019. Estimates of groundwater depletion under extreme drought in the Brazilian semi-arid region using GRACE satellite data: application for a small-scale aquifer. *Hydrogeol. J.* 27, 2789–2802. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02065-1>
- Merz, B., Blöschl, G., Vorogushyn, S., Dottori, F., Aerts, J.C.J.H., Bates, P., Bertola, M., Kemter, M., Kreibich, H., Lall, U., Macdonald, E., 2021. Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nat. Rev. Earth Environ.* 2, 592–609. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00195-3>
- Messenger, M.L., Lehner, B., Grill, G., Nedeva, I., Schmitt, O., 2016. Estimating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nat. Commun.* 7, 13603. <https://doi.org/10.1038/ncomms13603>
- Milman, A., Short, A., 2008. Incorporating resilience into sustainability indicators: An example for the urban water sector. *Glob. Environ. Chang.* 18, 758–767. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.08.002>
- Mishra, A., Mukherjee, S., Merz, B., Singh, V.P., Wright, D.B., Villarini, G., Paul, S., Kumar, D.N., Khedun, C.P., Niyogi, D., Schumann, G., Stedinger, J.R., 2022. An Overview of Flood Concepts, Challenges, and Future Directions. *J. Hydrol. Eng.* 27. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002164](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002164)
- Naumann, G., Podesta, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera, D., Arias Muñoz, C., Barbosa, P., Cammalleri, C., Chamorro, L., Cuartas, A., de Jager, A., Escobar, C., Hidalgo, C., Leal de Moraes, O., McCormick N., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., Seluchi, M., Skansi, M. M., Spinoni, J., Toreti., A. The 2019-2021 extreme drought episode in La Plata Basin, EUR 30833 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2021, ISBN 978-92-76- 41898-6 (online), doi:10.2760/773 (online), JRC126508
- Nobre, C.A., Gilvan, S., Borma, L.S., Carlos, C.-R.J., Silva, J.S., Manoel, C., 2016. Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proc. Natl. Acad. Sci.* 113, 10759–10768.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>

- O'Neill, B.C., Tebaldi, C., van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K., Sanderson, B.M., 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geosci. Model Dev.* 9, 3461–3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Octavianti, T., Staddon, C., 2021. A review of 80 assessment tools measuring water security. *WIREs Water* 8, e1516. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wat2.1516>
- Oliveira, P.T., Santos e Silva, C.M., Lima, K.C., 2017. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. *Theor. Appl. Climatol.* 130, 77–90. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1865-z>
- Panisset, J.S., Libonati, R., Gouveia, C.M.P., Machado-Silva, F., França, D.A., França, J.R.A., Peres, L.F., 2017. Contrasting patterns of the extreme drought episodes of 2005, 2010 and 2015 in the Amazon Basin. *Int. J. Climatol.* 38, 1096–1104. <https://doi.org/10.1002/joc.5224>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 11, 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Poff, N.L., Allan, J.D., Bain, M.B., Karr, J.R., Prestegard, K.L., Richter, B.D., Sparks, R.E., Stromberg, J.C., 1997. The Natural Flow Regime. *Bioscience* 47, 769–784. <https://doi.org/10.2307/1313099>
- Potapov, P., Turubanova, S., Hansen, M.C., Tyukavina, A., Zalles, V., Khan, A., Song, X.-P., Pickens, A., Shen, Q., Cortez, J., 2022. Global maps of cropland extent and change show accelerated cropland expansion in the twenty-first century. *Nat. Food* 3, 19–28. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00429-z>
- Rao, V.B., Franchito, S.H., Rosa, M.B., Govardhan, D., Figueroa, S.N., Bhargavi, V.S.L., 2022. In a changing climate Hadley cell induces a record flood in amazon and another recorded drought across South Brazil in 2021. *Nat. Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05437-1>
- Ribeiro Neto, A., da Paz, A.R., Marengo, J.A., Chou, S.C., 2016. Hydrological Processes and Climate Change in Hydrographic Regions of Brazil. *J. Water Resour. Prot.* 08, 1103–1127. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.812087>
- Rijsberman, F.R., 2006. Water scarcity: Fact or fiction? *Agric. Water Manag.* 80, 5–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.001>
- Rodrigues, D.B.B., Gupta, H. V, Mendiando, E.M., 2014. A blue/green water-based accounting framework for assessment of water security. *Water Resour. Res.* 50, 7187–7205. <https://doi.org/10.1002/2013WR014274>

- Seneviratne, S.I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C.M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., Mc Innes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., Rusticucci, M., Semenov, V., Alexander, L. V., Allen, S., Benito, G., Cavazos, T., Clague, J., Conway, D., Della-Marta, P.M., Gerber, M., Gong, S., Goswami, B.N., Hemer, M., Huggel, C., Van den Hurk, B., Kharin, V. V., Kitoh, A., Klein Tank, A.M.G., Li, G., Mason, S., Mc Guire, W., Van Oldenborgh, G.J., Orłowsky, B., Smith, S., Thiaw, W., Velegakis, A., Yiou, P., Zhang, T., Zhou, T., Zwiers, F.W., 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment, in: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109–230. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.006>
- Shi, S., Tao, X., Chen, X., Chen, H., Fitri, A., Yang, X., 2021. Evaluation of urban water security based on DPSIR model. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 880, 12023. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/880/1/012023>
- Shukla, S., Wood, A.W., 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophys. Res. Lett.* 35. <https://doi.org/10.1029/2007GL032487>
- Siqueira, V.A., Paiva, R.C.D., Fleischmann, A.S., Fan, F.M., Ruhoff, A.L., Pontes, P.R.M., Paris, A., Calmant, S., Collischonn, W., 2018. Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 4815–4842. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>
- Smeets, E., Weterings, R., 1999. Environmental indicators: typology and overview, Technical report No. 25. European Environment Agency, Copenhagen.
- Sullivan, C., 2002. Calculating a Water Poverty Index. *World Dev.* 30, 1195–1210. [https://doi.org/10.1016/S0305-750X\(02\)00035-9](https://doi.org/10.1016/S0305-750X(02)00035-9)
- Teluguntla, P., Thenkabail, P., Oliphant, A., Gumma, M., Anece, I., Foley, D., McCormick, R., 2023. Landsat-Derived Global Rainfed and Irrigated-Cropland Product 30 m V001. NASA EOSDIS L. Process. Distrib. Act. Arch. Cent. <https://doi.org/https://doi.org/10.5067/Community/LGRIP/LGRIP30.001>
- Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., Nemani, R., 2022. NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Sci. Data* 9, 262. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>
- Tucci, C., Chagas, M., 2017. Segurança hídrica: conceitos e estratégia para Minas Gerais. *Rev. Gestão Água da América Lat.* 14, 0–0. <https://doi.org/10.21168/rega.v14e12>
- Tundisi, J.G., Tundisi, T.M., 2016. Integrating ecohydrology, water management, and watershed economy: case studies from Brazil. *Ecohydrol. Hydrobiol.* 16, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2016.03.006>
- UN-Water, 2013. *Water Security & the Global Water Agenda: A UN-Water Analytical*

Brief. United Nations University.

Van Loon, A.F., 2015. Hydrological drought explained. *WIREs Water* 2, 359–392. <https://doi.org/10.1002/wat2.1085>

Veettil, A.V., Mishra, A.K., Green, T.R., 2022. Explaining water security indicators using hydrologic and agricultural systems models. *J. Hydrol.* 607, 127463. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127463>

Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I., 2010. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *J. Clim.* 23, 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>

Vicente-Serrano, S.M., López-Moreno Juan, I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., 2012. Accurate Computation of a Streamflow Drought Index. *J. Hydrol. Eng.* 17, 318–332. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000433](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000433)

Voosen, P., 2021. Global temperatures in 2020 tied record highs. *Science* (80). 371, 334–335. <https://doi.org/10.1126/science.371.6527.334>

Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B., Gessner, M.O., Dudgeon, D., Prusevich, A., Green, P., Glidden, S., Bunn, S.E., Sullivan, C.A., Liermann, C.R., Davies, P.M., 2010. Global threats to human water security and river biodiversity. *Nature* 467, 555–561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>

Wilhite, D.A., Glantz, M.H., 1985. Understanding: the Drought Phenomenon: The Role of Definitions. *Water Int.* 10, 111–120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>

World Meteorological Organization (WMO), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). 2012. International Glossary of Hydrology. 3rd ed. WMO; UNESCO: Geneva. 469 p.