

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

SUBPROJETO – CLIMA

**Impactos de Mudanças Climáticas em
Extremos de Vazão
(Cheias e Estiagens)
Relatório Final**

IPH-ANA-HGE-CLIMA-A3

**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) EA AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA)

AUTORES: Rodrigo Cauduro Dias de Paiva, Walter Collischonn, Pedro Torres Miranda, Hugo Oliveira Fagundes, Arthur Kolling Neto, Larissa de Castro Ribeiro, Júlia Rossi, Gabriel Matte, Leonardo Laipelt, Wilany Alves, Ingrid Petry.

COMO CITAR: Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Miranda, P. T., Fagundes, H.O., W., Kolling, A., Castro, L., Rossi, J., Matte, G., Laipelt, L., Alves, W., Petry, I., 2024. Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional. CLIMA: Impactos de Mudanças Climáticas em Extremos de Vazão (Cheias e Estiagens) – Relatório Final. IPH-ANA-HGE-CLIMA-A3. UFRGS: IPH, [Porto Alegre]. ANA, [Brasília].

Porto Alegre – RS

Abril 2024

Sumário

1. Apresentação.....	1
2. Introdução e contexto	2
3. Revisão sobre mudanças climáticas e impactos em extremos hidrológicos	4
3.1 Extremos hidrológicos	4
Cheias.....	4
Secas	6
3.2 Mudanças climáticas globais	10
Variabilidade e Mudança climática	10
Aquecimento global e mudanças climáticas	10
Intensificação do ciclo hidrológico.....	12
3.3 Alterações hidrológicas recentes	14
Tendências observadas nas chuvas em escala global	14
Tendências observadas nas chuvas no Brasil e América do Sul	15
Tendências observadas nas vazões máximas em escala global	16
3.3.4 Tendências observadas nas vazões no Brasil e na América do Sul	19
3.4 Metodologias para projeção de possíveis impactos nos recursos hídricos	21
3.5 Cenários de Emissão de gases de efeito estufa	22
3.6 Modelos climáticos	24
Modelos Globais	24
Modelos Regionais	25
Seleção de modelos climáticos	25
3.7 Correção de viés.....	26
3.8 Modelos hidrológicos	31
3.9 Incerteza nas projeções de mudanças climáticas	32
3.10 Mudanças projetadas de extremos hidrológicos.....	32
Resumo das projeções atuais do IPCC	33
Projeções globais de mudanças em vazões máximas	37
Projeções globais de mudanças em vazões mínimas.....	40
Projeções de mudanças de vazões médias no Brasil	41
Projeções de mudanças de vazões máximas no Brasil	44
Projeções de mudanças de vazões mínimas no Brasil	46
4. Metodologia	48
4.1 Projeções de modelos climáticos globais.....	48
4.2 Cenários	50
4.3 Modelo hidrológico	50
4.4 Viés do modelo climático-hidrológico	53
Recalibração do modelo MGB-SA	54
4.5 Incerteza.....	57

5. Análise de impactos de mudanças climáticas com modelo MGB-SA	58
5.1 Projeções de impactos nas vazões médias	58
6. Mudança nas vazões máximas	61
6.1 Introdução	61
6.2 Visão Geral dos Extremos Hidrológicos na América do Sul	62
6.3 Metodologia - Vazões Máximas	64
6.3.1. Projeções climáticas	65
6.3.2. Modelo Hidrológico Continental	65
6.3.3. Avaliação da mudança da magnitude de chuvas e vazões extremas	66
6.3.4. Avaliação da mudança de frequência de chuvas e vazões extremas	66
6.4 Resultados e discussões	67
6.4.1. Precipitação	67
6.4.2. Vazões	69
6.5 Conclusões	75
7. Mudança nas áreas inundadas	76
7.1 Introdução	76
7.2 Metodologia - Áreas Inundadas	76
7.3 Resultados e discussões	78
Caracterização do Período Histórico	78
Impactos na Magnitude	78
Impactos na Sazonalidade	80
Impactos nas Áreas Úmidas da América do Sul	81
Mudanças para diferentes Tempos de Retorno	83
7.4 Conclusões	84
8. Mudança nas secas na América do Sul	85
8.1 Introdução	85
8.2 Metodologia	86
Índices:	86
8.3 Resultados e discussões	87
CDD	87
Índice de Aridez	90
DEFICIT: P – PET	94
TWS	98
8.4 CONCLUSÕES	99
9. Mudança das vazões mínimas	100
9.1 Introdução	100
Secas hidrológicas	100
Vazões mínimas	101
Histórico recente na América do Sul	101

Projeções de seca sob mudanças climáticas.....	102
Objetivo	102
9.2 Metodologia	102
Modelagem climática e hidrológica	102
Caracterização de secas	102
Incerteza dos GCMs	105
9.3 Resultados	105
9.4 Discussão.....	109
Comparação com outras análises	109
Aspectos das projeções de seca.....	110
Controles de secas	110
Impactos futuros.....	111
9.5 Conclusões.....	111
10. Referências	113

1. APRESENTAÇÃO

Este documento apresenta o relatório “Impactos de Mudanças Climáticas em Extremos de Vazão (Cheias e Estiagens) – 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 estudos de impactos de mudanças climáticas sobre Cheias e Estiagens;
- 2) Aspectos metodológicos para análise de impacto de mudanças climáticas nos extremos hidrológicos;
- 3) Resultados de análise de impactos de mudanças climáticas sobre extremos de vazão, vazão de cheias, áreas de inundação, duração dos períodos secos e vazões mínimas.

2. INTRODUÇÃO E CONTEXTO

Eventos hidroclimáticos extremos como a seca recente da bacia do Prata (Naumann et al., 2021) e as inundações em diversas regiões do Brasil em 2021 a 2023 (Amazonas, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Paraná, Bahia, litoral paulista) causam inúmeros prejuízos econômicos, ambientais e à vida humana. No momento em que este relatório é finalizado, o Brasil se recupera de cheias extremas ocorridas na região sul e seca histórica na região amazônica. Estes eventos levantam questões sobre como secas e cheias extremas podem se repetir no futuro, em termos de frequência e magnitude, e como a variabilidade e mudanças climáticas devem ser consideradas em futuras ações relacionadas à gestão de recursos hídricos.

No contexto nacional, as Mudanças Climáticas vêm sendo incorporadas às atividades da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), desde a Instituição da Política Nacional de Mudança no Clima (Lei no 12.187, de 29 de dezembro de 2009) até, mais recentemente, no desenvolvimento do tema para inclusão no âmbito do novo Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH 2022-2040) e do 1º Relatório de Conjuntura de Mudanças Climáticas em Recursos Hídricos da ANA.

A preocupação com a variabilidade climática está presente na prática hidrológica há décadas, incluindo estudos de detecção de tendência e alteração hidrológica passadas, como recentemente demonstrado por Chagas et al. (2022) no Brasil, o reconhecimento da existência de períodos longos úmidos ou secos (O’Connell et al., 2016) e discussões sobre como estas questões deveriam ser levadas em conta para a gestão de recursos hídricos (Milly et al., 2015).

Conforme estudos do Painel Intergovernamental sobre Mudanças no Clima - IPCC (Arias, 2021), mudanças climáticas antropogênicas causadas por emissões de gases de efeito estufa (GEE) devem resultar no aquecimento da atmosfera, em alterações no regime de chuvas, e em mudanças na frequência e magnitude de eventos hidrológicos extremos (e.g. Alfieri et al., 2015; Hirabayashi et al., 2013).

Existem alguns estudos de projeção de impactos de mudanças climáticas sobre eventos hidrológicos extremos em nível global (e.g. Hirabayashi et al., 2013) e em escala regional ou local em algumas bacias brasileiras (Borges de Amorim et al. 2019, 2020). Além disso, existem estudos relacionados a impactos sobre o balanço hídrico e vazões médias na escala de todo o território nacional (Lima et al., 2014; Brêda et al., 2020), que, no entanto, não focam em eventos hidrológicos extremos. Assim, os possíveis impactos de mudanças climáticas sobre extremos hidrológicos, como cheias e estiagens, ainda são desconhecidos em escala nacional.

No contexto nacional, o modelo de base física MGB-SA (Siqueira et al., 2018) é capaz de representar adequadamente processos hidrológicos conforme inúmeras validações, e vem sendo considerado adequado para estudos de projeções de alterações hidrológicas, incluindo mudanças climáticas (e.g. Brêda et al., 2023, Brêda et al., 2020, Sorribas et al., 2015; Lima et al., 2014). Neste sentido, existe a oportunidade para estudos de impactos de mudanças climáticas em vazões de cheias e estiagens com base no modelo MGB-SA e modelos climáticos mais atuais.

O objetivo deste estudo é avaliar impactos de mudanças climáticas sobre extremos de vazão (cheias e estiagens) sobre os rios brasileiros com base no modelo hidrológico MGB da América do Sul e projeções de modelos climáticos.

3. REVISÃO SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E IMPACTOS EM EXTREMOS HIDROLÓGICOS

3.1 EXTREMOS HIDROLÓGICOS

Cheias e secas estão entre os desastres hidrológicos mais frequentes e causam severos impactos sociais, ecológicos e econômicos. O conhecimento e capacidade de prever estes fenômenos em diferentes escalas são fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de gestão voltadas para minimização de seus impactos negativos, incluindo ações de adaptação relacionadas as mudanças climáticas (Brunner et al., 2021).



Figura 3.1. Eventos hidrológicos extremos recentes. Painel esquerdo: Lago Mauá, em Manaus (AM), durante a seca. Outubro de 2023 (Maurício Martins/Rede Amazônica). Painel direito: Cidade de Encantado (RS) após enchente no Vale do Taquari (Matheus Bruxel/Agência RBS)

Cheias

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 (Merz et al., 2021; ICOLD 2022). 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 são governadas por diversos processos hidrológicos, conforme a síntese de Rosbjerg et al. (2013) no contexto da década “Prediction in Ungauged Basins” da Associação Internacional de Ciências Hidrológicas (Blöschl et al., 2013):

A curva de frequência de cheias é uma assinatura da variabilidade interanual das vazões máximas. A frequência e magnitude das cheias emerge da interação entre

a variabilidade da precipitação e diversos processos na bacia, como a geração do escoamento, a propagação de ondas de cheias, a evaporação e umidade do solo antecedente.

A curva de frequência de vazões máximas reflete a distribuição da precipitação no tempo (duração, intensidade e frequência) e no espaço (heterogeneidades, efeitos orográficos, trajetória da tormenta), a distribuição dos caminhos de escoamento (superficial, subsuperficial, fluvial), a sazonalidade do clima e o resultado na umidade do solo, e a inter-relação desses fatores.

Por outro lado, as cheias moldam a paisagem através de processos de erosão e deposição do solo, gerando e mantendo redes de drenagem e padrões de solo e vegetação. Essas variáveis co-evoluem podendo ser entendidos tanto como padrões emergentes e variáveis preditoras (e.g. densidade de drenagem) da frequência de cheias.

As cheias podem ser quantificadas em termos de vazões, níveis d'água ou 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, onde normalmente a magnitude e impactos estão associados à vazão máxima (Figura 3.2).

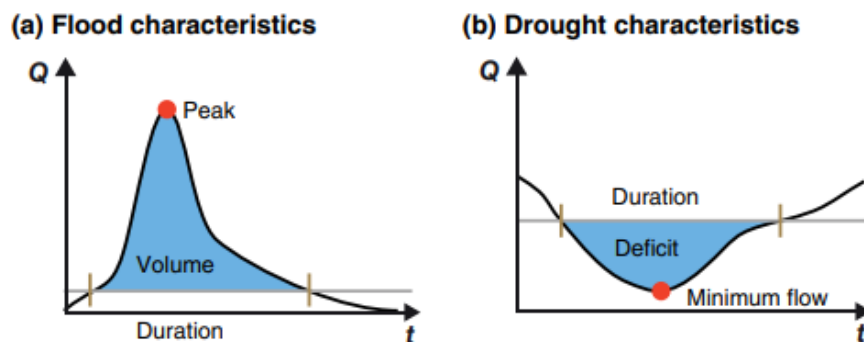


Figura 3.2. Hidrograma de vazões e características de cheias e secas. (Modificado de Brunner et al., 2021).

Além da magnitude, as cheias podem ser caracterizadas em termos de sua frequência ou tempo de retorno (Figura 3.3). 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.

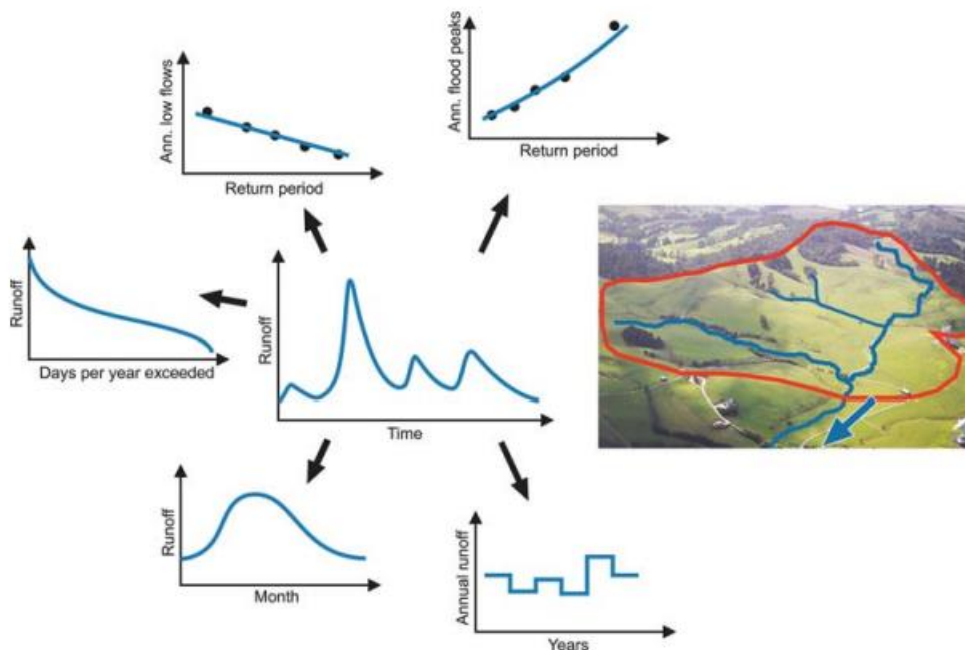


Figura 3.3. Hidrograma de vazões e variabilidade média anual, sazonal, curva de permanência, e curvas de frequência de vazões mínimas e máximas (Blöschl et al., 2013).

Secas

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 baixas dos rios são responsáveis por sustentar ecossistemas e usos d'água como abastecimento humano, irrigação, produção de energia e industrial e navegação durante períodos críticos (Laaha et al., 2013). Embora os ecossistemas e seres humanos possam se adaptar às condições de estiagem, a predição da disponibilidade de água durante estes períodos críticos é fundamental para diversas ações de gestão de recursos hídricos.

As secas ocorrem em praticamente todas as zonas climáticas e são de grande importância no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Embora sejam um perigo natural, as secas diferem de outros perigos naturais de várias maneiras: o início e o fim de uma seca são difíceis de determinar; não existe uma definição universal de seca; os impactos da seca não são estruturais e se espalham por grandes áreas geográficas e podem resultar de outros desastres naturais; e as atividades humanas podem desencadear diretamente uma seca, ao contrário de outros desastres naturais (Mishra et al., 2010).

De acordo com Van Loon et al. (2016), as secas severas em ambientes dominados pelo homem não podem ser vistas como desastres puramente naturais. A seca possui fatores naturais e humanos e é modificada por alterações de uso e cobertura da terra, que são relacionadas às atividades humanas. A seca antropogênica é governada principalmente

pelos impactos conjuntos da variabilidade natural da água renovável, mudanças climáticas e decisões humanas (AghaKouchak et al., 2021). Portanto, o planejamento para as secas deve estar pautado no entendimento de que a influência humana é tão essencial para a seca quanto a variabilidade natural do clima (Van Loon et al., 2016).

Dentre os conceitos de seca, algumas definições são comumente usadas: (i) A Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1986) define que seca significa *“uma deficiência prolongada de precipitação”*. (ii) A Convenção das Nações Unidas para Combater a Seca e a Desertificação (Secretariado Geral da ONU, 1994) define seca como *“o fenômeno de ocorrência natural que existe quando a precipitação foi significativamente abaixo dos níveis normais registrados, causando graves desequilíbrios hidrológicos que afetam adversamente os sistemas de produção de recursos terrestres”* e (iii) A Enciclopédia de Clima e Tempo (Schneider, 1996) define uma seca como *“um período prolongado - uma estação, um ano ou vários anos - de precipitação deficiente em relação à média estatística plurianual para uma região”*.

Neste sentido, secas são eventos extremos caracterizados pela falta de disponibilidade hídrica em frente a padrões de longo termo. São comumente classificadas em secas (i) meteorológicas, (ii) agrícolas, (iii) hidrológicas e (iv) socioeconômicas. O fenômeno se dá pela falta de precipitação e impacta progressivamente a umidade do solo, a vazão nos rios, 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.

As vazões mínimas durante as secas são governadas por diversos processos hidrológicos, conforme a síntese de Laaha et al. (2013) no contexto da década *“Prediction in Ungauged Basins”* da Associação Internacional de Ciências Hidrológicas (Blöschl et al., 2013):

As vazões mínimas descrevem situações em que há pouca água disponível nos rios. Podem ser descritas como a mínima vazão anual ou a magnitude de vazões que é excedida em 95% do tempo, por exemplo. As vazões mínimas são resultado de diversos fatores: o clima durante o período seco do ano, armazenamento de água no subsolo (incluindo aquíferos profundos) e os caminhos longos de escoamento, evaporação (especialmente da vegetação da zona ripária) e em climas frios, efeitos de armazenamento de neve. Vazões mínimas no inverno em regiões frias são controladas pela temperatura e precipitação antecedente. Vazões mínimas no verão (ou regiões quentes) são resultado de longos períodos de seca e controlados pela aridez da bacia, pela sequência de eventos de chuva durante a época seca, pelo armazenamento na subsuperfície e pela vegetação

Conforme a Figura 3.2, 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 (ver Figura 3.3):

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).

Diversos outros índices foram criados visando descrever secas em termos de abrangência espacial, frequência, duração e intensidade. Alguns exemplos são: *Palmer Drought Severity Index* (PDSI; Palmer, 1965) e *Standardized Precipitation Evapotranspiration Index* (SPEI; Vicente-Serrano et al., 2010) - seca agrícola - *Standardized Precipitation Index* (SPI; McKee et al., 1993), *Consecutive Dry Days* (CDD; Frich et al., 2002) - seca meteorológica - e *Standardized Runoff Index* (SRI; Shukla e Wood, 2008) - seca hidrológica. Os indicadores citados estão entre os mais utilizados para o monitoramento e para a caracterização de secas atualmente, contudo existe uma extensa gama de métodos desenvolvidos para o estudo desse fenômeno. Essa variedade reflete a dificuldade de se definir um evento de seca, ainda mais sob um único padrão. A seguir, são descritos alguns dos índices comumente aplicados na atualidade.

Palmer Drought Severity Index (PDSI): O PDSI mede o déficit de água a partir do balanço hídrico do solo, tendo precipitação (P) e evapotranspiração potencial (PET) como dados de entrada. Foi desenvolvido para quantificar anomalias meteorológicas prolongadas (Palmer, 1965), e tem sido utilizado em avaliações de mudanças na aridez, e em reanálises paleoclimáticas de secas globalmente, por apresentar boa correlação com medições de umidade do solo (Dai, 2011). Ao longo do tempo, diversas limitações do método foram documentadas, como a forte influência do período e do local de calibração do índice, problemas na comparabilidade entre diferentes regiões, e subjetividades em sua aplicação (Vicente-Serrano et al., 2010). Isso levou ao desenvolvimento de novas versões do PDSI, como a versão autocalibrada (sc-PDSI), que, conforme Vicente-Serrano et al. (2010), tornou o índice comparável espacialmente, mas não solucionou os problemas da escala temporal fixa (9~12 meses) e de autorregressão.

Standardized Precipitation Index (SPI): O SPI é um índice probabilístico desenvolvido por McKee et al. (1993), que tem a precipitação como a única variável de entrada. Para boas estimativas, necessita de uma extensa série temporal de precipitação, que é transformada para a distribuição normal, e normalizada, permitindo comparação entre diferentes regiões (Azman et al., 2022; Keyantash e Dracup, 2002). O indicador também permite a avaliação de secas meteorológicas em diferentes escalas temporais

(Keyantash e Dracup, 2002). As principais críticas se dão em torno do fato de que o SPI considera apenas a variação da precipitação no seu cálculo, o que presume estacionariedade de outras variáveis importantes para secas (e.g. evapotranspiração e temperatura) (Vicente-Serrano et al., 2010).

Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI): O SPEI foi criado como uma alternativa que contempla aspectos positivos do SPI e do PDSI. Possui a vantagem de ser um indicador multiescalar de secas, assim como o SPI, contando ainda com a temperatura de superfície, além da precipitação, como dado de entrada. Ele é um índice probabilístico, e utiliza a distribuição log-logística na representação da diferença entre precipitação e evapotranspiração potencial (Vicente-Serrano et al., 2010).

Standardized Runoff Index (SRI): Proposto por Shukla e Wood (2008), o SRI é obtido a partir da mesma metodologia do SPI, portanto se trata de um indicador probabilístico normalizado. Contudo, por se tratar de uma variável diferente, a distribuição teórica mais adequada a ser adotada pode não ser a Gamma, como para o SPI. A necessidade de se avaliar a seca hidrológica se dá principalmente no caso de agregação temporal pequena (mensal, ou sazonal), visto que sua correlação com as outras secas possui uma defasagem. Os autores destacam que um índice calculado a partir de vazões oferece um importante contraponto aos baseados em variáveis climáticas.

Como visto, os indicadores diferem-se na abordagem de processos, nos tipos de seca, na escala temporal e na região de aplicação, além de possuírem vantagens e limitações uns em relação aos outros. Por esses motivos, avaliações de múltiplos indicadores têm sido feitas conjuntamente por alguns autores e agências. Um exemplo disso é o Monitor de Secas dos Estados Unidos (USDM – *U.S. Drought Monitor*), que gera resultados a partir de diferentes indicadores quantitativos e de avaliações qualitativas de especialistas. Alguns estudos utilizam o índice *Joint Deficit Index* (JDI; Kao and Govindarao, 2010), que permite avaliar secas a partir de índices dependentes de variáveis ou de escalas distintas.

Para a avaliação do impacto das mudanças climáticas sobre secas, estudos têm aplicado indicadores tradicionais desses eventos (Gupta e Jain, 2018; Stagge et al., 2017). Isso traz vantagens na comparação com valores atuais obtidos pelo mesmo método, além de possibilitar a espacialização dessa informação. Contudo, diversos autores têm discutido sobre a validade dessas análises (Berg e Sheffield, 2018; Cook et al., 2018; Dai et al., 2018; Dai e Zhao, 2016; Mukherjee et al., 2018; Scheff, 2018; Stagge et al., 2017). Devido ao fato de que essas métricas foram desenvolvidas para um clima diferente do avaliado, mudanças importantes na dinâmica da seca podem não ser representadas pelos mesmos, e limitações dos indicadores podem ter maior influência sobre a análise.

3.2 MUDANÇAS CLIMÁTICAS GLOBAIS

Variabilidade e Mudança climática

A variabilidade e mudança climática 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.

Aquecimento global e mudanças climáticas

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 alterações no regime de chuvas e do clima (Figura 3.4). Este fenômeno pode causar alterações em eventos hidrológicos, seja em frequência e/ou intensidade (Alfieri et al., 2015; Hirabayashi et al., 2013), trazendo significantes impactos socioeconômicos (Winsemius et al., 2016).

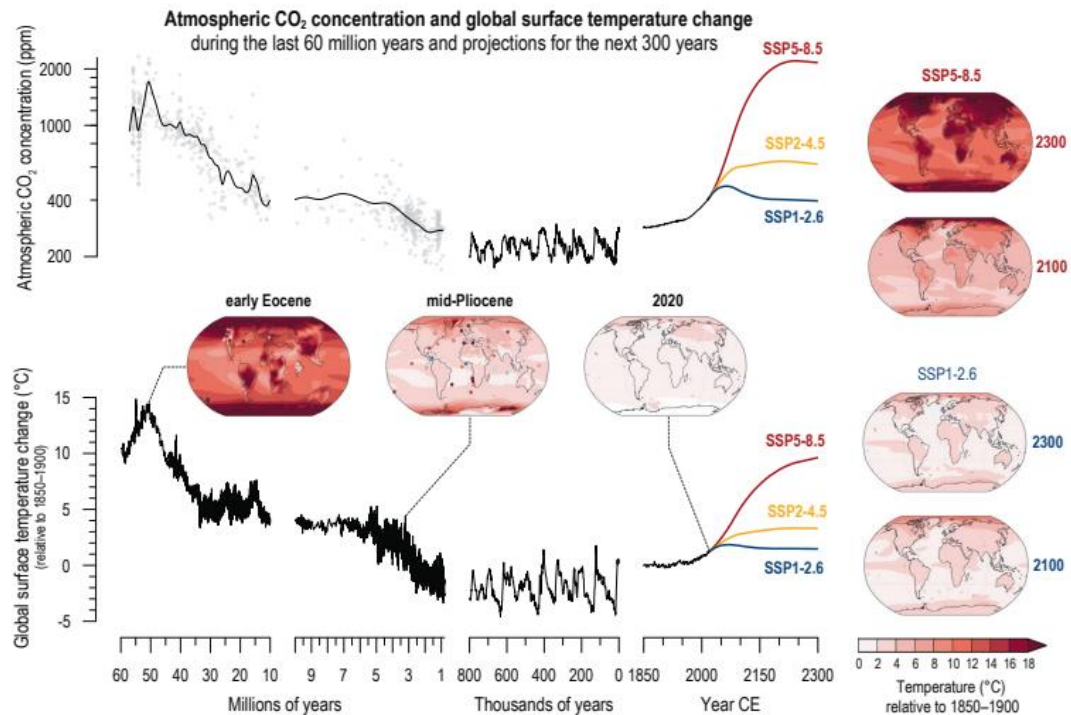


Figura 3.4. Mudanças na concentração de CO₂ e temperatura global reconstruídas para o passado e projetadas no futuro pelo sexto relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas IPCC AR6 (Arias, 2021).

O crescimento populacional e as práticas de uso do solo na América do Sul aumentam a vulnerabilidade da população (Debortoli et al., 2017), o que implica em danos em decorrência de eventos extremos cada vez mais custosos (Jongman et al., 2012; Visser et al., 2014). Mudanças na disponibilidade hídrica interferem na produção de energia hidrelétrica (Lima et al., 2014) e na produção agrícola e no abastecimento humano e industrial. Logo, se torna necessário entender a direção das projeções para poder minimizar os possíveis impactos (Reyer et al., 2017).

As projeções climáticas são tipicamente geradas por simulações de Modelos Climáticos Globais (GCM em inglês) considerando por diferentes cenários socioeconômicos e relativos níveis de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Os dados de saída de GCMs em um cenário escolhido produzem as condições atmosféricas utilizadas para simular a dinâmica dos recursos hídricos. Entretanto, deve-se ter cautela na interpretação das projeções, pois os modelos climáticos possuem grandes incertezas, já que são limitados pelo atual conhecimento físico e pela representação matemática incompleta de componentes dos sistemas terrestres (Flato et al., 2013). No intuito de aumentar a credibilidade das projeções climáticas, criou-se o CMIP - *Coupled Models Intercomparison Project* (Eyring et al., 2016), que se propõe a desenvolver e comparar continuamente um extenso conjunto de GCMs. Os GCMs também são limitados em termos de detalhamento espacial e capacidade de representar fenômenos climáticos de menor escala. Neste sentido, são utilizados métodos de *downscaling* para produzir

informações relevantes em menor escala, a exemplo de eventos hidrológicos extremos. Os Modelos Climáticos Regionais (RCM) constituem métodos dinâmicos de *downscaling*, que normalmente são mais vantajosos se comparado com os métodos estatísticos por possuírem maior embasamento físico (Fowler et al., 2007), embora tenham grande custo computacional. Os RCMs utilizam dados de GCMs como condições de contorno para produzir saídas de condições climáticas em maior resolução e assim conseguir representar fenômenos de escala local.

Intensificação do ciclo hidrológico

Com o avanço de evidências das mudanças climáticas devido ao aquecimento global, uma importante questão na hidrologia levantada por diversas pesquisas (e.g. Huntington, 2006) é: com o aquecimento global, o ciclo hidrológico vai ficar mais intenso? e como? Esta questão tem importantes implicações na disponibilidade hídrica e desastres hidrológicos. Huntington (2006) revisou estudos globais de tendências em fluxos de precipitação, vazão, vapor d'água na troposfera, umidade do solo, balanço de massa em glaciais, evapotranspiração e crescimento de vegetação, e encontrou evidências da intensificação do ciclo hidrológico em nível global.

Estas observações empíricas estão em acordo com a expectativa teórica de que o aquecimento do clima resultará em aumentos nos fluxos de evaporação e precipitação, o que corresponde a uma intensificação (ou aceleração) do ciclo hidrológico.

A base teórica para esta hipótese de intensificação é resumida pela relação de Clausius-Clapeyron, que relaciona a pressão parcial de vapor de água no ar na condição de saturação com a temperatura do ar. De acordo com esta relação, o ar quente é capaz de transportar mais vapor de água do que o ar frio, e a umidade específica pode aumentar, de forma exponencial, com a temperatura.

De acordo com a relação de Clausius-Clapeyron, um aumento de 1 grau na temperatura (Celsius ou Kelvin) corresponde a um aumento de, aproximadamente, 7% na pressão parcial de vapor na condição de saturação no ar atmosférico. Em teoria, isso significa que as precipitações intensas poderiam aumentar pelo mesmo fator, ou seja, 7% a mais de intensidade de chuva para cada grau Celsius de aumento da temperatura. Entretanto, diversos estudos têm apontado que a sensibilidade das chuvas intensas pode ser diferente deste valor, tanto para menos como para mais.

De acordo com Allen e Ingram, 2002, estudos de modelagem sugerem que a precipitação aumentaria em cerca de 3,4% por grau Kelvin de aumento de temperatura, sugerindo que a sensibilidade é menor do que seria estimado simplesmente pela relação de Clausius-Clapeyron.

Segundo Huntington (2010), há uma discrepância entre os resultados de GCMs e observações durante o final do século XX, o que é criticamente importante para entender a sensibilidade da resposta hidrológica ao aquecimento previsto para o futuro. Figura 3.5 (apresentada por Huntington, 2010) mostra uma comparação entre o aumento da precipitação prevista pelos modelos globais em função do aumento da temperatura média global e o aumento que seria esperado a partir da equação de Clausius-Clapeyron, mostrando a sensibilidade dos GCMs versus valores de observações.

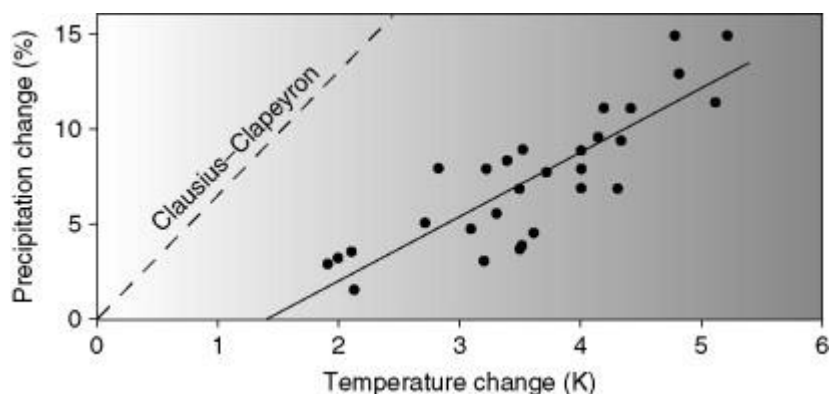


Figura 3.5. Mudanças de temperatura média global e precipitação. A linha sólida mostra a relação linear de melhor ajuste (mínimos quadrados) da precipitação prevista pelos modelos globais (pontos pretos). Todos esses pontos deveriam estar sobre a linha tracejada, caso a precipitação seguisse o Clausius-Clapeyron. Fonte: Huntington (2010).

Allan e Soden (2008) avaliaram dados de modelos climáticos e imagens de satélite, concluindo que as precipitações extremas em regiões tropicais estão diretamente relacionadas à temperatura, com chuvas mais intensas ocorrendo em períodos quentes. Esta amplificação ainda não era representada em modelos climáticos, significando que suas projeções de impactos sobre chuvas intensas podem ser subestimadas.

Yu et al. (2020) e diversos outros estudos demonstram evidência de intensificação do ciclo hidrológico analisando a salinidade dos oceanos. A salinidade dos oceanos é normalmente maior em regiões em que o saldo entre a evaporação e precipitação é maior, sendo um proxy dos fluxos médios de troca de água entre a atmosfera e o oceano. Estas pesquisas observaram tendências na intensificação dos padrões de salinidade, com regiões do oceano com alto (baixo) saldo E-P aumentando (diminuindo) salinidade, atribuindo a uma intensificação do ciclo hidrológico.

Trenberth (2011) observou tendências positivas de volume de água precipitável na atmosfera, podendo ser associado a temperatura da superfície dos oceanos e à precipitação.

Embora existam evidências e argumentos teóricos para a intensificação do ciclo hidrológico, nem todos os estudos concordam com essas análises. Koutsoyiannis (2020) coloca em dúvida a intensificação do ciclo hidrológico global, afirmando,

resumidamente, que a variabilidade climática está sendo confundida com tendência monotônica.

Dentro do contexto da intensificação do ciclo hidrológico, existe o paradoxo das chuvas que estariam aumentando, mas as cheias não. Sharma et al. (2018) apontam que existe evidência de crescimento dos extremos de precipitação, entretanto ainda não há evidência clara de aumento nas vazões máximas. Na visão destes autores, as magnitudes das vazões máximas estão, na realidade, diminuindo, apesar das alegações generalizadas de que, se os extremos de precipitação aumentarem, as inundações também devem aumentar. Para justificar essa colocação, os autores citam que entre os possíveis mecanismos responsáveis, identificaram a diminuição da umidade antecedente do solo, a diminuição da extensão das chuvas intensas e a diminuição do derretimento da neve.

3.3 ALTERAÇÕES HIDROLÓGICAS RECENTES

Uma das conclusões mais importantes da pesquisa climática é que se espera que o aquecimento global afete o ciclo hidrológico global. Existe a expectativa que, com o aquecimento da atmosfera e dos oceanos, mais água será transportada da superfície para a atmosfera e vice-versa. Este efeito é chamado de intensificação do ciclo hidrológico.

No entanto, a intensificação não é esperada para todos os tipos de eventos de precipitação, nem em todos os lugares. Em geral, supõe-se que as chuvas intensas deverão aumentar sua intensidade, e que as chuvas menos intensas poderão diminuir sua intensidade.

Neste contexto, são especialmente importantes os estudos de análise de tendência das variáveis hidrológicas observadas, especialmente as chuvas e as vazões.

Tendências observadas nas chuvas em escala global

Donat et al. (2016) analisaram dados observados e simulações de modelos climáticos e concluíram que as chuvas intensas com 1 dia de duração estão aumentando tanto em regiões úmidas como secas do mundo. Em uma análise posterior, Donat et al. (2019) confirmam a intensificação das chuvas intensas em áreas úmidas, e apresentam um quadro não tão claro nas tendências das chuvas intensas em regiões mais secas.

Markonis et al. (2019) analisaram dados de chuva do MSWEP, uma base de dados de chuva baseada em estimativas de satélite e observações e pluviômetros, ao longo do período de 1979 a 2016. De acordo com o esperado pela teoria da intensificação do ciclo hidrológico, os autores encontraram tendências de aumento da precipitação total, do número de dias com chuva, e da frequência de eventos intensos sobre as áreas

continentais. Entretanto, ao contrário do esperado, encontraram pouca tendência de redução da precipitação em dias de chuva fraca.

Se, por um lado, há um razoável consenso de que as mudanças climáticas podem aumentar a magnitude e ou a frequência de chuvas intensas, o impacto desse aumento sobre as vazões máximas não é tão claro, conforme discutido por Wright et al. (2019) e Sharma et al. (2018).

Tendências observadas nas chuvas no Brasil e América do Sul

Cunha et al. (2019) analisaram dados de chuva em todo o Brasil, no período de 1981 a 2019, e observaram que as secas, estimadas pelo SPI, se tornaram mais frequentes nas últimas duas décadas do período analisado em quase todas as regiões do Brasil, exceto a região Sul.

Ceron et al. (2021) analisaram dados de chuva na bacia do rio da Prata, no período de 1981 a 2018, e concluíram que houve um aumento no número de dias consecutivos sem chuva na parte Norte da bacia, enquanto na parte Sul da bacia houve um aumento da intensidade da chuva nos dias chuvosos, especialmente nos meses de setembro a fevereiro.

Regoto et al. (2021) analisaram séries de dados de temperatura e precipitação, procurando tendências nos valores extremos no Brasil. Estes autores observaram que há uma tendência de redução na precipitação na região Nordeste do Brasil, e uma tendência de aumento da umidade na região Sul, especialmente com uma redução no número consecutivo de dias sem chuva.

Luiz-Silva et al. (2022) analisaram dados climáticos na bacia do rio Xingu, e observaram tendências de aumento da precipitação na parte Norte da bacia, ao mesmo tempo que há tendência de redução na precipitação na parte Sul da bacia, onde também foi detectada uma tendência de aumento do número de dias consecutivos sem chuva.

A tendência de intensificação das secas nos anos mais recentes numa vasta região de transição entre os biomas Cerrado e Amazonia, entre o Nordeste e o Norte do Brasil, também foi identificada em uma análise realizada por Marengo et al. (2022).

Souza et al. (2022a) analisaram dados de precipitação de 2456 postos pluviométricos do Brasil, procurando identificar tendências em diversos índices de precipitação associados com extremos hidrológicos de cheias e secas. Eles observaram padrões consistentes de aumento do número de dias consecutivos sem chuva no Nordeste do Brasil, e na bacia dos rios Tocantins e Araguaia. Na região Sul do Brasil, os autores identificaram tendências de condições mais úmidas.

Tendências observadas nas vazões máximas em escala global

Blöschl (2022) analisou três hipóteses sobre a modificação das cheias: (i) mudanças de uso da terra; (ii) construção de estruturas hidráulicas; (iii) mudanças climáticas. Para cada uma destas três hipóteses, o autor examinou evidências experimentais e teóricas para discutir o quanto são defensáveis. Uma das conclusões importantes é que os efeitos desses três fatores sobre as vazões máximas dependem da escala espacial. O impacto de um determinado fator em bacias pequenas não necessariamente é igual ao impacto em bacias hidrográficas maiores.

De acordo com Blöschl (2022), em bacias hidrográficas de pequena área de drenagem, onde as cheias são causadas por chuvas convectivas de curta duração, há uma expectativa de aumento das vazões máximas, porque existem evidências que a intensidade das precipitações aumenta com o aumento da temperatura do ar (Fowler et al., 2021). A taxa de aumento encontrado por estudos empíricos está próxima da taxa de aumento da capacidade de retenção de água da atmosfera (relação de Clausius-Clapeyron), que é de aproximadamente 7% por °C, ou até um pouco maior, em alguns casos (Fowler et al., 2021). Entretanto, uma avaliação mais profunda das tendências observadas em chuvas intensas de curta duração é difícil, porque são relativamente raras as séries observadas de chuva com alta resolução temporal. Contudo, apesar desta incerteza, há razões para acreditar que as mudanças climáticas podem aumentar as vazões máximas em pequenas bacias hidrográficas.

Nos EUA, Hodgkins et al. (2019) não identificaram efeitos climáticos claros nas tendências de vazões máximas de bacias hidrográficas que não foram modificadas pelos efeitos de urbanização ou aumento da infraestrutura hídrica, como reservatórios.

Do et al. (2020) analisaram séries de vazões observadas e simuladas por modelos hidrológicos globais procurando identificar tendências de vazões máximas em escala global no período de 1971 a 2005. Estes autores encontraram regiões com evidências de aumento das vazões máximas, incluindo partes do Sul e Sudeste do Brasil, e outras regiões com evidências de reduções nas vazões máximas, incluindo o Nordeste e Centro-Oeste e partes do Sudeste do Brasil. Em um estudo anterior, Do et al. (2017) chegaram a conclusões semelhantes utilizando dados de vazões observadas em 9213 postos pluviométricos de todo o mundo.

Blöschl et al. (2019) analisaram as tendências das vazões máximas na Europa nas últimas cinco décadas, encontrando padrões regionais claros de aumentos e reduções nas descargas de enchentes observadas nos rios. De acordo com os autores, o aumento das chuvas de outono e inverno resultou em crescentes inundações no noroeste da Europa (região 1, na Figura 3.6); a diminuição da precipitação e o aumento da evaporação levaram à diminuição das inundações em médias e grandes bacias hidrográficas no sul da Europa (região 2, na Figura 3.6); e a diminuição da cobertura de neve e do

derretimento da neve, resultantes de temperaturas mais altas, levaram à diminuição das inundações na Europa Oriental (região 3, na Figura 3.6). As tendências regionais de descargas de inundações na Europa variam de um aumento de cerca de 11 % por década a uma diminuição de 23 %, e sua distribuição espacial está ilustrada na Figura 3.6.

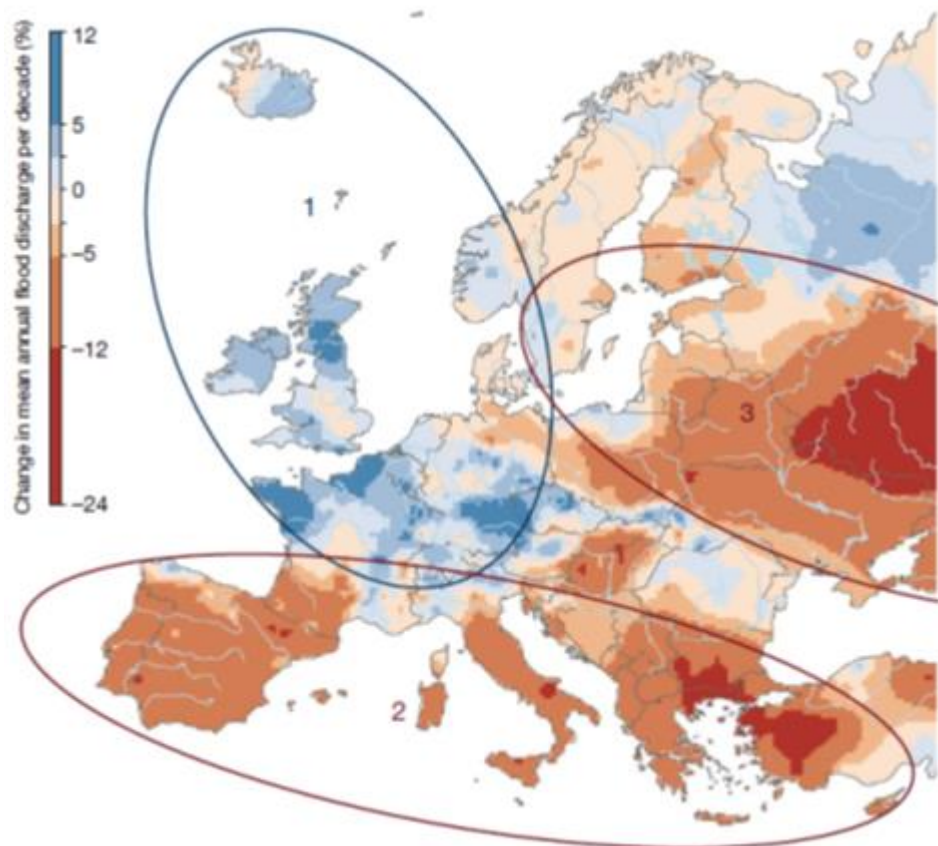


Figura 3.6. Tendências regionais observadas de cheias na Europa entre 1960 e 2010 (azul indica o aumento e vermelho denota a diminuição da vazão máxima média anual, em porcentagem por década – adaptado de Blöschl et al., 2019).

Gudmundsson et al. (2021) utilizaram dados de 7250 postos fluviométricos em todo o mundo, com séries de dados de 1971 a 2010, e avaliaram as tendências nas vazões médias, mínimas (expressas pela Q_{90} de cada ano) e máximas (expressas pelas Q_{10} de cada ano), e identificaram regiões em que as vazões estão aumentando ou diminuindo (Figura 3.7). Eles observaram que as mudanças ocorrem em sentidos diferentes, dependendo da região. Por outro lado, os autores constataram que, em geral, tendências em fluxos baixo, médio e alto compartilham o mesmo sinal em uma mesma região. Por exemplo, no Sul da Europa foram identificadas tendências negativas nas vazões baixas, médias e altas, enquanto no Norte da Europa as tendências foram positivas para as três faixas de vazão.

Os resultados de Gudmundsson et al. (2021) relativos à América do Sul mostram tendência de redução de vazões baixas, médias e altas na região Nordeste do Brasil, e aumento de vazões médias e altas no Sul e no Norte do Brasil.

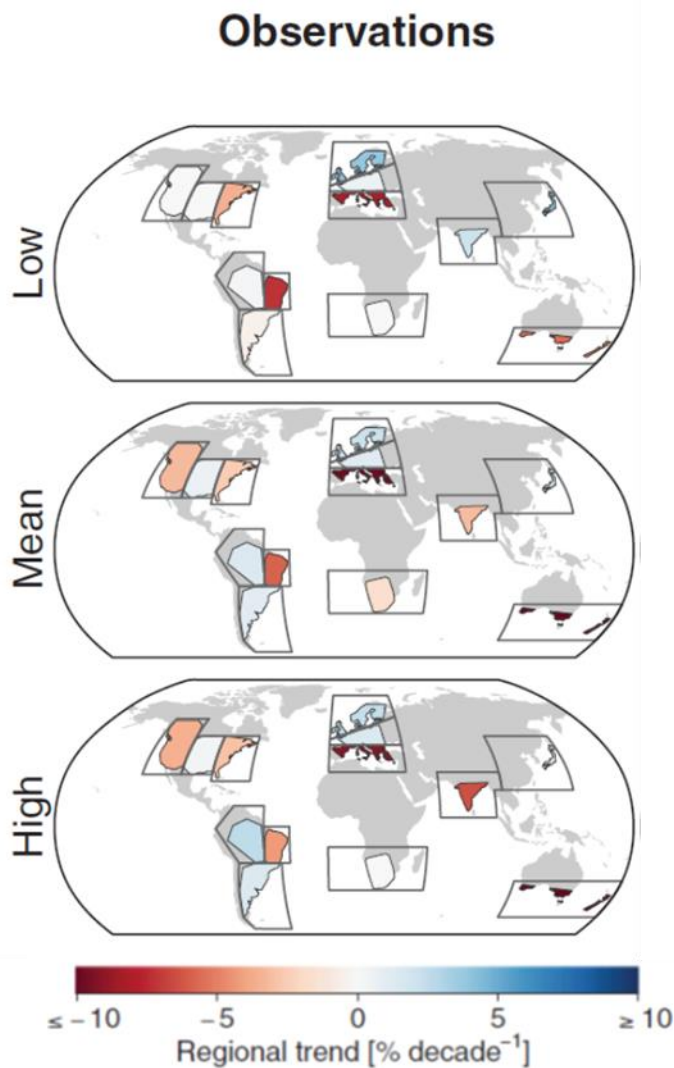


Figura 3.7. Tendências identificadas nas vazões baixas (Low), médias (mean) e altas (high) em diferentes regiões do Mundo, por Gudmundsson et al. (2021).

Yang et al. (2021) analisaram dados de vazão de 11069 locais em todo o mundo e concluíram que as series de vazões anuais são estacionárias na grande maioria (79%), sugerindo que as mudanças climáticas ao longo das últimas décadas não modificaram profundamente o comportamento das bacias hidrográficas. Por outro lado, em apenas 38% dos rios cujas bacias sofreram alterações antrópicas de urbanização, usos e manejo da água, o comportamento permaneceu estacionário.

De maneira geral, Sharma et al. (2018) chamam a atenção para o fato, aparentemente contraditório, que o aumento das chuvas intensas não necessariamente leva ao aumento das vazões máximas. Neste sentido, também é relevante a constatação de Kundzewicz et al. (2014), segundo os quais as tendências observadas, nas últimas décadas, de aumento dos danos devidos às inundações, têm uma relação maior com o aumento da exposição de bens e pessoas ao perigo do que propriamente com o aumento da magnitude ou frequência das cheias.

3.3.4 Tendências observadas nas vazões no Brasil e na América do Sul

Um trabalho extremamente abrangente sobre as tendências das vazões máximas e mínimas no Brasil foi apresentado por Chagas et al. (2022). Estes autores analisaram as tendências das vazões máximas e mínimas no Brasil no período de 1980 a 2015. Os resultados são apresentados na Figura 3.8. Observa-se que nas regiões Nordeste, Centro Oeste, e em boa parte do Sudeste do Brasil ocorreram, neste período, tendências de redução das vazões mínimas e das vazões máximas. Estas regiões incluem toda a bacia do rio São Francisco, praticamente toda a bacia dos rios Tocantins e Araguaia, a bacia do Alto Paraguai, e a parte superior da bacia do Paraná. Na região Sul houve um aumento das vazões mínimas, o mesmo ocorrendo no extremo Norte, na bacia do rio Negro.

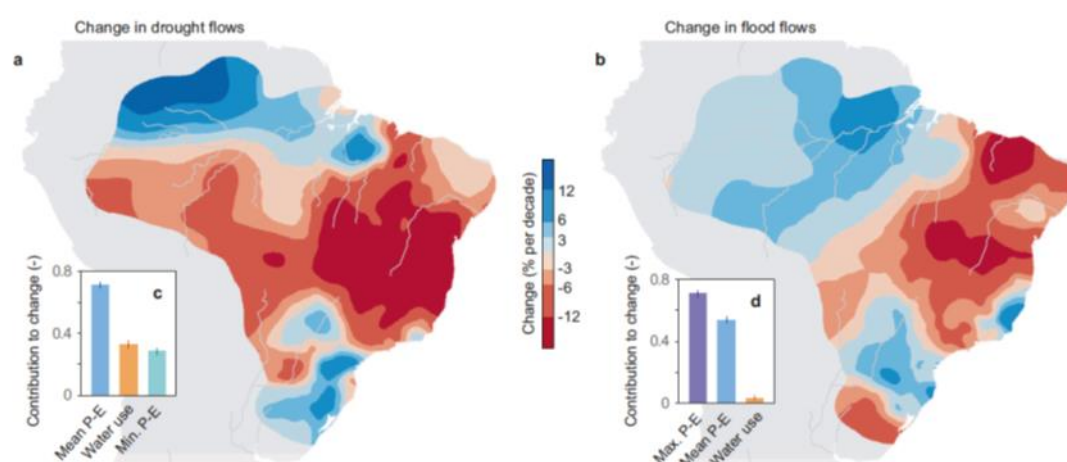


Figura 3.8. Tendências nas vazões mínimas (a) e máximas (b) no Brasil, no período de 1980 a 2015, identificadas por Chagas et al (2022). As regiões vermelhas indicam redução da vazão e as regiões azuis indicam aumento da vazão. Os gráficos de barra apresentam a importância dos possíveis fatores causadores das tendências, segundo análise de Chagas et al. (2022).

Na região de São Paulo, uma tendência negativa nas vazões já havia sido identificada antes por Freitas (2020), que analisou dados de vazão, evapotranspiração e precipitação nas bacias que contribuem para o abastecimento de água para a região metropolitana de São Paulo, no período de 1976 a 2009. A autora observou que a vazão média de alguns rios importantes nessa região caiu entre 30% e 40%, quando comparados os períodos de 1976 a 1989 e de 1990 a 2009, mas concluiu que a maior parte da alteração ocorreu não em função da mudança ou variabilidade climática, mas sim em função da mudança de uso da terra.

Na bacia do rio Araguaia tendências negativas da vazão nas últimas décadas também foram observadas por Lima et al. (2022), considerando dados de diversos postos fluviométricos, o que está de acordo com os resultados de Chagas et al. (2022).

No centro do Brasil, incluindo partes da região Sudeste, Nordeste e Centro Oeste, Cuartas et al. (2022) também observaram uma intensificação das secas. Eles analisaram

dados de chuva e vazão em diversas bacias hidrográficas relevantes para a produção de energia elétrica ao longo do período de 2010 a 2021 e concluíram que eventos de secas hidrológicas têm sido mais frequentes e intensos nos anos mais recentes.

Luiz-Silva et al. (2019) analisaram séries temporais de precipitação e vazão em dez bacias hidrográficas relevantes para a produção de energia elétrica no Brasil, utilizando dados do período de 1961 a 2006. Estes autores identificaram reduções de vazão no rio São Francisco, e aumentos de vazão na bacia do rio Paraná.

Souza et al. (2022b) analisaram séries temporais diárias de 855 postos fluviométricos no Brasil buscando tendências em vários indicadores relacionados a condições médias e extremas. Eles identificaram um padrão regional, com vazões decrescentes predominando na região Nordeste do Brasil, incluindo as bacias dos rios São Francisco e a região hidrográfica Atlântico Leste, e vazões crescentes no Norte (Amazonia), bacia do Alto Paraguai, bacia do Paraná, e na região Sul do Brasil.

Na Amazônia, um trabalho recente demonstrou que a área inundada durante as cheias tem aumentado desde 1980 até os dias atuais (Fleischmann et al. 2023).

Bartiko et al. (2019) avaliaram tendências na magnitude e frequência de cheias em 738 estações fluviométricas no Brasil, no período entre 1976 e 2015. Eles encontraram tendências positivas na frequência e magnitude das cheias nas regiões Norte e Sul e parte do Sudeste do Brasil, e tendências negativas no Nordeste e restante do Sudeste. Cheias estariam se tornando mais frequentes e intensas nas regiões úmidas e o contrário nas regiões secas.

O papel relativo do clima e de outras possíveis causas (uso da terra, uso da água) tem sido discutido por diversos autores (Chagas et al. 2022; Salmona et al.; 2023;), especialmente na bacia do rio Paraná (Doyle e Barros, 2011; Lee et al., 2013; Bayer, 2014; Lee et al. 2018; Abou Rafee et al., 2022;), e mais recentemente na bacia do rio São Francisco (Lucas et al., 2020; Collischonn et al. 2021; Silva et al 2021).

Uma comparação entre as observações das tendências recentes e as projeções de mudanças climáticas baseadas em modelos climáticos foi realizada por Miranda et al. (2023). As avaliações foram desenvolvidas com base em simulações do modelo MGB-SA. Em geral, as tendências simuladas concordam com as observadas em postos fluviométricos. Há tendência de redução nas vazões na região da bacia do Paraná, São Francisco e Tocantins e aumento na bacia Amazônica. Há concordância entre alterações recentes e projeções para o futuro em regiões como o norte da bacia do Paraná, Paraguai, São Francisco e Tocantins, mostrando redução nas vazões médias. E discordância na região na bacia Amazônia. A concordância entre alterações recentes e projeções devido a mudanças climáticas pode reforçar argumentos de que essas alterações recentes podem ser manifestação das mudanças climáticas. Por outro lado,

a discordância reforça argumentos de que as alterações recentes podem ser associadas à variabilidade climática.

Em geral, os estudos mostram tendências de aumento das vazões de cheias no sul e norte do Brasil, redução das cheias, vazões médias e mínimas na região central e nordeste.

No entanto, é importante lembrar que a interpretação do significado destas tendências deve ser realizada com cautela, pois, na maioria dos casos, as análises foram realizadas com séries relativamente curtas de dados. Caso tivessem sido utilizadas séries de dados mais longas, as conclusões poderiam ser diferentes. Além disso, as análises permitem identificar a existência ou não de tendências, mas não permitem conclusões a respeito dos fatores que causam as mudanças nas vazões.

3.4 METODOLOGIAS PARA PROJEÇÃO DE POSSÍVEIS IMPACTOS NOS RECURSOS HÍDRICOS

Os modelos climáticos globais, ou modelos do sistema terrestre, são as ferramentas utilizadas para projetar o clima do futuro. Estas ferramentas procuram representar o ciclo hidrológico global e, teoricamente, seriam capazes de representar adequadamente também os processos de hidrologia superficial, escoamento em rios, e os eventos extremos de vazões. Entretanto, os modelos climáticos globais, quando avaliados em regiões específicas, costumam apresentar viés. Por este motivo, os resultados de modelos climáticos não são utilizados diretamente para a análise de possíveis efeitos das mudanças climáticas sobre a hidrologia de bacias hidrográficas. Em vez disso, tipicamente, a análise dos impactos hidrológicos das mudanças climáticas é realizada através da aplicação de uma cadeia de ferramentas, ilustrada na Figura 3.9 e discutida por Hakala et al. (2019).

O passo inicial da cadeia de ferramentas é a necessidade de determinar um cenário de emissão de gases de efeito estufa ao longo do século XXI. Estes cenários, conforme discutido nos capítulos anteriores, permitem analisar as possíveis alterações no clima futuro em situações de emissões maiores ou menores.

Os modelos climáticos globais correspondem à etapa seguinte da cadeia. Estes modelos são aplicados em ao menos dois cenários de forçantes: aquelas correspondentes ao clima do presente e aquelas correspondentes ao clima do futuro.

Os resultados do modelo global podem ser utilizados como dados de entrada para a aplicação de um modelo climático regional, conforme mostra a Figura 3.9. Esta etapa, chamada de *downscaling* dinâmico, visa obter resultados mais detalhados na área de interesse, já que o modelo regional pode ter a vantagem de representar mais adequadamente o efeito do relevo sobre o clima.

Os resultados do modelo climático regional ou os resultados do modelo global podem ser utilizados como condições de contorno para a aplicação de um ou mais modelos hidrológicos. No entanto, tipicamente uma etapa intermediária, conhecida como correção de viés, é necessária antes da aplicação do modelo hidrológico. Isto ocorre porque os modelos climáticos tendem a apresentar desvios sistemáticos entre as variáveis simuladas (temperatura, precipitação, velocidade do vento, etc) e as variáveis observadas na região de interesse.

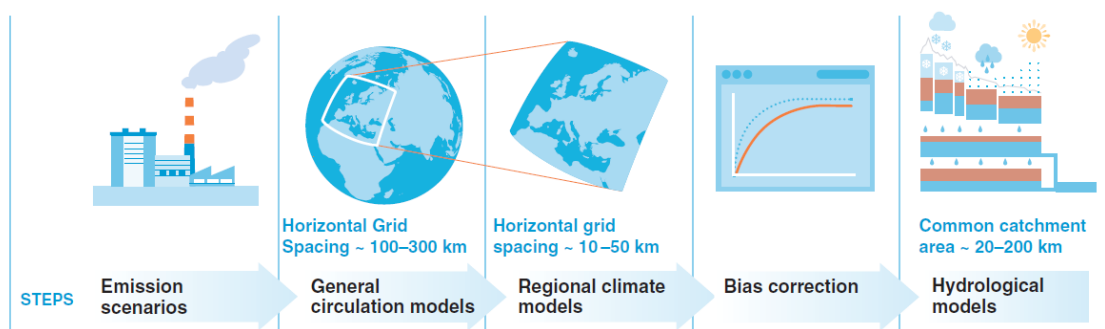


Figura 3.9. Cadeia de ferramentas utilizadas para estimar mudanças hidrológicas em função das mudanças climáticas (modificado de Hakala et al., 2019).

Vários métodos de correção de viés foram propostos ao longo das últimas décadas, e podem ser utilizados, conforme discutido a seguir.

Finalmente, após a correção de viés, as séries de dados climáticos podem ser utilizadas como condições de contorno para a aplicação de modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão, permitindo obter resultados de vazões nos locais de interesse. O modelo hidrológico é tipicamente aplicado com parâmetros calibrados em simulações anteriores, em que são utilizadas as séries observadas das variáveis mais importantes utilizadas como condições de contorno, como a precipitação.

Após a simulação de diferentes cenários, os resultados podem ser analisados sendo necessário considerar explicitamente a incerteza durante a sua interpretação.

3.5 CENÁRIOS DE EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA

A emissão real de gases de efeito estufa ao longo do século XXI não é conhecida com certeza, e o clima do futuro depende dessa variável. Para lidar com esta questão, o IPCC procura desenvolver cenários plausíveis sobre a evolução da emissão destes gases, considerando possíveis trajetórias socioeconômicas globais. Cada novo relatório do IPCC apresenta uma atualização dos cenários de emissão. Esses cenários podem ser pensados como histórias de futuros possíveis.

No relatório do IPCC conhecido como CMIP6, que é o mais recente disponível atualmente, foram definidos 5 cenários com nomes em código que remetem ao efeito

dos gases no balanço energético do planeta, em $W.m^{-2}$. Estes cenários são definidos como Shared Socio-Economic Pathways - SSPs (O'Neill et al., 2016). Por exemplo, o cenário SSP1-1.9 é um cenário em que a emissão de gases será baixa ao longo do século XXI, e o efeito destes gases na atmosfera representará um aquecimento correspondente a $1,9 W.m^{-2}$, na média de todo o planeta, no ano de 2100. Já o cenário SSP5-8.5 é um cenário de emissões muito altas, em que a concentração de GEE na atmosfera vai resultar em um efeito de $8.5 W.m^{-2}$ em 2100.

Tabela 3.1. Cenários de emissão de gases de efeito estufa (GEE) do CMIP6, com os valores esperados de aquecimento médio da atmosfera em meados do século XXI (2041 a 2060) e no final do século XXI (2081 a 2100).

Nome	Emissões	Incremento da temperatura média global (2041–2060)	Incremento da temperatura média global (2081–2100)	Faixa provável de incremento de temperatura média global em °C (2081–2100)
SSP1-1.9	Emissões de GEE muito baixas; emissões de CO ₂ zeradas até 2050	1.6 °C	1.4 °C	1.0 – 1.8
SSP1-2.6	Emissões de GEE baixas; emissões de CO ₂ zeradas até 2075	1.7 °C	1.8 °C	1.3 – 2.4
SSP2-4.5	Emissões de GEE intermediárias; emissões de CO ₂ estáveis até 2050, depois começam a diminuir, sem atingir zero até 2100	2.0 °C	2.7 °C	2.1 – 3.5
SSP3-7.0	Emissões de GEE altas; emissões de CO ₂ duplicam até 2100	2.1 °C	3.6 °C	2.8 – 4.6
SSP5-8.5	Emissões de GEE muito altas; emissões de CO ₂ triplicam até 2075	2.4 °C	4.4 °C	3.3 – 5.7

Observa-se na Tabela 3.1, que o cenário SSP5-8.5 é o cenário com maiores emissões e com o maior aumento esperado da temperatura média da atmosfera no final do século XXI. Este também é o cenário em que se esperariam as maiores alterações da precipitação e, possivelmente, da vazão dos rios.

3.6 MODELOS CLIMÁTICOS

Modelos Globais

Os modelos globais de clima (GCMs) são baseados nos princípios físicos gerais da dinâmica dos fluidos e termodinâmica e têm origem na previsão numérica de tempo. Os GCMs descrevem as interações entre os componentes do sistema climático global; a atmosfera, os oceanos e uma descrição básica da superfície da terra (Flato et al., 2013). Atualmente a maioria dos GCMs também representam importantes ciclos biogeoquímicos. Por este motivo, os modelos climáticos globais têm sido chamados de modelos do sistema terrestre (“*Earth System Models*”).

Ao longo das últimas décadas, desde o início do uso de modelos climáticos globais para a projeção das mudanças climáticas, houve uma evolução dos modelos climáticos. A evolução ocorreu em termos da quantidade de processos físicos representados, e em termos de resolução espacial. Mesmo assim, a geração atual de modelos climáticos globais utilizados nos relatórios do IPCC ainda tem uma resolução espacial de cerca de 100 km, que é relativamente grosseira quando comparada com a heterogeneidade da topografia e das bacias hidrográficas.

Apesar da evolução dos modelos climáticos, a variável precipitação, possivelmente a mais importante na hidrologia, continua sendo relativamente mal representada. Medeiros et al. (2022) compararam o desempenho de modelos climáticos do CMIP3, CMIP5 e CMIP6 em termos de sua capacidade de simular condições extremas de precipitação. Os autores concluíram que a evolução dos modelos ao longo do tempo (do CMIP3 ao CMIP6) não se refletiu numa melhora substancial em representar os eventos extremos de chuva analisados.

Da mesma forma, Correa et al. (2022) avaliaram o desempenho de um subconjunto de modelos do CMIP6 considerando as variáveis temperatura e precipitação no Brasil. Os autores observaram que o comportamento sazonal da precipitação é bem representado na região Centro-Oeste do Brasil. Já na região Nordeste ocorre uma tendência de superestimar a precipitação durante o período chuvoso, e na região Sul há uma tendência a subestimar a chuva, especialmente durante o inverno austral.

Já Pereima (2021) concluiu que os modelos do CMIP6 têm um desempenho melhor na região Sul do Brasil do que os modelos do CMIP5.

Modelos Regionais

Os modelos regionais são modelos numéricos semelhantes aos modelos globais, porém com resolução espacial mais fina, permitindo a avaliação de impactos em áreas menores e a análise mais detalhada dos impactos locais.

Os modelos regionais também permitem representar mais adequadamente o efeito das montanhas sobre as variáveis meteorológicas, como a temperatura e a precipitação.

Os modelos regionais são aplicados em áreas que cobrem um continente, ou uma parte de um continente. Nos contornos do domínio do modelo regional são fornecidos os dados previamente simulados por modelos climáticos globais.

Na América do Sul foram realizadas diversas aplicações de modelos climáticos regionais, com destaque para os esforços realizados com o modelo Eta, desenvolvido no INPE (Pesquero et al., 2010; Chou et al., 2014; Dereczynski et al., 2020).

Seleção de modelos climáticos

Diferentes modelos climáticos globais tendem a apresentar projeções de mudanças diferentes para uma mesma variável, em uma mesma região, em função de diferenças na sua formulação e na resolução espacial. Esta questão é, em geral, tratada na forma de uma análise de incerteza, em que cada projeção de cada modelo climático é considerada uma possível realização do clima futuro, e as diferentes projeções são tratadas como um conjunto, ou ensemble. A diferença entre as projeções é interpretada em termos da incerteza das projeções.

Outra possibilidade, entretanto, é a seleção ou ranqueamento de modelos climáticos, com base em uma avaliação de desempenho, ou da expectativa de geração de melhores projeções. Neste caso, ainda pode ser mantida a abordagem da projeção por conjunto, mas a combinação pode ser obtida de uma forma que não considera como equiprováveis as saídas de todos os modelos climáticos (Pereima, 2021; Tebaldi e Knutti, 2007; Sanderson, 2012).

A combinação de modelos pode levar em conta, ainda, a diferença de estrutura dos modelos, já que em grande parte os modelos climáticos apresentam semelhanças na forma como representam os processos físicos (Brunner et al., 2020). A Figura 3.10 apresenta o agrupamento dos modelos climáticos do CMIP6, com base na semelhança da estrutura ou de componentes compartilhados. Os modelos com os nomes da mesma cor indicam modelos com dependências óbvias, como componentes compartilhados ou a mesma origem, enquanto modelos sem dependências claras têm seus nomes em preto.

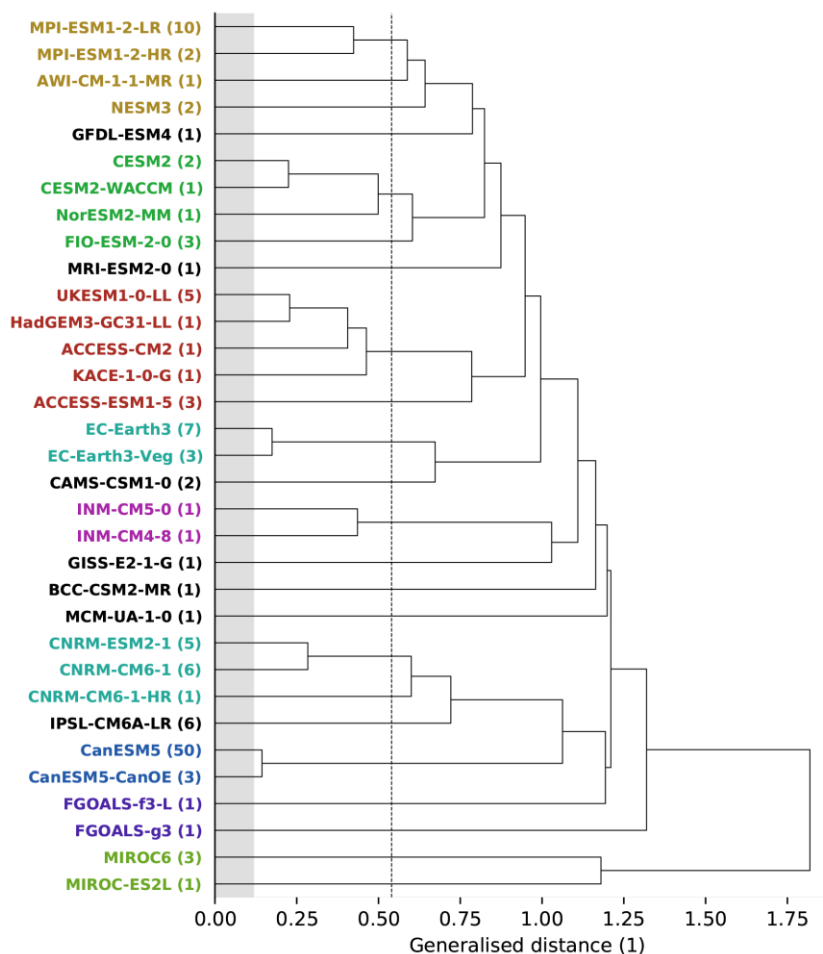


Figura 3.10. Árvore genealógica dos 33 modelos do CMIP6 (Brunner et al., 2020).

3.7 CORREÇÃO DE VIÉS

Teoricamente, resultados de um modelo climático regional ou de um modelo global poderiam ser utilizados, diretamente, como condições de contorno para a aplicação de um ou mais modelos hidrológicos. Contudo, as variáveis simuladas pelos modelos climáticos, e que são relevantes para as análises hidrológicas, como a temperatura do ar próximo à superfície, a precipitação e a velocidade do vento, tendem a apresentar desvios sistemáticos quando comparadas às variáveis observadas numa determinada região de interesse. Estes desvios podem ser grandes a ponto de prejudicar a análise final de comparação entre as variáveis hidrológicas, como a vazão, no clima futuro e no clima atual.

Assim, antes de utilizar os resultados do modelo climático como dados de entrada em um modelo hidrológico, usualmente é realizada a redução destes desvios, através de um procedimento chamado correção de viés.

O viés pode ser definido como diferença sistemática entre a estatística climática simulada e estatística climática correspondente do mundo real, podendo ser analisado como Viés de médias, de extremos e de variância. Também pode ser apresentado como

viés na correlação temporal (e.g. probabilidade de um dia chuvoso ser seguido por outro dia chuvoso) e viés na correlação espacial.

A análise de viés pode ser realizada comparando médias anuais da forçante estudada, mas com isso pode ocorrer a compensação de erros ao decorrer dos meses, e.g. chuva subestimada em alguns meses e superestimada em outros, apresentando erros pequenos, mas a sazonalidade pode estar mal representada. A análise mensal, ou sazonal, é mais adequada para evitar esse tipo de má interpretação dos erros.

Além da representação das forçantes médias anuais, da distribuição sazonal, e a variância dos totais anuais, o modelo climático pode estar representando mal a distribuição de frequência das variáveis climáticas diárias, e.g. subestimar chuvas intensas e superestimar chuvas leves.

Existem vários métodos de correções de viés, com diferentes graus de complexidade, e com foco em diferentes dimensões do viés. Um estudo apresentado por Luo et al. (2018) comparou 8 métodos de correção para precipitação e temperatura em uma bacia da China, utilizando dados do RCM HadGEM3-RA, realizando modelagem hidrológica com o modelo SWAT. Os autores concluíram que os métodos Daily Bias Correction (DBC) e Empirical Quantile Mapping (EQM) tiveram melhor desempenho na reprodução da precipitação, enquanto todos os métodos de correção de temperatura, com exceção do Linear Scaling (LS), funcionaram muito bem. Além disso, os autores concluíram que os métodos Daily Translation (DT) e LS, que não possuem correção de frequência de dias úmidos, não são adequados para serem aplicados em simulações de vazão. Os métodos EQM e Variance Scaling (VARI), para temperatura, foram os com melhor acurácia na simulação de vazões. O método Distribution Mapping (DM) tanto para precipitação quanto para temperatura teve a melhor correção na projeção de vazões extremas.

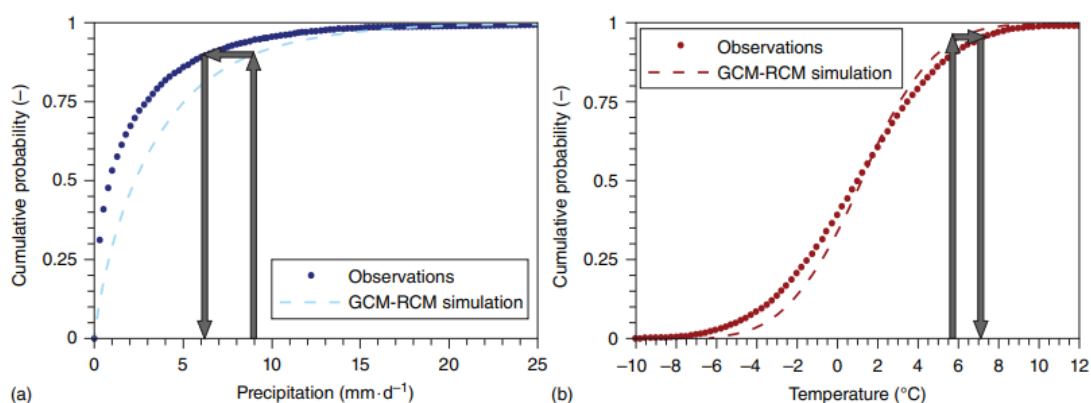


Figura 3.11. Ilustração da correção de viés de modelo climático para precipitação (a) e temperatura (b) pelo método Quantil-Quantil (Hakala et al., 2019).

Em uma parceria com a NASA, Thrasher et al. (2022) apresenta o *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6), onde disponibilizam uma base

de dados com variáveis climatológicas com viés corrigido para 35 GCMs, com dados históricos e mais 4 cenários, em uma resolução espacial de 0.25°. Os dados históricos são de 1950 a 2014 e os cenários futuros são de 2015 a 2100. A correção de viés das variáveis dos GCMs foi realizada através da metodologia Quantil-Quantil (*Quantile Mapping*) e o *downscaling* através de desagregação espacial (*Spatial Disaggregation*) com o método *Fast Fourier Transform*. Essa base de dados com correção de viés e *downscaling* permitem análise das variáveis máximas e mínimas com mais confiabilidade, além de ser útil para avaliar tendências nas mudanças projetadas no clima em uma variedade de escalas espaciais e temporais.

Serão abordados a seguir alguns dos métodos de correção de viés utilizados em análises de dados de GCMs e RCMs.

Delta change (DC)

Neste método temos a correção através de método aditivo (ou viés absoluto) e método multiplicativo (ou viés relativo). Neste método aplicamos uma perturbação delta nas variáveis estimadas do passado para obter a série da variável do futuro (Teutschbein e Seibert, 2012).

Este método é recomendado para análise de vazões médias e não é recomendado para análise de vazões extremas, pois na aplicação do método se usa a estrutura temporal da série observada amplificada ou reduzida, porém as secas do futuro poderão ser mais intensas, não porque chove menos nos dias de chuva, mas porque terão menos dias que chovem, a sequência temporal se alterou. Da mesma forma as cheias podem ficar intensas, não porque nos dias que chovem, chovem mais, mas porque passam mais dias chovendo. Essa mesma correção pode ser aplicada não mente para precipitação, mas para outras variáveis como a temperatura, radiação solar e umidade.

A escolha do método aditivo ou multiplicativo depende da variável escolhida, pois dependendo da variável não teremos valores com significados físicos após a correção (e.g. se usarmos aditivos para a precipitação e eventualmente ser uma subtração, poderemos ter chuvas negativas ou umidade relativa que fique acima de 100%).

Após a correção utilizando método, a sequência temporal será sempre a do clima atual, então para a análise de regularização de vazões, este método não a representará de forma adequada. Após a correção também ocorrerá uma mudança na distribuição de frequência da variável, então para análise de máximos e mínimos esse método não é adequado. Pois o máximo será o máximo observado aditivo ou multiplicativo a um fator delta, assim com os mínimos. Portanto este método é mais adequado para análise de disponibilidade hídrica e valores médios.

Em regiões áridas e semi árias, se aplicado o método multiplicativo, podemos obter valores considerados exageradamente amplificados. As equações (3.1) e (3.2) mostram o cálculo das variáveis climáticas corrigidas através do método DC.

$$XM_f^{cor} = X_{obs} \times \left(\frac{X_f}{X_p} \right) \quad (3.1)$$

$$XA_f^{cor} = X_{obs} + (X_f - X_p) \quad (3.2)$$

onde XM_f^{cor} é a variável climática corrigida pelo método multiplicativo, XA_f^{cor} é a é a variável climática corrigida pelo método aditivo, X_{obs} é a variável observada de uma base de dados climatológica e X_f e X_p são as variáveis climáticas simuladas pelo GCM para o futuro e passado, respectivamente.

Linear Scaling (LS)

Esta abordagem é capaz de se ajustar perfeitamente aos fatores climáticos quando os valores médios mensais são incluídos (Teutschbein e Seibert, 2012). Este método possui a vantagem de corrigir a média e a variância (porém de forma descontrolada). Além disso a sequência temporal do futuro é diferente da sequência temporal do passado. Porém, ao corrigir as variáveis por este método, não há mudança na forma de distribuição de frequência da variável, sendo então esse método não adequado para análises de máximos e mínimos de vazões. Este método mantém a sequência de dias chuvosos e dias secos. As equações (3.3) e (3.4) apresentam o cálculo da precipitação e temperatura corrigidas através deste método.

$$P_{f,m,d}^{cor} = P_{f,m,d} \times \left[\frac{\mu(P_{obs,m})}{\mu(P_{f,m})} \right] \quad (3.3)$$

$$T_{f,m,d}^{cor} = T_{f,m,d} + [\mu(T_{obs,m}) - \mu(T_{f,m})] \quad (3.4)$$

onde $P_{f,m,d}^{cor}$ e $T_{f,m,d}^{cor}$ são a precipitação e temperatura corrigidas, respectivamente, no correspondente d (dia) e m (mês); $P_{f,m,d}$ e $T_{f,m,d}$ são a precipitação e temperatura simuladas pelo GCM; e μ é o valor médio.

Empirical Quantile Mapping (EQM)

O método EQM pode ser aplicado a qualquer tipo de variável climática. Seu princípio é baseado em funções de distribuição cumulativa empírica diária construída pontualmente (ecdfs). Distingue-se de outras abordagens baseadas em mapeamento de distribuição que se concentram na precipitação e que apenas estimam os cdfs para dias úmidos (Piani et al., 2009; Jakob et al., 2011). Sua vantagem comparativa decorre do fato de poder produzir possíveis ecdfs tanto para dias secos quanto úmidos. A

frequência de ocorrências de precipitação juntamente com o desvio padrão pode ser corrigidos simultaneamente na abordagem EQM. As equações (3.5) e (3.6) mostram o cálculo das variáveis climáticas corrigidas através do método EQM.

$$P_{f,m,d}^{cor} = ecdf_{obs,m}^{-1} \left(ecdf_{f,m}(P_{f,m,d}) \right) \quad (3.5)$$

$$T_{f,m,d}^{cor} = ecdf_{obs,m}^{-1} \left(ecdf_{f,m}(T_{f,m,d}) \right) \quad (3.6)$$

onde $ecdf^{-1}$ representa o inverso da função de distribuição cumulativa empírica (ecdf).

Quantil-quantil ou Daily Translation (DT)

Neste método, para obtermos a série da variável corrigida do passado, se é gerada uma curva de frequência acumulada da série da variável simulada do passado e para a série da variável observada do passado (Mearns et al., 2009). Assim o viés é avaliado em cada quantil da comparação das curvas geradas. Para obtermos a série da variável corrigida do futuro, comparamos as curvas de frequência das séries simuladas do futuro com a curva das séries simuladas do passado, após obter o valor a frequência correspondente, esse valor é comparado na curva de frequência da série da variável observada do passado.

Este método tem como vantagem que as modificações do clima podem ser diferentes em valores extremos e em valores médios. Além disso o método não muda apenas a média e a variância, mas também a forma da distribuição e pode ser aplicado mês a mês. Como desvantagem, os valores extremos do clima do futuro que não aparecem nas curvas de frequência empíricas do clima do passado (ou seja, valores com frequência zero na curva de frequência do passado), terão de ser correspondidos através da extrapolação da curva de frequência do clima do passado, porém esse método pode apresentar incertezas. As equações (3.7) e (3.8) expressam o cálculo da precipitação e temperatura corrigidas através deste método.

$$P_{f,m,Q}^{cor} = P_{f,m,Q} \times \left[\frac{P_{obs,m,Q}}{P_{f,m,Q}} \right] \quad (3.7)$$

$$T_{f,m,Q}^{cor} = T_{f,m,Q} + [\mu(T_{obs,m,Q}) - \mu(T_{f,m,Q})] \quad (3.8)$$

onde $P_{f,m,Q}^{cor}$ e $T_{f,m,Q}^{cor}$ são a precipitação e temperatura corrigidas, respectivamente, e Q representa o percentil num mês m específico; $P_{obs,m,Q}$ e $T_{obs,m,Q}$ são a precipitação e temperatura, respectivamente, observadas para um determinado mês em um determinado percentil; e $P_{f,m,Q}$ e $T_{f,m,Q}$ são a precipitação e temperatura, respectivamente, simuladas pelo GCM para um determinado mês em um determinado percentil.

Um estudo recente, que utilizou a técnica do mapeamento quantil-quantil para a correção de viés de dados de modelos climáticos no Brasil, foi publicado por Ballarin et al. (2023).

Local Intensity Scaling (LOCI)

O método LOCI visa corrigir simultaneamente a intensidade e a frequência da precipitação (Schmidli et al., 2006). Inicialmente, é confirmado o limiar de intensidade de chuva ($P_{lim,m}$) para cada mês. Assim, o número de dias úmidos na precipitação do GCM que excede esse limite corresponde ao número de dias para os quais a precipitação observada foi determinada. Esta abordagem é capaz de eliminar efetivamente a tendência dos modelos globais simularem chuva leve, conhecido como efeito garoa. Um fator de escala s_m é então calculado para garantir que as quantidades médias de precipitação corrigida sejam iguais às observações. As equações (3.9) e (3.10) mostram o cálculo da precipitação corrigida através do método LOCI.

$$s_m = \frac{\mu(P_{obs,m,d} | P_{obs,m,d} > 0)}{\mu(P_{f,m,d} | P_{f,m,d} > P_{lim,m})} \quad (3.9)$$

$$P_{f,m,Q}^{cor} = \begin{cases} P_{f,m,d} \times s_m & P_{f,m,d} > P_{lim,m} \\ 0 & P_{f,m,d} < P_{f,m} \end{cases} \quad (3.10)$$

onde s_m é o fator de escala.

3.8 MODELOS HIDROLÓGICOS

Os modelos hidrológicos utilizados na estimativa de impactos de mudanças climáticas na hidrologia são, tipicamente, modelos do tipo chuva-vazão. Esses modelos podem ser simples modelos conceituais, concentrados no espaço, ou mesmo modelos distribuídos, de base física.

Os modelos hidrológicos devem ter a capacidade de considerar as mudanças nas variáveis climáticas, como a chuva, a temperatura, a radiação solar, a velocidade do vento etc.

Além disso, idealmente os modelos hidrológicos utilizados para a avaliação de impactos de mudanças climáticas deveriam ser calibrados e verificados. Sua capacidade de representar as mudanças do regime hidrológico em função das alterações do clima deveria ser demonstrada. Essa demonstração poderia ser realizada calibrando o modelo em um período relativamente úmido e verificando o modelo em um período relativamente seco, por exemplo.

Diversos estudos recentes têm demonstrado que os modelos hidrológicos podem ter dificuldades em representar as mudanças de variáveis como a vazão decorrentes de mudanças relativamente duradouras de condições climáticas (Coron et al., 2012; Berubé et al. 2022; Deb e Kiem, 2020; Duethmann et al. 2020; Fowler et al., 2016; Fowler et al. 2020).

3.9 INCERTEZA NAS PROJEÇÕES DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A incerteza nas projeções de impactos hidrológicos das mudanças climáticas está associada a diversas causas.

Inicialmente existe a incerteza relacionada à quantidade de gases de efeito estufa que serão emitidos ao longo das próximas décadas. Como essa emissão de gases depende de condicionantes socioeconômicas futuras, a incerteza é considerada através da elaboração de cenários de emissão de gases.

Outra fonte importante de incertezas está relacionada aos modelos climáticos globais. Modelos globais de clima tendem a gerar resultados diferentes entre si, dependendo do equacionamento adotado para representar os processos físicos, da solução numérica adotada, e da resolução espacial. Em muitos casos, não é possível saber, antecipadamente, se um modelo global é melhor, ou mais confiável, do que outro. Assim, é comum considerar que os diferentes resultados obtidos por diferentes modelos climáticos representam a incerteza da geração atual de modelos em representar o clima do futuro.

A incerteza também pode estar relacionada a outros elementos da cadeia de modelos, notadamente o método de correção de viés e o modelo hidrológico.

Em estudos de potenciais alterações hidrológicas em função das mudanças climáticas, a incerteza é normalmente considerada através da utilização de ensembles, ou conjuntos, de resultados. Os conjuntos permitem estimar a dispersão dos resultados e, portanto, permitem estimar a concordância entre os membros do conjunto com relação ao sinal da alteração prevista, ou em relação a sua intensidade.

3.10 MUDANÇAS PROJETADAS DE EXTREMOS HIDROLÓGICOS

Nesta seção estão resumidos alguns dos resultados mais relevantes sobre projeções de mudanças de eventos hidrológicos extremos em escala global e no Brasil.

Resumo das projeções atuais do IPCC

As projeções de mudanças climáticas globais envolvem diversas variáveis relativas à atmosfera, aos oceanos, e às superfícies continentais. Algumas variáveis relevantes no contexto da hidrologia continental são a temperatura, a precipitação total, a precipitação máxima, e a duração dos períodos de estiagem.

As projeções de mudanças de temperatura do ar apresentadas pelo IPCC sugerem que haverá aumento de temperatura em todo o globo, e que este aumento será mais intenso nas áreas continentais do hemisfério Norte (Figura 3.12). Na América do Sul as projeções indicam aumentos de temperatura entre 2 e 3 °C, aproximadamente, e há uma grande concordância dos modelos climáticos quanto ao sinal da mudança.

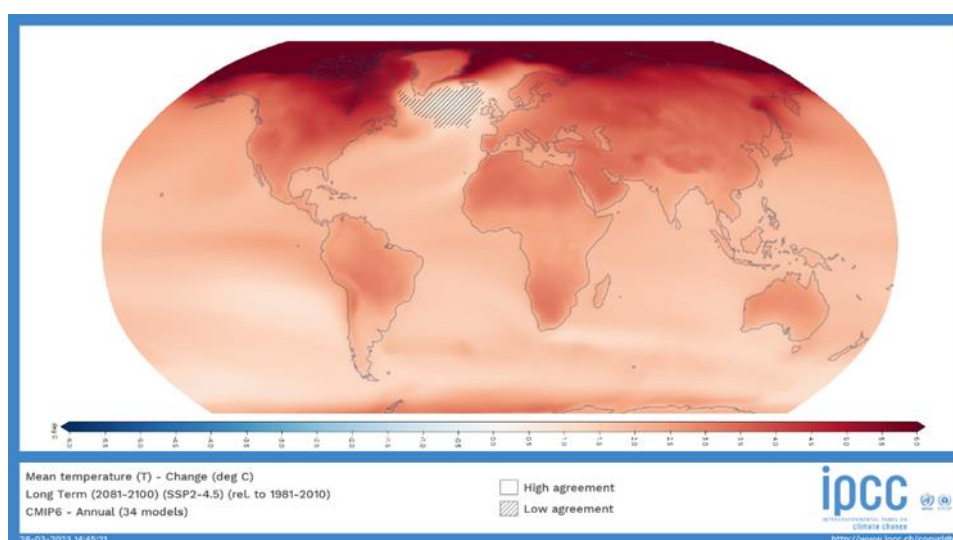


Figura 3.12. Projeção da mudança da temperatura do ar média (C), para o final do século XXI em relação ao final do século XX, com base em resultados de 34 modelos globais do IPCC, considerando o cenário SSP2-4.5.

As projeções de mudanças de precipitação média anual apresentadas pelo IPCC apresentam uma incerteza muito maior do que as projeções de temperatura (Figura 3.13). Em todo o hemisfério Sul praticamente não existem áreas continentais em que há concordância entre os diferentes modelos climáticos sobre o sinal da mudança. A América do Sul, em particular, está quase completamente hachurada no mapa, o que significa que é baixa a concordância entre os modelos globais quanto ao sinal da modificação. De qualquer forma, em termos médios, as projeções sugerem redução de precipitação em quase todo o Brasil, exceto na região Sul, onde há projeções de aumento, sendo que há, inclusive, concordância entre os modelos quanto ao sinal da modificação.

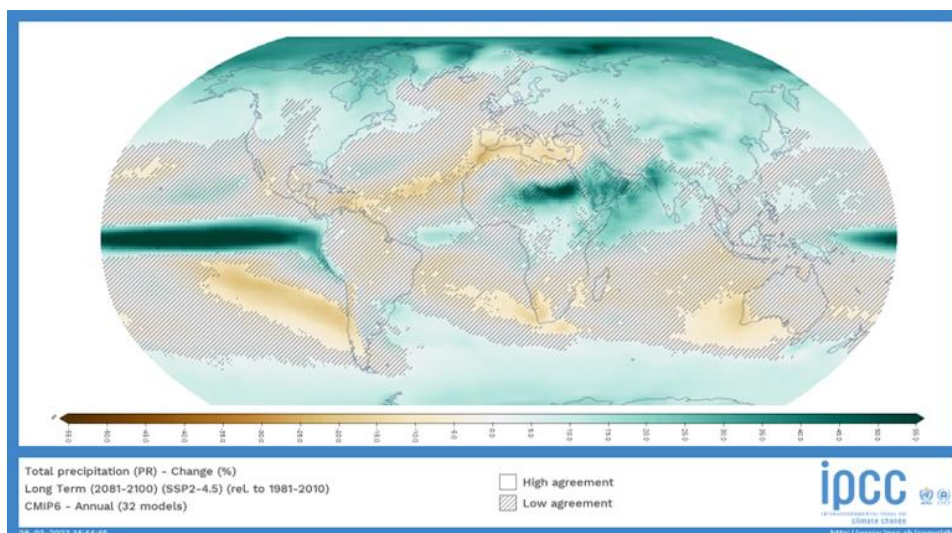


Figura 3.13. Projeção da mudança da precipitação média anual, no final do século XXI em relação ao final do século XX, com base em resultados de 32 modelos globais do IPCC, considerando o cenário SSP2-4.5.

Se nas projeções de chuvas médias em todo o Brasil a incerteza parece predominar, o mesmo não pode ser dito sobre as projeções de variáveis relacionadas aos eventos extremos causados pela chuva, ou pela falta de chuva. A Figura 3.14 apresenta a projeção de mudança do número consecutivo de dias sem chuva na América do Sul, que pode ser entendida como uma variável que mede a possível mudança da duração das estiagens. Observa-se que, na região Centro-Norte do Brasil, há uma grande área não hachurada, colorida em tons de marrom-esverdeado, onde há concordância entre os diferentes modelos climáticos globais sobre o sentido da alteração, isto é, os modelos concordam que vai haver um aumento do número de dias consecutivos sem chuva. No Brasil podemos esperar, portanto, um aumento na duração das estiagens em uma vasta região que inclui desde o Distrito Federal, ao Sul, até o Norte do Nordeste, boa parte da Amazonia, especialmente o Sul da Amazonia, incluindo as bacias dos rios Tocantins-Araguaia, Xingu, Tapajós e Madeira. Os valores de aumento projetado do número de dias consecutivos sem chuva na região em que há concordância entre os modelos variam entre 14 e 22 dias, aproximadamente.

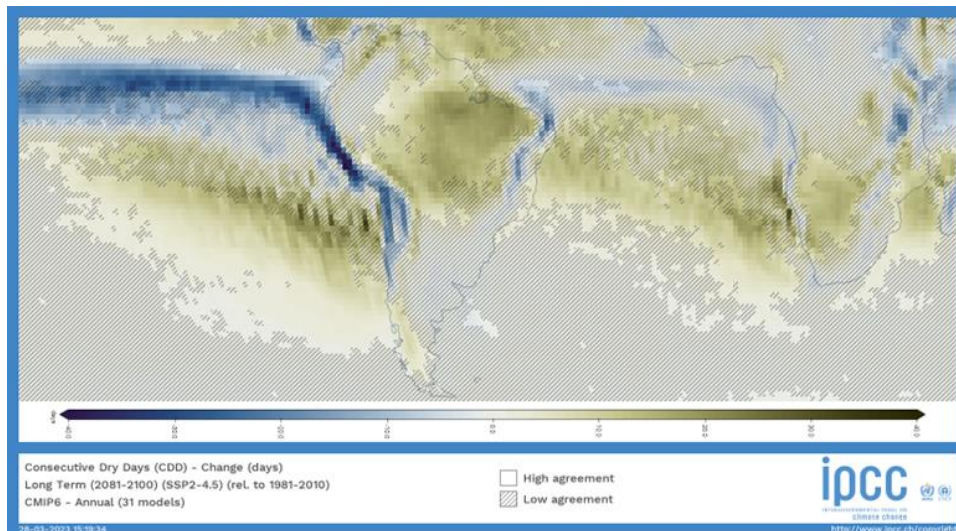


Figura 3.14. Projeção da mudança da duração das estiagens (número de dias consecutivos sem chuva), no final do século XXI em relação ao final do século XX, com base em resultados de 31 modelos globais do IPCC, considerando o cenário SSP2-4.5.

O aumento projetado no número de dias consecutivos sem chuva pode ter um importante impacto sobre os valores extremos de vazão. Espera-se que estiagens mais longas tenham como consequência valores menores de vazões mínimas. Ao mesmo tempo, estiagens mais longas podem ter como resultado uma redução na umidade do solo no início do período chuvoso, o que pode resultar em reduções das vazões máximas.

Considerando a variável chuva máxima com duração de 1 dia (Figura 3.15), os resultados apresentados pelo IPCC também têm uma concordância maior entre os modelos climáticos, do que no caso da chuva média anual. Observa-se que há concordância que as chuvas intensas com 1 dia de duração vão aumentar no Sul e Sudeste do Brasil, em parte da região Central, e no Norte do Nordeste. Na Amazônia também há projeção de aumento das chuvas intensas de 1 dia, mas a concordância entre os modelos é maior apenas na região Noroeste da bacia Amazônica, localizada principalmente na Colômbia e Equador.

A variável chuva máxima de 1 dia de duração, cuja projeção de alteração é apresentada na Figura 3.15, é importante no contexto dos extremos hidrológicos, porque ela influencia as vazões máximas, especialmente em bacias de até 5000 km², aproximadamente. Os valores de aumento de intensidade da chuva máxima de 1 dia projetados sobre a América do Sul chegam a 20%, aproximadamente.

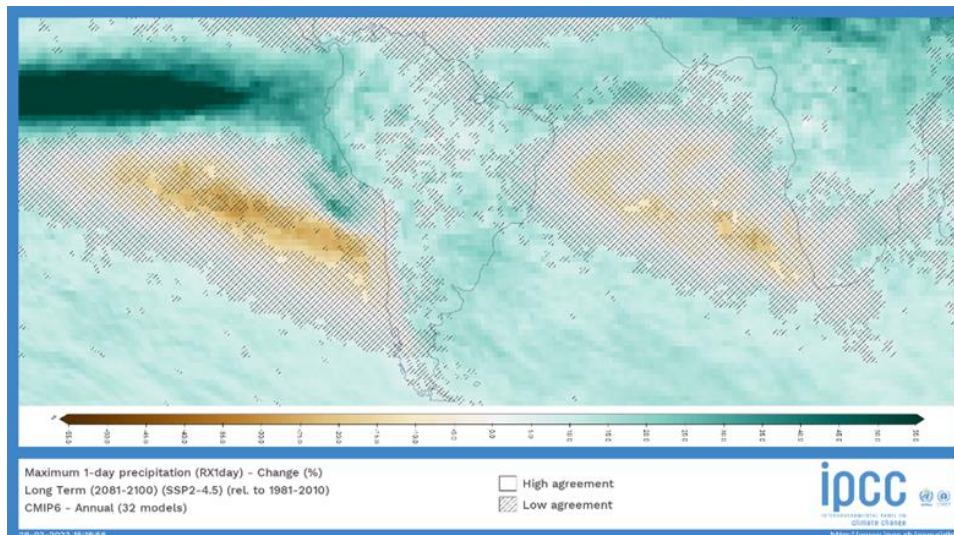


Figura 3.15. Projeção da mudança da chuva máxima em 1 dia, no final do século XXI em relação ao final do século XX, com base em resultados de 32 modelos globais do IPCC, considerando o cenário SSP2-4.5.

As cheias em bacias hidrográficas com maior área de drenagem são tipicamente formadas por chuvas com duração de múltiplos dias. Neste sentido, é interessante avaliar também os resultados apresentados pelo IPCC para a variável chuva máxima com duração de 5 dias (Figura 3.16), em que os resultados também têm uma concordância maior entre os modelos climáticos, do que no caso da chuva média anual. Observa-se que há três regiões principais da América do Sul em que existe concordância entre os modelos que as chuvas intensas com 5 dias de duração vão aumentar: o Sul do Brasil, o Norte do Nordeste do Brasil, e o Oeste da bacia Amazônica.

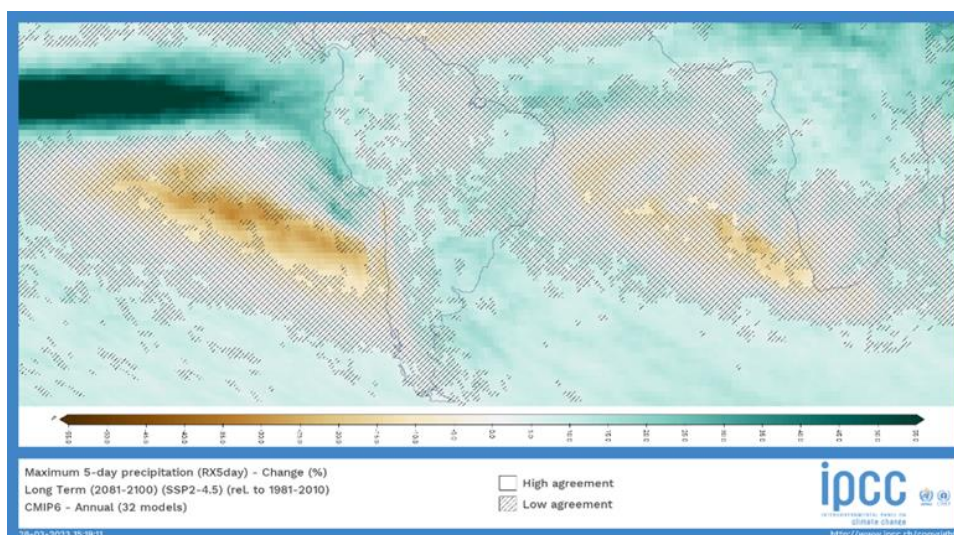


Figura 3.16. Projeção da mudança da chuva máxima em cinco dias, no final do século XXI em relação ao final do século XX, com base em resultados de 32 modelos globais do IPCC, considerando o cenário SSP2-4.5.

Com base no resumo de resultados do IPCC é razoável esperar que os impactos das mudanças climáticas nas vazões mínimas serão de diminuição destas vazões em grande parte do Brasil, exceto, talvez, na região Sul.

Já no caso dos possíveis impactos sobre vazões máximas, o resumo de resultados do IPCC apresenta um quadro um pouco mais confuso, porque as diferentes variáveis têm efeitos contraditórios. Enquanto o projetado aumento no número de dias consecutivos sem chuva tende a reduzir as vazões máximas, pelo efeito da redução da umidade do solo antecedente, o projetado aumento na magnitude das chuvas intensas tende a aumentar as vazões máximas. Esta contradição é maior na região Central do Brasil, e no Norte do Nordeste (Maranhão, Piauí e Ceará, aproximadamente).

Na região Sul do Brasil, por outro lado, há uma grande concordância entre os modelos do IPCC que as chuvas intensas de 1 dia e de 5 dias vão aumentar, e não há concordância que o número de dias consecutivos sem chuva vai diminuir. Isto leva a crer que, possivelmente, as cheias vão aumentar de magnitude e/ou frequência nesta região.

Projeções globais de mudanças em vazões máximas

Hirabayashi et al. (2013) utilizaram dados de deflúvio calculados por onze modelos climáticos globais do conjunto CMIP5 para estimar modificações nas vazões máximas diárias em todo o globo, através da simulação da propagação da vazão com o modelo CaMa-Flood. A alteração das vazões máximas foi estimada em termos da redução ou aumento do tempo de retorno de um valor de vazão máxima associada com o tempo de retorno de 100 anos na condição climática atual. Os resultados dos autores são reproduzidos na Figura 3.17, que mostra em azul as regiões em que se prevê redução do tempo de retorno, o que equivale à intensificação das vazões máximas, e em vermelho e laranja as regiões em que se prevê aumento do tempo de retorno.

A Figura 3.17a apresenta o grau de alteração do tempo de retorno, com tons de azul claro representando que a cheia de 100 anos passará a ser uma cheia de 75 a 95 anos no futuro, e os tons de azul mais escuro indicando que a cheia de 100 anos passará a ser uma cheia de 2 a 5 anos no futuro.

A Figura 3.17b apresenta o grau de concordância entre os modelos quanto ao sinal da alteração do tempo de retorno da cheia. Em azul escuro estão as regiões em que há grande concordância que o tempo de retorno da cheia de 100 anos vai diminuir, pois todos os onze modelos concordam com o sinal da modificação. Em azul claro a maioria dos modelos concorda que o tempo de retorno vai diminuir, mas a concordância é menor, pois apenas 7 entre 11 modelos concordam com o sinal.

O que se observa nos resultados de Hirabayashi et al. (2013), na Figura 3.17, é que a intensificação das cheias está prevista mais claramente na região dos trópicos e no Leste da Ásia. Além disso, há regiões de redução prevista no Norte da Europa, no Sudeste dos EUA e no Canadá. Por outro lado, em boa parte da Ásia, no Sul da Europa e no Norte da Amazonia há projeção de aumento do tempo de retorno da vazão que atualmente tem TR=100 anos.

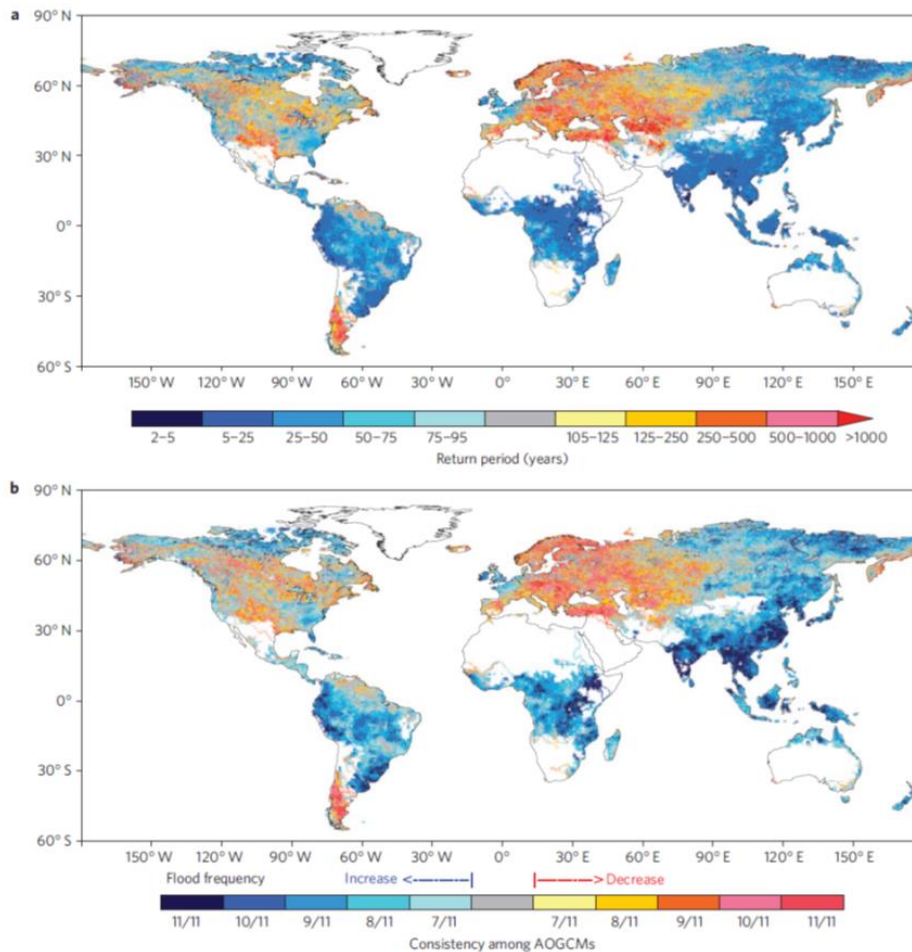


Figura 3.17. Alteração prevista do tempo de retorno da vazão máxima que tem 100 anos de tempo de retorno na condição climática atual, considerando o cenário RCP8.5: a) Tempo de retorno futuro da cheia de TR=100 anos atual; b) Concordância entre os 11 modelos climáticos quanto à alteração do tempo de retorno (adaptado de Hirabayashi et al., 2013).

Recentemente, o mesmo grupo de autores revisou o seu trabalho sobre redução do tempo de retorno das cheias em escala global utilizando os resultados dos modelos climáticos mais recentes, correspondentes ao CMIP6 (Hirabayashi et al., 2021). A metodologia utilizada neste novo trabalho foi praticamente a mesma utilizada no trabalho anterior (Hirabayashi et al., 2013), e os resultados também são semelhantes (ver Figura 3.18).

Observa-se na Figura 3.18 que, na América do Sul, a região em que está prevista uma redução do tempo de retorno da cheia de 100 anos se reduziu, ao passar do CMIP5 para

o CMIP6. Além disso, diminuiu a concordância entre os modelos quanto à redução ou ao aumento do tempo de retorno em grande parte da América do Sul, enquanto em outros continentes houve um aumento na concordância entre os modelos.

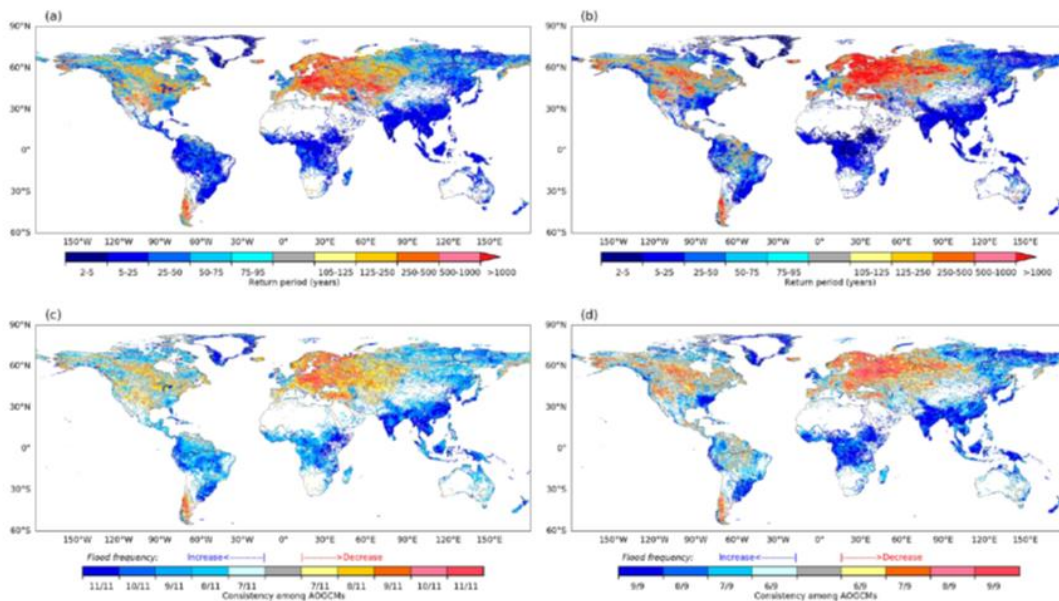


Figura 3.18. Comparação dos resultados obtidos por Hirabayashi et al. (2013), utilizando dados do CMIP5, e de Hirabayashi et al. (2021), utilizando dados do CMIP6. Alteração prevista do tempo de retorno da vazão máxima que tem 100 anos de tempo de retorno na condição climática atual, considerando o cenário RCP8.5. a) Tempo de retorno futuro da cheia de TR=100 anos atual com dados do CMIP5; b) Tempo de retorno futuro da cheia de TR=100 anos atual com dados do CMIP6; c) Concordância entre os modelos climáticos quanto à alteração do tempo de retorno com dados do CMIP5; d) Concordância entre os modelos climáticos quanto à alteração do tempo de retorno com dados do CMIP6 (adaptado de Hirabayashi et al., 2021).

He et al. (2022) analisaram os impactos das mudanças climáticas sobre as vazões máximas em seis países, utilizando uma combinação dos modelos HBV e CaMa-Flood. Eles concluem que, no cenário de aquecimento médio da atmosfera de 1,5 °C, a vazão máxima que atualmente tem um tempo de retorno de 100 anos passará a ter um tempo de retorno menor do que 100 anos em 92% das bacias analisadas na Índia, e 66% das bacias analisadas na China.

Os resultados de He et al. (2022) nos demais países analisados, e nos demais cenários de aquecimento, podem ser visualizados na Figura 3.19. Observa-se que na China, Etiópia, Gana e Índia os autores projetam um maior número de bacias apresentando redução de tempo de retorno. No Egito apenas uma parte pequena das bacias terá o tempo de retorno reduzido, o que significa que, na maior parte do território do país, as vazões máximas não vão se intensificar. No Brasil, a situação apresentada pelos autores sugere que as cheias vão se intensificar em aproximadamente metade dos locais.

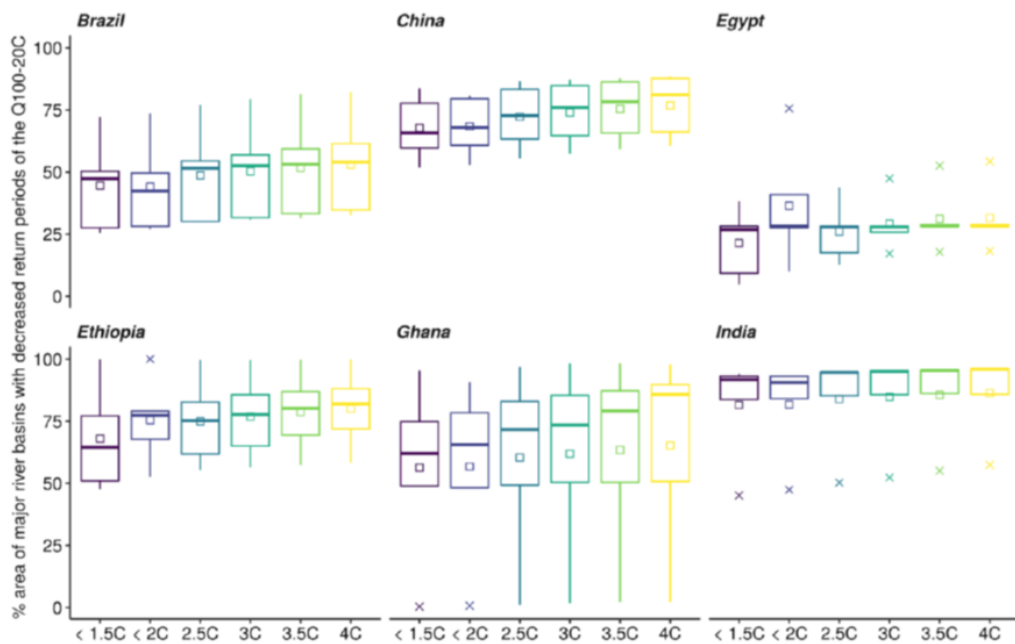


Figura 3.19. Porcentagem das principais bacias hidrográficas em que a vazão máxima com tempo de retorno de 100 anos no clima atual, terá um tempo de retorno menor no futuro, em 6 países e 6 cenários de mudanças climáticas (Box-plot com percentil 25% e 75%, mediana apresentada como linha horizontal, médias são os quadrados, e outliers marcados com x – adaptado de He et al., 2022).

Os resultados apresentados por He et al. (2022) estão em acordo com os resultados de Hirabayashi et al., 2021. No caso da Índia e China os dois estudos mostram uma intensificação das cheias, enquanto no Brasil as projeções não têm um sinal claro de aumento ou redução das vazões máximas.

Projeções globais de mudanças em vazões mínimas

Marx et al. (2018) obtiveram projeções de mudanças nas vazões mínimas de rios na Europa, através da combinação de modelos climáticos, cenários de aquecimento global, e diferentes modelos hidrológicos. Como indicador de vazão mínima os autores utilizaram a vazão Q_{90} .

Os resultados do estudo de Marx et al. (2018) estão apresentados na Figura 3.20. Os mapas no lado esquerdo da figura representam a mudança relativa na Q_{90} nos cenários de aquecimento da atmosfera global de 1.5 K até 3 K. Os mapas no lado direito apresentam o grau de confiança nos resultados. De acordo com os autores, a mudança indicada pode ser considerada provável quando este grau de confiança (*Robustness*) supera 66%.

A Figura 3.20 mostra que se projeta o aumento das vazões mínimas na região dos Alpes e no extremo Norte (Noruega, Suécia e Finlândia), e a redução na região Mediterrânea.

A redução de vazão na parte Sul da Europa se torna mais intensa nas projeções baseadas em cenários de maior aquecimento global.

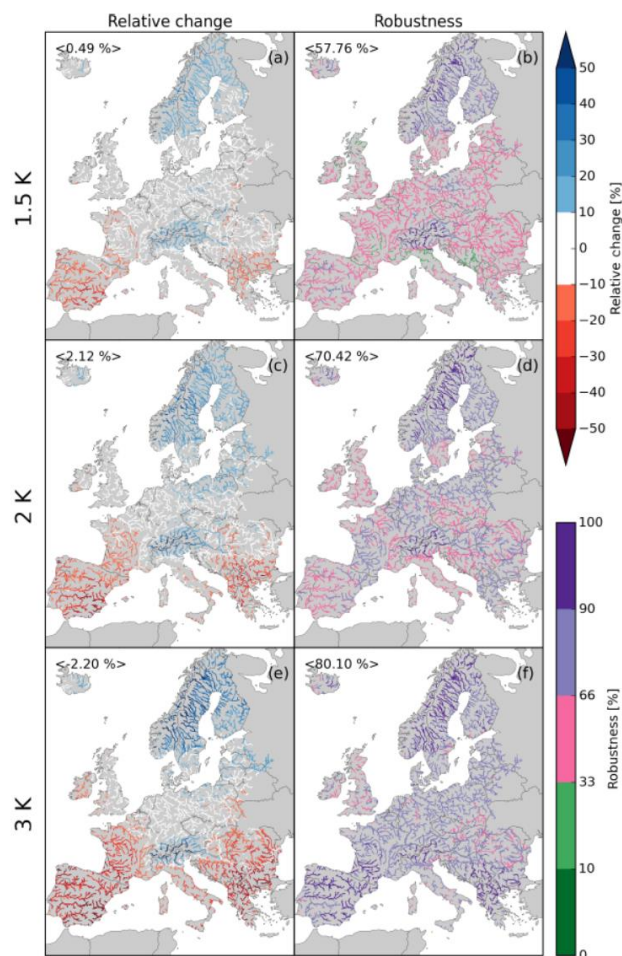


Figura 3.20. Mudança relativa na Q_{90} nos cenários de aquecimento da atmosfera global de 1.5 K até 3 K (lado esquerdo), e o grau de confiança correspondente (lado direito), de acordo com Marx et al. (2018).

Até a elaboração deste relatório não foram encontrados estudos para a escala global semelhantes ao apresentado por Marx et al. (2018) para a Europa.

Projeções de mudanças de vazões médias no Brasil

Ao longo das últimas décadas, foram desenvolvidos diversos estudos de avaliação de potenciais impactos de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos brasileiros.

Borges de Amorim et al. (2019, 2020) apresentam uma revisão sistemática de mais de 42 artigos científicos revisados por pares e publicados até o final de 2018. A análise foi compilada e organizada na base de dados online YARA (<http://www.labhidro.ufsc.br/yara/>), onde é possível consultar as principais conclusões dos artigos e grau de concordância para diferentes regiões brasileiras.

Entre as publicações revisadas, foram identificados diversos estudos utilizando o modelo hidrológico MGB forçado com projeções climáticas dos diferentes relatórios do IPCC. A maioria dos trabalhos foram aplicados a bacias hidrográficas específicas, como as dos rios Quaraí-RS (Paiva et al., 2011), Grande (Nobrega et al., 2011), Ibicuí (Adam et al., 2013), Paraguai (Bravo et al., 2013), Paraná (Adam et al., 2015), Amazonas (Sorribas et al., 2016), Lagoa dos Patos (Schuster, 2020), e Madeira (Siqueira Junior et al., 2015).

Na maioria dos casos, os estudos foram focados em avaliar impacto sobre as vazões médias. As abordagens variaram entre o uso de projeções de modelos climáticos globais e regionais, uso de métodos de remoção de viés mais simplificados (e.g. escalonamento linear) ou complexos (e.g. quantil-quantil), e entre o uso de diferentes gerações de modelos climáticos globais. Em muitos dos casos, observou-se considerável dispersão entre as projeções de diferentes modelos climáticos, indicando que a incerteza pode não ser desprezível se comparada com a diferença entre cenários climáticos ou até mesmo a magnitude das mudanças climáticas previstas. Esta incerteza deve ser considerada nas avaliações através do uso de um conjunto de modelos climáticos.

A Figura 3.21 apresenta projeções de futuros impactos de mudanças climáticas (2070 a 2100) nas vazões médias na bacia Amazônica simuladas com o modelo MGB-IPH e cenários do IPCC AR5 desenvolvidas por Sorribas et al. (2016).

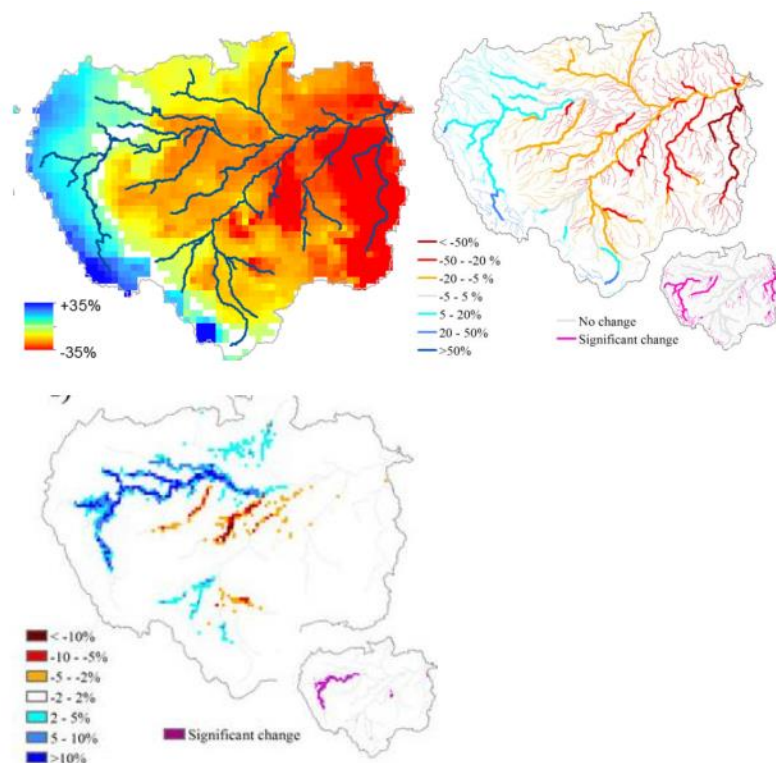


Figura 3.21. Projeções de futuros impactos de mudanças climáticas (2070 a 2100) no escoamento local, nas vazões médias e inundações na bacia Amazônica simuladas com o modelo MGB-IPH e cenários do IPCC AR5. Modificado de Sorribas et al. (2016).

Ao contrário da maioria das pesquisas realizadas até então, que focaram no impacto de mudanças do clima sobre as vazões médias, no trabalho de Sorribas et al. (2016), avaliou-se os impactos sobre as áreas de inundação na bacia Amazônica. Como resultado os autores notaram que as projeções indicam aumento no oeste da bacia e eixo principal do Amazonas, e redução nas várzeas dos afluentes na Amazônia central.

Em uma outra iniciativa de grande abrangência espacial, Lima, Collischonn e Marengo (2014) sintetizaram resultados de um grande projeto de pesquisa em que o modelo MGB foi aplicado em todas as bacias hidrográficas afluentes aos aproveitamentos hidroelétricos do Sistema Interligado Nacional (SIN). O modelo foi forçado com projeções de diversos modelos climáticos globais e regionais, considerando diferentes cenários de emissão de gases de efeito estufa. As vazões simuladas foram utilizadas para avaliações da operação do SIN sob diferentes projeções climáticas, sendo possível avaliar o impacto sobre a geração de energia elétrica.

Ribeiro Neto et al. (2016) avaliaram, de forma sistemática, potenciais alterações da vazão nas principais regiões hidrográficas brasileiras. Assim como outros estudos, os autores mostraram que é esperada uma redução da disponibilidade hídrica em quase todo o país, com exceção do sul do país. Os autores ainda projetaram que os extremos de vazão (máximas e mínimas) se intensificarão no futuro na Amazônia, Nordeste e em parte da costa do Atlântico Nordeste.

Apesar do grande número de estudos, observa-se que muitos deles são para regiões específicas e utilizam diferentes metodologias, causando dificuldade na avaliação sistemática e integrada em escala nacional de impactos de mudanças climáticas sobre os recursos hídricos.

Neste sentido, mais recentemente, Breda 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 3.22, 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/hge/modelos-e-outros-produtos/sacci/>.

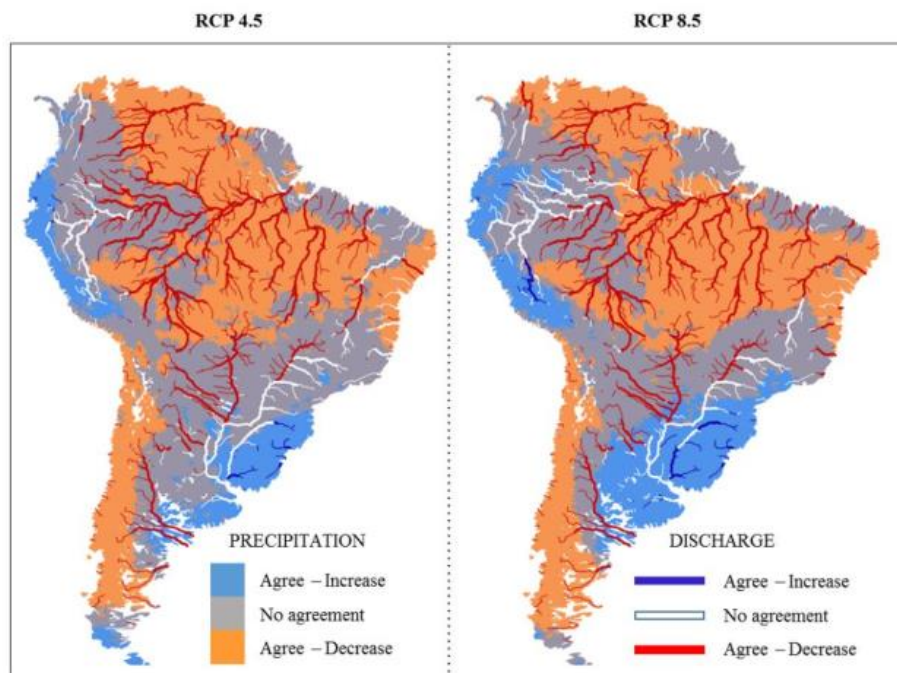


Figura 3.22. Projeções de mudanças na precipitação e vazão média na América do Sul. Grau de concordância entre predições com MGB usando diferentes GCMs. Fonte: Brêda et al. (2020).

Projeções de mudanças de vazões máximas no Brasil

Adam et al. (2015) utilizou o modelo hidrológico MGB e cenários de clima gerados com o modelo regional Eta para analisar as possíveis alterações nas curvas de vazões máximas em vários pontos de interesse na bacia do rio Paraná. Os autores observaram que a incerteza relacionada ao modelo climático é grande. Apesar disso, na maioria dos casos, as vazões máximas projetadas estão dentro dos limites de incerteza das estimativas de vazões máximas nas condições atuais. Além disso, concluem que, na bacia do rio Paraná, a variabilidade natural do clima pode ser tão importante quanto a influência das mudanças climáticas.

Ribeiro Neto et al. (2016) apresentaram um estudo abrangendo todo o Brasil, em que aplicaram o modelo hidrológico MGB com dados de clima de três combinações de modelos e cenários de aquecimento global, e avaliaram as mudanças projetadas na vazão Q_{95} , que serve como indicador de vazão mínima, e na vazão Q_{10} , que serve como indicador de vazão máxima. Os resultados de alteração da vazão Q_{10} , em valores absolutos ($mm \cdot dia^{-1}$), são apresentados na Figura 3.23. Observa-se que no Sul do Brasil é projetado um aumento das vazões máximas em quase todas as combinações de modelos e cenários. Além disso, em algumas partes da Amazonia e do Nordeste também há projeções relativamente consistentes, entre modelos e cenários, de aumento das vazões máximas. No restante do país predominam as projeções de redução nas vazões máximas.

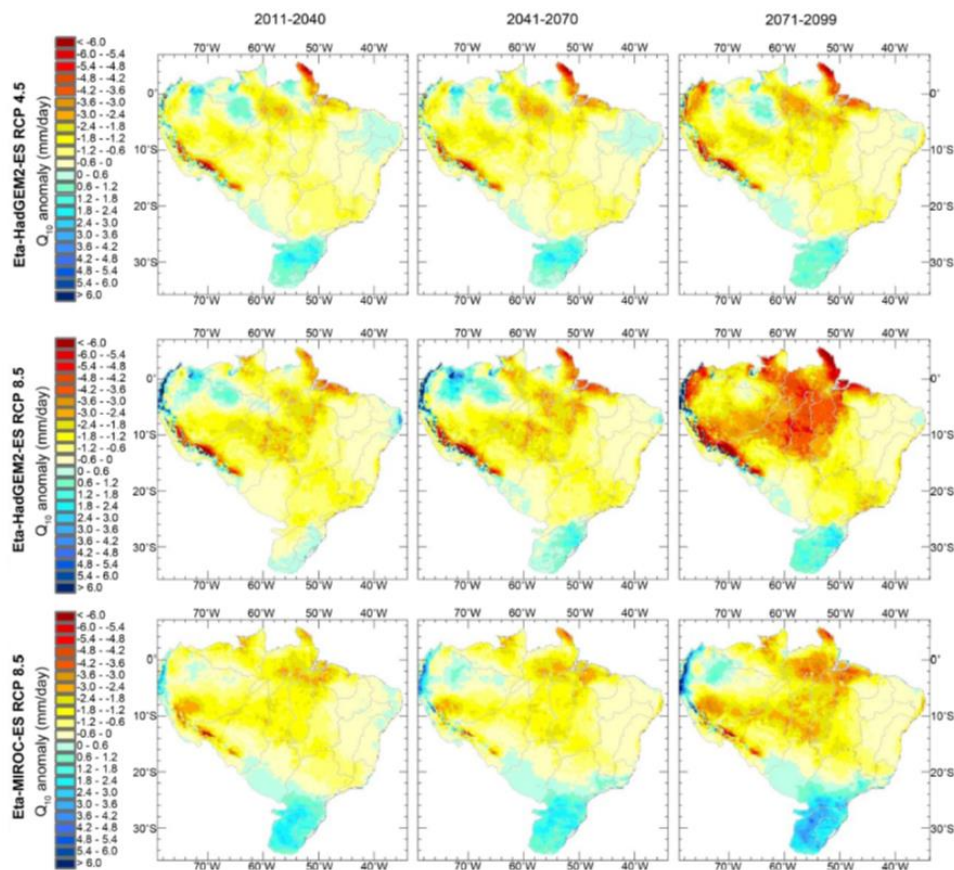


Figura 3.23. Alteração da vazão máxima (em $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$) considerando diferentes modelos climáticos (linhas) e diferentes períodos de tempo no futuro (colunas), de acordo com Ribeiro et al. (2016).

Na análise realizada por He et al. (2022) também estão incluídos resultados para o Brasil. De acordo com os autores, que analisaram os impactos das mudanças climáticas sobre as vazões máximas utilizando uma combinação dos modelos HBV e CaMa-Flood, a vazão máxima que atualmente tem um tempo de retorno de 100 anos passará a ter um tempo de retorno menor do que 100 anos em 48% das bacias analisadas no Brasil no cenário de aquecimento de $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ na atmosfera.

Um trabalho recente, enfocando sobre vazões máximas na América do Sul, foi apresentado por Brêda et al. (2023), que estudou extremos de precipitação e vazão na América do Sul (bacias $> 1000\text{ km}^2$). Os autores utilizaram o modelo hidrológico MGB com dados de quatro modelos climáticos, procurando analisar alterações potenciais nas vazões máximas. Eles mostraram que tanto a mudança das chuvas intensas como a mudança das condições antecedentes de umidade nas bacias hidrográficas influenciam as vazões máximas, sendo que em alguns casos os dois efeitos podem se anular ou podem amplificar os resultados. Por exemplo, enquanto apenas metade das bacias da América do Sul devem apresentar redução na precipitação máxima com tempo de retorno 2 anos, quase 70% dos rios apresentam um sinal negativo para mudanças nas vazões máximas com tempo de retorno de 2 anos, o que pode ser atribuído à redução da umidade antecedente do solo.

Os resultados de Brêda et al. (2023) são apresentados na Figura 3.24, 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. Já no caso dos tempos de retorno maiores (22 anos), o quadro apresentado é semelhante, mas com um pouco menos de concordância entre os modelos.

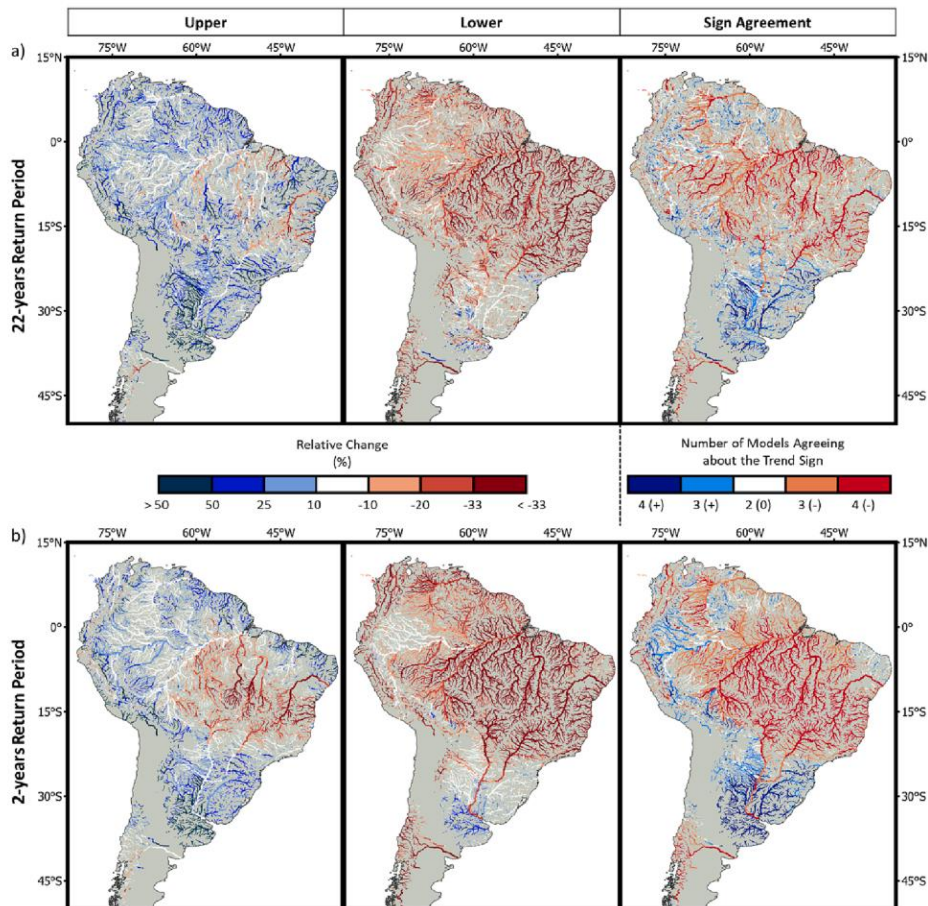


Figura 3.24. Projeção de alteração das vazões máximas de 2 anos e 22 anos de tempo de retorno. Os painéis esquerdo e central mostram os resultados da envoltória inferior e superior do conjunto de 4 modelos climáticos, e os painéis da direita indica a concordância entre esses modelos em relação à mudança de sinal.

Projeções de mudanças de vazões mínimas no Brasil

Um estudo realizado na bacia do rio São Francisco apresentou projeções de redução na vazão Q_{90} em quase todos os locais, considerando os cenários de clima do futuro do CMIP6 aplicados sobre o modelo hidrológico SMAP (Silva et al., 2022).

Antes disso, um estudo abrangendo todo o Brasil foi apresentado por Ribeiro Neto et al. (2016). Estes autores aplicaram o modelo hidrológico MGB com dados de clima de três combinações de modelos e cenários de aquecimento global, e avaliaram as mudanças projetadas na vazão Q_{95} , que serve como indicador de vazão mínima, e na vazão Q_{10} , que serve como indicador de vazão máxima. Os resultados de alteração da vazão Q_{95} ,

em valores absolutos ($mm. dia^{-1}$), são apresentados na Figura 3.25. Observa-se que no Oeste do Amazonas há uma região em que é projetada uma redução importante das vazões mínimas em quase todas as combinações de modelos e cenários. No Sul e em parte do Nordeste do Brasil os resultados se alternam entre aumento e redução da Q_{95} . Na região central do Brasil, correspondendo em grande parte às regiões Centro-Oeste, Sudeste e o Sul do Nordeste, todas as previsões indicam uma leve redução das vazões mínimas.

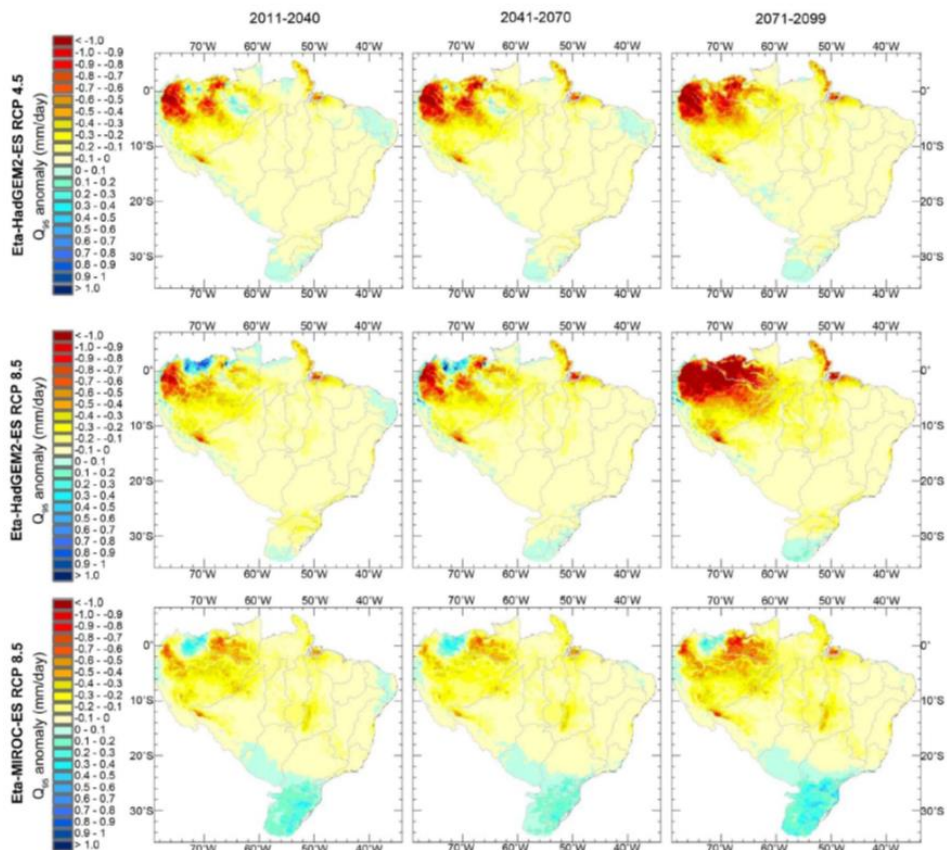


Figura 3.25. Alteração da vazão mínima (em $mm. dia^{-1}$) considerando diferentes modelos climáticos (linhas) e diferentes períodos de tempo no futuro (colunas), de acordo com Ribeiro et al. (2016).

4. METODOLOGIA

No contexto do projeto atual de cooperação entre ANA e IPH, que é objeto deste relatório, os impactos de mudanças climáticas sobre as vazões extremas na América do Sul foram avaliadas através de uma cadeia de ferramentas semelhante à descrita na Figura 3.9.

A cadeia consistiu dos seguintes itens:

- 1) seleção de projeções de modelos climáticos da base de dados *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) (Thrasher et al., 2022)
- 2) definição de cenário de emissões
- 3) seleção do modelo hidrológico MGB-SA (Siqueira et al., 2018)
- 4) correção do viés
- 5) considerações sobre as incertezas das projeções.

4.1 PROJEÇÕES DE MODELOS CLIMÁTICOS GLOBAIS

Foram avaliadas diferentes bases de dados de projeções de modelos climáticos globais (GCMs) e regionais (RCMs) no contexto do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados CMIP6 do Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do Painel Intergovernamental para Mudanças Climáticas (IPCC).

Os modelos do IPCC CMIP6 possuem, no geral, uma resolução horizontal entre 100 e 250 km. No início do projeto atual, foram identificadas as possíveis fontes de dados das projeções dos modelos climáticos com dados em intervalo de tempo mensal e diário.

Com relação aos dados mensais, foram identificadas as seguintes plataformas que disponibilizam os dados do CMIP6:

- USA, PCMDI/LLNL (California) - <https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>
- France, IPSL - <https://esgf-node.ipsl.upmc.fr/projects/cmip6-ipsl/>
- Germany, DKRZ - <https://esgf-data.dkrz.de/projects/cmip6-dkrz/>
- UK, CEDA - <https://esgf-index1.ceda.ac.uk/projects/cmip6-ceda/>

Com relação aos dados diários, as plataformas identificadas foram:

- Copernicus - <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/projections-cmip6?tab=overview>
- NASA (NEX-GDDP-CMIP6) - <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6>

- Cordex - <https://cordex.org/data-access/how-to-access-the-data/>
- ETA - <https://projeta.cptec.inpe.br>

Os dados do Cordex são disponibilizados considerando o *downscaling* dinâmico para uma resolução horizontal mais fina, mas que pode ser variável dependendo do modelo e da região avaliada.

Os dados disponibilizados pela NASA não possuem informações de pressão atmosférica. Por outro lado, seus dados são fornecidos já com correção de viés, e já reamostrados para uma resolução horizontal de 25 km, como resultado de um procedimento de *downscaling* estatístico e remoção de viés (Thrasher et al., 2022).

Após discussões com os analistas da ANA, optou-se pelo uso da base de dados *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) (Thrasher et al., 2022), disponível em <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6>. Nesta base de dados estão disponíveis projeções de diversas variáveis climáticas, com viés corrigido, de 35 GCMs, com dados históricos e mais 4 cenários de emissão de gases de efeito estufa.

A resolução espacial dos dados NEX-GDP-CMIP6 é de 0.25°. Os dados históricos são de 1950 a 2014 e os cenários futuros são de 2015 a 2100. Essa base de dados é adequada para a aplicação de um modelo hidrológico em intervalo de tempo diário, o que permite estimar adequadamente vazões mínimas e máximas em bacias hidrográficas com área de drenagem da ordem de 1000 km², ou mais, além de ser útil para avaliar tendências nas mudanças projetadas no clima em uma variedade de escalas espaciais e temporais.

Para gerar a base de dados NEX-GDP-CMIP6 a correção de viés das variáveis dos GCMs foi realizada através da metodologia Quantil-Quantil (*Quantile Mapping*) e o *downscaling* através de desagregação espacial (*Spacial Disagregation*) com o método *Fast Fourier Transform* (Thrasher et al., 2022). A base de dados de referência para a remoção de viés é o GMFD - *Global Meteorological Forcing Dataset for Land Surface Modeling* (Sheffield et al., 2006), disponível, atualmente, em <https://rda.ucar.edu/datasets/ds314.0/> e, até 2022, no repositório da Universidade de Princeton.

Foram obtidos dados observados do histórico da base GMFD e simulações do período histórico (1950 a 2014) e projeções (2015 a 2100) dos 28 modelos climáticos que possuem informações sobre as variáveis climáticas necessárias para o modelo hidrológico MGB-SA, incluindo precipitação, temperatura do ar, radiação incidente de ondas curtas e velocidade do vento.

4.2 CENÁRIOS

O cenário sócio-econômico (*Shared Socio-Economic Pathways-SSPs*, O'Neill et al. 2016) escolhido foi o SSP2-4.5, que considera que, até 2050, as emissões de CO₂ serão estabilizadas, e que se reduzirão até zero em 2100. De acordo com os resultados dos modelos climáticos globais, no cenário SSP2-4.5, haverá um incremento da temperatura média global em 2.0 °C nas próximas décadas (2041-2060), chegando a 2.7 °C (2.1 °C a 3.5 °C quando considerada a incerteza) no final do século (2081-2111).

A escolha do cenário SSP2-4.5 no contexto do presente trabalho se justifica porque ele é um cenário intermediário entre o mais otimista e o mais pessimista. Além disso, ele é suficientemente intenso para que as possíveis alterações possam ser percebidas nos resultados da modelagem hidrológica.

A opção por utilizar apenas um cenário, por outro lado, se justifica porque, em geral, os resultados em diferentes cenários de emissão apresentam padrões espaciais semelhantes, variando apenas em termos de intensidade.

4.3 MODELO HIDROLÓGICO

A terceira etapa na cadeia de procedimentos utilizados para gerar projeções de impactos da mudança climática sobre os recursos hídricos é a modelagem hidrológica. No contexto do presente projeto de pesquisa o modelo escolhido foi o modelo hidrológico continental MGB-SA (Siqueira et al., 2018). Esta opção foi adotada por uma série de motivos.

Em primeiro lugar, o modelo foi desenvolvido pela mesma equipe de pesquisadores do projeto atual, e foi aplicado previamente, em versões anteriores, em diversas avaliações de impactos de mudanças climáticas em recursos hídricos (e.g. Nóbrega et al., 2011; Bravo et al., 2014; Adam et al., 2015; Sorribas et al., 2016; Brêda et al., 2020; Brêda et al., 2023).

Em segundo lugar, o modelo MGB-SA permite realizar simulações hidrológicas e analisar os impactos da mudança climática sobre toda a América do Sul, numa escala compatível com a escala dos modelos climáticos.

Além disso, o modelo MGB-SA foi selecionado para este estudo pela sua capacidade de representar os processos hidrológicos da América do Sul, sendo desenvolvido a partir de experiências na região (Siqueira et al., 2018). Isto inclui, por exemplo, o detalhamento com o qual são representados os processos em planícies de inundação, muito relevantes no contexto dos rios da América do Sul.

O modelo MGB-SA também demonstrou que sua acurácia na predição de hidrogramas de vazões em geral é equivalente à acurácia de modelos hidrológicos locais. Por exemplo, as validações com séries de vazão observada em centenas de estações fluviométricas mostram valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe superiores a 0.6 em 55 % dos casos. Em comparação com modelos hidrológicos globais, o desempenho do modelo MGB-SA se mostrou claramente superior (Siqueira et al., 2018).

O MGB-SA é um modelo hidrológico-hidrodinâmico conceitual que simula o ciclo hidrológico terrestre, incluindo os processos de balanço hídrico e de energia, evapotranspiração, interceptação pela vegetação, escoamento subterrâneo, subsuperficial e superficial e propagação do escoamento em rios. O modelo representa bacias hidrográficas em três níveis: (i) *Minibacias*, (ii) *Unidades de Resposta Hidrológica (URHs)* e (iii) *Subbacias*.

- i) *Minibacias*: representam a área de contribuição incremental de trechos de rio de ~15 km. Elas são definidas a partir da topografia e servem para considerar a variabilidade espacial dos processos hidrológicos (e.g., precipitação e temperatura) e das características hidráulicas dos canais. O domínio da América do Sul totalizou 33,749 minibacias.
- ii) *URHs*: divisão em nove classes com resposta hidrológica diferente. A classificação é baseada no tipo e cobertura do solo. Foi utilizada a seguinte descrição: (i) floresta com solo raso, (ii) floresta com solo profundo, (iii) agricultura com solo raso, (iv) agricultura com solo profundo, (v) campo com solo raso, (vi) campo com solo profundo, (vii) planície de inundação, (viii) área semi-impermeável e (ix) água.
- iii) *Subbacias*: regiões utilizadas para a calibração do modelo. Em cada subbacia, o modelo possui um conjunto de parâmetros associado às URHs. Elas são definidas com base em mapas de litologia e na divisão de grandes bacias da América do Sul (e.g., bacias Amazônica e do Prata). Ao todo, o modelo possui 296 subbacias.

O escoamento gerado na minibacia é propagado até seu exutório através de um reservatório simples para cada um de seus componentes (superficial, subsuperficial e subterrâneo). Por fim, ao chegar no canal, a vazão é propagada na rede de drenagem através da equação hidrodinâmica inercial. Esse processo está ilustrado na Figura 4.1.

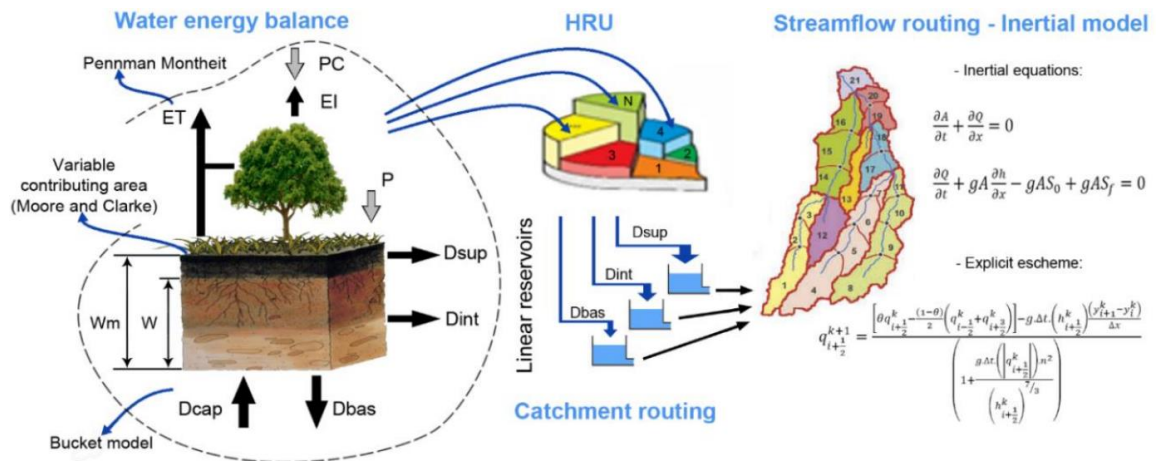


Figura 4.1. Representação esquemática dos processos envolvidos na simulação do MGB-SA. Os painéis esquerdo e central são referentes à parcela hidrológica do modelo, enquanto o direito é referente à parcela hidrodinâmica. (Adaptado de Siqueira et al., 2018)

O modelo MGB-SA foi aplicado para toda a América do Sul (Siqueira et al., 2018) e seus parâmetros foram calibrados para reproduzir hidrogramas utilizando dados de precipitação diária da base MSWEP v1 (Beck et al., 2017) e de variáveis climáticas do Climate Research Unity (CRU) Global Climate v.2. (New et al., 2002). A Figura 4.2 mostra a validação do modelo em alguns postos fluviométricos pela métrica KGE e a comparação de hidrogramas simulados com observados em alguns grandes rios.

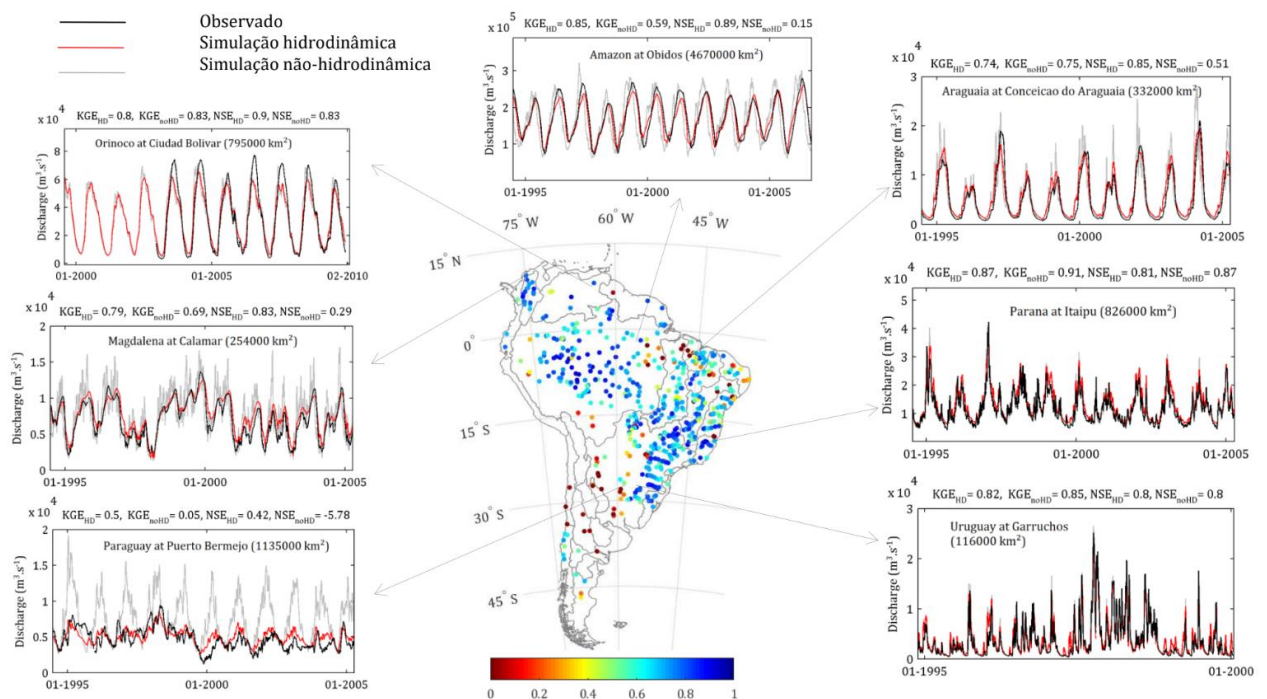


Figura 4.2. Validação das vazões diárias simuladas pelo modelo MGB-SA. Distribuição espacial do coeficiente de eficiência KGE nos postos fluviométricos e hidrogramas simulados (vermelho) e observados (preto).

4.4 VIÉS DO MODELO CLIMÁTICO-HIDROLÓGICO

A base NEX-GDDP-CMIP6 disponibiliza os dados dos modelos globais com um pós-processamento que inclui a correção de viés. Teoricamente, portanto, estes dados poderiam ser utilizados diretamente como condições de contorno para o modelo hidrológico. Entretanto, o modelo hidrológico foi desenvolvido e calibrado utilizando uma outra base de dados como condição de contorno, o que exige uma etapa de recalibração dos parâmetros do modelo hidrológico.

O modelo hidrológico MGB-SA foi calibrado com a base de dados de precipitação MSWEP v1. A base NEX-GDDP-CMIP6 teve seu viés corrigido considerando como referência os dados de chuva da base GMFD, que apresenta algumas diferenças em relação à base MSWEP. Aplicar o modelo MGB-SA, que foi calibrado com os dados do MSWEP, utilizando os dados do GMFD resulta em um viés, que deve permanecer também nas simulações com os resultados dos modelos climáticos da base NEX-GDDP-CMIP6. Este viés pode introduzir um erro sistemático nos resultados, e este erro pode se propagar na cadeia de avaliações com o modelo hidrológico.

Para reduzir estes erros sistemáticos e incertezas nas projeções de impactos hidrológicos sobre vazões extremas, os parâmetros do modelo MGB-SA foram recalibrados, utilizando a base de dados GMFD como condição de contorno. Nesta recalibração também foi considerado o objetivo da aplicação do modelo, por este motivo buscou-se reduzir o viés das vazões médias, e buscou-se a melhor representação das curvas de frequência de vazões máximas e vazões mínimas, quando comparada com observações de postos fluviométricos.

A acurácia das simulações das vazões diárias, e médias ($Q_{média}$), máximas (Q_{10}) e mínimas (Q_{95}) anuais foram avaliadas através de comparação com observações de 1331 postos fluviométricos das redes de monitoramento das agências ANA, DGA-Chile, GRDC, IDEAM-Colômbia, INA-Argentina, ONS, ORE-HYBAM, SENAMHI-Bolívia e SENAMHI-Peru. Utilizou-se a tradicional métrica eficiência de Nash-Sutcliffe (ENS) e da métrica de eficiência Kling-Gupta (KGE; Gupta et al., 2009), que considera a correlação, o viés e o coeficiente de variação entre a série simulada e a observada.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (4.1)$$

onde r é a correlação linear entre simulação e observação, $\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}$ é o erro da variabilidade da vazão, dado pela razão entre desvios padrão e $\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}}$ é viés, dado pela razão entre as médias. A métrica possui um valor ótimo igual a 1.0.

Além de aplicar a equação completa, foram calculados *KGEs* específicos de cada parâmetro da fórmula (correlação, variabilidade e viés). Isso foi feito considerando dois parâmetros como ideais (iguais a 1.0), a fim de “isolar” o efeito do parâmetro restante. Essa análise foi feita para indicar qual parâmetro teria maior influência na curva de frequência do *KGE*.

Recalibração do modelo MGB-SA

Os parâmetros do modelo MGB-SA, forçado com dados do GMFD, foram recalibrados onde necessário, visando reduzir o viés das vazões médias, e melhor representar das curvas de frequência de vazões máximas e vazões mínimas, quando comparada com observações de postos fluviométricos. Foram avaliados resultados nos postos fluviométricos localizados nos principais rios da América do Sul para o período de 1980 a 2014.

Foi utilizada a rede de postos fluviométricos das seguintes instituições: ANA, DGA-Chile, GRDC, IDEAM-Colômbia, INA-Argentina, ONS, ORE-HYBAM, SENAMHI-Bolívia e SENAMHI-Peru. Os postos passaram por um filtro referente à disponibilidade de dados no período avaliado. A exigência imposta foi a de ter no mínimo dois anos ininterruptos de dados. Após esse processo, restaram 1331 postos fluviométricos para análise. Dentre esses locais, ainda foram selecionados 141 postos representativos das principais bacias do continente, para servir como referência principal na calibração. A Figura 4.3 apresenta um exemplo de avaliação dos hidrogramas durante a etapa de calibração.

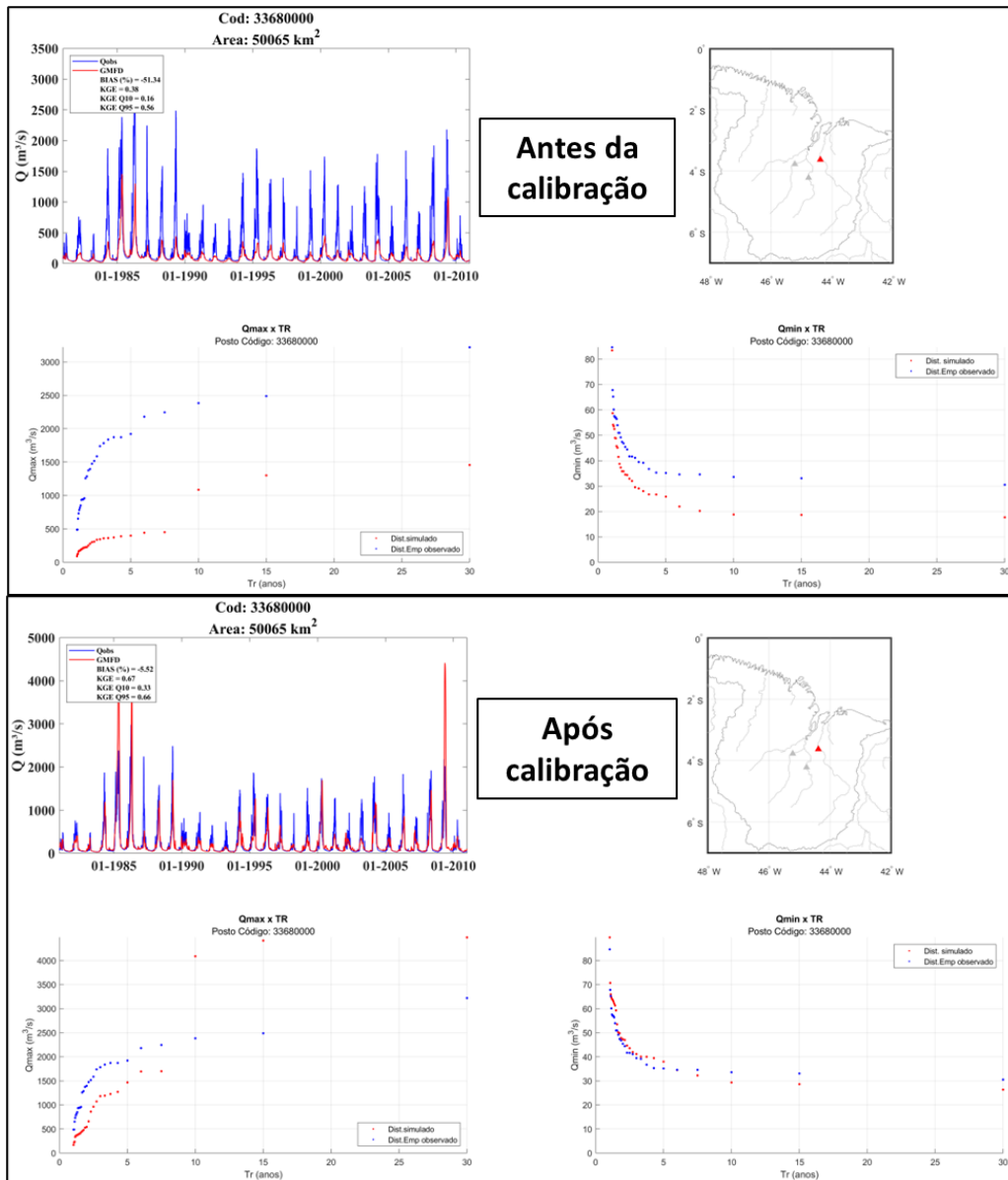


Figura 4.3. Figuras utilizadas na avaliação da calibração contendo (i) hidrograma diário com valores de métricas de desempenho, (ii) localização da estação avaliada e curvas empíricas de (iii) máximos e (iv) mínimos anuais.

Tendo terminado o processo de calibração, pôde-se ver que o modelo MGB-SA recalibrado possui melhor acurácia na representação das vazões diárias e máximas e mínimas anuais. Considerando as regiões de referência (141 postos representativos), o houve um aumento na métrica KGE para vazões diárias, melhorando principalmente o viés das estimativas, que passou a ter valores superiores a 0.6 em cerca de 80 % dos postos de referência.

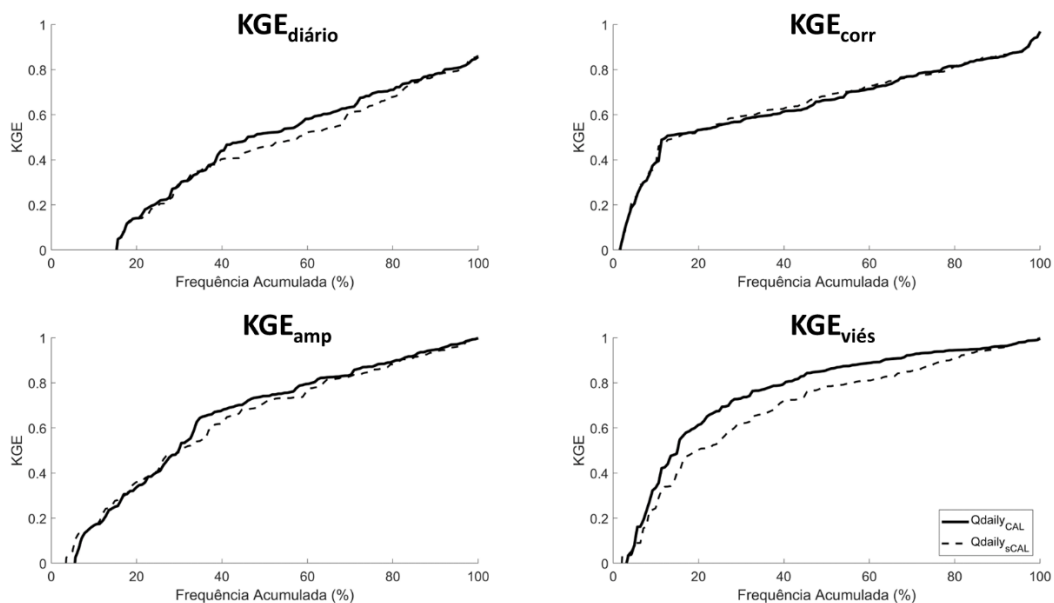


Figura 4.4. Curvas de frequência acumulada das métricas de avaliação de vazões diárias (KGE e componentes da correlação, amplitude e viés) do modelo MGB-SA forçado com GMFD recalibrado (linha contínua) e a priori (tracejado).

No caso das vazões máxima e mínima anuais em termos de Q_{10} e Q_{95} , a recalibração melhorou a métrica KGE, mostrando novamente aumento principalmente relacionado à redução de viés, mas também em melhor representação da amplitude de variação das cheias.

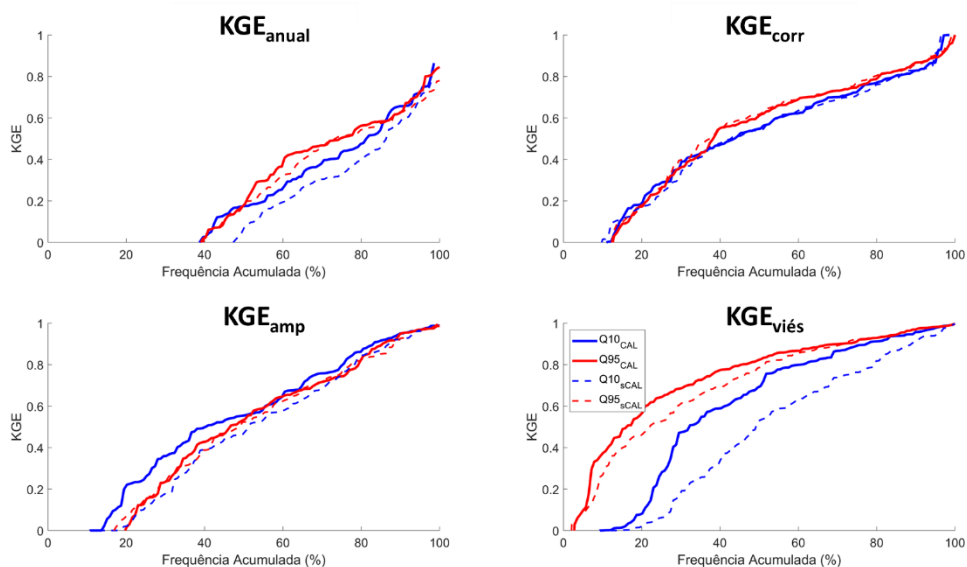


Figura 4.5. Curvas de frequência acumulada das métricas de avaliação de vazões máximas (azul) e mínimas (vermelho) anuais (KGE e componentes da correlação, amplitude e viés) do modelo MGB-SA forçado com GMFD recalibrado (linha contínua) e a priori (tracejado).

A Figura 4.6 apresenta uma avaliação da melhoria das métricas Nash-Sutcliffe (NSE), Nash-Sutcliffe Logaritmo (NSE_{log}) e KGEs anuais de Q_{10} e Q_{95} . A comparação mostrada na figura é em termos de diferença absoluta, com valores positivos (tons azulados)

indicando melhora e com valores negativos (tons avermelhados) indicando piora da métrica.

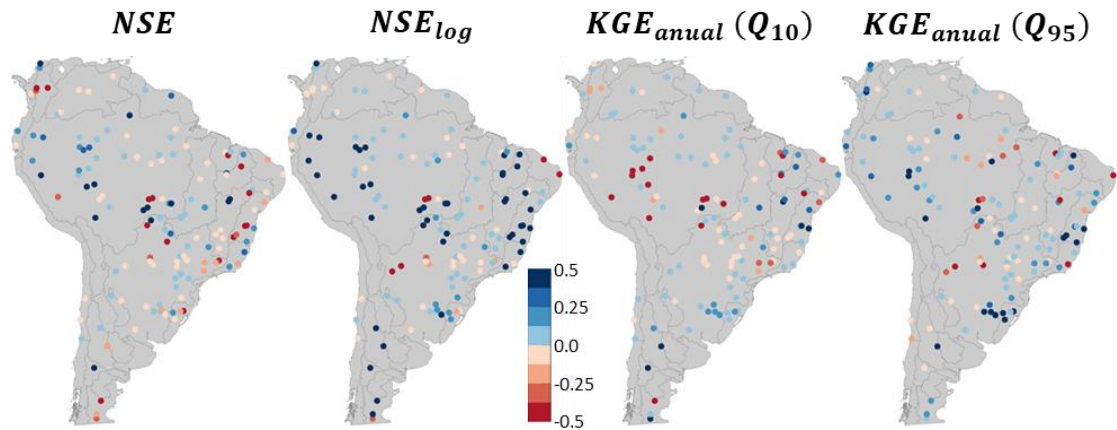


Figura 4.6 Diferença absoluta entre métricas (i) pós-calibração e (ii) pré-calibração nos postos de referência de calibração (141 postos). Cores azuladas indicando melhora, e cores avermelhadas indicando piora.

O mapa da Figura 4.6 mostra as estações fluviométricas selecionadas como principais referências no processo de calibração. Pode-se notar uma melhora nas métricas avaliadas, principalmente referentes a vazões baixas (NSE_{log} e KGE_{Q95}). Também é possível ver que algumas regiões apresentam uma concentração de postos com melhora em mais de uma métrica, como o sul do Brasil, parte do nordeste e a porção central da bacia Amazônica.

4.5 INCERTEZA

As projeções de vazões extremas de cheias e secas possuem incertezas relacionadas aos modelos climáticos, cenários e modelo hidrológico. A incerteza dos modelos climáticos foi considerada através da utilização de resultados de um ensemble de 28 GCMs.

A incerteza do modelo hidrológico está relacionada à sua estrutura e parâmetros. Além disso conforme analisado em relatório anterior, modelos hidrológicos podem apresentar uma sensibilidade reduzida em alterações de extremos de vazões devido a mudanças climáticas. Em consequência, as previsões de impactos de mudanças climáticas sobre cheias e secas podem ser subestimadas. Neste sentido, as incertezas do modelo hidrológico podem ser abordadas através de 2 estratégias. A primeira se refere a utilização de um ensemble de modelos hidrológicos, que pode ser construído com o próprio modelo MGB com diferentes parâmetros. A segunda se refere ao pós-processamento dos resultados de saída, buscando reproduzir a sensibilidade real do sistema hidrológico. Estas alternativas não chegaram a ser exploradas no contexto do projeto atual.

5. ANÁLISE DE IMPACTOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS COM MODELO MGB-SA

5.1 PROJEÇÕES DE IMPACTOS NAS VAZÕES MÉDIAS

O impacto de mudanças climáticas sobre as vazões médias dos rios da América do Sul foi avaliado através de simulações com o modelo hidrológico MGB-SA forçado com projeções de 28 GCMs da base NEX-GDP-CMIP6. Os períodos histórico e futuro são 1951-2014 e 2016-2100, respectivamente. Os anos 1950 e 2015 foram desconsiderados na análise, pois foram considerados anos de aquecimento do modelo hidrológico.

Como primeiro resultado, a Figura 5.1 apresenta os valores de vazão média mensal calculada pelo modelo MGB em nove rios da América do Sul. Os resultados estão apresentados para o período histórico de referência (1951 a 2014) com uma banda azul, e para o período futuro (2016 a 2100) com uma banda vermelha. A largura das bandas azul e vermelha representam a faixa de valores obtidos com os diferentes GCMs.

Observa-se, na Figura 5.1, que as vazões calculadas pelo MGB utilizando os dados de diferentes modelos climáticos durante o período histórico são bastante similares entre si, conforme era esperado, já que houve um processo de remoção de viés dos resultados dos GCMs que reduziu suas diferenças em termos médios. Isto pode ser observado pela pouca largura da faixa azul, que apresenta a banda de incerteza dos resultados do MGB com os diferentes modelos globais no período histórico. Por outro lado, as alterações projetadas para o futuro (banda vermelha) possuem incertezas consideráveis em termos de magnitude, embora haja concordância em relação ao sinal desta alteração na maioria dos casos.

Entre os nove rios apresentados na Figura 5.1, a bacia do Uruguai, localizada na região Sul do Brasil e incluindo parte da Argentina e do Uruguai, foi a única que apresentou um aumento expressivo de vazão na comparação entre os períodos. Os outros oito rios apresentaram decréscimos generalizados de vazão, com destaque para o rio Xingu, onde são projetadas as maiores reduções de vazão.

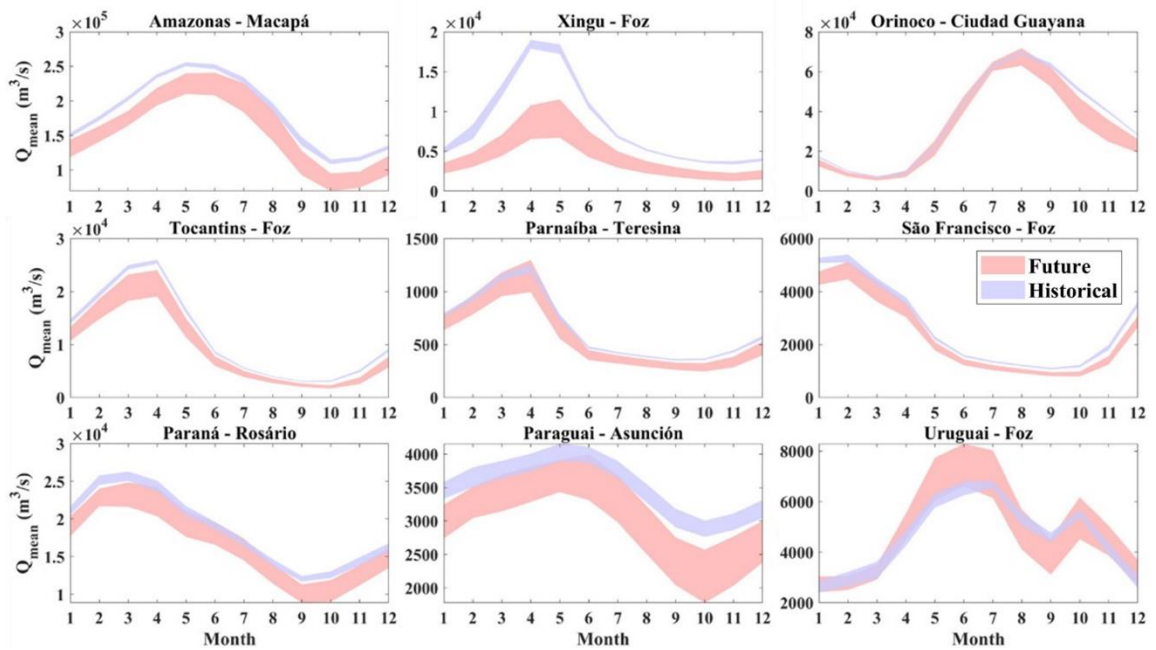


Figura 5.1. Médias mensais de vazão nos períodos de referência (azul) e futuro (vermelho). Resultados de simulação hidrológica a partir do conjunto de 28 GCMs.

Resultados semelhantes aos apresentados na Figura 5.1 foram obtidos para todos os rios da América do Sul, e podem ser observados na forma de mapas na Figura 5.2.

Na análise de alteração da Q_{med} anual (Figura 5.2a), observa-se projeções de redução das vazões médias em grande parte do continente, incluindo as bacias Amazônica, Paraná, Tocantins e parte do nordeste. Os impactos na vazão são mais intensos ao sul da bacia Amazônica, com valores de mais de 50 % de decréscimo nas bacias do Xingu, Juruá e Purus. A avaliação mostra que as projeções de redução da vazão média são robustas entre os 28 GCMs, com concordância de, no mínimo, 67% dos modelos para o sinal de alteração (Figura 5.2b). Projeções consistentes de aumento de vazão média dos rios foram encontradas apenas nas cabeceiras dos rios que formam o rio Amazonas, no extremo Oeste da Amazonia, e em algumas partes da região Sul do Brasil, Uruguai e Argentina.

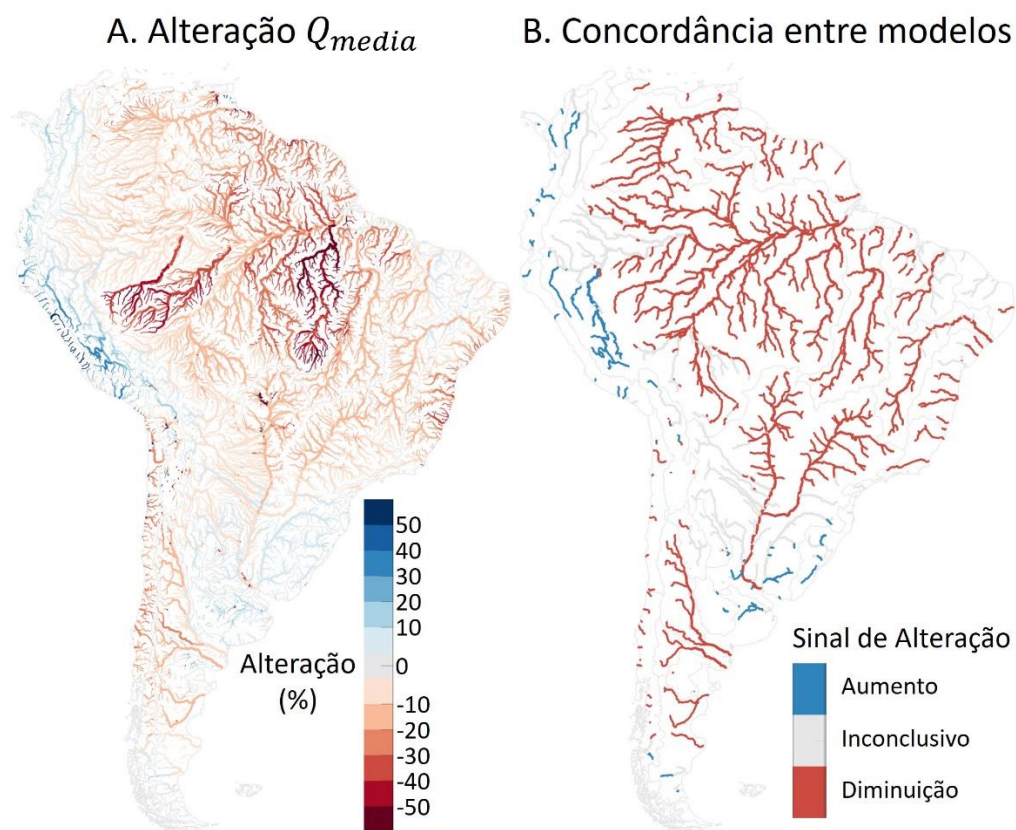


Figura 5.2. Mapas de (a) alteração média percentual entre períodos futuro (2016-2100) e de referência (1951-2014) e (b) concordância de alteração entre os modelos climáticos utilizados para Q_{med} anual sob o cenário SSP2-4.5. Resultados simulados pelo modelo MGB-SA a partir de 28 modelos climáticos, com limiar de concordância de 19 modelos (2/3).

Os padrões espaciais que podem ser identificados nos mapas da Figura 5.2 são similares aos documentados em Brêda et al. (2020), que utilizaram o mesmo modelo hidrológico para simulações de 25 GCMs do CMIP5. A mudança mais perceptível ocorreu na bacia Amazônica (Juruá, Purus e Xingu), que mostrou uma intensificação no sinal negativo de alteração. Comparando a concordância entre os GCMs utilizados por Brêda et al. (2020), houve um aumento da robustez das projeções em algumas regiões, como a bacia do rio São Francisco e a bacia do Prata, onde se projeta diminuição de vazão, e a região oeste da bacia Amazônica, onde se projeta aumento de vazão. Por outro lado, houve um aumento na incerteza das projeções em alguns locais (e.g., sul do Brasil e afluentes à direita do rio Paraguai).

6. MUDANÇA NAS VAZÕES MÁXIMAS

6.1 INTRODUÇÃO

As enchentes são classificadas como os desastres naturais mais comuns e destrutivos (Blöschl, 2022; Mishra et al., 2022; Tanoue et al., 2016). Segundo Winsemius (2016), entre 1980 e 2013, as perdas econômicas globais devido a enchentes ultrapassaram 1 trilhão de dólares, e mais de 220.000 pessoas perderam suas vidas. O crescimento populacional previsto (Gu et al., 2021), o aumento da temperatura global (Levine & Steele, 2021) e as práticas de uso do solo (Debortoli et al., 2017) aumentam a vulnerabilidade da população, com potencial de tornar as consequências das inundações mais graves nos próximos anos (Tanoue et al., 2016).

O sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) (Lee et al., 2023) apresenta evidências de mudanças climáticas induzidas pelo homem causadas por emissões de gases de efeito estufa, levando ao aquecimento atmosférico. Segundo a taxa de Clausius-Clapeyron, quando a temperatura aumenta (ou diminui) em 1 °C, a capacidade de retenção de água da atmosfera aumenta (ou diminui) em cerca de 7% (Held & Soden, 2006). Tais fenômenos podem causar modificações nos padrões de chuva, influenciar eventos hidrológicos em termos de frequência e intensidade (Alfieri et al., 2015), criando riscos compostos e em cascata que são mais complexos e difíceis de gerenciar (Lee et al., 2023), resultando em impactos socioeconômicos significativos (Winsemius et al., 2016).

Alguns estudos sugerem que as mudanças climáticas já estão impactando as vazões de cheia. Gudmundsson et al. (2021) analisaram dados de 1971 a 2010 e observaram uma tendência de diminuição das vazões de cheia em regiões como nordeste do Brasil, sul da Austrália, nas costas leste e oeste da América do Norte e no Mediterrâneo, enquanto regiões como o norte da Europa tendem a condições mais úmidas. Além disso, bacias menores mostraram tendências de aumento, enquanto as maiores mostraram tendências de diminuição (Gudmundsson et al., 2021). Do et al. (2017; 2020) encontraram padrões espaciais semelhantes e afirmaram que havia mais estações com tendências de diminuição significativas do que tendências de aumento significativas.

Em escala regional, estudos como os de Blöschl et al. (2019) e Chagas (2022) mostraram os mesmos padrões, mas também revelaram nuances que só são possíveis de observar em escala não global. Em outras palavras, o que Gudmundsson (2021) descreveu como padrões de mudança espaciotemporal complexos de tendências de vazão em escala global, revelou ser ainda mais complexo ao olhar para a escala regional.

Neste cenário, é importante entender a tendência futura do clima para minimizar possíveis impactos nas próximas décadas (Reyer et al., 2017). Projeções climáticas

servem como ferramentas importantes, oferecendo informações sobre possíveis condições climáticas futuras. Elas são tipicamente geradas usando simulações de Modelos Climáticos Globais (GCMs), considerando vários cenários socioeconômicos e níveis associados de emissões de GEE (Taylor et al., 2012). No entanto, a interpretação dessas projeções requer cautela, pois os modelos climáticos têm incertezas inerentes. Para aumentar a confiabilidade das projeções climáticas, foi estabelecido o Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP) (Eyring et al., 2016). Este projeto visa desenvolver e comparar continuamente um amplo conjunto de GCMs.

A América do Sul desempenha um papel crucial no equilíbrio hídrico global devido aos seus abundantes recursos hídricos. O continente abriga aproximadamente um terço dos recursos de água doce do mundo (Clark et al., 2015). Os impactos das mudanças climáticas representam uma ameaça significativa para os vários setores que dependem dos recursos hídricos na América do Sul: geração de hidroeletricidade, agricultura e indústria, e podem aumentar inundações e secas que já afetam significativamente a população local.

Recentemente, Brêda et al. (2023) publicaram um estudo sobre os impactos projetados das mudanças climáticas nas vazões de cheia, umidade do solo antecedente e precipitação na América do Sul e como os dois segundos estão relacionadas às mudanças projetadas nas vazões. Os resultados indicaram um aumento na precipitação de 2 anos no sudeste da América do Sul e no oeste da Amazônia e diminuir na América do Sul Central no século 21, com sinais de mudança para vazão de cheia espacialmente semelhantes à precipitação extrema. Enquanto apenas metade das bacias sul-americanas deve ter precipitações de 2 anos reduzidas, cerca de 70% dos rios apresentam uma tendência negativa para inundações de 2 anos, o que pode ser atribuído à diminuição da umidade do solo antecedente.

Neste estudo, avaliamos as mudanças nas vazões de cheia na América do Sul, com base no recentemente publicado CMIP6. Para isso, forçamos o modelo hidrodinâmico-hidrológico MGB-SA com 28 modelos GCMs do CMIP6. Os resultados foram avaliados em termos da vazão de 2, 10, 25 e 50 anos de tempo de retorno. Também avaliamos as chuvas máximas diárias anuais, tendo em vista que são as principais causadoras de inundações.

6.2 VISÃO GERAL DOS EXTREMOS HIDROLÓGICOS NA AMÉRICA DO SUL

A América do Sul (AS), abrangendo aproximadamente 17,8 milhões de quilômetros quadrados, é um vasto continente situado principalmente no Hemisfério Sul e ladeado tanto pelo Oceano Atlântico quanto pelo Pacífico. Cerca de 80% da área da AS possui clima tropical, com estações úmidas e secas. Esse padrão climático influencia a vazão dos rios e a ocorrência de inundações e secas sazonais (Reboita et al., 2012).

O continente é esculpido por três regiões montanhosas: a Cordilheira dos Andes, os planaltos residuais Norte-Amazônicos e os planaltos e montanhas do Atlântico-Leste-Sudeste. Aninhadas entre essas montanhas estão áreas de planície, que abrigam as três principais bacias hidrográficas do continente: Amazonas, Orinoco e La Plata.

A Figura 6.1 apresenta quatro mapas de caracterização dos eventos de cheia na América do Sul, respectivamente, (a) a mediana da chuva diária máxima anual; (b) a mediana da vazão diária máxima anual; (c) o coeficiente de variação das chuvas máximas anuais; e (d) o coeficiente de variação das vazões máximas anuais. Os dados de chuva apresentados são provenientes do banco de dados MSWEP, enquanto as vazões observadas são de diferentes instituições da América do Sul (ANA, IDEAM e ONS), e ambos os dados são apresentados em milímetros por dia.

A legenda de cores da Figura 6.1 mostra um gradiente das chuvas máximas diárias, que vai de 0 a 100 milímetros (mm) por dia, enquanto as vazões máximas diárias variam entre 0 e 20 mm por dia. As cores no mapa correspondem a esses valores, com áreas de baixa mediana em roxo e as de alta mediana em vermelho. Os maiores volumes estão concentrados na parte Norte da América do Sul, na região Sul do Brasil, e na costa Oeste da América do Sul.

Nos mapas de coeficiente de variação apresentados na Figura 6.1, a legenda de cores corresponde a valores entre 0.0 (azul) e 0.5 (vermelho). Observa-se que a variabilidade das chuvas máximas diárias é mais alta ao longo da Cordilheira dos Andes e na região Nordeste do Brasil. Já a maior variabilidade das vazões máximas diárias ocorre nas regiões Sul e Sudeste brasileiras, além da região ao longo da Cordilheira dos Andes.

De acordo com Chagas et al (2022), os picos de cheia estão intimamente relacionados com a época dos picos de umidade do solo, ocorrendo tipicamente em conjunto com os níveis mais altos de umidade do solo anual e seguindo os picos anuais de chuva com um atraso de três semanas. Em regiões como a Amazônia e o centro do Brasil, onde a capacidade de armazenamento do solo é elevado, a sazonalidade das inundações está principalmente ligada aos picos de umidade do solo. Por outro lado, no sul e sudeste do Brasil, onde a capacidade de armazenamento do solo é menor, a cronologia das inundações mostra uma forte correlação tanto com os picos de chuva quanto com os de umidade do solo, indicando uma resposta mais direta e imediata aos eventos de precipitação.

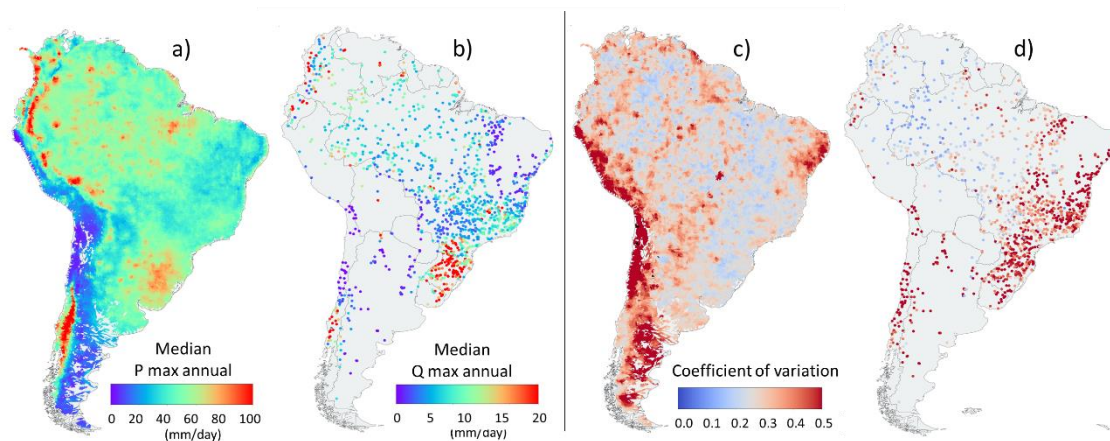


Figura 6.1. a) Mediana da chuva diária máxima anual (MSWEP); b) Mediana da vazão diária máxima anual (ANA, IDEAM e ONS); c) Coeficiente de variação da chuva em a); d) Coeficiente de variação da vazão em b).

6.3 METODOLOGIA - VAZÕES MÁXIMAS

Os efeitos das mudanças climáticas nas vazões de cheia foram avaliados na América do Sul através de simulações hidrológicas com o modelo MGB-SA (Siqueira et al., 2018). Forçamos o MGB com um conjunto de 28 projeções de modelos climáticos globais (GCMs) e regionais (RCMs) do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados Fase 6 (NEX-GDDP-CMIP6) (Thrasher et al., 2022). Usamos dados diários de umidade relativa, precipitação, temperatura, velocidade do vento e radiação de onda curta incidente, de dois períodos principais, 1950 a 2014, chamado aqui de período histórico, e 2015 a 2099, o período futuro. Após a execução da simulação hidrológica o período futuro foi dividido em dois períodos, e um ano foi removido do início de cada um dos períodos, para aquecimento do modelo, resultando nos períodos futuro próximo (2016 a 2065) e futuro distante (2051 a 2100).

A seguir selecionamos os valores máximos de vazão de cada ano das simulações históricas, futuro próximo e futuro distante, para cada trecho de rio representado no modelo MGB-SA. Com estas séries de vazões máximas ajustamos a distribuição de Gumbel para obter os valores correspondentes aos tempos de retorno (TR) de 2, 10, 25 e 50 anos. A comparação final foi realizada em termos de alteração de magnitude para um mesmo tempo de retorno, e em termos de frequência para um mesmo valor de vazão máxima.

Além disso, também avaliamos a modificação das chuvas máximas, tendo em vista que são as principais causadoras de inundações.

6.3.1. Projeções climáticas

O período futuro considera diferentes cenários socioeconômicos, e o avaliado nesse trabalho foi o SSP2-4.5, que corresponde a um cenário de impacto intermediário entre os disponíveis no CMIP6. Ele considera emissões estáveis de CO₂ até meados de 2050 e subsequente diminuição até 2100, e refere-se ao aumento do balanço radiativo atmosférico devido à concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE), em W/m². Esse cenário pressupõe um aumento na temperatura global média de 2.7°C para o período de 2081-2100.

6.3.2. Modelo Hidrológico Continental

O MGB-SA (Siqueira et al. 2018) é uma versão continental e hidrodinâmica do modelo hidrológico conceitual semi-distribuído MGB (Pontes et al. 2015). No MGB, informações sobre uso da terra e tipo de solo são usadas para calcular a disponibilidade hídrica e o balanço energético em um passo de tempo diário, contidos em unidades de resposta hidrológica (HRUs). A propagação da água superficial, subsuperficial e das águas subterrâneas até o canal principal é calculada com reservatórios lineares para representar a atenuação da bacia. A rotina de propagação de vazão, a elevação da superfície da água e a área inundada são simulados usando um modelo hidrodinâmico inercial local unidimensional.

O MGB-SA foi calibrado manualmente com centenas de observações in situ de vazão. As regiões de menor confiança nos resultados do MGB-SA são as localizadas no nordeste do Brasil e no sudoeste do continente (regiões semiáridas da Argentina, Chile e Paraguai). Essas regiões correspondem às áreas com pouquíssimas estações de medição, com KGE entre 0.6 e 0.4 (14.57%), 0.4 e 0.2 (7%), e < 0.2 (7%).

Quanto ao uso do modelo MGB-SA, devido ao desempenho superior do MGB-SA em comparação com outros modelos disponíveis em escala continental/global, o modelo foi recentemente aplicado para previsão e estudo de inundações na América do Sul. Exemplos incluem Siqueira et al. (2020), que avaliaram o potencial de previsões de fluxo de médio alcance para predição de inundações na América do Sul; Siqueira et al. (2021), que forneceram uma avaliação abrangente sobre o uso de pós-processamento estatístico em previsões de vazão por conjunto e por Breda (2023), que utilizou o modelo para avaliar as projeções climáticas do CMIP5 em termos hidrológicos.

6.3.3. Avaliação da mudança da magnitude de chuvas e vazões extremas

Realizamos a mesma análise para as chuvas máximas anuais diárias e as vazões máximas anuais diárias. Selecionamos as máximas de cada ano das simulações histórica, futuro próximo e futuro distante, para cada trecho de rio no MGB-SA, excluindo os dois primeiros anos de simulação dos períodos histórico e futuro para o aquecimento do modelo.

Com estas séries de vazões máximas ajustamos a distribuição de Gumbel para obter os valores correspondentes aos tempos de retorno (TR) de 2, 10, 25 e 50 anos.

Para avaliar a modificação da magnitude, comparamos o valor das vazões de mesmo TR no período futuro e no período histórico.

6.3.4. Avaliação da mudança de frequência de chuvas e vazões extremas

Realizamos a mesma análise para as chuvas máximas anuais diárias e as vazões máximas anuais diárias. Selecionamos as máximas de cada ano das simulações históricas, futuro próximo e futuro distante, para cada trecho de rio no MGB-SA, excluindo os dois primeiros anos de simulação dos períodos histórico e futuro para o aquecimento do modelo. Para os períodos de retorno de 2, 10, 25 e 50 anos, calculamos o valor de referência do período histórico, ajustando os dados à distribuição de Gumbel.

Para avaliar a mudança de frequência da vazão máxima de 50 anos calculamos o tempo de retorno futuro do valor correspondente ao TR 50 anos no período histórico, também considerando a distribuição de Gumbel, conforme ilustrado na Figura 6.2.

Desta forma, foi encontrado qual será, no futuro, o TR de uma vazão máxima que atualmente tem TR igual a 50 anos. Este procedimento foi repetido para as vazões máximas de TR igual a 2, 10, 25 e 50 anos, e para as chuvas máximas.

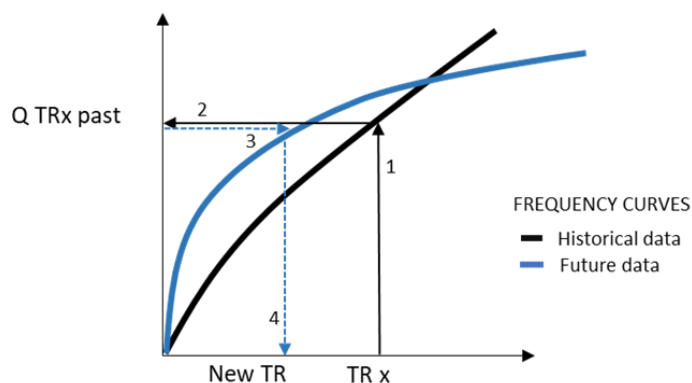


Figura 6.2. Esquema da obtenção de novos períodos de retorno para as chuvas e vazões de referência.

Se o período de retorno de uma vazão (chuva) de referência for menor para o período futuro, isso significa que a frequência dessa vazão (chuva) de referência está projetada para aumentar. Repetimos esse procedimento para os 28 modelos climáticos. Consideramos que os modelos concordam em uma tendência de diminuição (aumento) da vazão de cheia se pelo menos dois terços dos modelos apresentarem o mesmo padrão (~66%), o que foi arredondado para 19 modelos.

6.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.4.1. Precipitação

A seguir são apresentados os resultados da análise das chuvas máximas diárias do período histórico e futuro. Os resultados de TR 10 e 25 foram omitidos por apresentarem comportamentos de transição entre os resultados de TR 2 e 50 anos.

A Esse aumento é mais expressivo no período do futuro distante (rosa escuro).

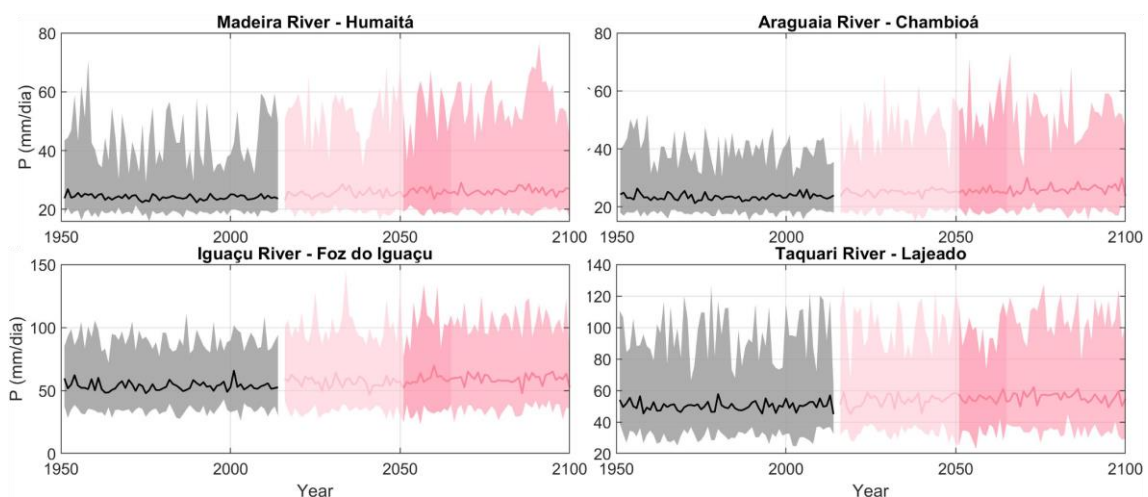


Figura 6.3 mostra quatro gráficos de séries temporais de chuva máxima anual para diferentes rios no Brasil: Madeira River - Humaitá, Araguaia River - Chambioá, Iguaçu River - Foz do Iguaçu, e Taquari River - Lajeado. Em cada gráfico, dois períodos são diferenciados por cores: o período histórico é representado em cinza e o período considerado futuro em dois tons de rosa, representando o futuro próximo (rosa claro) e o futuros distante (rosa escuro). As linhas que percorrem os períodos indicam a mediana dos valores.

Observa-se que para todos os rios, durante o período histórico (cinza), a precipitação máxima anual mostra variações, com alguns picos e vales, mas geralmente mantendo-se dentro de uma faixa. Não há uma tendência clara de aumento ou diminuição ao longo deste período.

No período futuro, há uma tendência visível de aumento na amplitude das precipitações máximas anuais, sugerindo um aumento na variabilidade e na ocorrência de eventos extremos de precipitação. Esse aumento é mais expressivo no período do futuro distante (rosa escuro).

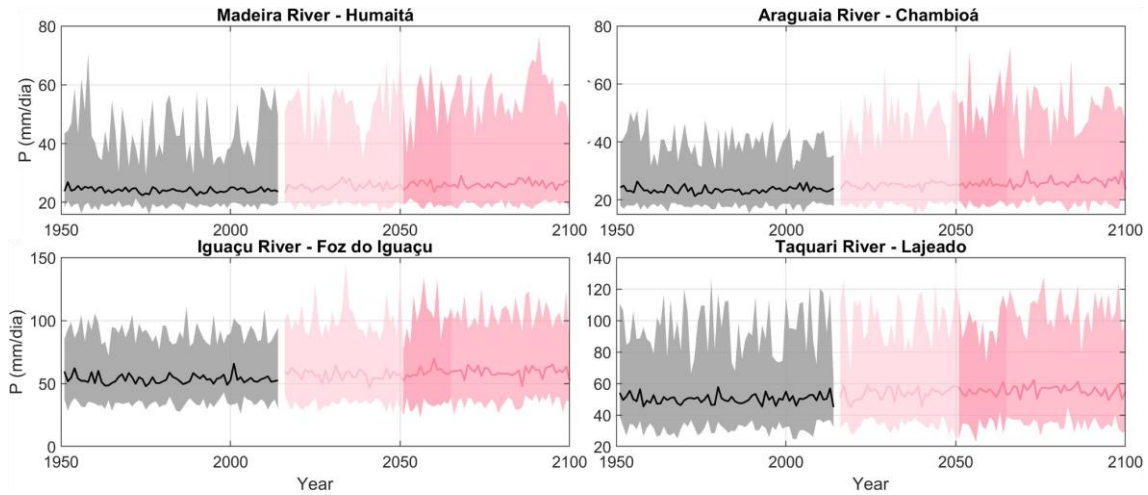


Figura 6.3. Séries temporais de chuvas máximas diárias anuais para quatro importantes rios do Brasil. Em cinza o período histórico e em rosa o futuro, sendo o rosa mais claro o futuro próximo, e o rosa mais escuro futuro distante. A chuva é referente à precipitação na minibância do modelo MGB do local.

A Figura 6.4 apresenta as alterações percentuais de magnitude previstas para o futuro próximo e futuro distante nas chuvas máximas anuais na América do Sul, para os TRs 2 e 50 anos. As regiões com cor mostram que os modelos tiveram concordância de 66%, e onde não houve concordância, a cor apresentada é cinza claro. A cor azul nos mapas indica um aumento na magnitude das chuvas máximas. É notável que há uma concentração de aumentos mais significativos no extremo norte e, em menor grau, no extremo sul do continente. Diminuição na magnitude das chuvas máximas é observada apenas na região dos Andes e entorno, representado pela cor vermelha.

Comparando o futuro próximo com o futuro distante, percebe-se uma expansão das áreas em azul escuro, sugerindo um aumento ainda maior na magnitude das chuvas máximas anuais (>30%), especialmente para eventos de TR 50. Esta tendência é mais evidente na região central da América do Sul, onde se destaca a intensificação dos eventos de chuva máxima. Ambos os períodos futuros indicam que as chuvas extremas, especialmente aquelas com baixa frequência (TR 50), podem se tornar mais intensas em comparação com o registro histórico, apontando para um potencial aumento no risco de eventos extremos de precipitação.

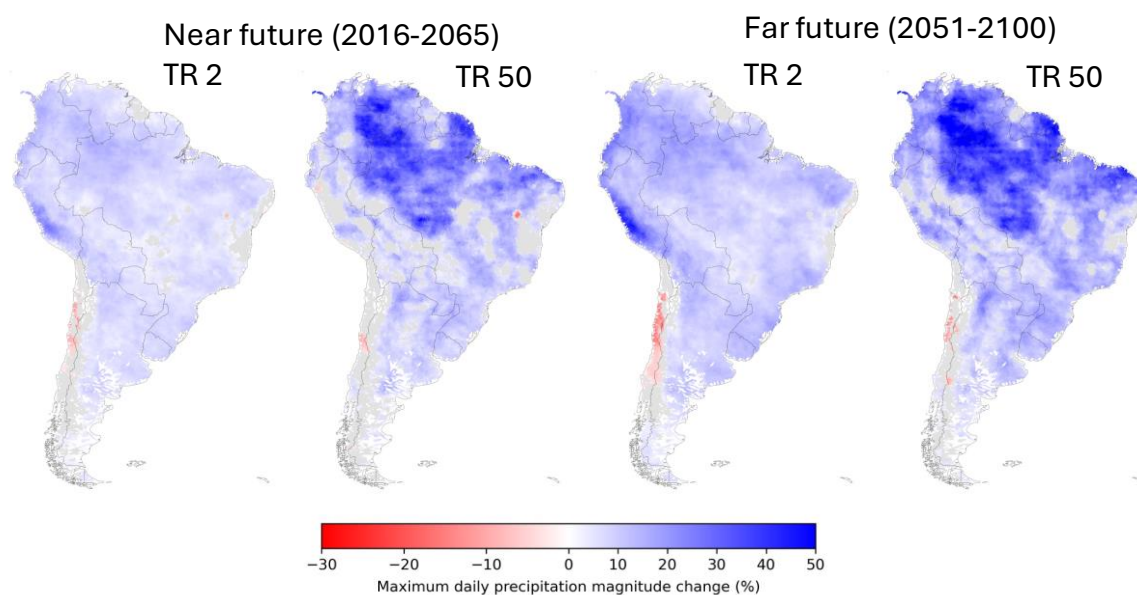


Figura 6.4. Alteração percentual da magnitude das chuvas diárias máximas anuais dos períodos futuro próximo e futuro distante em relação ao histórico, para os tempos de retorno 2 e 50 anos. Em cinza, áreas onde não houve concordância entre os modelos.

6.4.2. Vazões

A Figura 6.5 apresenta as séries temporais de vazão máximas anuais, sendo em cinza o período histórico, em azul claro o futuro próximo e em azul escuro o futuro distante. A vazão é apresentada em milímetros. No período histórico, que abrange de 1951 até o início dos anos 2014, a vazão máxima anual mostra flutuações com algumas elevações e depressões ao longo do tempo, porém sem uma tendência clara de longo prazo. Esta variação é representada pela sombra cinza, com a linha central indicando a média ou uma tendência central da vazão durante este período.

Nas projeções, observa-se um notável aumento na vazão máxima anual, como indicado pela expansão da sombra azul. Este aumento é acompanhado por picos mais altos e uma elevação na linha de tendência central, sugerindo que os rios terão eventos de vazão máxima mais intensos no futuro.

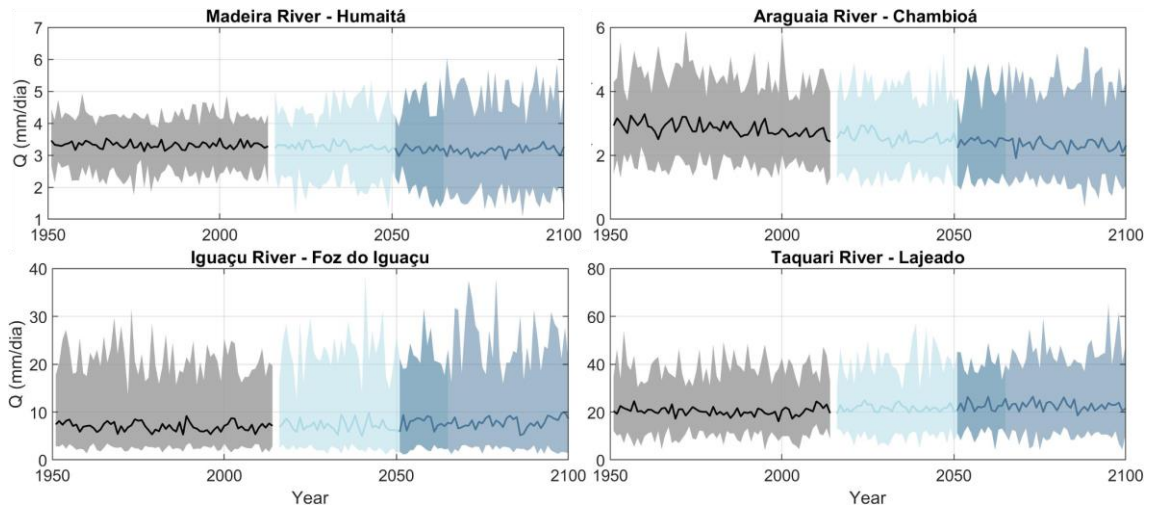


Figura 6.5. Séries temporais de vazões máximas diárias anuais para quatro importantes rios do Brasil. Em cinza o período histórico e em azul o futuro.

A Figura 6.6 apresenta as curvas de frequência de cheias em termos de período de retorno para as simulações históricas e futuras e para quatro importantes localizações de rios na América do Sul, todas localizadas no Brasil.

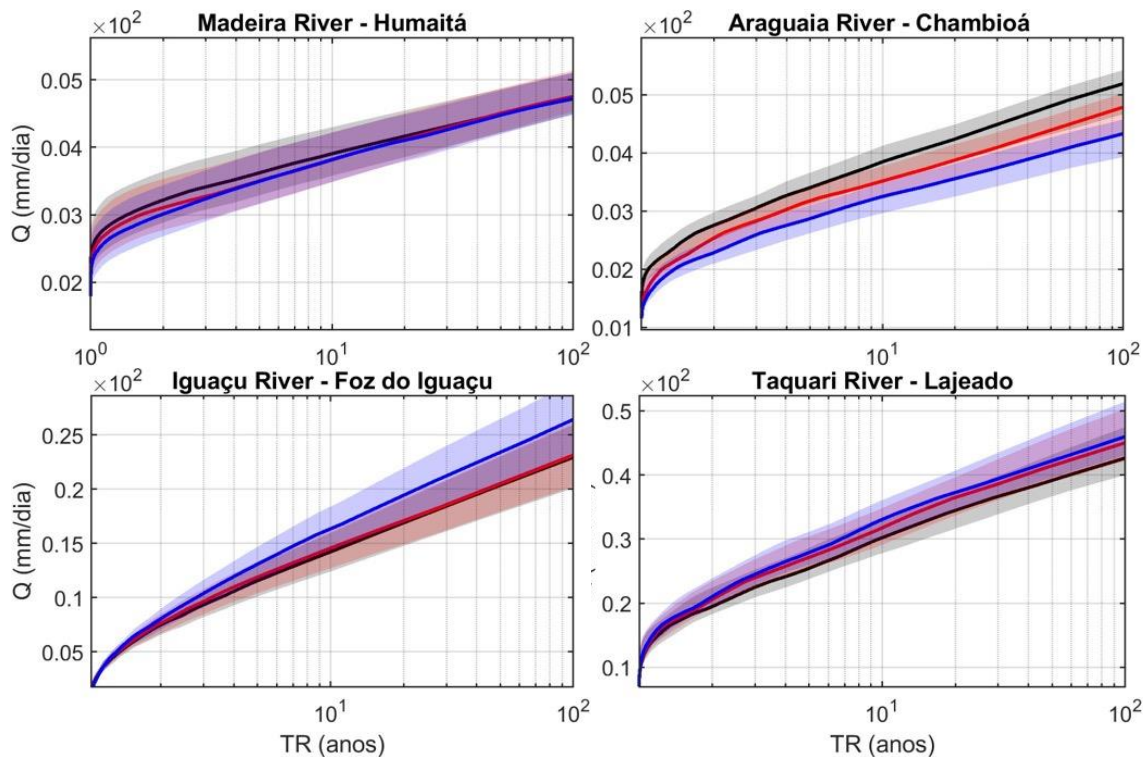


Figura 6.6. Curvas de frequência de cheias em termos de tempo de retorno para as simulações históricas e futuras e para quatro importantes rios na América do Sul. As linhas na cor preta a mediana do conjunto do período histórico, a vermelha o período futuro próximo e a azul o futuro distante. O sombreado representa os percentis 75% e 25% dos membros do conjunto

A Figura 6.7 apresenta o fator de alteração (ou *Change Factor* – CF) da frequência das vazões máximas anuais. Esse fator é um multiplicador ou divisor, dependendo da alteração do novo TR (NEW TR) em relação ao TR referência (TR ref).

Se o novo TR para um determinado valor de referência for maior, CF é calculado como

$$CF = -\left(\frac{NEW\ TR}{TR\ ref}\right)$$

Se o novo TR for menor que o TR referência, o CF é

$$CF = \frac{TR\ ref}{NEW\ TR}$$

O CF acompanha um sinal negativo quando o novo TR for maior que o TR de referência, indicando diminuição da frequência de ocorrência de tal evento. Se o CF for positivo, a vazão de referência é projetada para ser mais frequente. O valor numérico indica a proporção (multiplicativa ou divisível) de alteração, de acordo com as equações de CF apresentadas.

Observamos na Figura 6.7 uma forte diminuição na frequência de vazão de cheia no Rio Amazonas e na maioria de seus afluentes, no Rio São Francisco e no Rio Paraná. Ainda em relação aos períodos de retorno mais baixos, observamos que o alto Amazonas apresenta uma tendência de aumento na frequência. Esta parte da Bacia Amazônica está localizada nos Andes, uma região com influência de neve e precipitações orográficas, muito diferentes da dinâmica de precipitação nas áreas alagadas da Amazônia.

Nos períodos de retorno maiores, de 25 e 50 anos, vemos um forte sinal de aumento na frequência de vazão de cheia nas regiões brasileiras Sul e Nordeste.

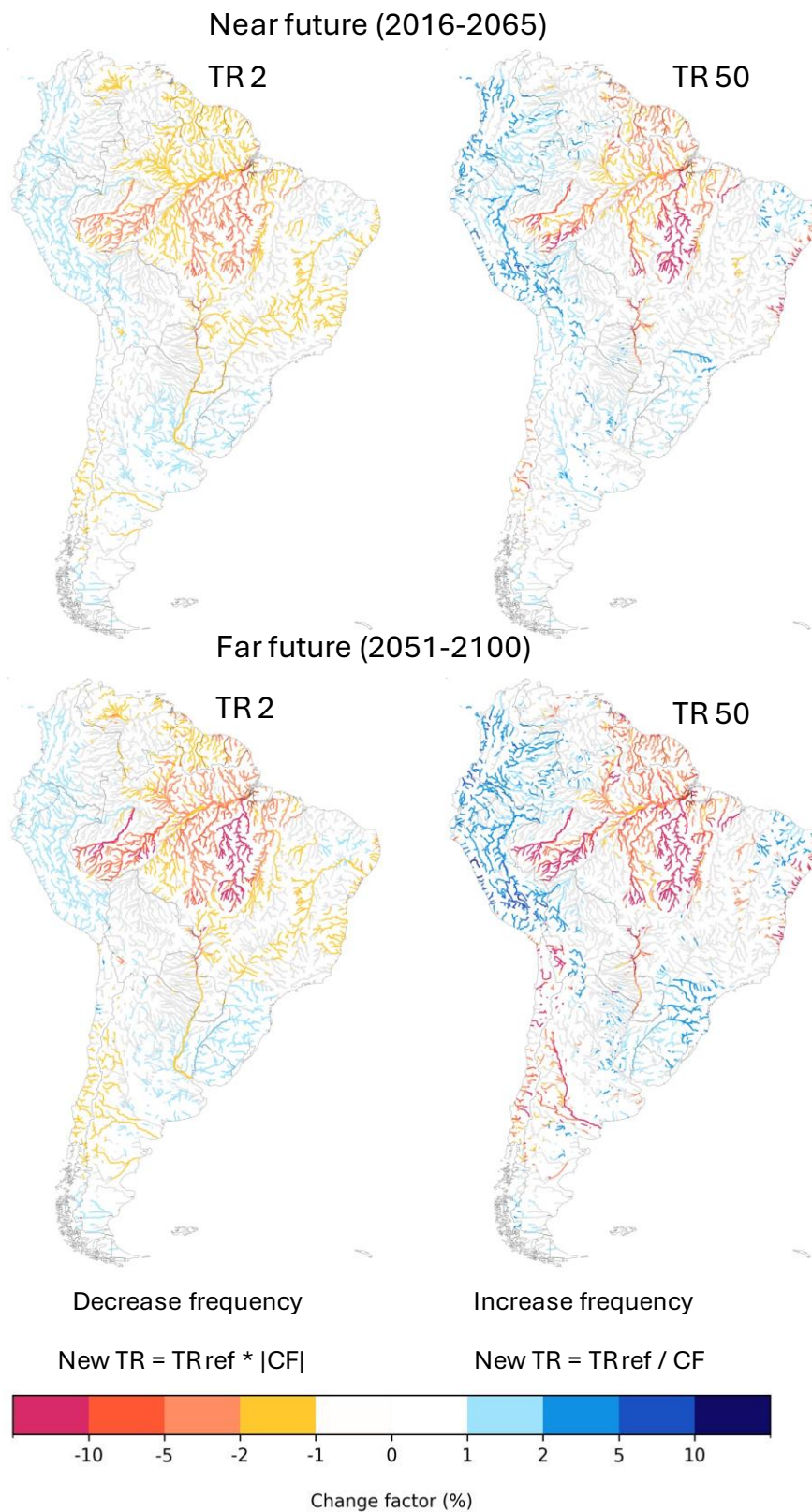


Figura 6.7. Fator de mudança no tempo de retorno das vazões máximas anuais (CF positivo corresponde a aumento de frequência e CF negativo corresponde à diminuição de frequência, por exemplo, um trecho de rio com CF=3 significa que a frequência vai aumentar três vezes, enquanto um trecho de rio com CF=-2 significa que a frequência vai diminuir 2 vezes). Em cinza, trechos onde não houve concordância entre os modelos.

A Figura 6.8 apresenta dois pares de mapas da América do Sul que representam as alterações percentuais na magnitude das vazões máximas anuais para dois períodos de retorno (2 e 50 anos) e o futuro próximo e futuro distante.

No primeiro par de mapas (futuro próximo), o TR 2 anos mostra uma mescla de aumentos e diminuições na magnitude das vazões, com áreas de diminuição significativa (representadas em laranja e vermelho) concentradas principalmente nas regiões centrais e algumas áreas costeiras. O mapa TR 50 anos mostra uma tendência semelhante, mas com uma presença mais notável de aumentos na magnitude de extremos (em azul e roxo), principalmente nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, na América Andina e cabeceira Amazônica.

O segundo par de mapas (futuro distante) apresenta um padrão de mudança mais intensificado, com uma ampliação das áreas em vermelho e roxo, especialmente nas bacias hidrográficas centrais, indicando maior concordância dos modelos.

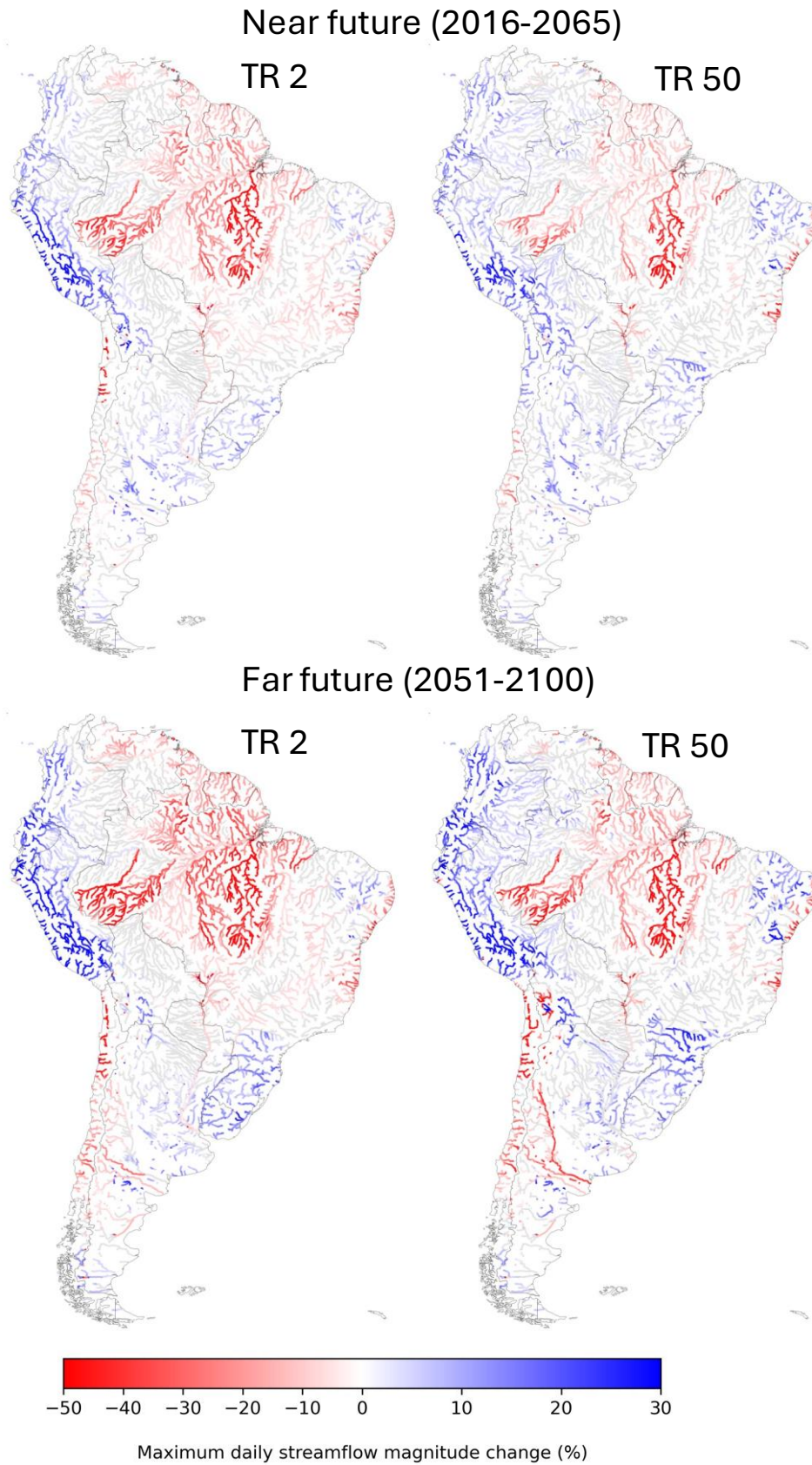


Figura 6.8. Alteração percentual da magnitude das vazões máximas anuais dos períodos futuro próximo e futuro distante em relação ao histórico. Em cinza, trechos onde não houve concordância entre os modelos.

Esses resultados estão de acordo com os de Do et al. (2020), que investigaram as tendências de vazão máxima a partir de modelos hidrológicos globais. Eles descobriram que partes do Sul e Sudeste do Brasil têm evidências de aumento nas vazões máximas, e outras regiões com evidências de redução nas vazões máximas, incluindo o Nordeste e Centro-Oeste e partes do Sudeste do Brasil.

Para Brêda et al (2023), que observaram resultados semelhantes, tais tendências podem ser atribuídas à redução da umidade do solo antecedente, que se espera ser reduzida na maior parte do continente, exceto no Sudeste da América do Sul.

O aumento na frequência de vazão de cheia é naturalmente visto como uma consequência negativa, no entanto, a diminuição na frequência não é necessariamente positiva. A saúde da biodiversidade de regiões alagadas, por exemplo, na Amazônia, no Pantanal e na Ilha do Bananal, também depende de cheias que trazem nutrientes para a área.

6.5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma avaliação dos padrões de mudança futura da magnitude e frequência de chuva e vazão de cheias na América do Sul, baseada nos recentemente publicados CMIP6 e no modelo hidrológico-hidrodinâmico MGB-SA.

Observamos que a frequência de vazão de cheia provavelmente (concordância de 71% dos modelos) aumentará no Sul e Nordeste do Brasil, com sinal mais forte nos períodos de retorno mais longos, e diminuirá na Amazônia, no Centro e no Sudeste do Brasil, principalmente no período de retorno curto (2 anos). Essas alterações projetadas não acompanham o que se espera das alterações das chuvas máximas, que é de aumento generalizado. Isso pode ser explicado por outras alterações no ciclo hidrológico causado pelas mudanças climáticas, como o aumento da capacidade de armazenamento de água no solo.

Esses resultados sugerem que as mudanças climáticas podem influenciar significativamente o regime hidrológico dos rios da América do Sul, com implicações importantes para a gestão de recursos hídricos, planejamento de infraestrutura, e adaptação a eventos extremos como inundações e secas.

7. MUDANÇA NAS ÁREAS INUNDADAS

7.1 INTRODUÇÃO

Cheias são uma das maiores causas de desastres naturais e tem intensificado seus danos socioeconômicos nas últimas décadas (EM-DAT, 2023), ao mesmo tempo em que são de extrema importância para a manutenção de serviços ecossistêmicos nos rios e planícies de inundação (Junk et al., 1989; Poff et al., 1997). A dinâmica das cheias na América do Sul está sujeita a alterações devido às Mudanças Climáticas. Estudos recentes em escala global utilizando modelagem hidrológica com projeções de modelos climáticos apresentam resultados indicando um aumento na frequência das cheias na América do Sul (Hirabayashi et al., 2013, 2021; He et al., 2022). Essas alterações devem ser melhor analisadas na escala do continente sul-americano, considerando projeções mais recentes e suas incertezas. Essa análise pode contribuir com a futura gestão de recursos hídricos em escala continental, envolvendo o planejamento adequado de políticas públicas, implementação de infraestrutura e gerenciamento de desastres das próximas décadas.

Neste capítulo as cheias são analisadas a partir da extensão de áreas inundadas calculadas utilizando o Modelo de Grandes Bacias (Collischonn et al., 2007) aplicado em escala continental na América do Sul (MGB-SA) (Siqueira et al., 2018) com dados de entrada de Modelos Climáticos Globais (GCMs) contendo séries históricas e projeções do clima futuro. Os resultados são analisados em termos de diferenças absolutas e relativas entre as simulações hidrológicas com o clima histórico e futuro. São apresentados mapas e séries temporais que demonstram as alterações na extensão das áreas inundáveis em diferentes regiões de interesse no continente, incluindo uma análise da concordância entre as simulações em relação às alterações projetadas.

7.2 METODOLOGIA - ÁREAS INUNDADAS

Para a análise das áreas inundáveis foi utilizado o MGB-SA (Siqueira et al., 2018), um modelo hidrológico-hidrodinâmico de base física semi-distribuído, discretizado em unidades de cálculo menores denominadas minibacias, com comprimento de trecho de rio de aproximadamente 15 km cada. Para cada minibacia foram calculadas diversas componentes do ciclo hidrológico como vazão, evapotranspiração, infiltração, áreas inundadas, entre outros. O MGB-SA é um modelo focado em aplicações de larga escala e tem sido aplicado em diversos estudos de projeções de impactos de mudanças climáticas (e.g. Brêda et al., 2020, 2023; Sorribas et al., 2016), portanto adequado para os objetivos do presente estudo. Para fins de compatibilização das simulações do MGB-SA com os resultados dos GCMs utilizados nesse estudo, foi utilizada uma versão do modelo recalibrada para a base de dados *Global Meteorological Forcing Dataset for*

Land Surface Modeling (GMFD) (Sheffield et al., 2006), base utilizada na remoção de viés dos GCMs.

Os dados de entrada do MGB-SA foram obtidos do projeto *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) (Thrasher et al., 2022), que agrega dados de 35 modelos climáticos globais com projeções de mudanças climáticas considerando 4 cenários diferentes de emissões. Os dados já possuem remoção de viés pelo método Quartil-Quartil e *downscaling* espacial. Nesse estudo foram utilizados 28 dos GCMs disponibilizados para apenas o cenário de emissões SSP2-4.5 do CMIP6 (Arias et al., 2021), que corresponde a um cenário intermediário. Os dados estão disponíveis para o período histórico (1950 a 2014) e para o período futuro (2015 a 2100).

Os dados analisados neste estudo são os resultados de extensão de área inundada nas minibacias obtidos a partir das simulações do MGB-SA usando como entrada 28 GCMs da base NEX-GDDP-CMIP6. Foram analisadas as mudanças relativas e absolutas nas áreas inundáveis da América do Sul considerando os períodos passado e futuro. O período futuro foi subdividido em dois períodos, o Futuro Próximo (2016 a 2065) e o Futuro Distante (2051 a 2100).

Para a análise da concordância nos sinais de variação entre as simulações, foi considerado que existe concordância quando pelo menos cerca de 70% (ou 20 simulações) deles apresentam o mesmo sinal de variação (aumento ou redução). Caso essa proporção não seja atingida em nenhum dos sinais, considera-se que há discordância entre as simulações.

Selecionamos as vazões máximas de cheia de cada ano das simulações históricas e futuras para cada trecho de rio do MGB-AS, excluindo os dois primeiros anos de ambos os períodos de simulação para o aquecimento do modelo.

Para a avaliação das mudanças na magnitude das áreas inundadas foram calculadas as diferenças relativas entre os períodos analisados, a das médias das séries de máximas anuais de cada simulação. Foram calculadas as diferenças relativas de cada simulação e computadas as diferenças médias em cada minibacia, tanto para o futuro próximo quanto para o futuro distante. Além disso, foram avaliadas as mudanças nas magnitudes em relação aos Tempos de Retorno (TR) de 5, 25 e 50 anos. Para isso as séries de máximas anuais do período histórico e dos períodos futuros foram ajustadas a distribuição *Generalized Extreme Value* (GEV) e calculadas as diferenças relativas entre os períodos analisados para cada TR.

Além das mudanças nas magnitudes, também foram avaliadas mudanças na sazonalidade. Foram calculadas as médias mensais de cada minibacia para o período histórico e períodos futuros, em seguida calculado o deslocamento do mês em que ocorre o pico de inundação para cada período e calculada a diferença, em meses.

7.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Caracterização do Período Histórico

Na Figura 7.1 é apresentada a média e o coeficiente de variação da série anual de áreas inundáveis no período histórico considerando todos os 28 GCMs utilizados neste estudo. Fica evidente os padrões de ocorrência de inundações e sua variabilidade. Regiões como do rio Amazonas apresentam em média uma grande área inundada e uma baixa variabilidade interanual, enquanto em regiões como a bacia do rio Tocantins-Araguaia, rio Paraguai e região Sul do Brasil observa-se menor extensão de área inundada e maior variabilidade.

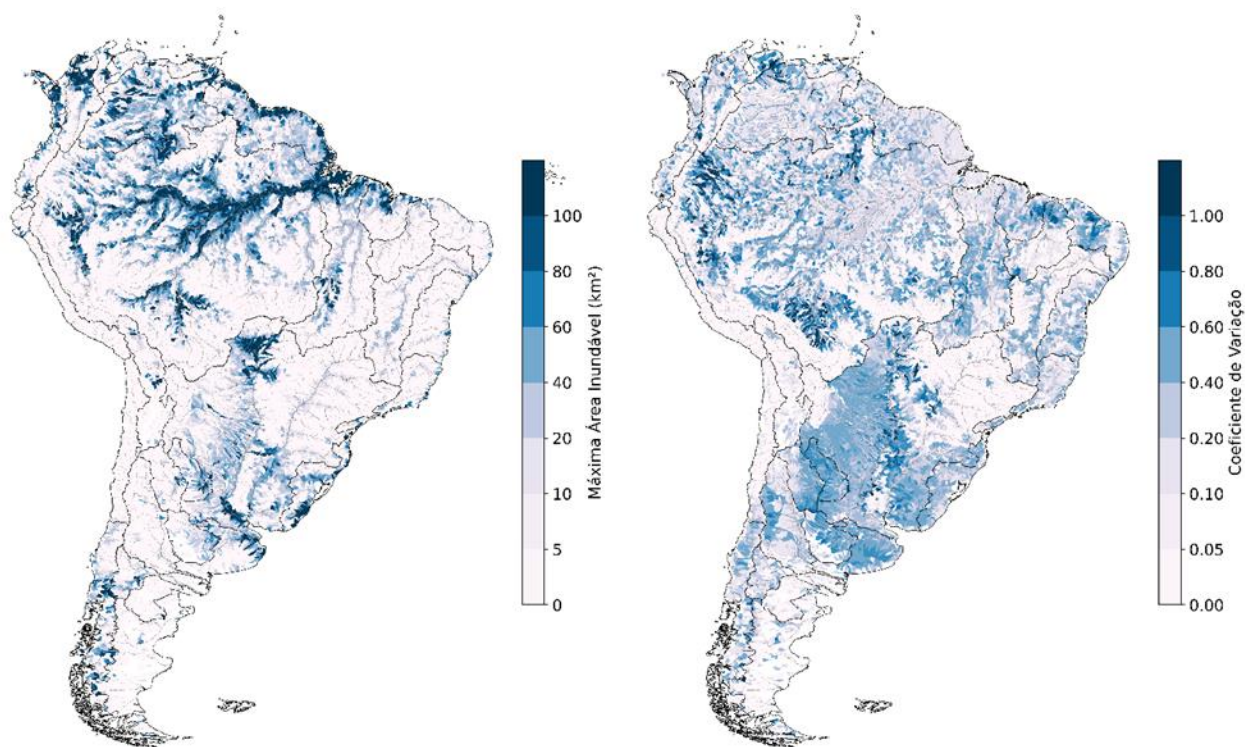


Figura 7.1. Média e o coeficiente de variação da série anual de áreas inundáveis considerando 28 simulações.

Impactos na Magnitude

A Figura 7.2 apresenta as variações na magnitude das máximas áreas inundadas anuais entre o período histórico e o futuro distante, tanto em termos absolutos de incremento de área inundada quanto em termos percentuais. Os resultados mostram um padrão de redução das áreas inundadas na maior parte da bacia Amazônica, nas bacias dos rios Tocantins-Araguaia e São Francisco, no litoral oeste do Brasil e no bioma Pantanal, além de outras áreas. Ao mesmo tempo observa-se aumento das áreas inundáveis nas regiões

mais a montante da bacia Amazônica, na bacia do rio Orinoco, no baixo Paraná, na região Sul do Brasil e nas regiões norte do Nordeste brasileiro. Quanto as variações absolutas de áreas inundadas em km², ficam evidentes as reduções no rio Amazonas, Ilha do Bananal e no bioma Pantanal. O padrão observado se mantém entre o Futuro Próximo e Distante, no entanto as alterações são intensificadas com o passar do tempo.

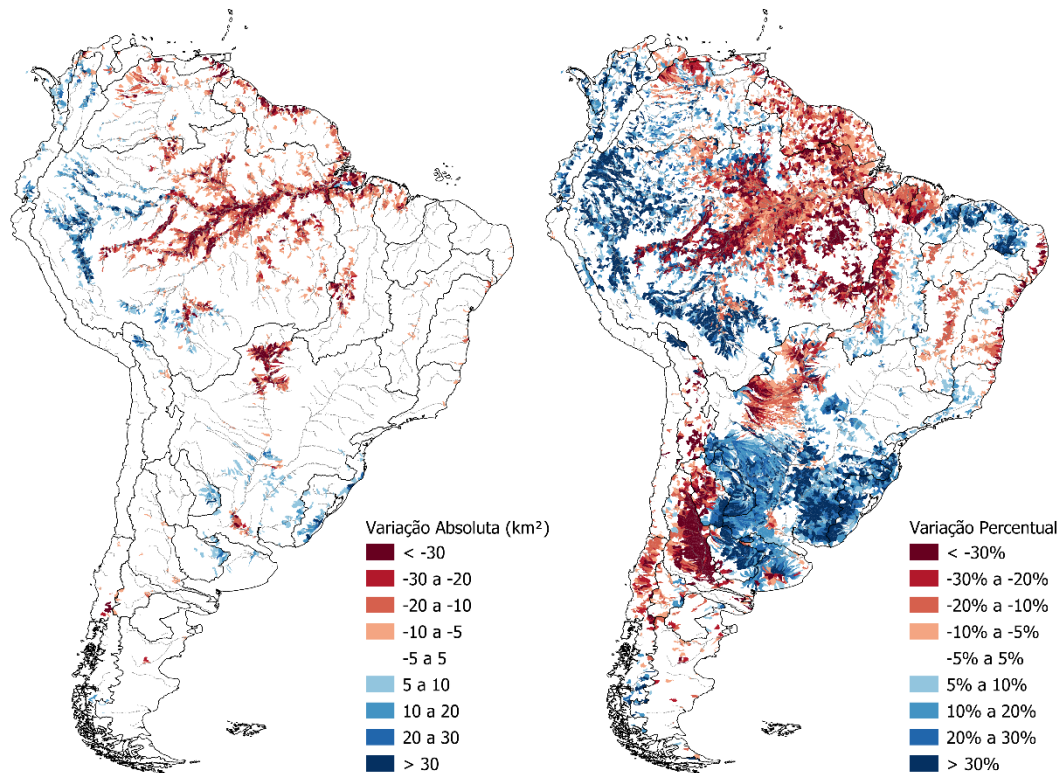


Figura 7.2. Variação na magnitude da média das máximas anuais de área inundada na América do Sul do futuro distante (2051-2100) em relação ao período histórico.

A Figura 7.3 apresenta a classificação de concordância dos resultados de áreas inundáveis máximas anuais considerando os resultados das 28 simulações. O mapa mostra concordância nos sinais de aumento e diminuição de áreas inundáveis já apontados na Figura 7.2. Observa-se concordância nas projeções de redução das áreas inundáveis nos rios afluentes ao rio Amazonas, acompanhado de um aumento da extensão das áreas inundáveis nas regiões mais a montante da bacia, como na Amazônia Peruana e nas planícies de Moxos. Na bacia do rio Araguaia, especialmente na região da Ilha do Bananal, e no Alto Paraguai, no bioma Pantanal, é observado concordância nas projeções de redução da área inundável. Também há concordância na redução das áreas inundáveis no litoral do Nordeste brasileiro. Além disso, as projeções concordam no aumento das áreas inundáveis no Alto Amazonas e na região Sul do Brasil. Outro ponto a ressaltar é a discordância entre as projeções em uma parte considerável do território da América do Sul, como no rio Tocantins, Baixo Paraguai e Orinoco.

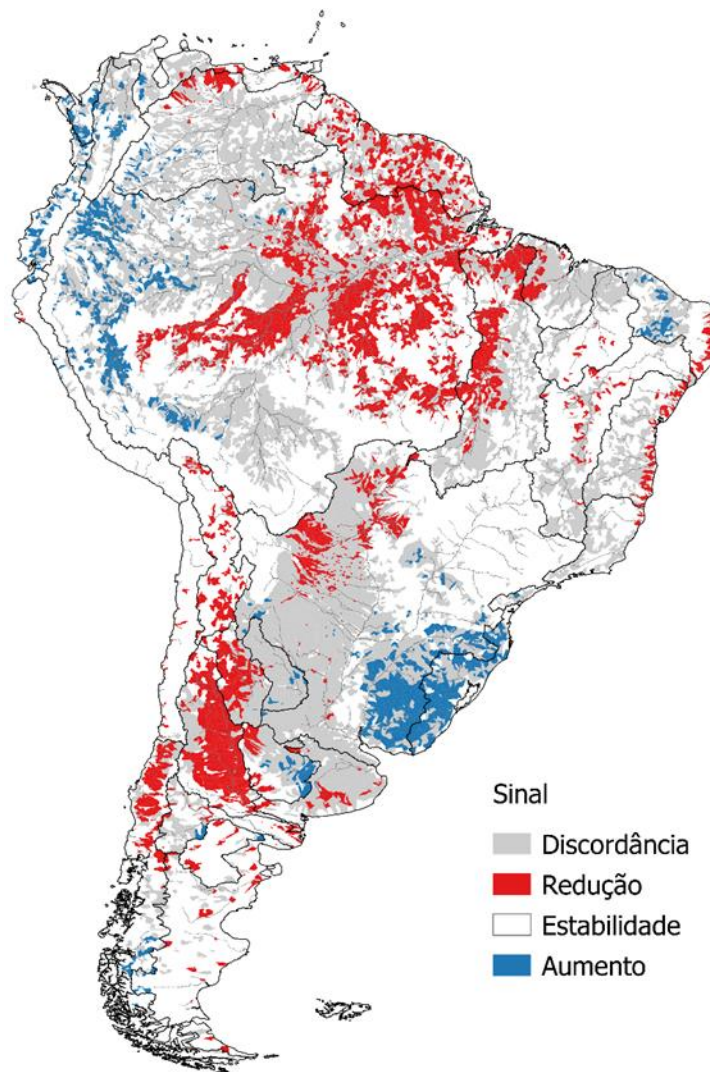


Figura 7.3. Concordância entre as simulações em relação a variação na média das máximas anuais de área inundada.

Em relação a concordância entre as simulações, observou-se aumento em 4,7% das minibacias, redução em 14,0% das minibacias, estabilidade em 44,3% das minibacias e discordância entre as simulações em 37,0% das minibacias. Portanto as simulações apontaram para mudanças significativas em 18,7% das unidades de cálculo do MGB-AS.

Impactos na Sazonalidade

A Figura 7.4 apresenta o mês em que ocorre o pico de inundação em média dos anos do período histórico, as mudanças no mês do pico para o futuro distante e a concordância entre as simulações. As mudanças no pico de inundação são menos expressivas que as mudanças observadas nas seções anteriores, no entanto foram observadas mudanças significativas e concordância entre as simulações. Nas bacias dos rios Juruá, Purus, Xingu e na região Sul do Brasil, estão projetados adiantamentos no pico de inundação. Embora destes, apenas o rio Xingu apresenta concordância entre as simulações, além de ser a

região em que os picos de inundação se apresentam mais adiantados para o período do futuro distante. Observa-se projeções de atraso para os picos de inundação em diversas áreas das bacias do rio Paraná e do rio São Francisco, nessas bacias também foi observado concordância entre as simulações.

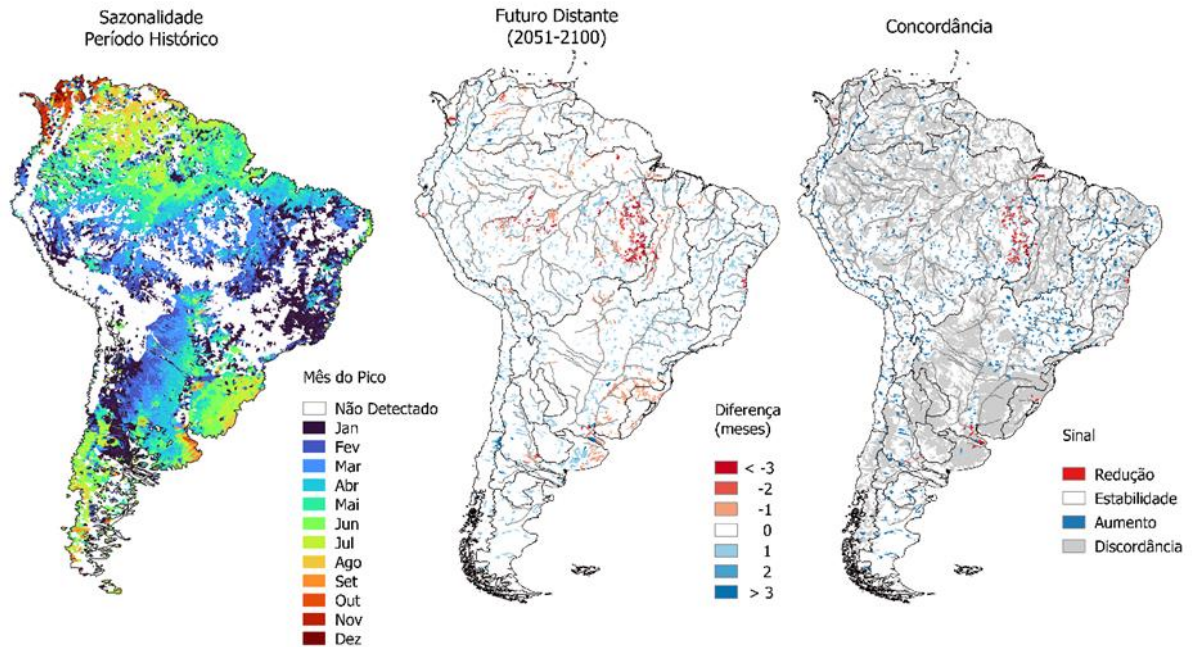


Figura 7.4. Análise do deslocamento na sazonalidade: (i) mês do pico da área inundada considerando a sazonalidade do período histórico, (ii) mudança no mês do pico anual de inundação no período do futuro distante e (iii) concordância entre as simulações para as mudanças projetadas.

Impactos nas Áreas Úmidas da América do Sul

A Figura 7.5 apresenta a sazonalidade das inundações nas principais áreas úmidas da América do Sul. Observa-se redução nos valores médios mensais nos períodos do futuro próximo e distante ao longo de todo o ano no rio Amazonas, na Ilha do Bananal e no Pantanal. No rio Orinoco e nas zonas interfluviais do Rio Negro observa-se redução dos valores mensais mais relacionado aos meses de cheia, enquanto os meses de seca permanecem relativamente estáveis. Nas planícies de Moxos foi observada estabilidade nos valores das médias mensais. Em todos os casos observa-se um aumento significativo no desvio padrão dos valores mensais nos períodos do futuro, inclusive crescendo entre o período futuro próximo e distante. Em nenhuma das áreas selecionadas foi observado deslocamento na sazonalidade, apenas reduções nas áreas inundadas.

Como citado anteriormente, as alterações nas magnitudes do regime de cheias dessas regiões podem causar impactos negativos, tanto socioeconômicos quanto ecossistêmicos.

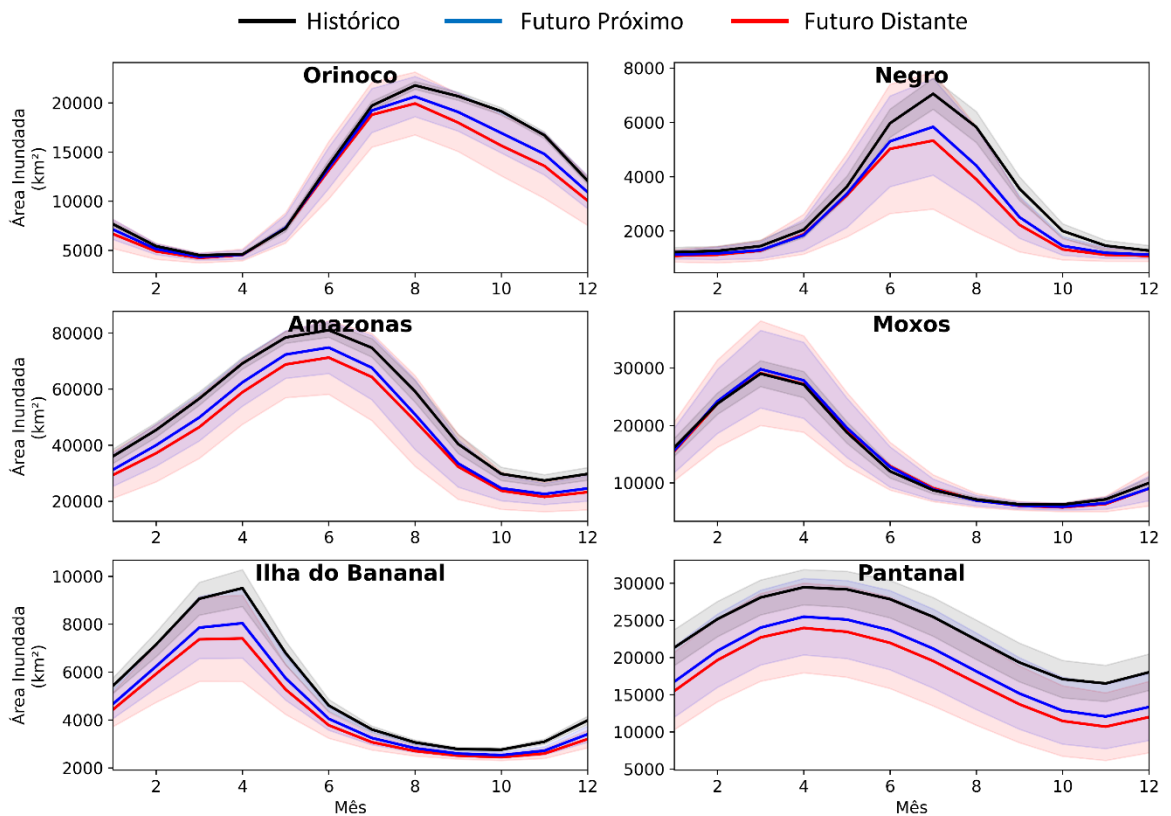


Figura 7.5. Sazonalidade das áreas inundadas nas principais áreas inundáveis da América do Sul.

Entre as áreas que apresentaram redução nas médias anuais de área inundada, estão importante áreas inundáveis da América do Sul, como o trecho principal do rio Amazonas, zonas interfluviais do rio Negro, Ilha do Bananal e o Pantanal. A Figura 7.6 apresenta as séries temporais de áreas inundadas máximas anuais para as áreas inundáveis citadas. As séries estão divididas entre período histórico, futuro próximo e distante. Observa-se que onde foram observadas reduções, estas ocorreram principalmente ao longo do futuro próximo e se estabilizam no futuro distante. As reduções mais acentuadas ocorreram nas áreas do rio Amazonas, zonas interfluviais do rio Negro, Pantanal e Ilha do Bananal. No geral, são observadas maiores amplitudes entre as simulações dos períodos futuros em relação ao período histórico.

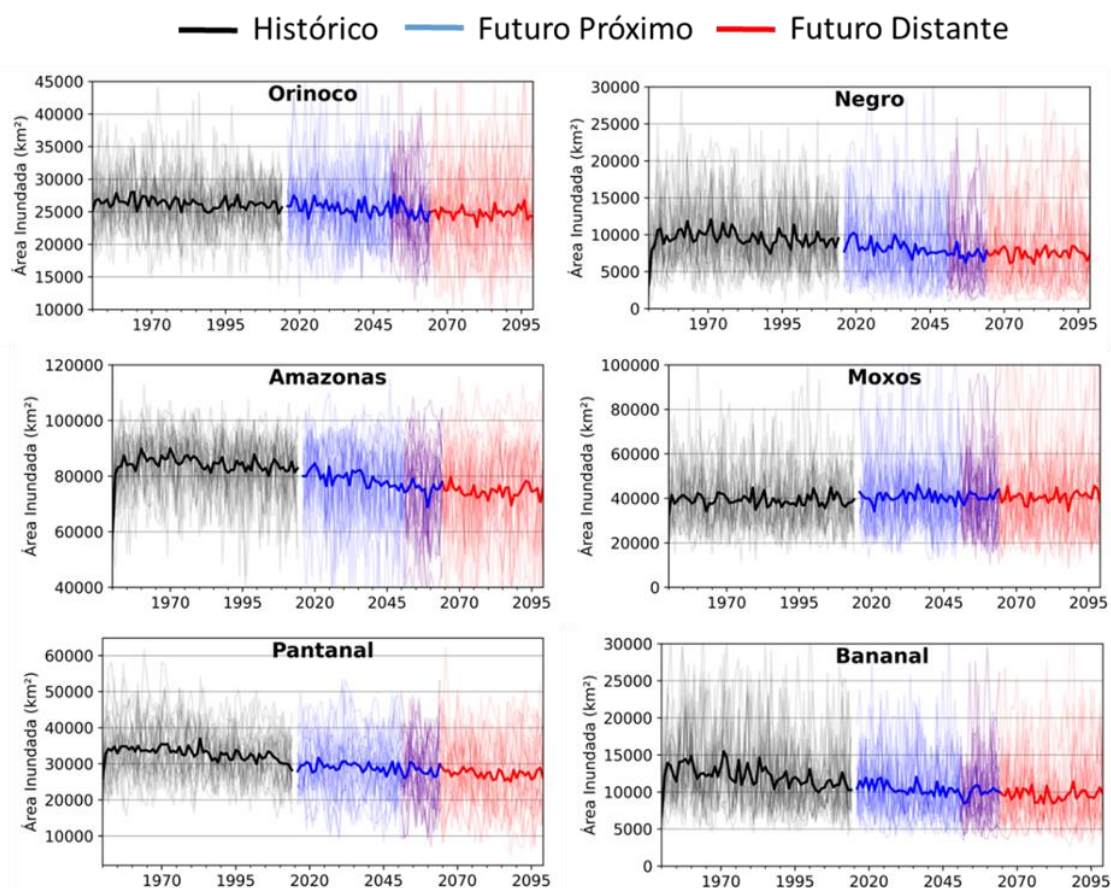


Figura 7.6. Séries temporais das máximas anuais de áreas inundadas para as principais áreas inundáveis da América do Sul.

Mudanças para diferentes Tempos de Retorno

A Figura 7.7 apresenta as mudanças na magnitude de áreas inundadas máximas anuais para os TRs de 5, 25 e 50 anos, tanto para o futuro próximo quanto para o futuro distante. Observa-se reduções significativas nas áreas inundadas da bacia do rio Amazonas para todos os TRs, sendo intensificado entre o período do futuro próximo para o futuro distante. As reduções observadas na bacia do rio Amazonas diminuem para TRs mais altos. O mesmo padrão é observado no bioma Pantanal. Na Ilha do Bananal as reduções se intensificam para TRs maiores e permanecem significativas tanto no futuro próximo quanto no futuro distante. Na região Sul do Brasil observa-se aumento das áreas inundadas que se intensificam no futuro distante e para TRs maiores. O mesmo padrão é observado no alto Amazonas, principalmente para a região da Amazônia Peruana.

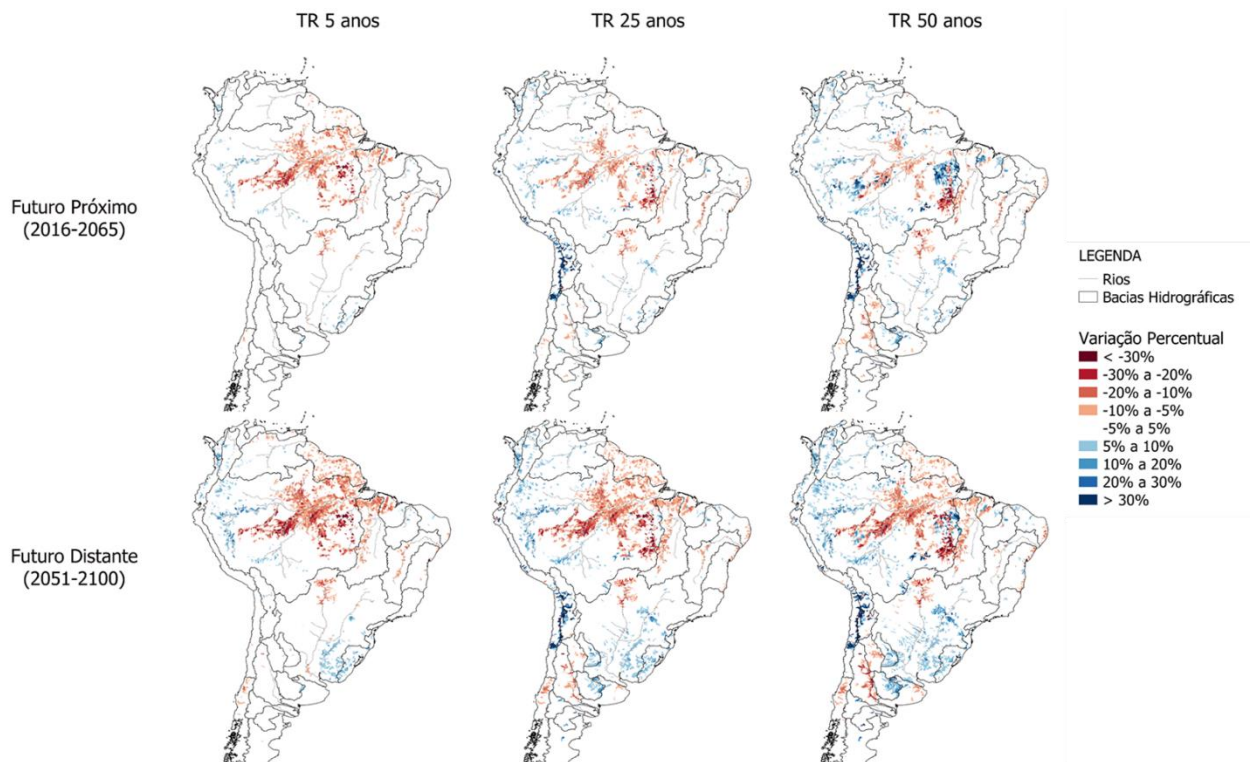


Figura 7.7. Alteração das áreas inundadas na América do Sul para diferentes Tempos de Retorno para o futuro próximo e distante.

7.4 CONCLUSÕES

O estudo avaliou as alterações nas áreas inundadas na América do Sul com base em simulações do MGB-AS utilizando como dados de entrada um conjunto de GCMs. As alterações foram avaliadas em termos de magnitude, sazonalidade e duração. As principais conclusões do estudo são apresentadas abaixo:

- Foram avaliadas as alterações nas áreas inundadas na América do Sul utilizando dados de 28 GCMs como entradas do MGB-AS, possibilitando uma análise envolvendo diversas simulações e suas concordâncias.
- Foram estimadas reduções na magnitude das médias das máximas anuais de área inundada nas regiões do Baixo Amazonas e seus afluentes, na região da Ilha do Bananal e no bioma Pantanal. Por outro lado, foram estimados aumento na região Sul do Brasil, na região norte do Nordeste brasileiro e no Alto Amazonas.
- A análise de concordância entre as simulações mostra que 18.7% das minibacias simuladas apresentam uma alteração significativa e convergente entre as simulações para o período futuro.
- Foram estimadas reduções significativas nos dias de inundação na bacia Amazônica e no Pantanal. Na região Sul do Brasil e no Alto Amazonas foi estimado aumento nos dias de inundação.
- Nas bacias do rio Purus, Juruá, Xingu e na região Sul do Brasil foi estimado deslocamento na sazonalidade das inundações.

8. MUDANÇA NAS SECAS NA AMÉRICA DO SUL

8.1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o Brasil enfrentou uma série de eventos extremos com impactos econômicos e ambientais significativos em todo o seu território. Dentre estes, as secas se destacam como um dos desastres naturais mais custosos globalmente, pois seus impactos se estendem aos recursos hídricos vitais, afetando diretamente a produção agrícola e a atividade econômica (Cook et al., 2018). Secas severas atingiram diversas regiões do país, incluindo o Nordeste em 2012-2015 (Marengo et al., 2018), a Amazônia em 2005, 2010, 2015-2016 e 2023 (Aragão et al., 2018; Costa & Marengo, 2023; CPTEC/Inpe & Inmet, 2023; Jiménez-Muñoz et al., 2016), o Sudeste em 2014-2015 (Nobre et al., 2016), o Pantanal em 2020-2021 (Libonati et al., 2022) e o Sul em 2020 (Grimm et al., 2020). É importante ressaltar que a mudança climática pode agravar tanto a frequência quanto a intensidade desses eventos extremos, ampliando ainda mais os impactos sobre o meio ambiente e a economia. Dessa forma, é imprescindível aprofundar as pesquisas sobre os efeitos das mudanças climáticas para guiar a formulação de políticas de adaptação e promover o desenvolvimento sustentável, visando a mitigação dos impactos negativos desses fenômenos.

As secas são classificadas em categorias: meteorológica, relacionada à falta de chuvas; a agrícola, associada à insuficiência de umidade no solo; e a hidrológica, decorrente da redução do escoamento superficial e das reservas de água (Seneviratne et al., 2023). Essas diferentes categorias de seca têm impactos específicos e respondem de maneiras variadas às mudanças climáticas (Seneviratne et al., 2023). Assim, podem ser avaliadas por meio de métricas que consideram frequência, intensidade, duração e danos resultantes (Beniston & Stephenson, 2004; Seneviratne et al., 2012).

De acordo com o relatório AR6 do IPCC, o aquecimento global está levando a alterações significativas no ciclo hidrológico, resultando em secas mais prolongadas e intensas. Essas secas têm impactos adversos em ecossistemas, na segurança hídrica e alimentar, e na produtividade agrícola. Além disso, o AR6 enfatiza a crescente variabilidade e imprevisibilidade desses eventos, ressaltando a necessidade urgente de estratégias de adaptação e mitigação para lidar com os riscos associados às secas (IPCC, 2021).

Os índices climáticos desempenham um papel importante na compreensão desses eventos. Um exemplo de evento climático extremo é o aumento do número de dias consecutivos sem chuva em uma determinada região (Reboita et al., 2022), e um índice útil para avaliar essa situação é o Índice Anual de Dias Secos Consecutivos (CDD – *Consecutive Dry Days*), pois um período seco prolongado com pouca ou nenhuma precipitação tem maior probabilidade de desencadear eventos de seca devido falta de chuva (Wang et al., 2021). Outro exemplo é o índice de aridez (AI – *Aridity Index*), que é

um indicador quantitativo do grau de deficiência hídrica presente em um determinado local. Assim, a aridez é normalmente quantificada comparando a média de longo prazo do abastecimento de água ou precipitação (P) com a média de longo prazo da procura climática de água (conhecida como evapotranspiração potencial - PET) (UNEP, 1992).

Este capítulo detalhará análises da seca em escala meteorológica a agrícola, explorando os seguintes índices: o número de dias consecutivos sem chuva (CDD – *Consecutive Dry Days*), a relação precipitação-evapotranspiração potencial (P-PET), o Armazenamento total de água (TWS - *Total Water Storage*) e o índice de aridez (AI – *Aridity Index*). Esta análise conjunta busca não se limitar a identificação da ausência de chuva, mas também explorar como a interação entre diferentes fatores, como a precipitação, a evaporação e o armazenamento de água, influencia as condições de aridez.

8.2 METODOLOGIA

O estudo utilizou o conjunto de 28 modelos climáticos da base NEX-GDDP-CMIP6 (Thrasher et al., 2022) e o modelo hidrológico-hidrodinâmico MGB-SA (Siqueira et al., 2018), conforme descrito no Capítulo 4. A metodologia se inicia com três conjuntos de dados: precipitação (P), um dos dados de entrada proveniente dos 28 GCMs; e evapotranspiração potencial (PET) e armazenamento total de água (TWS), resultantes do MGB-SA. A partir destes, processamos as informações para criar séries temporais de índices específicos referentes a cada um dos 28 GCMs.

Índices:

- CDD: Este índice oferece uma medida direta da duração de períodos sem chuvas expressivas, ajudando a identificar a ocorrência e a intensidade de secas meteorológica. Para calcular o índice CDD foram analisados os dados diários de precipitação, considerando apenas os dias nos quais a chuva foi inferior a 1 mm.
- AI: O índice de aridez foi calculado conforme a Equação 8.2 (UNEP, 1992). A Tabela 8.1 apresenta os limites de classificação de acordo com o AI.

$$AI = \frac{P}{PET} \quad (\text{Equação 8.2})$$

Tabela 8.1. Classificação de acordo com o Índice de Aridez

Classificação	AI
Hiperárido	$AI \leq 0,05$
Árido	$0,05 \leq AI < 0,20$
Semiárido	$0,20 \leq AI < 0,50$
Subúmido seco	$0,50 \leq AI < 0,65$
Subúmido	$0,65 \leq AI < 0,80$
Úmido	$0,80 \leq AI < 1,50$
Muito úmido	$1,50 \leq AI$

- P-PET: No estudo, a interação entre os níveis de precipitação e evapotranspiração potencial, representada pela diferença P-PET, foi utilizada como um indicador para discernir regiões com déficit hídrico, caracterizadas por valores negativos, das áreas com disponibilidade hídrica, indicadas por valores positivos.
- TWS: O TWS é definido como a soma de toda a água armazenada acima e abaixo da superfície terrestre. Isso inclui águas superficiais, umidade do solo, águas subterrâneas, neve, gelo e água armazenada na vegetação (Giroto & Rodell, 2019).

Para cada índice, calculamos a média para os períodos histórico (H) (1950-2014), futuro próximo (NF) (2016-2065) e futuro distante (FF) (2051-2100) para cada GCM, considerando os anos específicos de cada período. Em seguida, determinamos a mediana entre os 28 GCMs para o índice médio e avaliamos a concordância entre eles. Consideramos como concordância significativa as regiões onde pelo menos 2/3 dos modelos concordam em indicar um aumento ou redução do índice analisado no futuro em comparação com o período histórico de referência. Além disso, para as séries temporais, realizamos análises considerando a mediana e os percentis 25 e 75, em áreas específicas de interesse. Isso nos permite avaliar a variabilidade e as tendências dos índices de seca ao longo do tempo, bem como a incerteza associada à modelagem.

8.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

CDD

A Erro! Fonte de referência não encontrada. exibe os mapas da mediana do CDD médio para os períodos H, NF e FF, representando a síntese dos modelos considerados. No entanto, devido à ampla variabilidade do índice, torna-se desafiador identificar visualmente alterações significativas entre os períodos. Esta variabilidade abrange desde poucos dias secos, como observado na região amazônica, até longos períodos de estiagem em áreas como o nordeste do Brasil e a região oeste da América do Sul, incluindo os Andes e áreas com clima desértico. Destaca-se, porém, uma tendência de expansão dos valores mais altos no centro do Brasil, em aproximadamente 30 dias, indicando uma possível mudança nessa região.

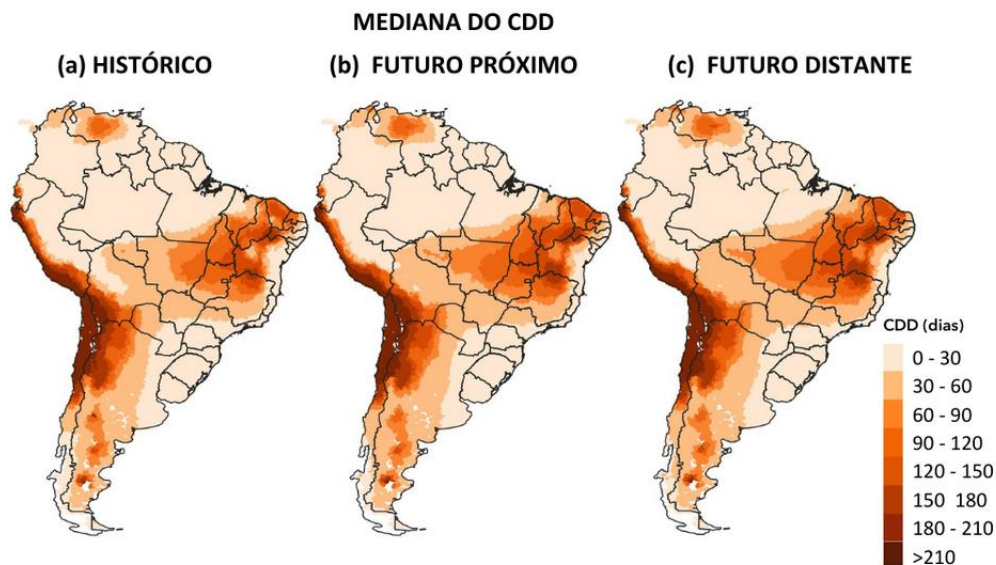


Figura 8.1. CDD médio para os períodos (a) histórico, (b) futuro próximo e (c) futuro distante.

Na Figura 8.2 as projeções de alteração para os períodos futuro próximo (NF) e futuro distante (FF) são apresentadas, juntamente com a porcentagem dos modelos que concordam e o respectivo sinal de concordância. Os maiores valores de alteração percentual são encontrados na região da Amazônia, tanto no futuro próximo (Figura 8.2a), quanto no distante (Figura 8.2b). Isso sugere um aumento de episódios de seca na região. Para o Brasil como um todo, a predominância de valores positivos nos mapas sugere um cenário futuro em que a seca se torna mais longa em quase todas as regiões, com exceção de parte do Rio Grande do Sul, que apresenta valores negativos. Isso pode indicar que, ao contrário do restante do Brasil, o Pampa poderá experimentar um aumento na frequência das precipitações. A concordância dos modelos mostra que grande percentual dos modelos concorda para o aumento do CDD no Brasil.

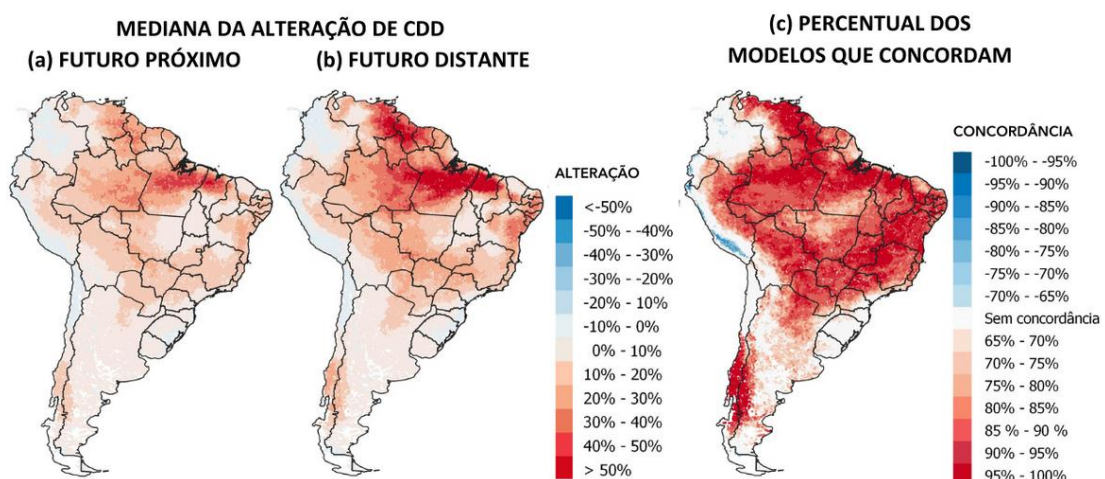


Figura 8.2. Projeções de alteração do número de dias consecutivos sem chuva (CDD) para a América do Sul: Mediana da alteração de CDD para os períodos (a) futuro próximo e (b) futuro distante, em relação ao período histórico e (c) percentual dos modelos que concordam para aumento (cores quentes) ou redução (cores frias) do CDD.

Além disso, foram geradas séries temporais de 1950 a 2100 para verificar o incremento de CDD em seis regiões de interesse, ilustradas na Figura 8.3. Nas séries temporais, a linha representa a média dos 28 modelos e a área preenchida é delimitada pelos percentis 25 e 75, permitindo visualizar tanto a tendência geral quanto a incerteza nas projeções climáticas.

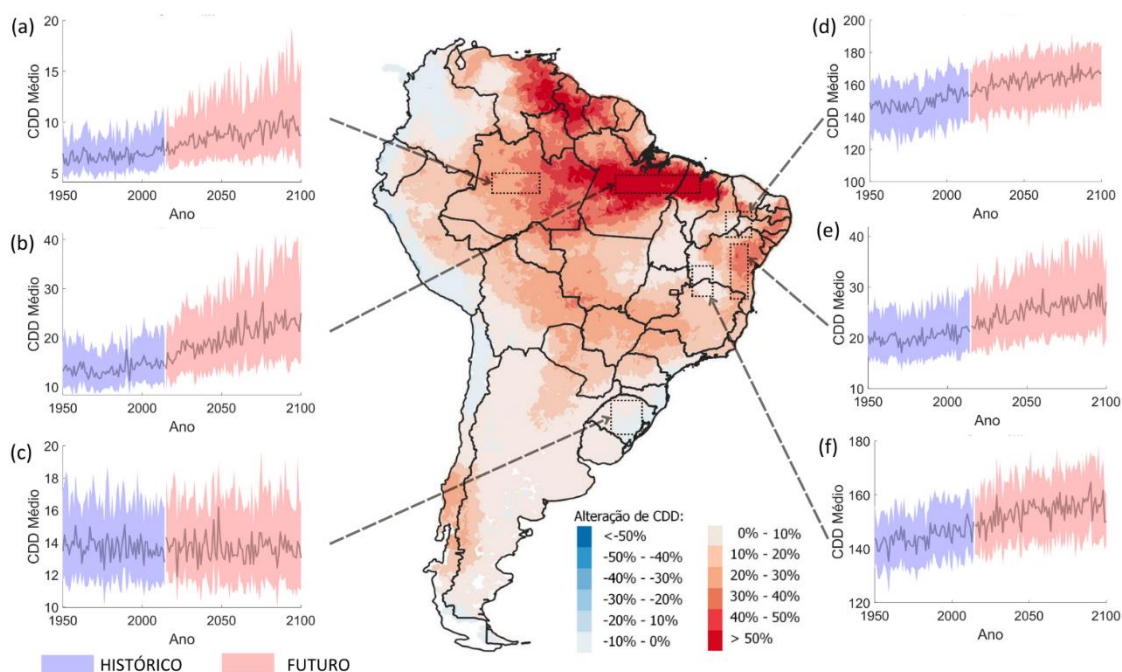


Figura 8.3. Séries temporais de CDD para o período histórico (azul) e futuro (vermelho) obtidas a partir de 28 GCMs. A linha contínua representa a média entre os modelos, e a área preenchida é delimitada pelos percentis. As séries temporais são apresentadas para seis regiões de interesse. A escala em todos os gráficos é representada em dias. As regiões são indicadas no mapa de alteração projetada para o período futuro distante (FF).

Analisando as diferentes regiões do país, podemos observar os seguintes padrões em relação ao CDD no passado e no futuro:

As análises da Figura 8.3a e Figura 8.3b referem-se a regiões localizadas no Norte do Brasil, onde prevalece o clima equatorial caracterizado por altas temperaturas, elevada umidade e chuvas abundantes distribuídas ao longo de todo o ano, sem uma estação seca definida. Durante o período histórico, essas áreas apresentaram valores baixos de CDD e baixa variabilidade, indicando um clima estável nesse aspecto. No entanto, para o período futuro, observa-se elevados valores de alteração indicando um aumento no CDD para a região e sugerindo que as mudanças climáticas podem resultar em períodos secos atípicos.

A análise referente ao bioma Pampa (Figura 8.3c) revelou baixos valores de CDD tanto no período histórico quanto no futuro. Além disso, observou-se que os valores no mapa de alteração para o período FF também foi baixo, sendo essa a única região no Brasil a apresentar valores negativos, ainda que próximos de zero. Esses resultados indicam uma

influência limitada das mudanças climáticas na duração do período seco nessa região, além de sugerir uma tendência leve à diminuição do intervalo sem chuvas, e indicam um potencial promissor para atividades agrícolas. Similarmente, para o Leste da Bahia (Figura 8.3e), foram registrados baixos valores de CDD durante o período histórico, entretanto, para o período futuro, destaca-se uma alteração positiva indicando o aumento do CDD na região.

As análises da Figura 8.3d e da Figura 8.3f referem-se à parte da Região Nordeste e ao Norte de Minas Gerais, que são áreas classificadas como semiáridas, conhecidas por enfrentar crises recorrentes de estiagem prolongada. Tanto no período histórico quanto no futuro, essas regiões exibem os maiores valores de CDD em todo o Brasil (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**). Os baixos valores de alteração indicam que a área já é historicamente afetada por essas condições secas. Essas observações ressaltam a vulnerabilidade das regiões semiáridas e confirmam a importância de considerar a variabilidade natural e histórica das condições secas ao analisar os impactos futuros das mudanças climáticas.

Dessa forma, observa-se que a Amazônia e o Nordeste podem ser as áreas mais impactadas em relação CDD até o final do século, sob cenários de mudanças climáticas. Isso se deve à maior variabilidade nos padrões de precipitação na Amazônia e aos maiores valores de CDD registrados no Nordeste. Essas descobertas estão de acordo com estudos anteriores realizados sobre o assunto (Chou et al., 2014; Reboita et al., 2022; Valverde & Marengo, 2014).

Índice de Aridez

A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os mapas com projeções médias do índice de aridez para o período (a) histórico, (b) futuro próximo e (c) futuro distante. De modo geral, observa-se a redução de áreas úmidas e muito úmidas, respectivamente, na região central da América do Sul e na Amazônia, e a expansão de zonas semiáridas e áridas no nordeste do Brasil. Salienta-se que estas alterações são mais acentuadas para o futuro distante.

Em corroboração, Beck et al., (2018) compararam as mudanças no clima para os períodos recente (1980 a 2016) e futuro (2071–2100). Os resultados indicaram a redução da umidade na região Amazônica, com diminuição da área com clima tropical úmido (Af) no Amazonas, convertido para tropical moderadamente úmido (Am), e do clima Am para tropical seco (Aw) no Pará. Além disso, houve aumento das áreas com clima semiárido quente (BSh) e árido quente (BWh) em regiões do nordeste.

O aumento das zonas de clima semiárido e árido no nordeste brasileiro também foi evidenciada numa nota técnica, no ano 2023, de pesquisadores de órgãos federais

brasileiros, ligados ao MCTI (Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação) (Tomasella et al., 2023). A partir de dados de precipitação e evapotranspiração potencial de cada região, constataram que a área com clima semiárido vem aumentando. Além disso, pela primeira vez no Brasil, identificaram locais caracterizados como áridos no Nordeste, e sinalizaram que o limiar da classe árida tende a crescer ao longo dos anos. A modificação no índice de aridez na América do Sul, especialmente em regiões como o nordeste do Brasil ou o cinturão de florestas tropicais, pode refletir a intensificação do ciclo hidrológico, com alterações significativas na precipitação, umidade e evapotranspiração (Chagas et al., 2022).

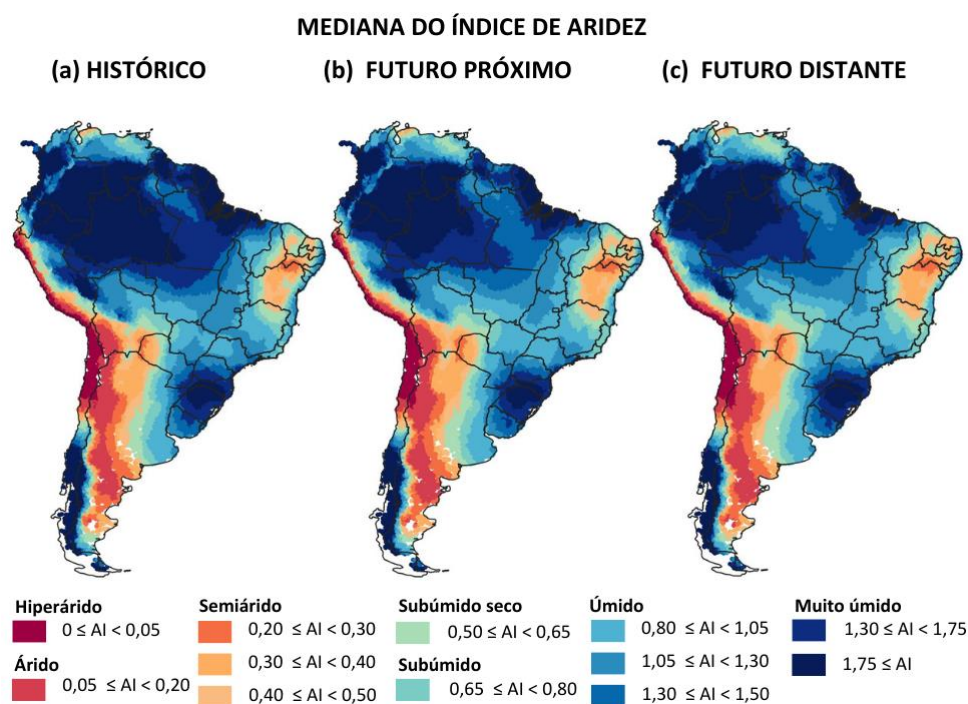


Figura 8.4. Projeções médias do índice de aridez para o período (a) histórico, (b) futuro próximo e (c) futuro distante, com tons quentes indicando regiões áridas e tons frios indicando regiões úmidas.

A Figura 8.5 mostra a alteração do índice de aridez do período (a) futuro próximo e (b) futuro distante em relação ao período histórico e (c) a porcentagem dos modelos que concordam e o respectivo sinal de concordância. Essas análises destacam o aumento de aridez e mudanças na distribuição espacial de regiões com climas úmidos e secos na América do Sul, e evidenciadas principalmente no cenário de futuro distante.

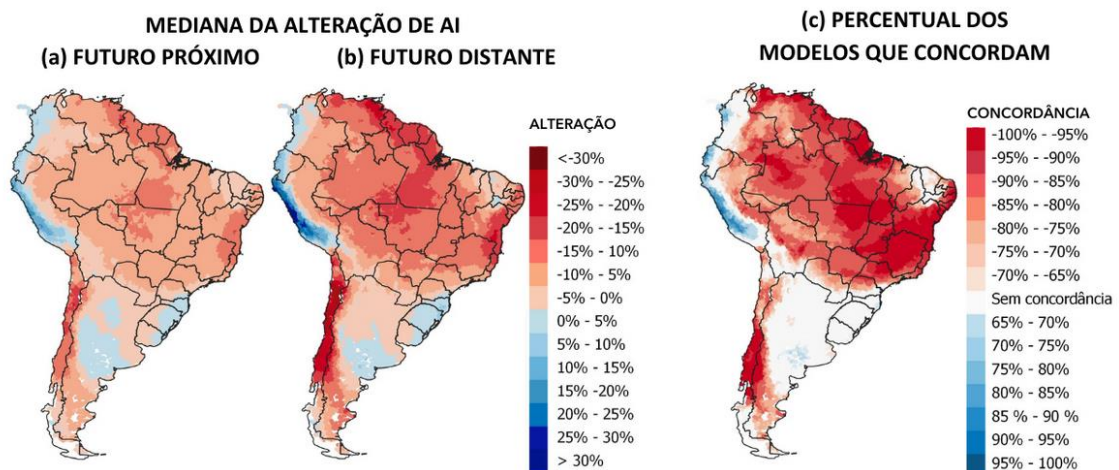


Figura 8.5. Projeções de alteração do índice de aridez para o período (a) futuro próximo, 2015-2065, e (b) futuro distante, 2050-2100, com tons quentes indicando regiões mais áridas e tons frios indicando regiões mais úmidas, em relação à média histórica, e (c) percentual dos modelos que concordam para aumento (cores quentes) ou redução (cores frias) da aridez.

Para avaliar o comportamento do índice de aridez em regiões com diferentes características no Brasil, foram geradas séries temporais de 1950 a 2100, ilustradas na Figura 8.6. Nas séries temporais, a linha representa a média dos 28 modelos e a área preenchida é delimitada pelos percentis 25 e 75, permitindo visualizar tanto a tendência geral quanto a incerteza nas projeções climáticas.

Nas áreas selecionadas na região Norte, cujos climas são predominantemente úmidos (Figura 8.6 (a), (b) e (c)), observa-se tendência de redução da umidade ao longo dos anos, principalmente, nas áreas no entorno da floresta amazônica (Figura 8.6 (b) e (c)), onde o decréscimo da umidade é mais expressivo no período futuro, ocorrendo transição da classificação de muito úmida para úmida.

O índice de aridez na região semiárida do nordeste brasileiro (Figura 8.6d) mostra uma ligeira diminuição, mantendo a área próxima ao limiar do que é caracterizado como semiárido. Contudo, uma análise da tendência futura revela que a região pode estar se aproximando da classificação de região árida. Isso implica que, embora as mudanças não sejam drasticamente expressivas devido aos já baixos índices de aridez da região, a tendência aponta para um agravamento das condições de aridez ao longo do tempo, indicando um possível aumento da vulnerabilidade às secas no futuro.

As áreas localizadas nos biomas Pantanal (Figura 8.6e) e Cerrado (Figura 8.6f) tendem a se tornar mais secas no período futuro. Com foco no Pantanal, observa-se Índice de Aridez parte de um limiar próximo a 0.8, oscilando de condições úmidas para subúmidas historicamente. No futuro, há uma tendência para um clima mais seco, com valores de AI próximos de 0.65, progredindo para subúmido seco.

Por fim, na área localizada no bioma Pampa (Figura 8.6g), caracterizado por uma região de clima temperado, não existem grandes alterações nos valores da aridez no período futuro.

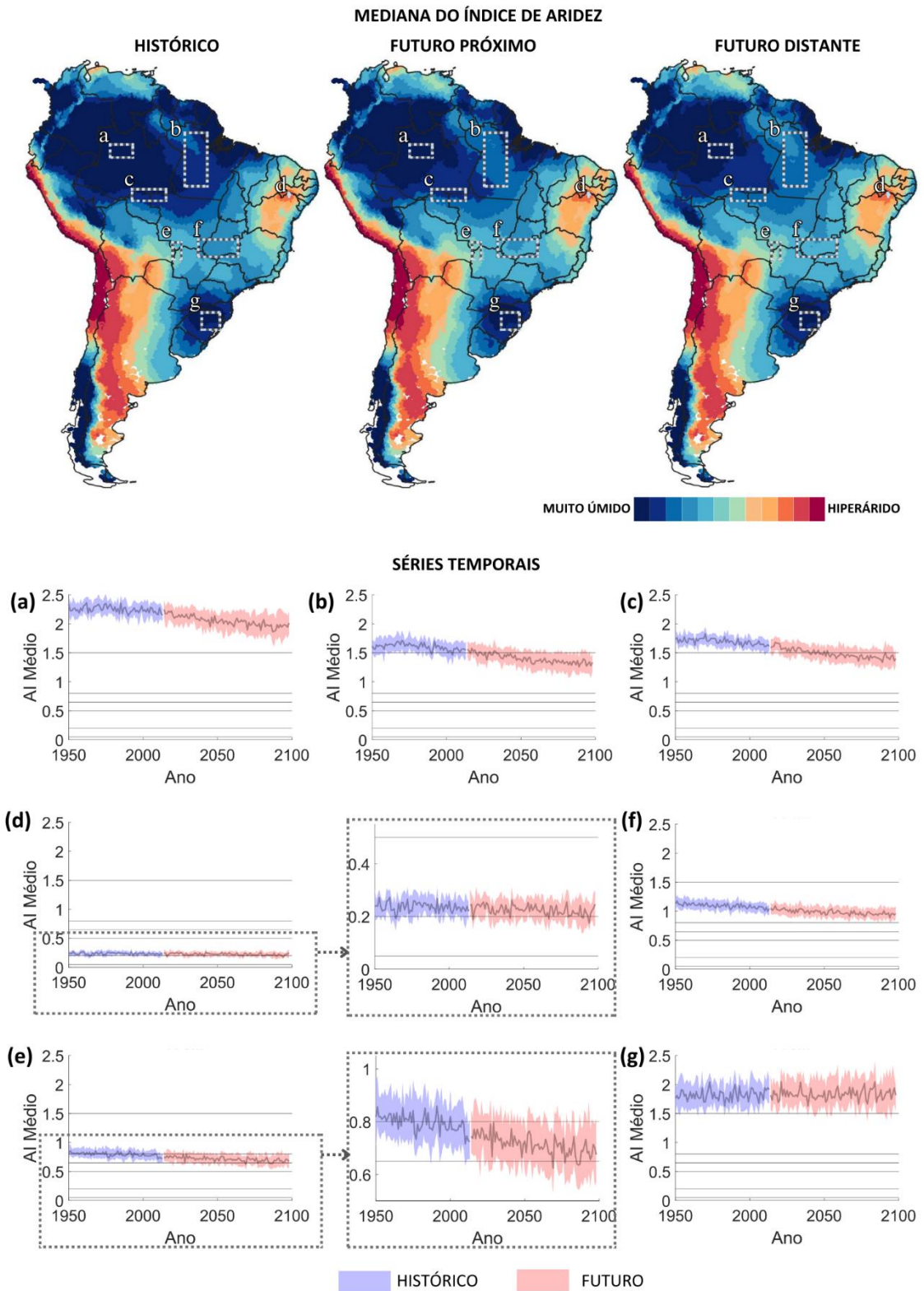


Figura 8.6. Mapa de localização das regiões analisadas quanto ao índice de aridez (AI), e as respectivas séries temporais. A escala dos gráficos representa o AI (adimensional), e as linhas horizontais representam os limites das classes, conforme a Tabela 8.1.

DEFICIT: P – PET

A Figura 8.7 e Figura 8.8 mostra a variação sazonal e a tendência de mudança no balanço hídrico da América do Sul, tanto histórica quanto projetada para o futuro próximo e distante. As cores quentes denotam um déficit hídrico - condições mais secas - enquanto as cores frias indicam um excedente de água - maior disponibilidade hídrica.

As regiões do mapa destacadas para os meses de abril e outubro revelam tendências em termos de variações, particularmente no Nordeste do Brasil e no Centro do país. Em abril, as projeções futuras indicam uma expansão notável do déficit hídrico, como evidenciado pela mancha vermelha que se torna mais escura e se estende para regiões adjacentes. Isso sinaliza uma antecipação da estação seca, com condições de aridez intensificadas, sugerindo um início mais precoce e severo do período seco em comparação com o registro histórico. Observando outubro, nota-se que a recuperação para um déficit positivo, que historicamente começava neste mês, está sendo adiada nas projeções para o futuro distante. O vermelho intenso persiste, indicando que o período de seca no centro do Brasil não apenas se prolonga, mas também se intensifica. Esse prolongamento sugere que a transição para condições mais úmidas é retardada, levando a uma estação seca que se estende até novembro, uma alteração significativa do padrão hídrico usual, que é de maio a setembro.

Nos primeiros meses do ano, de janeiro a maio, a região amazônica apresenta predominantemente tons de azul, indicando disponibilidade hídrica. Esta é a estação chuvosa típica da região. O sul e leste da Amazônia mostram uma tendência de aumento de déficit hídrico. Em abril, pode-se notar que o superávit hídrico começa a diminuir mais cedo no futuro próximo e distante. Em outubro, que é um mês de transição para o período chuvoso, o déficit hídrico permanece mais intenso nas projeções futuras.

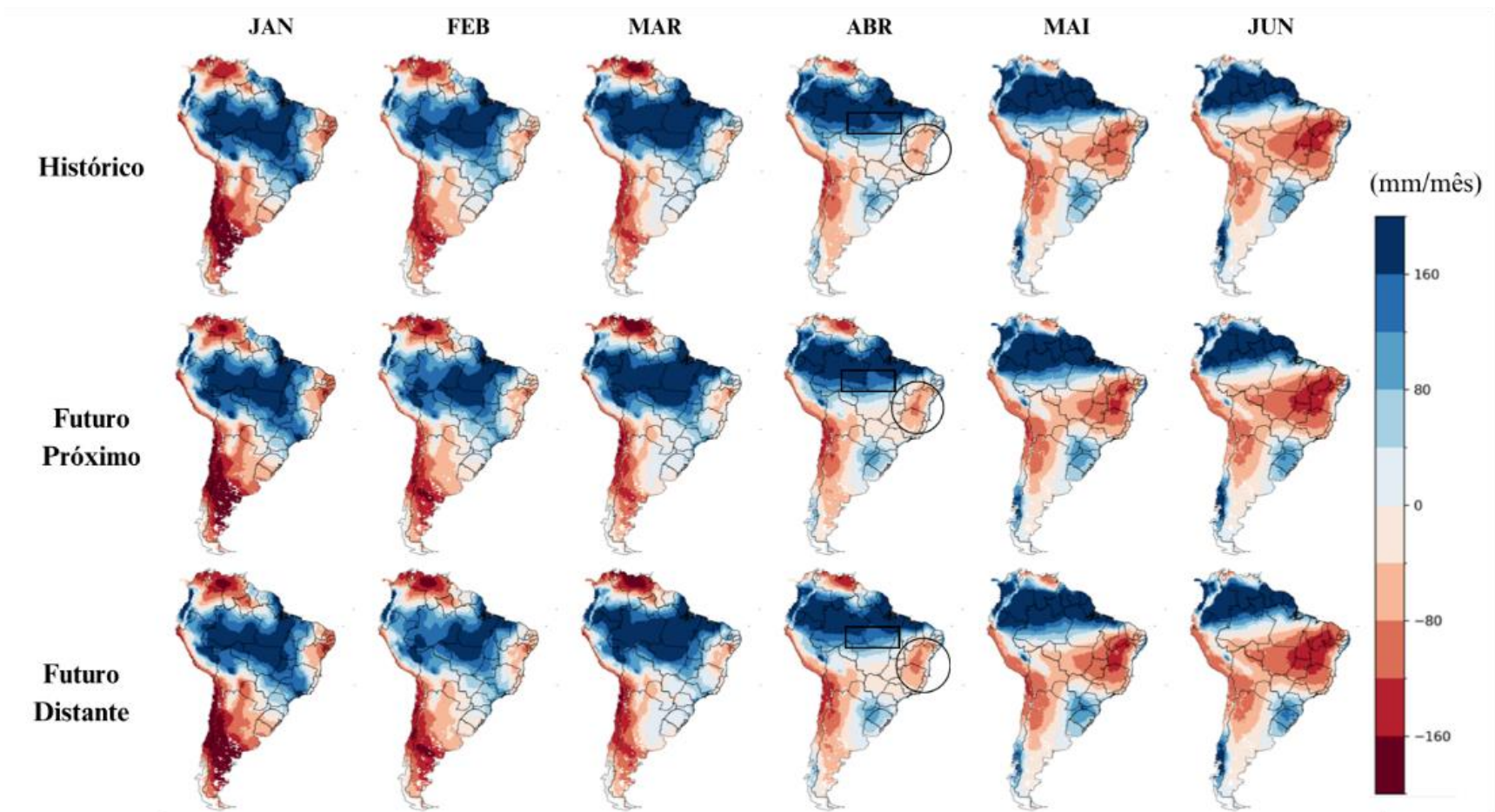


Figura 8.7. Mapas de P-PET (mm/mês) para os meses de janeiro a junho, para o período histórico, futuro próximo e futuro distante. Os círculos e retângulos pretos no mês de abril correspondem as regiões citadas anteriormente no texto, referentes ao Nordeste e a Amazônia, respectivamente.

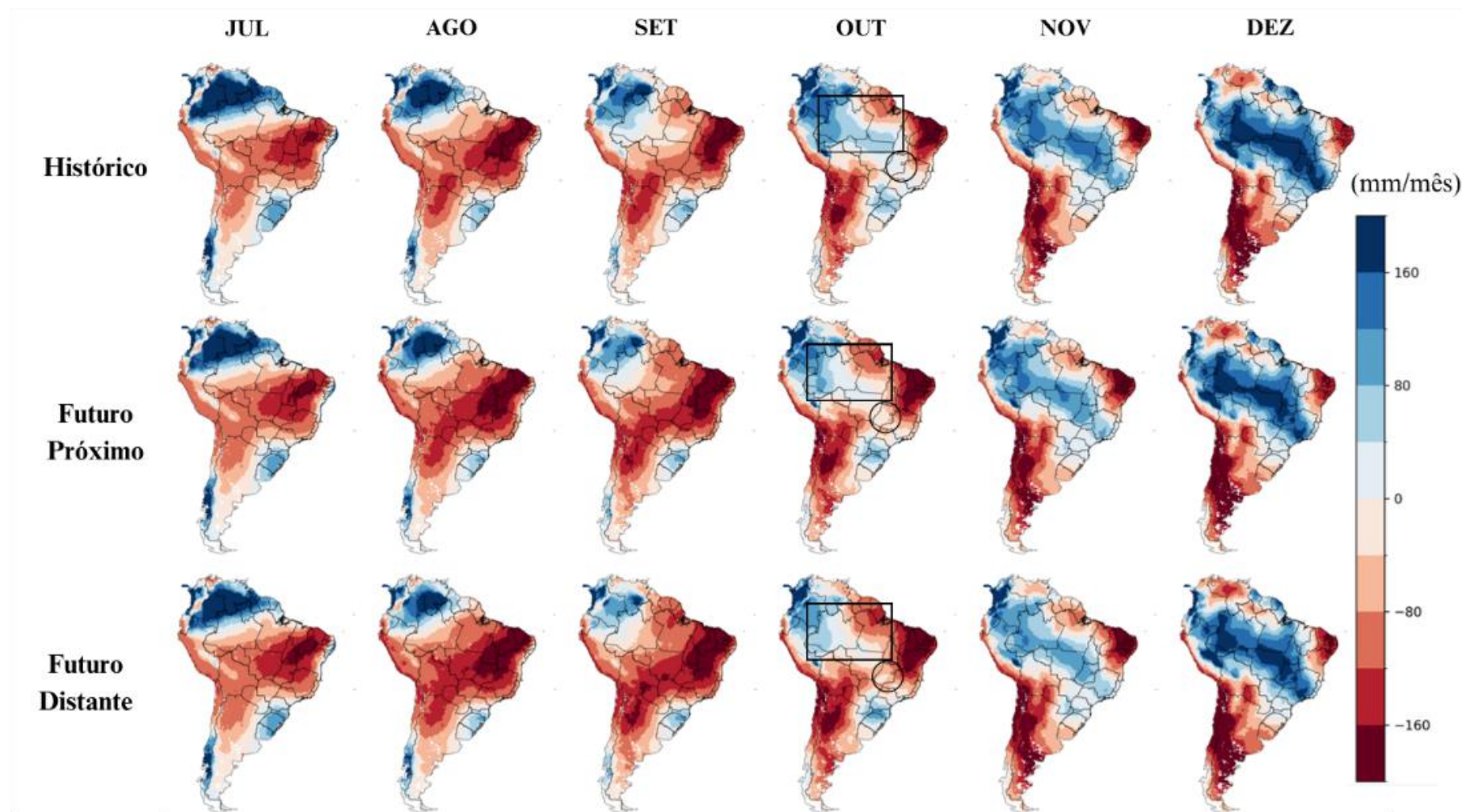


Figura 8.8. Mapas de P-PET (mm/mês) para os meses de julho a dezembro, para o período histórico, futuro próximo e futuro distante. Os círculos e retângulos pretos no mês de outubro correspondem as regiões citadas anteriormente no texto, referentes ao Centro-Oeste e a Amazônia, respectivamente.

A Figura 8.9 apresenta gráficos de P-PET mensal para as regiões de interesse. Os gráficos mostram a sazonalidade para os períodos histórico, futuro próximo e futuro distante, delimitados pelas medianas entre os modelos e os percentis 25 e 75. Os resultados encontrados revelam uma tendência predominante de aumento do déficit hídrico.

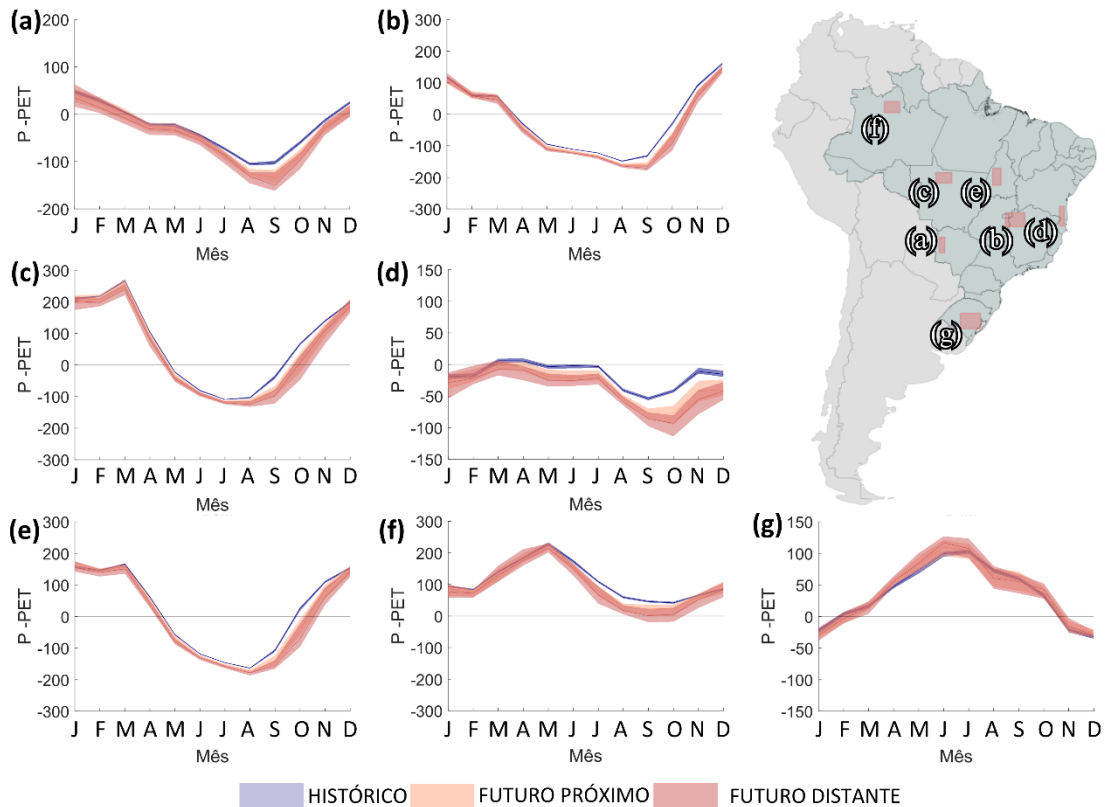


Figura 8.9. Análise gráfica de P-PET mensal (mm/mês), e mapa localização das regiões analisadas, para os períodos histórico (em vermelho), futuro próximo (em azul claro) e futuro distante (em azul escuro).

Historicamente, essas regiões experimentam um déficit sazonal esperado, com uma recuperação notável ao final do ano. No entanto, as projeções para um futuro próximo e distante mostram uma intensificação desse déficit, com uma duração mais longa da estação seca. Especificamente, as regiões (a) e (b) demonstram um aprofundamento significativo da escassez de água, com a redução se estendendo além dos meses habituais, com notável retardo na recuperação hídrica. A região (c), embora tradicionalmente menos afetada, segue a mesma tendência de aumento na intensidade e duração do déficit. Na região (d), nas projeções para o futuro próximo e distante, a amplitude do déficit aumenta, e o retorno a condições de disponibilidade é retardado. Isto indica uma estação seca mais prolongada e intensa do que o histórico. As regiões (e) e (f) se mostram mais resilientes, embora ainda sujeita a uma diminuição na disponibilidade hídrica, com foco na região (f), que durante a região histórica apresentava apenas valores positivos e durante o período futuro distante começa a apresentar também valores negativos. Para a região (g), conforme observado em análises anteriores, os padrões ao longo do ano são mantidos em todos os períodos analisados, não apresentando variações visualmente significativas.

TWS

A Figura 8.11 mostra os mapas com projeções médias do TWS para o período (a) histórico, (b) futuro próximo e (c) futuro distante e a Figura 8.11 mostra a alteração do índice de aridez do período (a) futuro próximo e (b) futuro distante em relação ao período histórico e (c) a porcentagem dos modelos que concordam e o respectivo sinal de concordância. É possível observar que as áreas com maiores valores de TWS tendem a apresentar as maiores alterações. Para o futuro próximo e distante (Figura 8.11a,b), as projeções indicam reduções mais severas do TWS, particularmente no final do século, com foco na Amazônia e parte do Pantanal. Ao examinar a concordância entre os modelos (Figura 8.11c), a consistência do sinal de redução do TWS em quase toda a região reforça os resultados anteriores. Contudo, há áreas no sul do Brasil, na Argentina e nos Andes tropicais onde um aumento do TWS é projetado, indicando que essas podem ser áreas de interesse para futuros estudos com foco em disponibilidade hídrica.

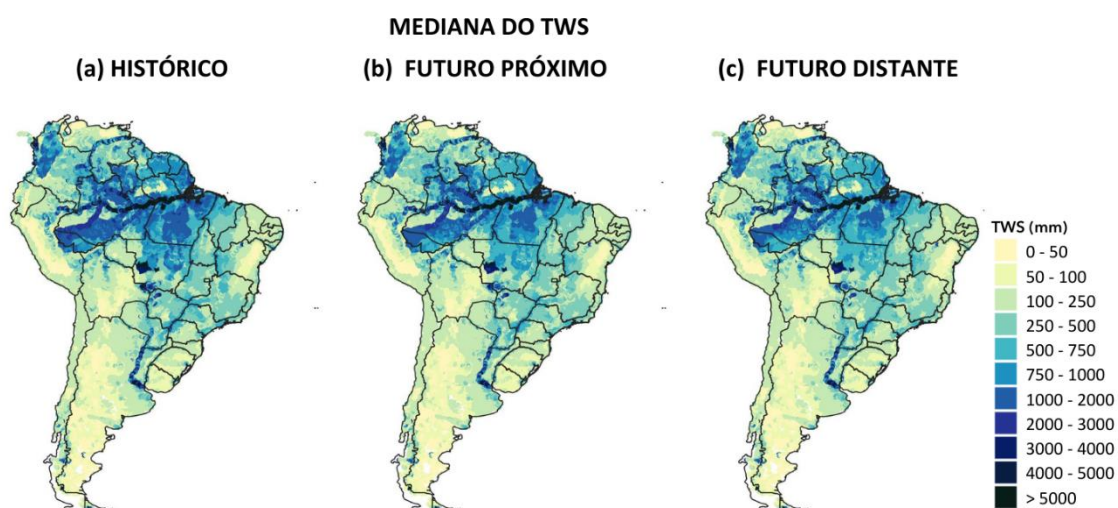


Figura 8.10. Projeções médias do TWS para o período (a) histórico, (b) futuro próximo e (c) futuro distante.

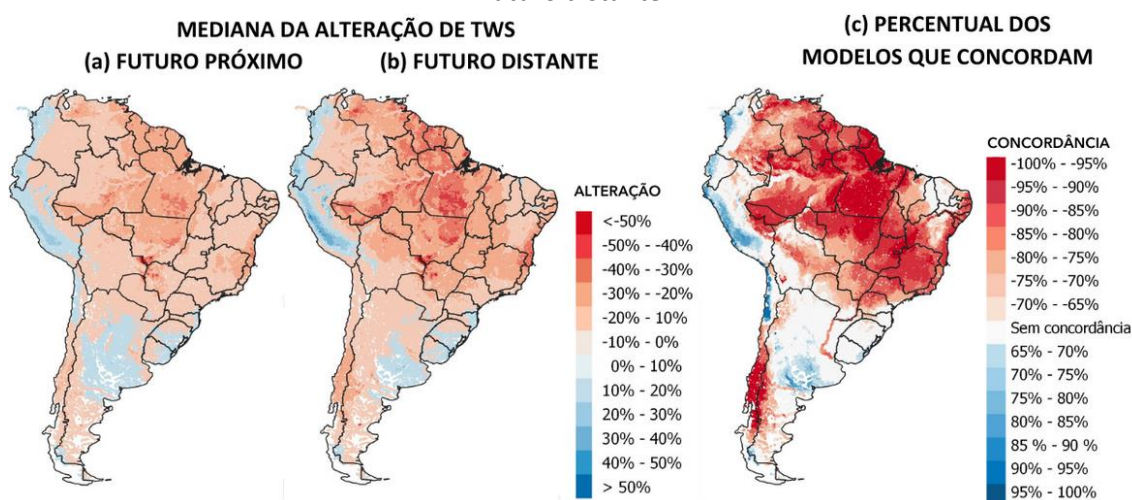


Figura 8.11. Projeções de alteração do TWS para o período (a) futuro próximo, 2015-2065, e (b) futuro distante, 2050-2100, com tons quentes indicando regiões com diminuição e tons frios indicando regiões com aumento de TWS, em relação à média histórica, e (c) percentual dos modelos que concordam para aumento (cores quentes) ou redução (cores frias) do TWS.

8.4 CONCLUSÕES

A conclusão central do estudo é que existe tendências crescentes do período seco para a maior parte da América do Sul. De acordo com o CDD, evidenciou-se que as regiões Norte e o Nordeste estão propensas a serem as regiões brasileiras mais impactadas por eventos de seca. A Amazônia, em particular, pode enfrentar períodos de secas que ultrapassam os valores históricos, indicando uma significativa alteração dos padrões típicos observados no bioma. Por outro lado, o Nordeste, que já é caracterizado como uma região semiárida, poderá enfrentar uma tendência de diminuição nas precipitações e períodos de estiagem ainda maiores. O estudo também revela uma tendência crescente da aridez na maior parte da América do Sul. Na Amazônia, observa-se uma grande alteração projetada nos padrões de umidade históricos, enquanto semiárido, mostra indícios de um agravamento das condições de seca, sugerindo uma possível reclassificação de algumas regiões para a classe árida no futuro. O Cerrado, com grande relevância para o cenário agrícola nacional, também evidenciou aumento na duração do período seco e na aridez.

As projeções futuras indicam ainda uma intensificação e expansão do déficit hídrico no Nordeste brasileiro, com uma antecipação do início do período seco e uma maior severidade e abrangência das secas. Os resultados para o Cerrado indicam um atraso na chegada das chuvas e uma consequente extensão do período seco. Em contraste, bioma pampa, localizada na região Sul do Brasil, apresentou resultados divergentes do restante do Brasil, não sendo identificado aumento de secas na região. Por fim, as projeções do TWS corroboram os resultados dos demais índices, com a maioria das regiões brasileiras mostrando um declínio no estoque de água.

9. MUDANÇA DAS VAZÕES MÍNIMAS

9.1 INTRODUÇÃO

As secas representam um grande desafio para a sociedade em todo o mundo. Esses eventos impactam vários aspectos do setor de gestão de água, incluindo as vazões mínimas, que são a base para muitas políticas hídricas. Há preocupação em relação ao comportamento futuro das secas diante das mudanças climáticas, motivando a comunidade a avaliar projeções sob essa perspectiva.

Secas hidrológicas

As secas são descritas como períodos com baixa disponibilidade de água anormalmente baixa (IPCC, 2012; UNCCD, 1994; WMO, 2012). Elas se manifestam em diferentes estágios do ciclo da água (Mishra e Singh, 2010): começam com déficit de chuva – seca meteorológica –, propagam-se para o solo – seca agrícola – e para a vazão de rios e níveis de água subterrânea – seca hidrológica –, também se traduzindo em impactos sociais – seca socioeconômica.

Elas são responsáveis pela maioria dos impactos socioeconômicos dentre desastres naturais, afetando a agricultura, geração de energia, abastecimento de água e dinâmica de ecossistemas (FAO, 2021; Mishra e Singh, 2010; UNDRR, 2021). Seus efeitos são extensos e podem ser duradouros (Mishra e Singh, 2010), e geralmente são categorizados por duração, abrangência espacial e severidade. No entanto, devido à sua complexidade e aos seus efeitos compostos, são um fenômeno difícil de caracterizar (Vicente-Serrano et al., 2010; Zhang et al., 2022a). Entre os diferentes tipos, as secas hidrológicas podem ser especialmente desafiadoras.

Elas são resultado da propagação de déficits de chuva – umidade do solo – vazão. A não-linearidade do sistema causa processos de *pooling* (acumulação), atenuação, *lag* (retardo) e prolongamento dos efeitos conforme a seca se desenvolve para águas superficiais e subterrâneas (Bevacqua et al., 2021; Van Loon, 2015; Zhang et al., 2022a). Os tipos mais comuns de secas hidrológicas são Déficit de Chuva (*Rainfall Deficit*; RD) e Estação Úmida para Seca (*Wet-to-Dry-Season*; WDS). Ambos começam com a falta de chuva, e o primeiro é sustentado/recuperado pela chuva, enquanto o segundo é controlado pela temperatura (Van Loon, 2015). A sazonalidade desempenha um papel importante nas secas WDS. Ela se desenvolve a partir de chuvas abaixo do normal na estação úmida, que não recarregam os aquíferos o suficiente para sustentar a estação seca (Van Loon, 2015), tornando-a um tópico importante para avaliação.

Vazões mínimas

As vazões mínimas são comumente definidas como o fluxo de rio que ocorre durante as estações secas, e desempenham um papel crucial na manutenção de ecossistemas e no apoio a múltiplos usos socioeconômicos da água (Laaha et al., 2013; Smakhtim, 2001). Elas são influenciadas por fatores climáticos e físicos da bacia hidrográfica (Chagas et al., 2024). A estação chuvosa é responsável pela recarga de aquíferos (relacionada ao clima), e a recessão das vazões estabelece o fluxo em períodos secos (relacionado à bacia). Essas vazões fazem parte do regime sazonal dos rios e geralmente são adotadas como valores de referência na gestão de água, principalmente para políticas de outorga do recurso (e.g. Q_{95} e $Q_{7,10}$; ANA, 2022; Laaha et al., 2013).

As secas hidrológicas podem impactar aspectos importantes dessas vazões. A duração de períodos secos (i.e. períodos com vazão abaixo de um limiar estabelecido) pode influenciar as políticas de outorga de água e o armazenamento em reservatórios (ANA, 2022). Além disso, pode haver implicações ecológicas devido à alteração das vazões mínimas (e.g. mudanças na duração da intermitência – Rolls et al., 2012; Yildirim e Aksoy, 2022 – e na qualidade da água – Van Lanen et al., 2016). Como uma das principais referências para a gestão de águas, é importante avaliar os impactos das secas em relação a essa variável.

Histórico recente na América do Sul

Muitas regiões na América do Sul têm enfrentado secas severas recentemente (e.g. Amazônia – Costa e Marengo, 2023; Pantanal – Marengo et al., 2021; bacia do Prata – Naumann et al., 2022; Argentina – Vogt et al., 2018, Brasil – Cuartas et al., 2022). No Brasil, por exemplo, Cuartas et al. (2022) analisaram eventos de seca de 1981 a 2021 com base em diferentes índices relacionados a secas meteorológicas, agrícolas e hidrológicas. Os autores mostraram que esses eventos se tornaram mais frequentes e intensos nas últimas décadas, além de estarem mais disseminados pelo país. Marengo et al. (2021) avaliaram a seca de 2019/2020 no bioma Pantanal, que resultou em um período com diversos incêndios. Na década de 2010, vários reservatórios apresentaram uma diminuição significativa no volume armazenado (ANA, 2022). Mais recentemente, em 2023, a bacia Amazônica mostrou condições secas sem precedentes (Costa e Marengo, 2023), resultando em impactos socioambientais como interrupção da navegação e mortandade de botos.

A aceleração do ciclo hidrológico já foi documentada globalmente (e.g. IPCC, 2023; Wang et al., 2023) e regionalmente (Brasil; Chagas et al., 2022), com intensificação de eventos extremos, incluindo secas na maior parte do continente (Cuartas et al., 2022). Espera-se que esse efeito continue sob condições futuras (IPCC, 2023; Wang et al., 2023), reafirmando a necessidade de avaliações de secas e vazões mínimas sob

mudanças climáticas para o planejamento de estratégias de mitigação e gestão sustentável dos recursos hídricos.

Projeções de seca sob mudanças climáticas

As projeções de mudanças climáticas mostram impactos significativos no ciclo da água, com alterações na circulação atmosférica e na demanda evaporativa. Essas alterações podem levar a um aumento de eventos extremos em termos de frequência e magnitude em muitos lugares ao redor do mundo (IPCC, 2023). Projeções de seca sob mudanças climáticas foram avaliadas em alguns estudos (e.g. Lange et al., 2020; Marx et al., 2018; Prudhomme et al., 2013; Satoh et al., 2022; Wanders e Wada, 2014). No que diz respeito à América do Sul, as evidências apontam para condições mais secas, seja em termos de média (Brêda et al., 2020) ou valores mínimos (Prudhomme et al., 2013; Ribeiro Neto et al., 2016; Satoh et al., 2022; Wander e Wada, 2014). Apesar das projeções já existentes sobre essa questão, os impactos sobre as secas hidrológicas ainda carecem de uma abordagem detalhada e integrada no continente.

Objetivo

Levando em consideração essa lacuna e a importância das vazões mínimas para a gestão de recursos hídricos a longo prazo, o presente capítulo avalia as projeções de secas hidrológicas para a América do Sul sob diferentes perspectivas de vazões mínimas. Ele aborda alterações nas vazões mínimas, duração das secas e intermitência, além do momento de mudança significativa.

9.2 METODOLOGIA

Modelagem climática e hidrológica

O estudo utilizou o conjunto de 28 modelos climáticos da base NEX-GDDP-CMIP6 (Thrasher et al., 2022) e o modelo hidrológico-hidrodinâmico MGB-SA (Siqueira et al., 2018), descritos no capítulo 4 – Metodologia.

Caracterização de secas

Secas apresentam diferentes componentes, sendo eles normalmente divididos em duração, abrangência espacial e intensidade, contudo, não há uma padronização na caracterização desses aspectos (Vicente-Serrano et al., 2010; Zhang et al., 2022). Para a avaliação de períodos de seca é comum analisar vazões mínimas de referência (Laaha et al., 2013). Esse valor é importante para a gestão, pois indica a disponibilidade de água

superficial para suprir usos d'água em períodos de estiagem (Laaha et al., 2013). No contexto brasileiro, a agência reguladora utiliza Q_{95} como referência, que é a vazão igualada ou superada em 95% do tempo (ANA, 2022). Por isso, conduzimos a maior parte da nossa análise sob a perspectiva dessa métrica, nas escalas de longo termo, anual e sazonal, conforme o fluxograma e as representações gráficas da Figura 9.1 e da Figura 9.2, respectivamente.

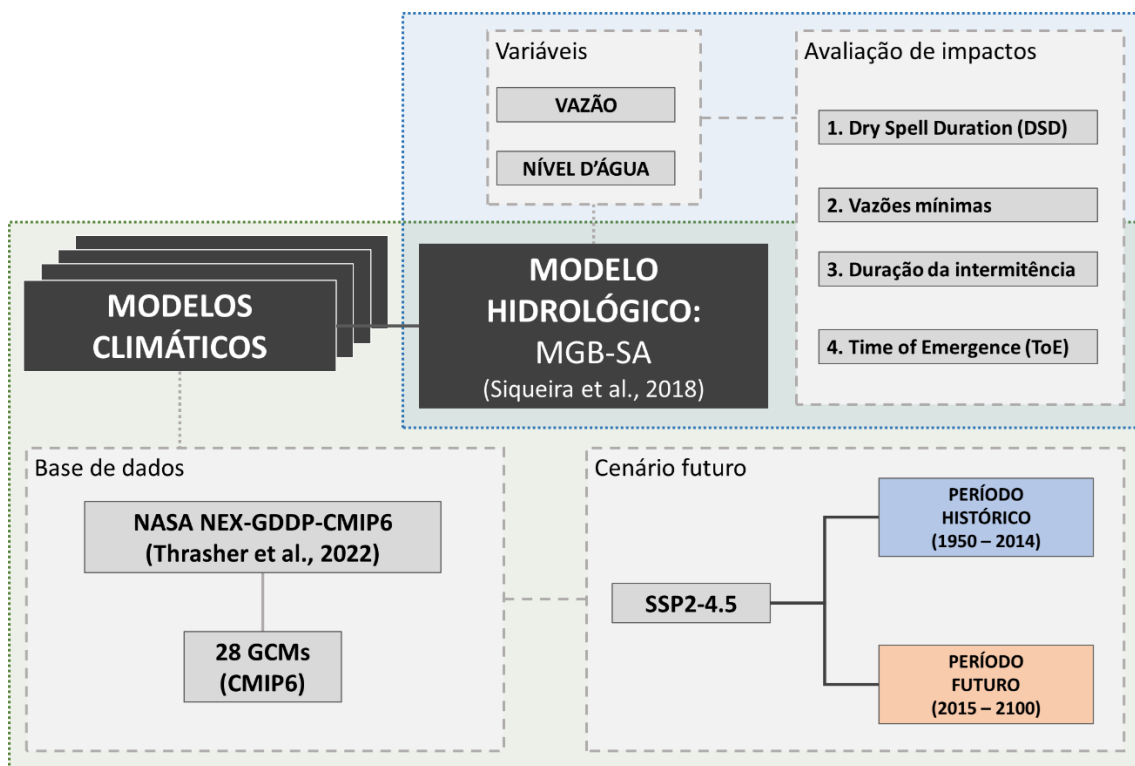


Figura 9.1. Fluxograma de avaliação de seca hidrológica. O painel verde contém informações sobre modelos climáticos (conjunto de dados e cenário avaliado). O painel azul contém informações sobre projeções climáticas hidrológicas (variáveis usadas e avaliação de seca).

Para a presente análise, nós caracterizamos secas hidrológicas a partir de 4 abordagens ligadas a vazões mínimas (Figura 9.2): (i) *Dry Spell Duration* (DSD) máximo anual, (ii) vazão mínima, (iii) duração do período anual com rio seco e (iv) *Time of Emergence* (ToE).

- i) *Dry Spell Duration (DSD)*: período máximo anual de dias consecutivos de vazão seca para períodos históricos e futuros. Foi adotado um limiar de vazão (Q_{95} de longo prazo do período histórico) abaixo do qual seria considerada uma vazão seca.
- ii) *Vazão Mínima*: alteração média da Q_{95} média sazonal (i.e. trimestral) e anual entre os períodos histórico e futuro.
- iii) *Duração da Intermitência*: número de dias com o rio seco em um ano. Para considerar o rio seco, estabelecemos um limiar de 1 cm para a profundidade da água.

iv) *Time of Emergence (ToE)*: tempo em que o sinal de mudança climática supera a variabilidade natural (John et al., 2023; Satoh et al., 2022). Determinamos o ToE comparando as Funções de Densidade de Probabilidade (FDP) ajustadas pela distribuição de Valor Extremo Generalizado (*Generalized Extreme Value*; GEV) da Q_{95} anual. Comparamos um período de referência (1951-1990) com seis períodos de 30 anos no futuro: 2020-2050, 2030-2060, 2040-2070, 2050-2080, 2060-2090 e 2070-2100. Quando as distribuições diferem em pelo menos 50%, é detectado o ToE. Essa métrica é uma forma de avaliar a dissimilaridade entre os períodos de referência e futuros (John et al., 2023; Nathan et al., 2019; Satoh et al., 2022).

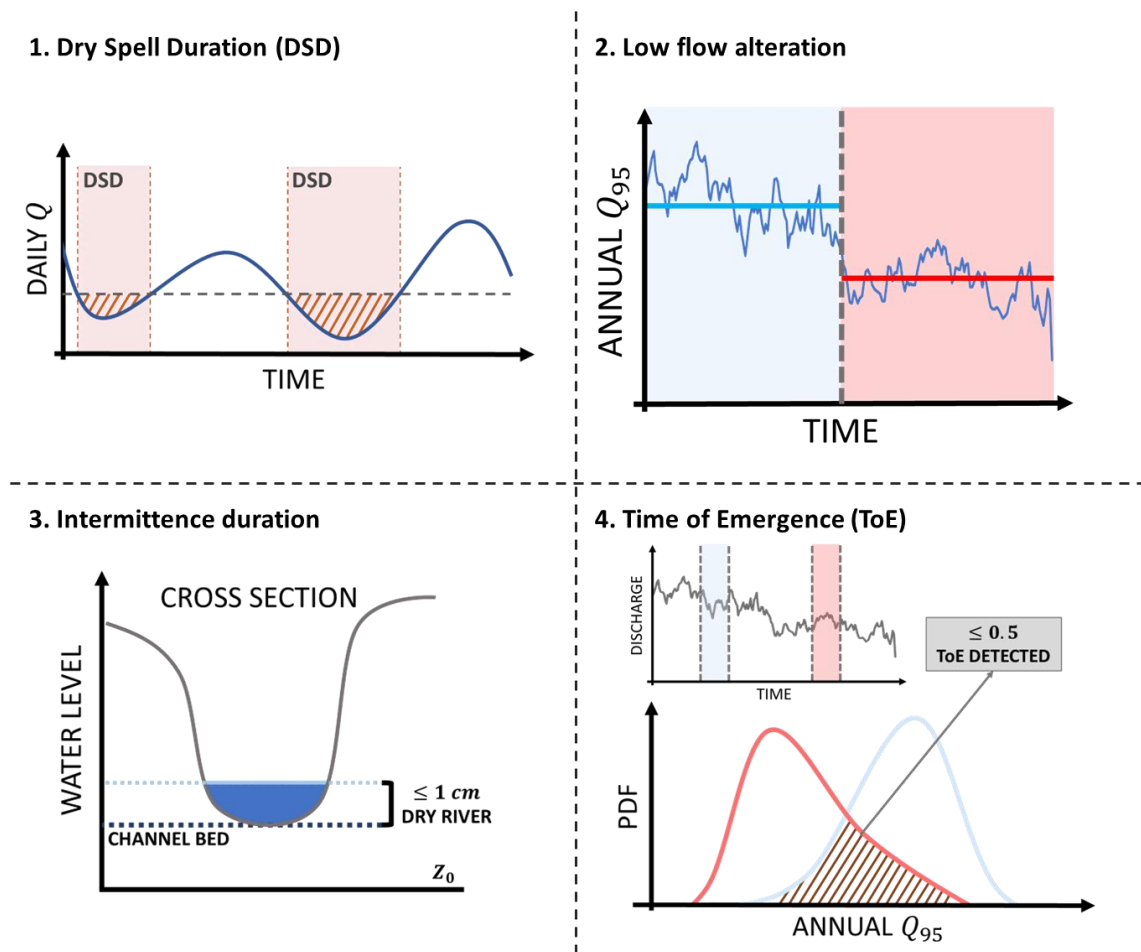


Figura 9.2. Representação esquemática da caracterização de secas hidrológicas realizada no estudo: (1) *Dry Spell Duration* (DSD), (2) alteração de vazão mínima (sazonal ou anual), (3) duração da intermitência e (4) *Time of Emergence* (ToE).

Outras duas análises foram feitas em relação a vazões mínimas: (i) déficit de volume em relação à Q_{95} de referência do período histórico e (ii) novo valor de permanência da Q_{95} de referência do histórico no futuro.

- i) Déficit de volume: foi definido a partir da Q_{95} de referência do período histórico, e se refere ao déficit durante o maior período seco anual (DSD máximo anual)
- ii) Nova permanência: a partir do valor absoluto da Q_{95} de referência (1951-2014), estimou-se seu novo valor de permanência no futuro. Ou seja, uma permanência menor que 95% indica condições mais secas, em que a vazão que antes era superada ou igualada em 95% do tempo, passa a ser superada com uma frequência menor.

Incerteza dos GCMs

A incerteza dos modelos climáticos foi considerada por meio de análise de conjunto. Os resultados na Figura 9.3a-c e na Figura 9.4a são mostrados apenas para trechos de rios nos quais havia pelo menos 2/3 (19 modelos) do conjunto de modelos climáticos (GCM) convergindo para o mesmo sinal de mudança. Na Figura 9.3d, 2/3 do conjunto apresentaram valores de ToE iguais ou mais severos do que os exibidos.

9.3 RESULTADOS

Projeções de secas hidrológicas na América do Sul apontam para impactos em grande parte do território nas próximas décadas (Figura 9.3 e Figura 9.4). A alteração da Q_{95} anual e sazonal apresentou um agravamento da seca, com mudanças mais intensas na parte superior do continente (região sul Amazônia, nordeste do Brasil e da costa norte do continente), com diminuições de 20-50% nas vazões mínimas anuais e sazonais médias (Figura 9.3a e Figura 9.4a). Esse comportamento é mantido na América do Sul central e sudeste, mas com valores mais suaves (10-20%) na bacia do Prata. Sinal positivo de mudança é restrito a poucos locais na parte sul do continente e na Amazônia Andina.

Projeções para o DSD máximo anual (Figura 9.3b) apresentam um padrão semelhante ao descrito acima, sendo o sul da Amazônia (bacias do Purus, Tapajós e Xingu) a área mais afetada. Espera-se que o DSD aumente pelo menos 50 dias nessas regiões. Essa mudança também é observada em outras grandes bacias sul-americanas (e.g. São Francisco, Prata e Tocantins-Araguaia), exceto na bacia do Uruguai, com prolongamento de 10-30 dias no DSD. Esse comportamento pode ser observado ao analisar séries temporais de DSD máximo anual (Figura 9.5). Alguns rios, como Amazonas, Tocantins, Parnaíba e São Francisco (Figura 9.5a, d, e, f) apresentaram anos com DSD máximo superior a 50 dias. No entanto, esse comportamento é muito mais acentuado no rio Xingu (Figura 9.5b), que atinge valores de até 150 dias. Isso resulta em uma alteração do DSD da ordem de 100 dias, o que pode levar a mudanças preocupantes no regime de vazões mínimas, conforme discutido adiante. É notável uma tendência de aumento do

DSD em quase todos os pontos amostrados, com destaque à foz do rio Xingu. É interessante notar que essa tendência parece estar presente mesmo no período histórico (faixa azul na Figura 9.5) na maioria dos pontos, exceto nas bacias do Orinoco e Uruguai. Quanto às projeções de duração da intermitência (Figura 9.3c), as mudanças foram restritas ao nordeste do Brasil e à bacia do Orinoco, com prolongamento de 10-30 dias.

As FDPs da Q_{95} anual, assim como as séries temporais de DSD, mostraram mudanças significativas nos rios sul-americanos. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra que algumas regiões podem seguir um regime de vazão mínima muito diferente no futuro. Por exemplo, o valor mínimo para a Q_{95} anual no rio Xingu é de $\sim 1.000 \text{ m}^3/\text{s}$ no período histórico, enquanto no futuro, ele atinge $\sim 0 \text{ m}^3/\text{s}$. Para estimar o momento e a ocorrência dessas alterações no regime de vazões mínimas, calculamos o ToE (Figura 9.3d) para a América do Sul. O padrão de impacto corresponde à alteração do DSD (Figura 9.3b), e a análise indicou que $\sim 40\%$ dos rios no continente podem ser significativamente impactados em sua frequência e magnitude de vazões mínimas devido às mudanças climáticas (2070-2100: 10%; 2060-2090: 5%; 2050-2080: 5%, 2040-2070: 4%; 2030-2060: 3%; 2020-2050: 3%).

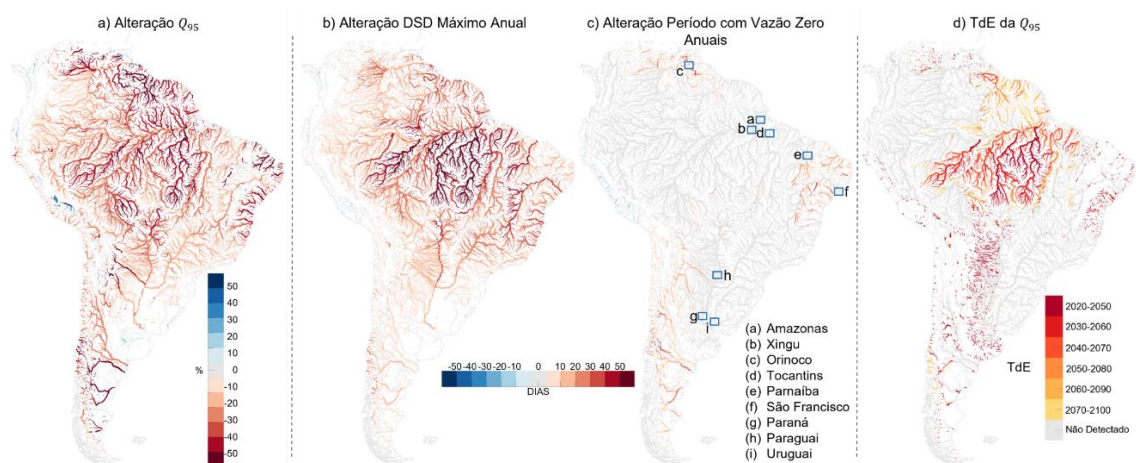


Figura 9.3. Resultados de alteração para (a) Q_{95} média anual, (b) DSD máximo médio anual e (c) duração média anual da intermitência, e (d) detecção de ToE. No mapa de duração da intermitência (d), há uma identificação para locais referenciados posteriormente no texto e na Figura 9.5 e na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

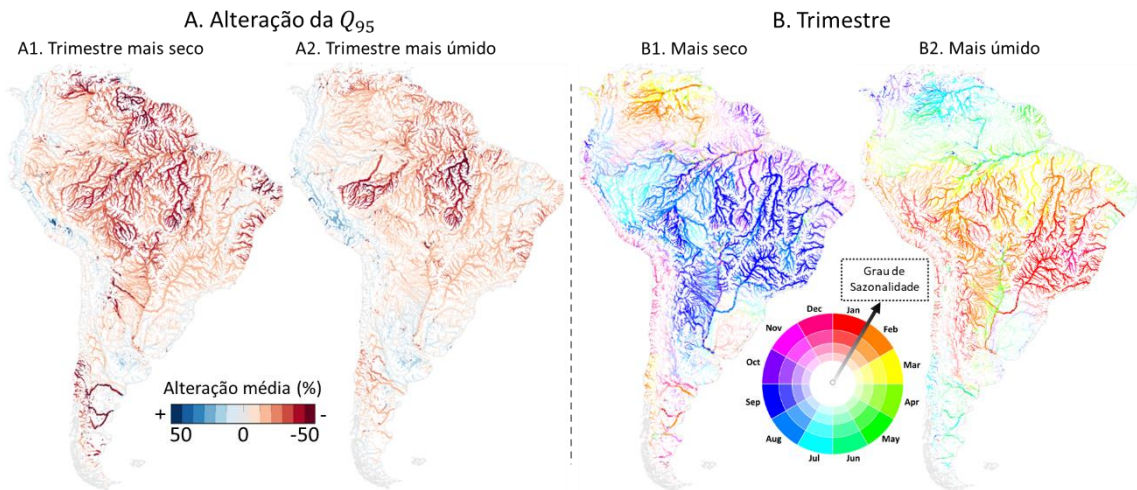


Figura 9.4. O Pannel A mostra resultados para a alteração da Q_{95} sazonal (A1 – estação seca; A2 – estação úmida). O Pannel B mostra o mês central de (B1) estação seca (B2) estação úmida. A intensidade da cor no Pannel B indica o grau de sazonalidade (quanto mais intensa, mais sazonal).

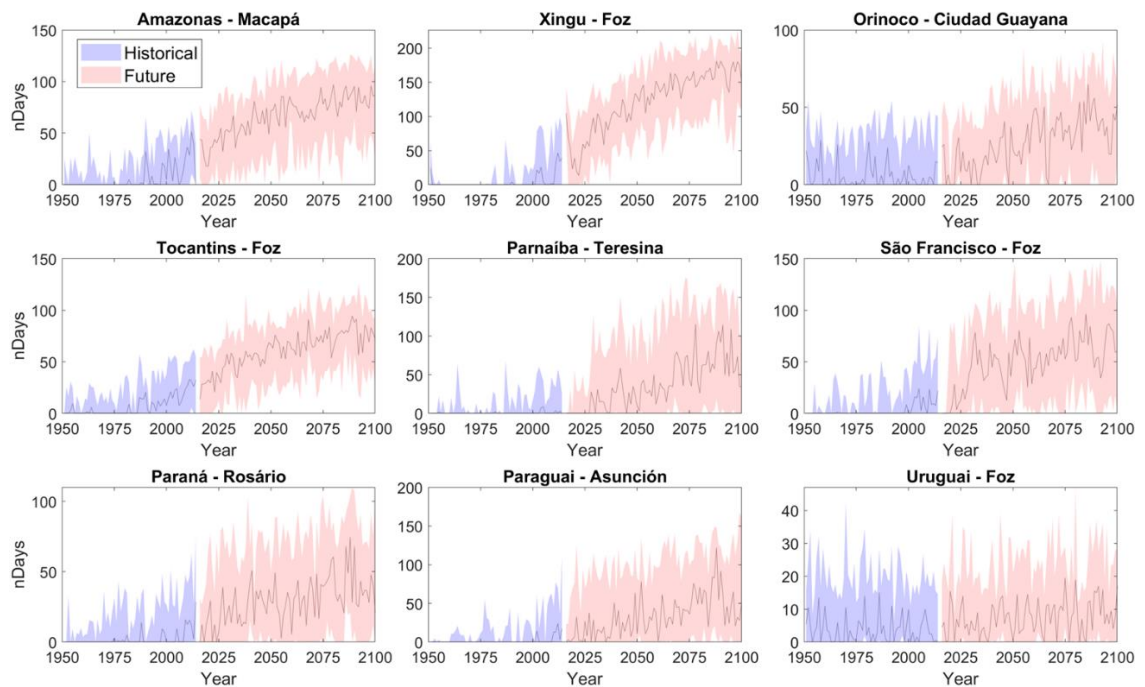


Figura 9.5. *Dry Spell Duration* (DSD) máximo anual em algumas grandes bacias sul-americanas para os períodos histórico (azul) e futuro (vermelho). A área sombreada indica a distância interquartil do conjunto de modelos climáticos, e a linha sólida indica a mediana do conjunto.

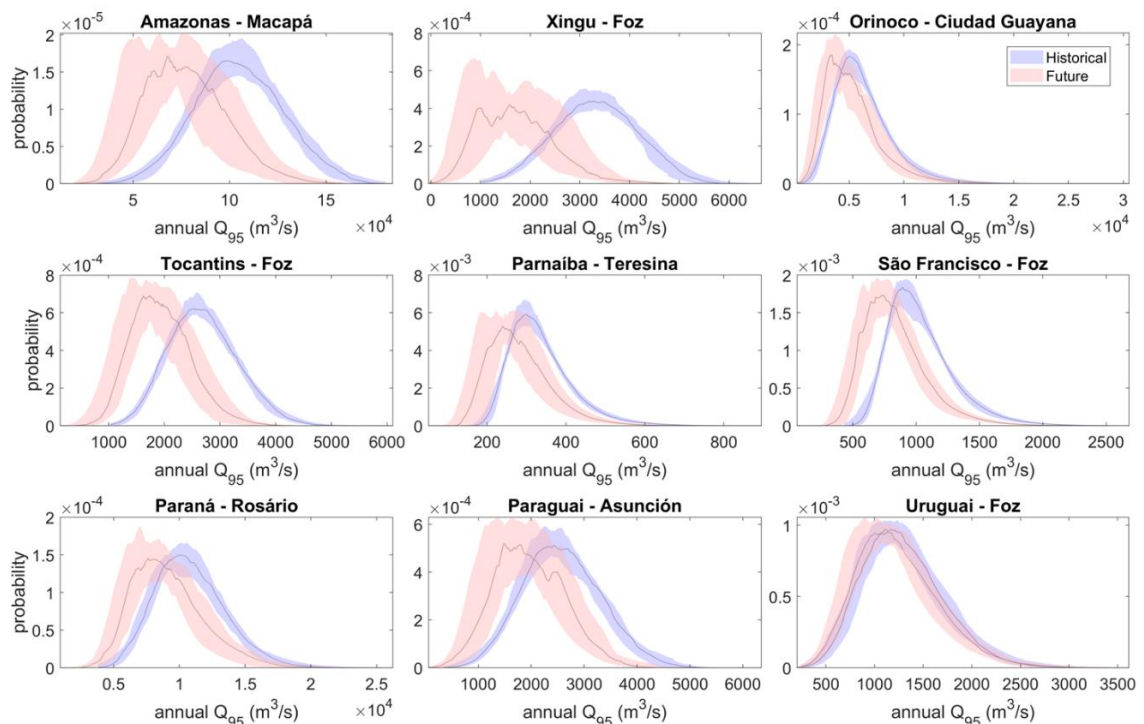


Figura 9.6. Funções de Densidade de Probabilidade (FDPs) da Q_{95} anual ajustadas para distribuição GEV em algumas grandes bacias sul-americanas para os períodos histórico (azul) e futuro (vermelho). A área sombreada indica a distância interquartil do conjunto de modelos climáticos, e a linha sólida indica a mediana do conjunto.

A alteração do déficit relativo ao DSD máximo anual (Figura 9.7a) mostra um aumento no déficit entre 100-400 % na maior parte do continente. Além de destacar as regiões mais impactadas pelas demais análises (e.g. sul da Amazônia), o mapa mostra uma mudança intensa no rio São Francisco e na costa leste brasileira, que não haviam tido tanto destaque nas outras análises. Já a permanência da Q_{95} de referência (Figura 9.7b) no período futuro (2016-2100) mostra um padrão similar com a detecção de ToE (Figura 9.3d). O resultado mostra uma diminuição da permanência na faixa de 5-15 % nas regiões central e norte do continente, mas com foco na porção sul da Amazônia, onde a vazão mínima pode passar a ter permanências de 60-70 %. Aumentos na permanência ficaram contidos em rios intermitentes no nordeste brasileiro e na região sudoeste do continente. Isso mostra que a vazão de referência utilizada no passado pode se tornar inadequada como padrão de vazão mínima no futuro.

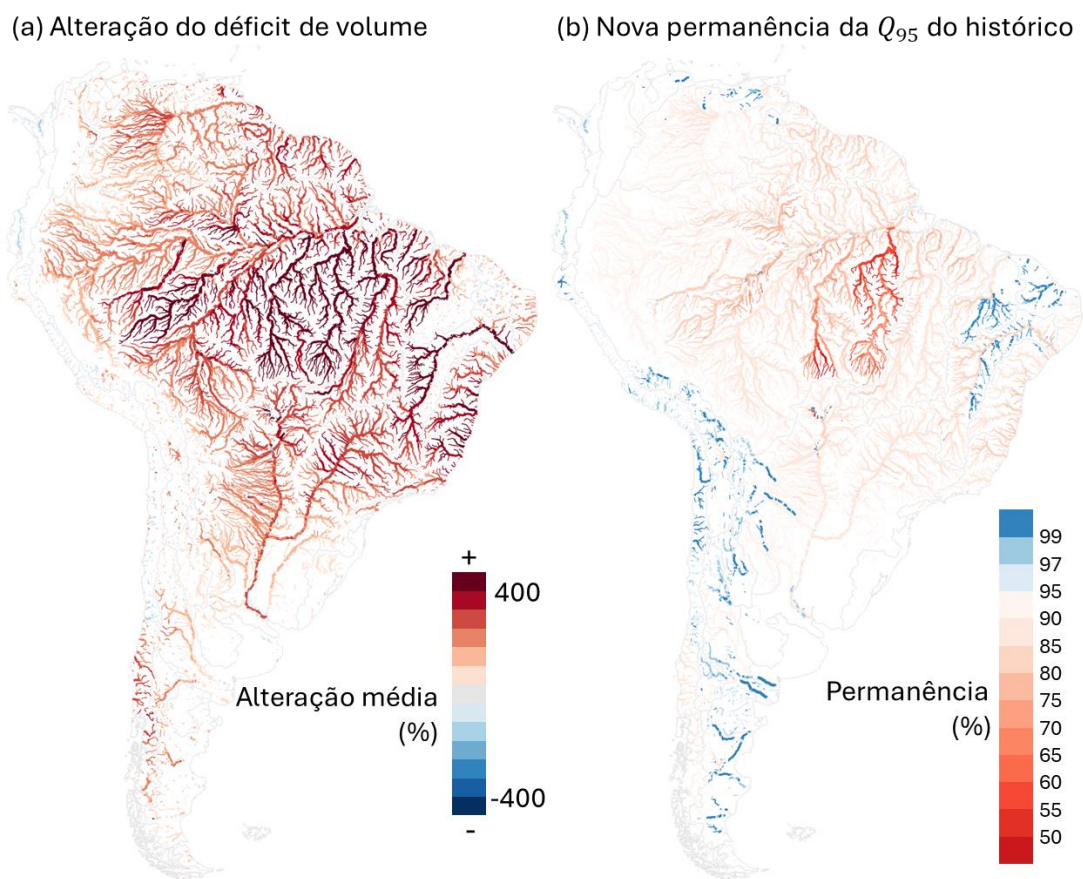


Figura 9.7. Mapas de alteração percentual de (a) déficit de volume no período seco e (b) novo valor de permanência da Q_{95} do período histórico.

9.4 DISCUSSÃO

Comparação com outras análises

Secas hidrológicas podem apresentar mudanças importantes nas próximas décadas. Estudos focados nesses eventos na América do Sul ainda são raros, especialmente em uma abordagem integrada. No entanto, evidências globais e regionais existentes sobre este tópico apoiam nossas descobertas (e.g. Cook et al., 2020; Prudhomme et al., 2013; Ribeiro Neto et al., 2016; Satoh et al., 2022). Prudhomme et al. (2013) encontraram aumentos na DSD anual na maior parte da América do Sul, com valores maiores (30-50 dias) no sul da Amazônia e na bacia do Orinoco sob um cenário de mudança climática severa (RCP 8.5 do CMIP5). Seus resultados para o nordeste (sul) do Brasil ficaram em torno de 10-30 (-5-20) dias. O escoamento superficial deve diminuir na bacia Amazônica e aumentar no sul da América do Sul (Cook et al., 2020; Ribeiro Neto et al., 2016), enquanto a umidade do solo mostrou uma diminuição mais espalhada no continente (Cook et al., 2020; Ribeiro Neto et al., 2016). Esses padrões de sinal e intensidade de mudança são semelhantes aos do presente estudo.

Aspectos das projeções de seca

As projeções climáticas indicam uma piora geral das condições de seca na América do Sul. No entanto, esse efeito é observado em diferentes níveis ao longo do continente. As áreas mais afetadas são o sul da Amazônia, o norte da América do Sul e o nordeste do Brasil. Essas regiões podem apresentar alterações mais intensas que outras para a maioria das variáveis avaliadas (magnitude de vazão mínima, DSD máximo anual e ToE). A parte central do continente (bacia do Alto Paraguai) também apresentou mudanças importantes. Nesta área, os rios mais afetados correspondem a regiões de cabeceira, com a intensidade de alteração diminuindo à jusante. O sul do Brasil (bacia do Uruguai) mostra as menores mudanças projetadas, quando os GCMs mostraram concordância. Mesmo assim, baseado em outros estudos, e no fato de que a concordância foi estabelecida sobre o sinal de alteração, a região poderia apresentar discordâncias entre valores baixos de mudança (positivos e negativos).

Quanto à análise de ToE, ela mostrou que algumas regiões podem apresentar regimes de vazões mínimas significativamente diferentes no futuro, além disso, algumas podem ser afetadas mais cedo do que outras. O padrão de ToE apresentou semelhanças com as alterações de DSD e de Q_{95} na estação úmida. Essas e outras variáveis podem ser investigadas como proxies úteis para mudanças significativas nas vazões mínimas.

Controles de secas

A seca é controlada tanto pelo clima quanto pelas características da bacia hidrográfica. A influência desses fatores sobre as secas varia de acordo com a escala espacial. Chagas et al. (2024) avaliaram diferentes aspectos dos controles de vazão mínima em bacias brasileiras. Os autores mostraram que a variável é mais influenciada pelas propriedades da bacia em escalas de pequena a grande. Em grandes escalas, as influências do clima e da bacia são mais equilibradas. O total de entrada de água no sistema (P-ET) e a sazonalidade são os principais fatores climáticos governantes, enquanto o controle da bacia está relacionado à dinâmica de armazenamento (Van Loon, 2015). A sazonalidade climática está relacionada ao DSD e enfatiza a interação do armazenamento da bacia com a vazão do rio (i.e. recessão da vazão). Além disso, secas prolongadas podem levar a mudanças nas relações chuva-vazão (Chiew et al., 2014; Fowler et al., 2022; Liu et al., 2021), mostrando assim a importância de avaliar mudanças de DSD no futuro.

O sul da Amazônia apresentou uma combinação desses efeitos. A região apresentou aumentos de DSD da ordem de meses (50 dias ou mais; Figura 9.3b), e sua recessão é rápida (30-50 dias até a metade da vazão; Chagas et al., 2024). Essa ocorrência combinada causou um decréscimo intensificado na Q_{95} da estação úmida devido à alta sazonalidade (Figura 9.4), o que poderia explicar a detecção antecipada de ToE na região (Figura 9.3d). Assim, pode-se dizer que quanto mais sazonal a região e mais rápida sua

recessão, menores decréscimos de P-ET são necessários para impactar as vazões mínimas. Isso se estende para o oposto, menor sazonalidade (e.g. sul do Brasil) e/ou recessão mais lenta (centro-oeste do Brasil), maior declínio de P-ET seria necessário para observar impactos severos. Isso se relaciona à sensibilidade da vazão a alterações do clima e do armazenamento.

Impactos futuros

As projeções de diminuição da vazão mínima para a América do Sul são preocupantes para a gestão dos recursos hídricos em muitos aspectos. Os impactos diretos mais significativos são na disponibilidade de água para captações (e.g. sistemas de abastecimento de água e irrigação) e nos níveis de água, afetando produção hidrelétrica e canais utilizados para navegação (Laaha et al., 2013), como visto recentemente na Amazônia (Costa e Marengo, 2023). Além disso, a qualidade da água também pode ser impactada, já que os rios perdem a capacidade de dissolver efluentes com a mesma eficiência de antes. Assim, muitas regiões no continente poderiam experimentar estresse nesses sistemas com mais frequência. Ao mesmo tempo, a esfera ecológica também é afetada por essas mudanças. A manutenção de vários ecossistemas depende da variabilidade da descarga (Rolls et al., 2012; Smakhtin, 2001). Tendências de diminuição de níveis d'água podem resultar em uma menor conectividade hídrica, impactando a biota local e as espécies aquáticas migratórias (Rolls et al., 2012). Como um continente com grandes áreas úmidas (Pantanal, Amazônia e Bananal), a América do Sul pode sofrer grandes impactos na dinâmica desses sistemas.

É importante ressaltar que esta análise foi conduzida apenas para o sistema natural, sem levar em conta reservatórios e atividades humanas. Esses aspectos podem influenciar as secas hidrológicas e as vazões mínimas (Chagas et al., 2022; Laaha et al., 2013; Mishra et al., 2010; Van Loon, 2015). Outra observação está relacionada ao limiar de detecção de ToE. Embora seja arbitrário, seu objetivo foi mostrar o momento de alteração significativa relativa no continente, especialmente identificando quais regiões podem sofrer mais mudanças mais cedo do que outras. Valores diferentes já poderiam configurar impactos significativos em atividades como produção agrícola e saúde de ecossistemas, o que não foi investigado no presente estudo. No entanto, nossos resultados fornecem informações qualitativas relevantes sobre as expectativas para as secas hidrológicas na América do Sul no futuro.

9.5 CONCLUSÕES

O capítulo avalia projeções futuras de secas hidrológicas na América do Sul sob mudanças climáticas. A caracterização de secas foi feita com base em vários aspectos do regime de vazões mínimas, utilizando um conjunto de modelos climáticos do CMIP6

como forçante do modelo MGB-SA. As projeções mostraram intensificação de condições secas na maior parte do continente, com maiores alterações no sul da Amazônia, norte e centro da América do Sul e nordeste do Brasil. O sul da Amazônia foi a região mais afetada, apresentando aumentos de DSD de pelo menos 50 dias e diminuições na Q_{95} anual entre 30-50%. Este local correspondeu à detecção mais antecipada de ToE (2020-2050).

No geral, pelo menos 40% dos rios da América do Sul poderão apresentar regimes de vazões mínimas significativamente mais secas até o final do século. O momento e o grau de mudança são informações relevantes para o setor de gestão de águas, fornecendo meios para alocar melhor os recursos para medidas de mitigação e resiliência. Além disso, a alteração significativa nas vazões mínimas mostrou padrões semelhantes aos decréscimos de Q_{95} na estação úmida e aos aumentos de DSD, sugerindo uma correlação com essas variáveis, o que poderia incentivar investigações futuras.

10. REFERÊNCIAS

- Abou Rafee, S. A., Uvo, C. B., Martins, J. A., Machado, C. B., & Freitas, E. D. (2022). Land Use and Cover Changes versus climate shift: Who is the main player in river discharge? A case study in the Upper Paraná River Basin. *Journal of Environmental Management*, 309, 114651.
- Adam, K.; Collischonn, W. Análise dos Impactos de Mudanças Climáticas nos Regimes de Precipitação e Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Ibicuí. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, p. 69-79, 2013.
- Adam, K., Fan, F., Pontes, P., Bravo, J., & Collischonn, W. (2015). Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná / Climate Change and Extreme Streamflows in Paraná River Basin. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(4), 999–1007.
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). (2022). *Conjuntura Recursos Hídricos Brasil, 2021*.
- AghaKouchak, A., Mirchi, A., Madani, K., Di Baldassarre, G., Nazemi, A., Alborzi, A., et al. (2021). Anthropogenic drought: Definition, challenges, and opportunities. *Reviews of Geophysics*, 59, e2019RG000683. <https://doi.org/10.1029/2019RG000683>
- Ahmadi Dehrashid, A., Valizadeh, N., Gholizadeh, M. H., Ahmadi Dehrashid, H., & Nasrollahizadeh, B. (2022). Perspectives of Climate Change. In *Climate Change: The Social and Scientific Construct* (pp. 369-388). Cham: Springer International Publishing.
- Alexandre, A.M.B., Martins, E.S. (2005). “Regionalização de Vazões Médias de Longo Período para o Estado do Ceará”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(3).
- Alfieri, L., Burek, P., Feyen, L. and Forzieri, G., 2015, 'Global warming increases the frequency of river floods in Europe', *Hydrology and Earth System Sciences* 19(5), 2247–2260 (DOI: 10.5194/hess-19-2247-2015).
- Alifu, H., Hirabayashi, Y., Imada, Y., & Shiogama, H. (2022). Enhancement of river flooding due to global warming. *Scientific Reports*, 12(1), 20687.
- Allan, R. & Soden, B. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science* 321, 481–1484 (2008).
- Allen, M.R., Ingram, W.J., 2002. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature* 418, 224–232.

- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., & Vis, M. (2021). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(1), 429-446.
- Anderson, B. J., Brunner, M. I., Slater, L. J., and Dadson, S. J.: Elasticity curves describe streamflow sensitivity to precipitation across the entire flow distribution, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2022-407>, in review, 2023.
- Andréassian, V., Coron, L., Lerat, J., & Le Moine, N. (2015). Climate elasticity of streamflow revisited—an elasticity index based on long-term hydrometeorological records. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss*, 12(4), 3645-3679.
- Aragão, L. E. O. C., Anderson, L. O., Fonseca, M. G., Rosan, T. M., Vedovato, L. B., Wagner, F. H., Silva, C. V. J., Silva Junior, C. H. L., Arai, E., Aguiar, A. P., Barlow, J., Berenguer, E., Deeter, M. N., Domingues, L. G., Gatti, L., Gloor, M., Malhi, Y., Marengo, J. A., Miller, J. B., ... Saatchi, S. (2018). 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. *Nature Communications*, 9(1), 536. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-02771-y>
- Arias, P.A., et al. 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*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–144, doi:10.1017/9781009157896.002.
- Arora, V. K. (2002). The use of the aridity index to assess climate change effect on annual runoff. *Journal of hydrology*, 265(1-4), 164-177.
- Ballarin, A. S., Sone, J. S., Gesualdo, G. C., Schwaback, D., Reis, A., Almagro, A., & Wendland, E. C. (2023). CLIMBra-Climate Change Dataset for Brazil. *Scientific Data*, 10(1), 47.
- Barreto, G. A. R., Buarque, D. C., Collischonn, W., & Föeger, L. B. (2023). Avaliação da performance do modelo hidrológico MGB em épocas de estiagem: estudo de caso para a bacia hidrográfica do Rio Doce. In *Congreso Latinoamericano de Hidraulica (30.: 2022: [Foz do Iguaçu])*. Anales del XXX Congreso Latinoamericano de Hidráulica 2022: volúmen 3: hidráulica de ríos [recurso eletrônico]. Madrid: IAHR, 2023.
- Bartiko, D., Oliveira, D. Y., Bonumá, N. B., & Chaffe, P. L. B. (2019). Spatial and seasonal patterns of flood change across Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, 64(9), 1071-1079.

- Bassiouni, M., Vogel, R. M., & Archfield, S. A. (2016). Panel regressions to estimate low-flow response to rainfall variability in ungaged basins. *Water Resources Research*, 52(12), 9470-9494.
- Bayer, D. M. (2014). Efeitos das mudanças de uso da terra no regime hidrológico de bacias de grande escala. Tese Doutorado. IPH UFRGS
- Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1), 1–12.
- Beniston, M., Stephenson, D.B., 2004. Extreme climatic events and their evolution under changing climatic conditions. *Glob Planet Change* 44, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.06.001>
- Bertola, M., Viglione, A., Vorogushyn, S., Lun, D., Merz, B., & Blöschl, G. (2021). Do small and large floods have the same drivers of change? A regional attribution analysis in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(3), 1347-1364.
- Bérubé, S., Brissette, F., & Arsenault, R. (2022). Optimal hydrological model calibration strategy for climate change impact studies. *Journal of Hydrologic Engineering*, 27(3), 04021053.
- Bevacqua, A. G., Chaffe, P. L. B., Chagas, V. B. P., & AghaKouchak, A. (2021). Spatial and temporal patterns of propagation from meteorological to hydrological droughts in Brazil. *Journal of Hydrology*, 603. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126902>
- Blöschl, G., Bierkens, M. F., Chambel, A., Cudennec, C., Destouni, G., Fiori, A., ... & Renner, M. (2019). Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)—a community perspective. *Hydrological sciences journal*, 64(10), 1141-1158.
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A., Parajka, J., Merz, B., ... & Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108-111.
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., & Savenije, H. (Eds.). (2013). *Runoff prediction in ungaged basins: synthesis across processes, places and scales*. Cambridge University Press.
- Blöschl, G.: Three hypotheses on changing river flood hazards, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 26, 5015–5033, <https://doi.org/10.5194/hess-26-5015-2022>, 2022.
- Booij, M. J., Huisjes, M., & Hoekstra, A. Y. (2006). Uncertainty in climate change impacts on low flows. In S. Demuth, A. Gustard, E. Planos, F. Scatena, & E. Servat (Eds.),

Climate variability and change: Hydrological impacts. Proceedings of the fifth FRIEND World Conference Havana Cuba, 27 November -1 December 2006. IAHS publication 308 (pp. 401-406). (IAHS publication; No. 308). IAHS Press. <http://iahs.info/redbooks/a308/308068.htm>

Borges De Amorim, P.; Chaffe, P. B. (2019) Towards a comprehensive characterization of evidence in synthesis assessments: the climate change impacts on the Brazilian water resources. *Climatic Change*, v. Online First, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02430-9>

Borges De Amorim, P.; Silva De Souza, K. I.; Chaffe, P. L. B. (2020) A web-based tool for synthesis assessments of the impacts of climate change on water resources. *Environmental Modelling & Software*, v. Online First, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104848>

Bravo, J. M., Collischonn, W., da Paz, A. R., Allasia, D., & Domecq, F. (2014). Impact of projected climate change on hydrologic regime of the Upper Paraguay River basin. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0816-2>

Brêda, J. P. L. F.; Paiva, R.C.D. et al., (2020). Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *CLIMATIC CHANGE*, v. 158, p. 1-20, 2020.

Brêda, J. P. L., de Paiva, R. C. D., Siqueira, V. A., & Collischonn, W. (2023). Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers. *Journal of Hydrology*, 619, 129284.

Brunner, L., Pendergrass, A. G., Lehner, F., Merrifield, A. L., Lorenz, R., & Knutti, R. (2020). Reduced global warming from CMIP6 projections when weighting models by performance and independence. *Earth System Dynamics*, 11(4), 995-1012.

Brunner, M. I., Melsen, L. A., Newman, A. J., Wood, A. W., & Clark, M. P. (2020). Future streamflow regime changes in the United States: assessment using functional classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(8), 3951-3966.

Brunner, M. I., Slater, L., Tallaksen, L. M., & Clark, M. (2021). Challenges in modeling and predicting floods and droughts: A review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 8(3), e1520.

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., ... Ha, M. (2023). IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the

- Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (P. Arias, M. Bustamante, I. Elgizouli, G. Flato, M. Howden, C. Méndez-Vallejo, J. J. Pereira, R. Pichs-Madruga, S. K. Rose, Y. Saheb, R. Sánchez Rodríguez, D. Ürge-Vorsatz, C. Xiao, N. Yassaa, J. Romero, J. Kim, E. F. Haites, Y. Jung, R. Stavins, ... C. Péan, Eds.). <https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
- Ceron, W. L., Kayano, M. T., Andreoli, R. V., Avila-Diaz, A., Ayes, I., Freitas, E. D., ... & Souza, R. A. (2021). Recent intensification of extreme precipitation events in the La Plata Basin in Southern South America (1981–2018). *Atmospheric Research*, 249, 105299.
- Chagas, V.B.P., Chaffe, P.L.B. & Blöschl, G. (2022) Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nat Commun* 13, 5136. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32580-x>
- Chagas, V. B. P., Chaffe, P. L. B., & Blöschl, G. (2024). Regional Low Flow Hydrology: Model Development and Evaluation. *Water Resources Research*, 60(2). <https://doi.org/10.1029/2023WR035063>
- Chen, G., Norris, J., Neelin, J. D., Lu, J., Leung, L. R., & Sakaguchi, K. (2019). Thermodynamic and dynamic mechanisms for hydrological cycle intensification over the full probability distribution of precipitation events. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 76(2), 497-516.
- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., et al. (2014). Evaluation of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. *American Journal of Climate Change*, 03(05), 438–454. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35039>
- Clark, E. A. et al. (2015) Continental runoff into the oceans (1950-2008). *Journal of Hydrometeorology*, v. 16, n. 4, p. 1502–1520.
- Collischonn, W., & Dornelles, F. (2022). *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1, 336.
- Collischonn, W., Jardim, P. F., & Fontana, R. B. (2021). Redução da vazão no Rio Carinhanha nos últimos anos pode ser explicada pela redução da chuva. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (24.: 2021: Belo Horizonte)*. Anais [recurso eletrônico]. Porto Alegre: ABRHidro, 2021.
- Collischonn, W., Tucci, C. E. M., & Clarke, R. T. (2001). Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: Part of a wider phenomenon of

climate change? *Journal of Hydrology*, 245 (1–4).
[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00348-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00348-1)

Conway, D. and Hulme, M. 1996. The impacts of climate variability and future climate change in the Nile basin on water resources in Egypt. *International Journal of Water Resources Development* 12(3): 277-296.

Cook, B. I., Mankin, J. S., & Anchukaitis, K. J. (2018). Climate Change and Drought: From Past to Future. *Current Climate Change Reports*, 4(2), 164–179.
<https://doi.org/10.1007/s40641-018-0093-2>

Coron, L., Andréassian, V., Perrin, C., Lerat, J., Vaze, J., Bourqui, M., & Hendrickx, F. (2012). Crash testing hydrological models in contrasted climate conditions: An experiment on 216 Australian catchments. *Water Resources Research*, 48(5).

Correa, W. D. S. C., Soares, W. R., AYLAS, G. Y. R., Junior, N. C. R., MARENGO, J. A., Chou, S. C., & Nobre, C. (2022). Avaliação das simulações de temperatura e precipitação de um subconjunto de modelos do CMIP6 para o Brasil. *Derbyana*, 43, e774-e774.

Costa, F., & Marengo, J. (2023). Statement on the 2023 Amazon Drought and its unforeseen consequences. The Amazon we want: Science Panel for the Amazon.
https://www.theamazonwewant.org/spa_publication/statement-on-the-2023-amazon-drought/

CPTEC/Inpe, & Inmet. (2023). Nota técnica conjunta CPTEC/Inpe e Inmet: Condições de déficit de chuva na Amazônia.

Cuartas, L. A., Cunha, A. P. M. D. A., Alves, J. A., Parra, L. M. P., Deusdará-Leal, K., Costa, L. C. O., Molina, R. D., Amore, D., Broedel, E., Seluchi, M. E., Cunningham, C., Alvalá, R. C. D. S., & Marengo, J. A. (2022). Recent Hydrological Droughts in Brazil and Their Impact on Hydropower Generation. *Water (Switzerland)*, 14(4).
<https://doi.org/10.3390/w14040601>

Cunha, A. P. M., Zeri, M., Deusdará Leal, K., Costa, L., Cuartas, L. A., Marengo, J. A., ... & Ribeiro-Neto, G. (2019). Extreme drought events over Brazil from 2011 to 2019. *Atmosphere*, 10(11), 642.

Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(1), 45-65.

Deb, P., & Kiem, A. S. (2020). Evaluation of rainfall–runoff model performance under non-stationary hydroclimatic conditions. *Hydrological Sciences Journal*, 65(10), 1667-1684.

- Debortoli, N. S., Camarinha, P. I. M., Marengo, J. A., & Rodrigues, R. R. (2017). An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. *Natural Hazards*, 86(2), 557–582. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2705-2>
- Dereczynski, C., Chou, S. C., Lyra, A., Sondermann, M., Regoto, P., Tavares, P., ... & de los Milagros Skansi, M. (2020). Downscaling of climate extremes over South America—Part I: Model evaluation in the reference climate. *Weather and Climate Extremes*, 29, 100273.
- DKRZ – Deutsches Klimarechenzentrum. The SSP Scenarios. Disponível em: <https://www.dkrz.de/en/communication/climate-simulations/cmip6-en/the-ssp-scenarios> . Acesso em: 09 set 2022.
- Do, H. X., Westra, S., & Leonard, M. (2017). A global-scale investigation of trends in annual maximum streamflow. *Journal of hydrology*, 552, 28-43.
- Do, H. X., Zhao, F., Westra, S., Leonard, M., Gudmundsson, L., Boulange, J. E. S., ... & Wada, Y. (2020). Historical and future changes in global flood magnitude: evidence from a model–observation investigation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(3), 1543-1564.
- Donat, M. G., Angéilil, O., & Ukkola, A. M. (2019). Intensification of precipitation extremes in the world's humid and water-limited regions. *Environmental Research Letters*, 14(6), 065003.
- Donat, M. G., Lowry, A. L., Alexander, L. V., O’Gorman, P. A., & Maher, N. (2016). More extreme precipitation in the world's dry and wet regions. *Nature Climate Change*, 6(5), 508-513.
- Doyle, M. E., & Barros, V. R. (2011). Attribution of the river flow growth in the Plata Basin. *International Journal of Climatology*, 31(15), 2234-2248.
- Drought in the Anthropocene. Anne F. Van Loon et al. *Nature Geoscience* volume 9, pages 89–91 (2016).
- Duethmann, D., Blöschl, G., & Parajka, J. (2020). Why does a conceptual hydrological model fail to correctly predict discharge changes in response to climate change?. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(7), 3493-3511.
- EM-DAT. (2023). The International Disaster Database. Acesso em maio de 2023, disponível em EM-DAT: www.emdat.be

- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Eyring, V., P.M. Cox, G.M. Flato, P.J. Gleckler, G. Abramowitz, P. Caldwell, W.D. Collins, B.K. Gier, A.D. Hall, F.M. Hoffman, G.C. Hurtt, A. Jahn, C.D. Jones, S.A. Klein, J.P. Krasting, L. Kwiatkowski, R. Lorenz, E. Maloney, G.A. Meehl, A.G. Pendergrass, R. Pincus, A.C. Ruane, J.L. Russell, B.M. Sanderson, B.D. Santer, S.C. Sherwood, I.R. Simpson, R.J. Stouffer, and M.S. Williamson, 2019: Taking climate model evaluation to the next level. *Nat. Clim. Change*, 9, no. 2, 102-110, doi:10.1038/s41558-018-0355-y.
- Ferreira, G. W. S., & Reboita, M. S. (2022). A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast. *Atmosphere*, 13(873).
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., Braconnot, P., Chou, S. C., Collins, W., et al. (2013). Evaluation of Climate Models. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*
- Fleischmann, A. S., Papa, F., Hamilton, S. K., Fassoni-Andrade, A., Wongchuig, S., Espinoza, J. C., ... & Collischonn, W. (2023). Increased floodplain inundation in the Amazon since 1980. *Environmental Research Letters*, 18(3), 034024.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). The impact of disasters and crises on agriculture and food security: 2021. *The Impact of Disasters and Crises on Agriculture and Food Security: 2021*. <https://doi.org/10.4060/CB3673EN>
- Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), 1547–1578. <https://doi.org/10.1002/joc.1556>
- Fowler, K. J., Coxon, G., Freer, J. E., Knoben, W. J., Peel, M. C., Wagener, T., ... & Zhang, L. (2021). Towards more realistic runoff projections by removing limits on simulated soil moisture deficit. *Journal of Hydrology*, 600, 126505.
- Fowler, K. J., Peel, M. C., Western, A. W., Zhang, L., & Peterson, T. J. (2016). Simulating runoff under changing climatic conditions: Revisiting an apparent deficiency of conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 52(3), 1820-1846.

- Fowler, K., Coxon, G., Freer, J., Peel, M., Wagener, T., Western, A., ... & Zhang, L. (2018a). Simulating runoff under changing climatic conditions: A framework for model improvement. *Water Resources Research*, 54(12), 9812-9832.
- Fowler, K., Knoben, W., Peel, M., Peterson, T., Ryu, D., Saft, M., ... & Western, A. (2020). Many commonly used rainfall-runoff models lack long, slow dynamics: Implications for runoff projections. *Water Resources Research*, 56(5), e2019WR025286.
- Fowler, K., Peel, M., Western, A., & Zhang, L. (2018b). Improved rainfall-runoff calibration for drying climate: Choice of objective function. *Water Resources Research*, 54(5), 3392-3408.
- Freitas, G. N. (2020). São Paulo drought: trends in streamflow and their relationship to climate and human-induced change in Cantareira watershed, Southeast Brazil. *Hydrology Research*, 51(4), 750-767.
- Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22, 3–11.
- Giorgi, F., C. Jones, G.R. Asrar, (2009) Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *World Meteorol. Org. (WMO) Bull.*, 58 (2009), p. 175.
- Giroto, M., & Rodell, M. (2019). Terrestrial water storage. In *Extreme Hydroclimatic Events and Multivariate Hazards in a Changing Environment* (pp. 41–64). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814899-0.00002-X>
- Gleckler, P. J.; Taylor, K. E.; Doutriaux, C. (2008) Performance metrics for climate models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 113, n. 6, p. 1–20.
- Gosling, S. N., & Arnell, N. W. (2016). A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. *Climatic Change*, 134, 371-385.
- 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.
- Gu, D., Andreev, K., & Dupre, M. E. (2021). Major Trends in Population Growth Around the World.
- Gudmundsson, L., Boulange, J., Do, H. X., Gosling, S. N., Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G., ... & Zhao, F. (2021). Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. *Science*, 371(6534), 1159-1162.

- Gupta, Hoshin V., Kling, Harald, Yilmaz, Koray K., Martinez, Guillermo F., “Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling”, *Journal of Hydrology*, Volume 377, Issues 1–2, 2009, Pages 80-91, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.
- He, Y., Manful, D., Warren, R., Forstehäusler, N., Osborn, T. J., Price, J., ... & Yamazaki, D. (2022). Quantification of impacts between 1.5 and 4 C of global warming on flooding risks in six countries. *Climatic Change*, 170(1-2), 15.
- Held, I. M., & Soden, B. J. (2006). Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming.
- Her, Y., Yoo, Sh., Cho, J. et al. “Uncertainty in hydrological analysis of climate change: multi-parameter vs. multi-GCM ensemble predictions”. *Sci Rep* 9, 4974 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41334-7>
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., ... & Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature climate change*, 3(9), 816-821.
- Hirabayashi, Y., Tanoue, M., Sasaki, O., Zhou, X., & Yamazaki, D. (2021). Global exposure to flooding from the new CMIP6 climate model projections. *Scientific reports*, 11(1), 3740.
- Hodgkins, G. A., Dudley, R. W., Archfield, S. A., & Renard, B. (2019). Effects of climate, regulation, and urbanization on historical flood trends in the United States. *Journal of Hydrology*, 573, 697-709.
- Hulsman, P., Hrachowitz, M., & Savenije, H. H. (2021). Improving the representation of long-term storage variations with conceptual hydrological models in data-scarce regions. *Water Resources Research*, 57(4), e2020WR028837.
- Huntington, T. G. (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology*, 319(1-4), 83-95.
- Huntington, T. G. (2010). Climate warming-induced intensification of the hydrologic cycle: an assessment of the published record and potential impacts on agriculture. *Advances in agronomy*, 109, 1-53.
- ICOLD, C. I. G. B. (2022). Dam Surveillance-Lessons Learnt from Case Histories: Bulletin 180. Taylor & Francis Group.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2012). Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press; 2014. doi:10.1017/CBO9781107415324
- Jakob Themeßl, M., Gobiet, A., & Leuprecht, A. (2010). Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, 31(10), 1530–1544. doi:10.1002/joc.2168
- 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. *Scientific Reports*, 6(1), 33130. <https://doi.org/10.1038/srep33130>
- John, A., Nathan, R., Horne, A., Fowler, K., Stewardson, M., Peel, M., & Angus Webb, J. (2023). The time of emergence of climate-induced hydrologic change in Australian rivers. *Journal of Hydrology*, 619, 129371. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2023.129371>
- Jongman, B., Ward, P. J., & Aerts, J. C. J. H. (2012). Global exposure to river and coastal flooding: Long term trends and changes. *Global Environmental Change*, 22(4), 823–835. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.07.004>
- Junk, W. J., Bayley, P. B., & Sparks, R. E. (1989). The flood pulse concept in river-floodplain systems. *Canadian special publication of fisheries and aquatic sciences*, 106(1), 110-127.
- Hakala et al. 2019. Hydrological Modeling of Climate Change Impacts. In *Encyclopedia of Water: Science, Technology, and Society*, edited by Patricia A. Maurice. Copyright © 2019 John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10.1002/9781119300762.wsts0062
- Koutsoyiannis, D. (2020) Revisiting the global hydrological cycle: is it intensifying?, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 24, 3899–3932, <https://doi.org/10.5194/hess-24-3899-2020>.
- Kundzewicz, Z. W., Kanae, S., Seneviratne, S. I., Handmer, J., Nicholls, N., Peduzzi, P., ... & Sherstyukov, B. (2014). Flood risk and climate change: global and regional perspectives. *Hydrological Sciences Journal*, 59(1), 1-28.

- Laaha, G., Demuth, S., Hisdal, H., Kroll, C. N., van Lanen, H. A., Nester, T., ... & Young, A. (2013). Prediction of low flows in ungauged basins. In *Runoff Prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales* (pp. 163-188). Cambridge University Press.
- Lange, S., Volkholz, J., Geiger, T., Zhao, F., Vega, I., Veldkamp, T., Reyer, C. P. O., Warszawski, L., Huber, V., Jägermeyr, J., Schewe, J., Bresch, D. N., Büchner, M., Chang, J., Ciais, P., Dury, M., Emanuel, K., Folberth, C., Gerten, D., ... Frieler, K. (2020). Projecting Exposure to Extreme Climate Impact Events Across Six Event Categories and Three Spatial Scales. *Earth's Future*, 8(12). <https://doi.org/10.1029/2020EF001616>
- Lee, E., Livino, A., Han, S. C., Zhang, K., Briscoe, J., Kelman, J., & Moorcroft, P. (2018). Land cover change explains the increasing discharge of the Paraná River. *Regional environmental change*, 18(6), 1871-1881.
- Lee, E., Moorcroft, P. R., Livino, A., & Briscoe, J. (2013). The Parana paradox: can a model explain the decadal impacts of climate variability and land-cover change?. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2013, pp. GC11D-1028).
- Lee, H. et al. (2023) Synthesis Report of the IPCC Sixth Assessment Report (AR6) Summary for Policy makers. [s.l.] Panmao Zhai.
- Levine, M. D., & Steele, R. V. (2021). Climate change: What we know and what is to be done. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 10(1). <https://doi.org/10.1002/wene.388>
- 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. *Environmental Research Letters*, 17(1), 015005. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac462e>
- Lima, J. W. M. (Org.); Collischonn, W. (Org.); Marengo, J. A. (Org.) (2014) *Efeitos das mudanças climáticas na geração de energia elétrica*. 1. ed. São Paulo: Hunter, 2014. v. 1. 357p.
- Lima, L. B., Cribari-Neto, F., & Lima-Junior, D. P. (2022). Dynamic quantile regression for trend analysis of streamflow time series. *River Research and Applications*, 38(6), 1051-1060.
- Lins, H. F., and Cohn, T. A. (2003). "Floods in the greenhouse: Spinning the right tale, in applications in flood risk assessment." *Palaeofloods, historical data and climatic*

variability, V. R. Thorndycraft, et al., eds., Cent. de Cienc. Medioambientales, Madrid, 263–268

- Liu, Y., Liu, P., Zhang, L., Zhang, X., Zhang, Y., & Cheng, L. (2021). Detecting and attributing drought-induced changes in catchment hydrological behaviours in a southeastern Australia catchment using a data assimilation method. *Hydrological Processes*, 35(7), e14289. <https://doi.org/10.1002/HYP.14289>
- Lucas, M. C., Kublik, N., Rodrigues, D. B., Meira Neto, A. A., Almagro, A., Melo, D. D. C., ... & Oliveira, P. T. S. (2020). Significant baseflow reduction in the São Francisco river basin. *Water*, 13(1), 2.
- Luiz-Silva, W., Regoto, P., de Vasconcellos, C. F., Garcia, K. C., & Guimarães, F. B. F. (2022). A comprehensive analysis of observed and projected climate extremes of temperature and precipitation in Belo Monte Hydropower Plant-eastern Amazon, Brazil. *International Journal of Climatology*, 42(16), 9710-9729.
- Luiz-Silva, W., Xavier, L. N. R., Maceira, M. E. P., & Rotunno, O. C. (2019). Climatological and hydrological patterns and verified trends in precipitation and streamflow in the basins of Brazilian hydroelectric plants. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 353-371.
- Madakumbura, G. D., Kim, H., Utsumi, N., Shiogama, H., Fischer, E. M., Seland, Ø., ... & Oki, T. (2019). Event-to-event intensification of the hydrologic cycle from 1.5 C to a 2 C warmer world. *Scientific Reports*, 9(1), 1-7.
- Majone, B., Avesani, D., Zulian, P., Fiori, A., & Bellin, A. (2022). Analysis of high streamflow extremes in climate change studies: how do we calibrate hydrological models? *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(14), 3863-3883.
- 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 Ângulo, E., Almeida, E. K., Kazmierczak, M. L., Mateus, N. P. A., Silva, R. C., & Bender, F. (2021). Extreme Drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: Characterization, Causes, and Impacts. *Frontiers in Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.639204>
- Marengo Orsini, J. A., Alves, L. M., Alvala, R. C. S., Cunha, A. P., Brito, S., & Moraes, O. L. L. (2017). Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. *Anais Da Academia Brasileira de Ciências*, 90(2), 1973–1985. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>
- Marengo, J. A., & Espinoza, J. C. (2016). Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, 36(3), 1033–1050. <https://doi.org/10.1002/JOC.4420>

- Marengo, J. A., Jimenez, J. C., Espinoza, J. C., Cunha, A. P., & Aragão, L. E. (2022). Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. *Scientific Reports*, 12(1), 457.
- Markonis, Y., Papalexiou, S. M., Martinkova, M., & Hanel, M. (2019). Assessment of water cycle intensification over land using a multisource global gridded precipitation dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(21), 11175-11187.
- Marx, A., Kumar, R., Thober, S., Rakovec, O., Wanders, N., Zink, M., ... Samaniego, L. (2018). Climate change alters low flows in Europe under global warming of 1.5, 2, and 3 C. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), 1017–1032. doi:10.5194/hess-22-1017-2018.
- Mearns, L. O., Gutowski, W., Jones, R., Leung, R., McGinnis, S., Nunes, A., & Qian, Y. (2009). A Regional Climate Change Assessment Program for North America. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 90(36), 311–311. doi:10.1029/2009eo360002
- Medeiros, F. J., de Oliveira, C. P., & Avila-Diaz, A. (2022). Evaluation of extreme precipitation climate indices and their projected changes for Brazil: From CMIP3 to CMIP6. *Weather and Climate Extremes*, 38, 100511.
- Meresa, H., Tischbein, B., & Mekonnen, T. (2022). Climate change impact on extreme precipitation and peak flood magnitude and frequency: observations from CMIP6 and hydrological models. *Natural Hazards*, 111(3), 2649-2679. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05152-3>
- Merz, B., Blöschl, G., Vorogushyn, S., Dottori, F., Aerts, J. C., Bates, P., ... & Macdonald, E. (2021). Causes, impacts and patterns of disastrous river floods. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(9), 592-609. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00195-3>
- Milly, P. C., Betancourt, J., Falkenmark, M., Hirsch, R. M., Kundzewicz, Z. W., Lettenmaier, D. P., ... & Krysanova, V. (2015). On critiques of “Stationarity is dead: Whither water management?”. *Water Resources Research*, 51(9), 7785-7789.
- Miranda, P. T., de Paiva, R. C. D., de Araújo Gama, C. H., & Brêda, J. P. L. F. (2023). River discharge in South America: agreement and contradictions between recent alteration and projected changes. *RBRH*, 28, e18. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.282320220085>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. In *Journal of Hydrology* (Vol. 391, Issues 1–2, pp. 202–216).

- <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>Mishra, A., Mukherjee, S., Merz, B., Singh, V. P., Wright, D. B., Villarini, G., ... & Stedinger, J. R. (2022). An overview of flood concepts, challenges, and future directions. *Journal of hydrologic engineering*, 27(6), 03122001.
- Nathan, R. J., McMahon, T. A., Peel, M. C., & Horne, A. (2019). Assessing the degree of hydrologic stress due to climate change. *Climatic Change*, 156(1–2), 87–104. <https://doi.org/10.1007/S10584-019-02497-4>
- 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
- Naumann, G., Podestá, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera D., Acosta Navarro, J., Arias Muñoz, C., Barbosa, P., Cammalleri, C., Cuartas, A., de Estrada, M., de Felice, M., de Jager, A., Escobar, C., Fioravanti, G., Giordano, L., Harst Essenfelder, A., Hidalgo, C., Leal de Moraes, O., ... Vera, C. (2022). Extreme and long-term drought in the La Plata Basin: event evolution and impact assessment until September 2022 - Brazil | ReliefWeb. <https://reliefweb.int/report/brazil/extreme-and-long-term-drought-la-plata-basin-event-evolution-and-impact-assessment-until-september-2022>
- Nóbrega, M. T. ; COLLISCHONN, W. ; TUCCI, C. E. M. ; PAZ, A. R. . Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, p. 585-595, 2011.
- O’Connell, P. E., Koutsoyiannis, D., Lins, H. F., Markonis, Y., Montanari, A., & Cohn, T. (2016). The scientific legacy of Harold Edwin Hurst (1880–1978). *Hydrological Sciences Journal*, 61(9), 1571-1590.
- O’Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K., Levy, M., and Solecki, W.: The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century, *Global Environ. Chang.*, doi:10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004, online first, 2015.
- Oliveira, G. G., Pedrollo, O. C., & Castro, N. M. R. (2015). Stochastic approach to analyzing the uncertainties and possible changes in the availability of water in the future

based on scenarios of climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(8), 3585–3604. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3585-2015>

Olsson, J., et al (2016). Hydrological climate change impact assessment at small and large scales: key messages from recent progress in Sweden. *Climate*, 4(3), 39

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., and Sanderson, B. M.: The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 9, 3461-3482, doi:10.5194/gmd-9-3461-2016, 2016.

Paiva, R. C. D., Collischonn, W., Schettini, E.B.C. (2011) Climate Change Impacts on Water Resources in the Quaraí River Basin. In: C. Fai Fung; A. Lopez; M. New. (Org.). *Modelling the Impact of Climate Change on Water Resources.*: Willey-Blackwell, 2011.

Peel, M. C., & Blöschl, G. (2011). Hydrological modelling in a changing world. *Progress in Physical Geography*, 35(2), 249-261.

Pereima, Maria Fernanda Rodrigues. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, 2021.

Pesquero, J. F., Chou, S. C., Nobre, C. A., & Marengo, J. A. (2010). Climate downscaling over South America for 1961–1970 using the Eta Model. *Theoretical and applied climatology*, 99, 75-93.

Piani, C., Haerter, J. O., & Coppola, E. (2009). Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1-2), 187–192. doi:10.1007/s00704-009-0134-9

Poff, N. L., Allan, J. D., Bain, M. B., Karr, J. R., Prestegard, K. L., Richter, B. D., ... & Stromberg, J. C. (1997). The natural flow regime. *BioScience*, 47(11), 769-784. <https://doi.org/10.2307/1313099>

Pontes, P. R. M. et al. (2015) Hydrologic and hydraulic large-scale modeling with inertial flow routing. *Water and Climate: Modeling in Large Basins*, v. 3, p. 1–84.

Prudhomme, C., Giuntoli, I., Robinson, E. L., Clark, D. B., Arnell, N. W., Dankers, R., Fekete, B. M., Franssen, W., Gerten, D., Gosling, S. N., Hagemann, S., Hannah, D. M., Kim, H., Masaki, Y., Satoh, Y., Stacke, T., Wada, Y., & Wisser, D. (2014). Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9), 3262–3267.

[https://doi.org/10.1073/PNAS.1222473110/-
/DCSUPPLEMENTAL/PNAS.201222473SI.PDF](https://doi.org/10.1073/PNAS.1222473110/-/DCSUPPLEMENTAL/PNAS.201222473SI.PDF)

- Reboita, M. S., Krusche, N., Ambrizzi, T., & Porfírio Da Rocha, R. (2012). Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. *Terrae Didatica*, 8(1), 34–50. <https://doi.org/10.20396/td.v8i1.8637425>
- Reboita, M.S., Kuki, C.A.C., Marrafon, V.H., de Souza, C.A., Ferreira, G.W.S., Teodoro, T., Lima, J.W.M., 2022. South America climate change revealed through climate indices projected by GCMs and Eta-RCM ensembles. *Clim Dyn* 58, 459–485. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05918-2>
- Regoto, P., Dereczynski, C., Chou, S. C., & Bazzanella, A. C. (2021). Observed changes in air temperature and precipitation extremes over Brazil. *International Journal of Climatology*, 41(11), 5125-5142.
- Reyer, C. P. O., Adams, S., Albrecht, T., Baarsch, F., Boit, A., Canales Trujillo, N., et al. (2017). Climate change impacts in Latin America and the Caribbean and their implications for development. *Regional Environmental Change*, 17(6), 1601–1621. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0854-6>
- Ribeiro Neto, A., da Paz, A. R., Marengo, J. A., & Chou, S. C. (2016). Hydrological Processes and Climate Change in Hydrographic Regions of Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, 08(12), 1103–1127. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.812087>
- Rolls, R. J., Leigh, C., & Sheldon, F. (2012). Mechanistic effects of low-flow hydrology on riverine ecosystems: Ecological principles and consequences of alteration. *Freshwater Science*, 31(4), 1163–1186. <https://doi.org/10.1899/12-002.1>
- Rosbjerg, D., Blöschl, G., Burn, D., Castellarin, A., Croke, B., Di Baldassarre, G., ... & Viglione, A. (2013). Prediction of floods in ungauged basins. In *Runoff prediction in ungauged basins: Synthesis across processes, places and scales* (pp. 189-225). Cambridge University Press.
- Saavedra, D., Mendoza, P. A., Addor, N., Llauca, H., & Vargas, X. (2022). “A multi-objective approach to select hydrological models and constrain structural uncertainties for climate impact assessments”. *Hydrological Processes*, 36 (1), e14446. <https://doi.org/10.1002/hyp.14446>
- Saft, M., Peel, M. C., Western, A. W., Perraud, J. M., & Zhang, L. (2016). Bias in streamflow projections due to climate-induced shifts in catchment response. *Geophysical Research Letters*, 43(4), 1574-1581.

- Saft, M., Western, A. W., Zhang, L., Peel, M. C., & Potter, N. J. (2015). The influence of multiyear drought on the annual rainfall-runoff relationship: An Australian perspective. *Water Resources Research*, 51(4), 2444-2463.
- Salmona, Y. B., Matricardi, E. A. T., Skole, D. L., Silva, J. F. A., Coelho Filho, O. D. A., Pedlowski, M. A., ... & Souza, S. A. D. (2023). A Worrying Future for River Flows in the Brazilian Cerrado Provoked by Land Use and Climate Changes. *Sustainability*, 15(5), 4251.
- Sanderson, B. M.; Knutti, R. On the interpretation of constrained climate model ensembles. v. 39, n. August, p. 1–6, 2012.
- Satoh, Y., Yoshimura, K., Pokhrel, Y., Kim, H., Shiogama, H., Yokohata, T., Hanasaki, N., Wada, Y., Burek, P., Byers, E., Schmied, H. M., Gerten, D., Ostberg, S., Gosling, S. N., Boulange, J. E. S., & Oki, T. (2022). The timing of unprecedented hydrological drought under climate change. *Nature Communications* 2022 13:1, 13(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30729-2>
- Schmidli, J., Frei, C., & Vidale, P. L. (2006). Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*, 26(5), 679–689. doi:10.1002/joc.1287
- Schuster, Raíza Cristóvão; Fan, Fernando Mainardi; Collischonn, Walter. (2020) Scenarios of climate change effects in water availability within the Patos Lagoon's Basin. *Revista Brasileira De Recursos Hídricos*, v. 25, p. 1
- Seibert, J. (2003). Reliability of model predictions outside calibration conditions: Paper presented at the Nordic Hydrological Conference (Røros, Norway 4-7 August 2002). *Hydrology Research*, 34(5), 477-492.
- Seiller, G., Roy, R., & Anctil, F. (2017). Influence of three common calibration metrics on the diagnosis of climate change impacts on water resources. *Journal of Hydrology*, 547, 280-295.
- Seneviratne, S. I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., & C. Dereczynski, A. D. L. S. G. I. I. J. K. S. L. F. O. I. P. M. S. S. M. V.-S. M. W. and B. Z. (2023). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis* (pp. 1513–1766). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>
- Seneviratne, S., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C., et al, (2012). Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment, in: Chapter 3 of *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate*

Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press.

Sharma, A., Wasko, C., & Lettenmaier, D. P. (2018). If precipitation extremes are increasing, why aren't floods?. *Water resources research*, 54(11), 8545-8551.

Sheffield, J., G. Goteti, and E. F. Wood (2006): Development of a 50-year high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling *J. Climate*, 19(13), 3088-3111

Shen, H., Tolson, B. A., & Mai, J. (2022). Time to update the split-sample approach in hydrological model calibration. *Water Resources Research*, 58(3), e2021WR031523.

Shukla, S. & Andrew W. Wood, A.W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS*, VOL. 35, L02405, doi: 10.1029/2007GL032487.

Silva, A. L. D., Souza, S. A. D., Coelho Filho, O., Eloy, L., Salmons, Y. B., & Passos, C. J. S. (2021). Water Appropriation on the Agricultural Frontier in Western Bahia and Its Contribution to Streamflow Reduction: Revisiting the Debate in the Brazilian Cerrado. *Water*, 13(8), 1054

Silva, M. V. M.; Vitorino, R. P.; Lima, C. E. S.; Silva, G. K.; Nobrega, M. R. R.; Silveira, C. S. 2022 Projeções de mudanças climáticas e de demandas de consumo de água na geração hidrelétrica: Estudo de caso na bacia do rio São Francisco, Brasil. In: Souza Filho, F. A.; Reis, D. S.; Galvão, C. O. 2022 Secas e cheias: modelagem e adaptação aos extremos hidrológicos no contexto da variabilidade e mudança do clima. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza.

Silveira, C. da. S. et al. Mudanças Climáticas na Bacia do Rio São Francisco: uma análise para precipitação e temperatura. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v. 21, n. 2, p. 416-428, 2016.

Siqueira Júnior, J. L., Tomasella, J., & Rodriguez, D. A. (2015). Impacts of future climatic and land cover changes on the hydrological regime of the Madeira River basin. *Climatic Change*, 129(1–2), 117–129. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1338-x>

Siqueira, V.A., Paiva, R. C. D., Fleischmann, A. S., Fan, F. M., Ruhoff, A. L., Pontes, P. R. M., et al. (2018). Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 4815–4842. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>

- Siqueira, V. A., Fan, F. M., Paiva, R. C. D. de, Ramos, M. H., & Collischonn, W. (2020). Potential skill of continental-scale, medium-range ensemble streamflow forecasts for flood prediction in South America. *Journal of Hydrology*, 590(February), 125430. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125430>
- Smakhtin, V. U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240(3–4), 147–186. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1)
- Smith, A., Sampson, C., & Bates, P. (2015). Regional flood frequency analysis at the global scale. *Water Resources Research*, 51(1), 539-553.
- Sorribas, M. V., Paiva, R. C. D., Melack, J. M., Bravo, J. M., Jones, C., Carvalho, L., et al. (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin, 555–570. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1640-2>
- Souza, S. A.; Amorim, R. S.; Reis, D. S. 2022a Análise de tendência de extremos de precipitação nas regiões hidrográficas brasileiras. In: Souza Filho, F. A.; Reis, D. S.; Galvão, C. O. 2022 Secas e cheias: modelagem e adaptação aos extremos hidrológicos no contexto da variabilidade e mudança do clima. Expressão Gráfica e Editora, Fortaleza.
- Staudinger, M., Weiler, M., & Seibert, J. (2015). Quantifying sensitivity to droughts—an experimental modeling approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(3), 1371-1384.
- Steinschneider, S., Yang, Y.-C. E. & Brown, C. Panel regression techniques for identifying impacts of anthropogenic landscape change on hydrologic response. *Water Resour. Res.* 49, 7874–7886 (2013).
- Stephens, C. M., Marshall, L. A., & Johnson, F. M. (2019). Investigating strategies to improve hydrologic model performance in a changing climate. *Journal of Hydrology*, 579, 124219.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., et al. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press Cambridge.
- Tanoue, M., Hirabayashi, Y., & Ikeuchi, H. (2016). Global-scale river flood vulnerability in the last 50 years. *Scientific Reports*, 6. <https://doi.org/10.1038/srep36021>
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., & Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. In *Bulletin of the American Meteorological Society* (Vol. 93, Issue 4, pp. 485–498). <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>

- Tebaldi, C.; Knutti, R. The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, v. 365, n. 1857, p. 2053–2075, 2007
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456-457, 12–29. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.05.052
- Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., & Nemani, R. (2022). NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. *Scientific Data* 2022 9:1, 9(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>
- Valverde, M.C., Marengo, J.A., 2014. Extreme Rainfall Indices in the Hydrographic Basins of Brazil. *Open Journal of Modern Hydrology* 04, 10–26. <https://doi.org/10.4236/ojmh.2014.41002>
- Tomasella, J., Cunha, A. P. de A., & Marengo, J. A. (2023). Nota Técnica: Elaboração dos Mapas de índice de Aridez e Precipitação Total Acumulada para o Brasil.
- United Nations Convention to Combat Desertification. (1994). United Nations Convention to Combat Desertification in those countries experiencing serious drought and/or desertification, particularly in Africa.
- van Lanen, H. A. J., Laaha, G., Kingston, D. G., Gauster, T., Ionita, M., Vidal, J. P., Vlnas, R., Tallaksen, L. M., Stahl, K., Hannaford, J., Delus, C., Fendekova, M., Mediero, L., Prudhomme, C., Rets, E., Romanowicz, R. J., Gailliez, S., Wong, W. K., Adler, M. J., ... van Loon, A. F. (2016). Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case. *Hydrological Processes*, 30(17), 3097–3104. <https://doi.org/10.1002/HYP.10838>
- van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4), 359–392. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1085>
- Van Loon, A. F., Gleeson, T., Clark, J., Van Dijk, A. I. J. M., Stahl, K., Hannaford, J., Di Baldassarre, G., Teuling, A. J., Tallaksen, L. M., Uijlenhoet, R., Hannah, D. M., Sheffield, J., Svoboda, M., Verbeiren, B., Wagener, T., Rangecroft, S., Wanders, N., & Van Lanen, H. A. J. (2016). Drought in the Anthropocene. In *Nature Geoscience* (Vol. 9, Issue 2, pp. 89–91). Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/ngeo2646>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation

- Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Visser, H., Petersen, A. C., & Ligtoet, W. (2014). On the relation between weather-related disaster impacts, vulnerability and climate change. *Climatic Change*, 125(3–4), 461–477. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1179-z>
- Vogt, J. V, Naumann, G., Masante, D., Spinoni, J., Cammalleri, C., Erian, W., Pischke, F., Pulwarty, R., & Barbosa, P. (2018). Drought Risk Assessment and Management. <https://doi.org/10.2760/057223>
- Wanders, N., & Wada, Y. (2015). Human and climate impacts on the 21st century hydrological drought. *Journal of Hydrology*, 526, 208–220. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2014.10.047>
- Wang, X., Hou, X., & Zhao, Y. (2021). Changes in consecutive dry/wet days and their relationships with local and remote climate drivers in the coastal area of China. *Atmospheric Research*, 247, 105138. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105138>
- Wang, Y., Meili, N., & Fatichi, S. (2023). Evidence and Controls of the Acceleration of the Hydrological Cycle Over Land. *Water Resources Research*, 59(8), e2022WR033970. <https://doi.org/10.1029/2022WR033970>
- Wasko, C., & Sharma, A. (2017). Global assessment of flood and storm extremes with increased temperatures. *Scientific reports*, 7(1), 7945.
- WCRP – World Climate Research Programme. CMIP Phase 6 (CMIP6). Disponível em: <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6> . Acesso em ago 2022.
- Williams, M. W., Seibold, C., & Chowanski, K. (2009). Storage and Release of Solutes from a Subalpine Seasonal Snowpack: Soil and Stream Water Response, Niwot Ridge, Colorado. *Biogeochemistry*, 95(1), 77–94. <https://doi.org/10.1007/s10533-009-9288-x>.
- Winsemius, H. C., Aerts, J. C. J. H., van Beek, L. P. H., Bierkens, M. F. P., Bouwman, A., Jongman, B., et al. (2016). Global drivers of future river flood risk. *Nature Climate Change*, 6(4), 381–385. <https://doi.org/10.1038/nclimate2893>
- WMO, 2012. International Glossary of Hydrology, WMO Report No. 385, Geneva.
- Wright, D. B., Bosma, C. D., & Lopez-Cantu, T. (2019). US hydrologic design standards insufficient due to large increases in frequency of rainfall extremes. *Geophysical Research Letters*, 46(14), 8144-8153.

- Wu, P., Christidis, N., & Stott, P. (2013). Anthropogenic impact on Earth's hydrological cycle. *Nature Climate Change*, 3(9), 807-810.
- Xuan Do, H., Zhao, F., Westra, S., Leonard, M., Gudmundsson, L., Eric Stanislas Boulange, J., Chang, J., Ciais, P., Gerten, D., Gosling, S. N., Müller Schmied, H., Stacke, T., Telteu, C. E., & Wada, Y. (2020). Historical and future changes in global flood magnitude - evidence from a model-observation investigation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(3), 1543–1564. <https://doi.org/10.5194/hess-24-1543-2020>
- Yang, Y., Roderick, M. L., Yang, D., Wang, Z., Ruan, F., McVicar, T. R., ... & Beck, H. E. (2021). Streamflow stationarity in a changing world. *Environmental Research Letters*, 16(6), 064096.
- Yildirim, I., & Aksoy, H. (2022). Intermittency as an indicator of drought in streamflow and groundwater. *Hydrological Processes*, 36(6), e14615. <https://doi.org/10.1002/HYP.14615>
- Yu, L., Josey, S. A., Bingham, F. M. & Lee, T. Intensification of the global water cycle and evidence from ocean salinity: Synthesis review. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1472, 76–94 (2020).
- Zhang, X.; Alexander, L.; Hegerl, G. C.; Jones, P.; Tank, A. K.; Peterson, T. C.; Trewin, B.; Zwiers, F. W. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 2, n. 6, p. 851–870, 2011.
- Zhang, Y., Viglione, A., & Blöschl, G. (2022). Temporal Scaling of Streamflow Elasticity to Precipitation: A Global Analysis. *Water Resources Research*, 58(1). <https://doi.org/10.1029/2021WR030601>