

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

CONSTRUINDO UM ÍNDICE DE RISCO CLIMÁTICO PARA A AVALIAÇÃO DA SEGURANÇA HÍDRICA NA AMÉRICA DO SUL

Júlia Brusso Rossi¹; Rodrigo Cauduro Dias De Paiva²; Walter Collischonn³; Pedro Torres Miranda⁴; Arthur Kolling Neto⁵; Hugo de Oliveira Fagundes⁶; Larissa De Castro Ribeiro⁷; Gabriel Matte Rios⁸; Wilany Rodrigues Galvão Alves⁹; Ingrid Petry¹⁰; Alexandre Abdalla Araujo¹¹ e Saulo Aires de Souza¹²

Abstract: Water security refers to the guarantee of water for population supply, development of productive activities, preservation of ecosystems, and protection against extreme events. Climate change show a risk of altering extreme events occurrence, which may lead to more intense and widespread droughts and floods. In this sense, this study seeks to understand the impacts of climate change projections on water availability and extreme events in South America, for the preparation of a Climate Risk Index for Water Security. A continental hydrological model was used with CMIP6 projections. The results show projections of reduction in precipitation, average flow and Q95, and an increase in maximum precipitation, in most of the continent. The Climatic Risk Index for Water Security in South America, preliminary proposed, represented the risk associated with droughts and floods in the scenario from 2036 to 2100. The Index will continue to be improved to represent the impacts of climate change on extreme events in South America.

Keywords – Droughts; floods; projections

Resumo: A segurança hídrica se refere a garantia de água para abastecimento da população, desenvolvimento de atividades produtivas, preservação dos ecossistemas, e proteção contra eventos extremos. As mudanças climáticas apresentam risco para alteração na ocorrência de eventos extremos, podendo tornar as secas e cheias mais intensas e abrangentes. Neste sentido, este estudo buscou compreender as projeções de impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica e em eventos extremos na América do Sul, para a elaboração de um Índice de Risco Climático para a Segurança Hídrica. Foi utilizado um modelo hidrológico continental com projeções do CMIP6. Os resultados demonstram projeções de redução na precipitação, na vazão média e na Q₉₅, e aumento na precipitação máxima, na maior parte do continente. O Índice de Risco Climático para a Segurança Hídrica na América do Sul, proposto de forma preliminar, representou o risco associado a ocorrência

1) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, juliabrusso@gmail.com

2) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, rodrigo.paiva@ufrgs.br

3) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, collischonn@iph.ufrgs.br

4) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pedrotorresm121@gmail.com

5) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, arthur.kolling@hotmail.com

6) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul e Universidade Estadual de Campinas, h.o.fagundes@hotmail.com

7) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, larissa.ribeirocr@gmail.com

8) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, gabriel.matterios@gmail.com

9) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, wilanyg.alves@gmail.com

10) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, ingridp8396@gmail.com

11) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, Alexandre.Araujo@ana.gov.br

12) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, saulo.souza@ana.gov.br

de secas e cheias no cenário de 2036 a 2100. O Índice seguirá sendo aprimorado para representação dos impactos das mudanças climáticas em eventos extremos na América do Sul.

Palavras-Chave – Secas; cheias; projeções

INTRODUÇÃO

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

A segurança hídrica pode ser descrita como o nível tolerável de risco relacionado à água para a sociedade, sendo o risco (situação envolvendo exposição ao perigo) compensado pela segurança (estado livre de perigo) (Grey et al., 2013). O risco é uma combinação de perigo, exposição e vulnerabilidade (Garrick e Hall, 2014). O perigo inclui ocorrências de secas e cheias, a exposição trata da concentração de pessoas, e a vulnerabilidade considera a falta de adaptação em termos de infraestruturas e governança adequadas (Hoekstra et al., 2018). Neste sentido, Tucci e Chagas (2017) definem segurança hídrica como a gestão de risco da escassez de água e das inundações para a sociedade, meio ambiente e economia.

Eventos extremos podem causar impactos sociais, econômicos e ambientais. Por um lado, as secas comprometem a oferta de água para abastecimento humano, produção agrícola e geração de energia, por outro, eventos de cheias podem causar impactos negativos consideráveis pela ocorrência de inundações. Brêda et al. (2020) avaliaram projeções de futuros impactos das mudanças climáticas (2070 a 2100) nos componentes do balanço hídrico e nas vazões médias na América do Sul, simulados com o modelo hidrológico MGB-SA e com 25 modelos climáticos globais (sigla em inglês, GCMs) do CMIP5. Os autores observaram projeção de reduções de vazões médias na região norte e aumento no sul do Brasil. Ainda, Brêda et al. (2023) avaliaram extremos de precipitação, umidade do solo e vazão na América do Sul com o modelo hidrológico MGB-SA e dados de quatro modelos climáticos regionais (RCMs, projeto Eta-INPE) do CMIP5, verificando que os extremos vão diminuir no centro e aumentar na região sul do continente.

A segurança hídrica climática está relacionada a múltiplos fatores, sendo necessário estabelecer um meio de quantificá-la através da aplicação de ferramentas que auxiliem na representação das regiões de maior risco as mudanças climáticas. Em 2019, foi publicado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), em parceria com o Ministério do Desenvolvimento Regional, o Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH). Para formar o Índice de Segurança Hídrica (ISH), o PNSH considera quatro dimensões para a segurança hídrica (Humana, Econômica, Ecossistêmica e de Resiliência), sendo cada dimensão composta de um ou mais indicadores, e cada indicador formado por uma combinação de variáveis ou atributos mensuráveis (ANA, 2019). O PNSH apresenta planejamentos de projetos e obras de infraestrutura hídrica até o ano de 2035, visando a redução dos impactos de secas e cheias no país. Contudo, autores apontam que a segurança hídrica não depende apenas de infraestrutura, mas também de sistemas adequados de governança hídrica, principalmente em cenários de crise hídrica (Cunha Libanio, 2020; Empinotti et al., 2019; Tundisi e Tundisi, 2016).

O ISH do PNSH atualmente considera os riscos potenciais das mudanças climáticas através da variabilidade pluviométrica estimada com a rede de estações pluviométricas nacional. Contudo, as projeções de impactos das mudanças climáticas nas variáveis do balanço hídrico não são consideradas. Desse modo, a integração de análises de impactos das mudanças climáticas ao ISH se

apresenta como um recurso para a investigação dos riscos associados a eventos futuros de secas e cheias. Este trabalho buscou compreender o impacto das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica na América do Sul, e se os eventos de secas e cheias se tornarão mais intensos e capazes de atingir maiores extensões de área no futuro. Foram avaliadas as projeções de impactos em variáveis do balanço hídrico, com a utilização do modelo hidrológico-hidrodinâmico MGB-SA, analisando projeções do CMIP6 para 28 modelos climáticos em período histórico e futuro. Por fim, foram propostos Índices de Risco Climático para a Segurança Hídrica na América do Sul.

MÉTODOS

Modelagem hidrológica e climática

O modelo hidrológico-hidrodinâmico utilizado neste estudo é o Modelo hidrológico de Grandes Bacias da América do Sul (MGB-SA) (Siqueira et al., 2018). Esse modelo conceitual de hidrologia de larga escala foi selecionado por representar os principais processos hidrológicos da América do Sul, sendo utilizado em estudos de mudanças climáticas (Brêda et al., 2023, 2020). Os resultados do modelo MGB-SA são obtidos por mini-bacias, de trechos de aproximadamente 15 km, sendo mais de 30 mil mini-bacias para todo o continente (Siqueira et al., 2018).

Foram avaliados GCMs da base de dados NASA *Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) (Thrasher et al., 2022) com base nos resultados da Fase 6 do Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP6). Esta base de dados contém projeções de diversas variáveis climáticas, com viés corrigido e resolução espacial de 0.25° , e os dados estão disponíveis em <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6>. A base de dados de referência para a remoção de viés é o *Global Meteorological Forcing Dataset for Land Surface Modeling* (GMFD) (Sheffield et al., 2006).

Foi realizada uma recalibração do MGB-SA utilizando dados GMFD para reduzir erros sistemáticos e incertezas nas projeções. Foram avaliados 28 modelos climáticos que possuem dados de variáveis climáticas utilizadas como entrada no MGB-SA, como precipitação, temperatura do ar, radiação incidente de ondas curtas e velocidade do vento. O cenário sócio-econômico (*Shared Socio-Economic Pathways* – SSPs, O'Neill et al., 2016) selecionado foi o SSP2-4.5. A análise foi realizada considerando dois períodos de 64 anos, o período histórico, de 1950 a 2014, e o período futuro, de 2036 a 2100.

Componentes do Índice de Risco Climático para a Segurança Hídrica

Estudos anteriores apresentam a definição do índice de segurança hídrica a partir de uma metodologia de definição de dimensões, indicadores e variáveis (ANA, 2019; Babel et al., 2020). Assim, para a composição do índice foi assumida uma dimensão (dimensão climática), representada por indicadores, que por sua vez, foram quantificados através de variáveis. Como indicadores, considerou-se a disponibilidade hídrica e as ocorrências de secas e cheias. A partir dos indicadores, foram selecionadas, em uma abordagem inicial, variáveis hidrológicas relacionadas a precipitação (P), vazão dos rios (Q), evapotranspiração (ET) e armazenamento de água no solo (TWS), sendo:

- A precipitação média ($P_{\text{média}}$), determinada pela média anual das chuvas;
- A precipitação máxima anual de um dia ($P_{\text{máx}}$), utilizada para representar chuvas intensas;
- A vazão média ($Q_{\text{média}}$), determinada pela média anual das vazões;
- A vazão com 95% de permanência no tempo (Q_{95}), representa a vazão mínima anual, sendo utilizada para representar a vazão de referência de disponibilidade hídrica nos

períodos de estiagem. Este indicador se refere a vazão que é igualada ou superada em 95% do tempo;

- A vazão máxima ($Q_{\text{máx}}$), determinada pela máxima vazão anual, indica a magnitude das cheias frequentes;
- A evapotranspiração real anual média ($ET_{\text{média}}$), representa a estimativa da evapotranspiração anual que ocorre em determinada região;
- O armazenamento total de água médio ($TWS_{\text{médio}}$), inclui estoques de águas superficiais naturais, no solo, e subterrâneas, sendo determinado pela média anual.

As variáveis $P_{\text{média}}$, $Q_{\text{média}}$, $ET_{\text{média}}$ e $TWS_{\text{médio}}$ estão relacionadas a análise da disponibilidade hídrica. Para as análises de eventos de cheia foram avaliadas $P_{\text{máx}}$ e $Q_{\text{máx}}$ e para secas foram avaliadas $P_{\text{média}}$ e Q_{95} . As variáveis foram utilizadas para cálculo de estatísticas com a finalidade de determinar a relevância das projeções climáticas no conjunto dos 28 modelos (*ensemble*). As métricas utilizadas foram o coeficiente de variação (CV), a alteração projetada e a concordância entre os modelos.

O CV foi determinado como o desvio padrão do *ensemble* no período histórico (1950-2014) normalizado pela média do *ensemble* no período histórico, representando a variabilidade climática natural da região. A alteração projetada (Δ_p) é a métrica estatística para avaliação da magnitude das mudanças climáticas, sendo determinada pela Equação 1, para análise das alterações do futuro, quando comparadas ao período histórico.

$$\Delta_p = \frac{\bar{X}_f - \bar{X}_h}{\bar{X}_h} \quad (1)$$

onde \bar{X}_f e \bar{X}_h representam as médias para os períodos futuro (2036-2100) e histórico (1950-2014).

A concordância entre os modelos foi assumida como a condição em que dois terços dos modelos do *ensemble* apresentam o mesmo sinal de alteração projetada (Δ_p), indicando condições mais secas ou mais úmidas no período futuro (2036-2100).

Foram elaborados, preliminarmente, dois índices de risco climático para a segurança hídrica, um para cheias (IRC-SH_{cheias}) e outro para secas (IRC-SH_{secas}). O IRC-SH_{cheias} foi calculado como a média entre as Δ_p de $P_{\text{máx}}$ e $Q_{\text{máx}}$ para eventos de cheias (Equação 2) e o IRC-SH_{secas} entre as Δ_p de $P_{\text{média}}$ e Q_{95} para secas (Equação 3). Para o índice de secas foram assumidos os valores negativos do IRC-SH_{secas}, e, para o índice de cheias, os valores positivos do IRC-SH_{cheias}.

$$IRC - SH_{cheias} = \left(\frac{P_{\text{máx}_f} - P_{\text{máx}_h}}{P_{\text{máx}_h}}, \frac{Q_{\text{máx}_f} - Q_{\text{máx}_h}}{Q_{\text{máx}_h}} \right) > 0 \quad (2)$$

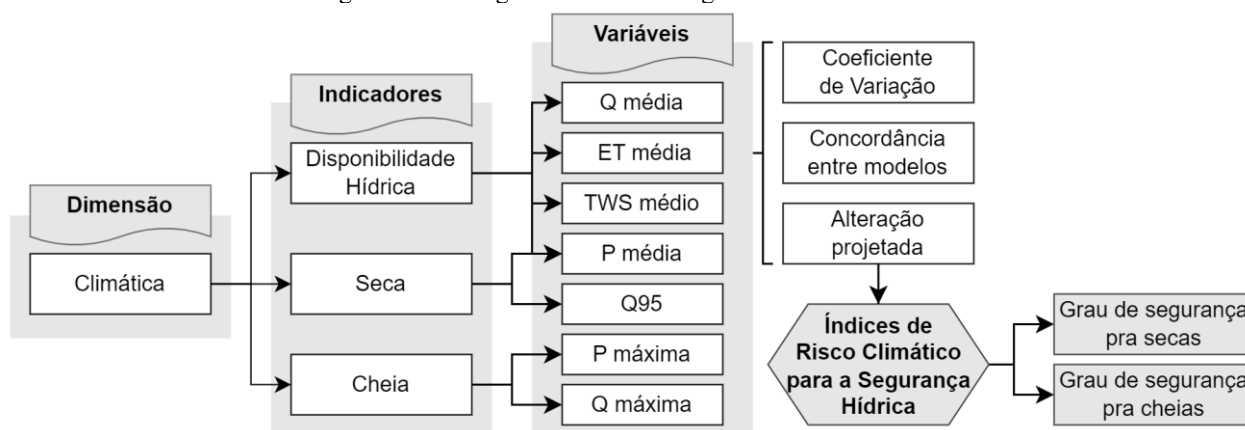
$$IRC - SH_{secas} = \left(\frac{P_{\text{média}_f} - P_{\text{média}_h}}{P_{\text{média}_h}}, \frac{Q_{95_f} - Q_{95_h}}{Q_{95_h}} \right) < 0 \quad (3)$$

A classificação dos IRC foi definida a partir do grau de segurança hídrica. Com isso, foram assumidos intervalos de 10 em 10% para as alterações projetadas (Δ_p), determinando os níveis de muito baixo a alto grau de segurança hídrica.

O mapa base adotado nas figuras deste estudo consiste na delimitação das regiões hidrográficas da América do Sul.

A Figura 1 resume a metodologia adotada neste estudo para proposição dos índices de segurança hídrica.

Figura 1 – Fluxograma da metodologia adotada neste estudo.

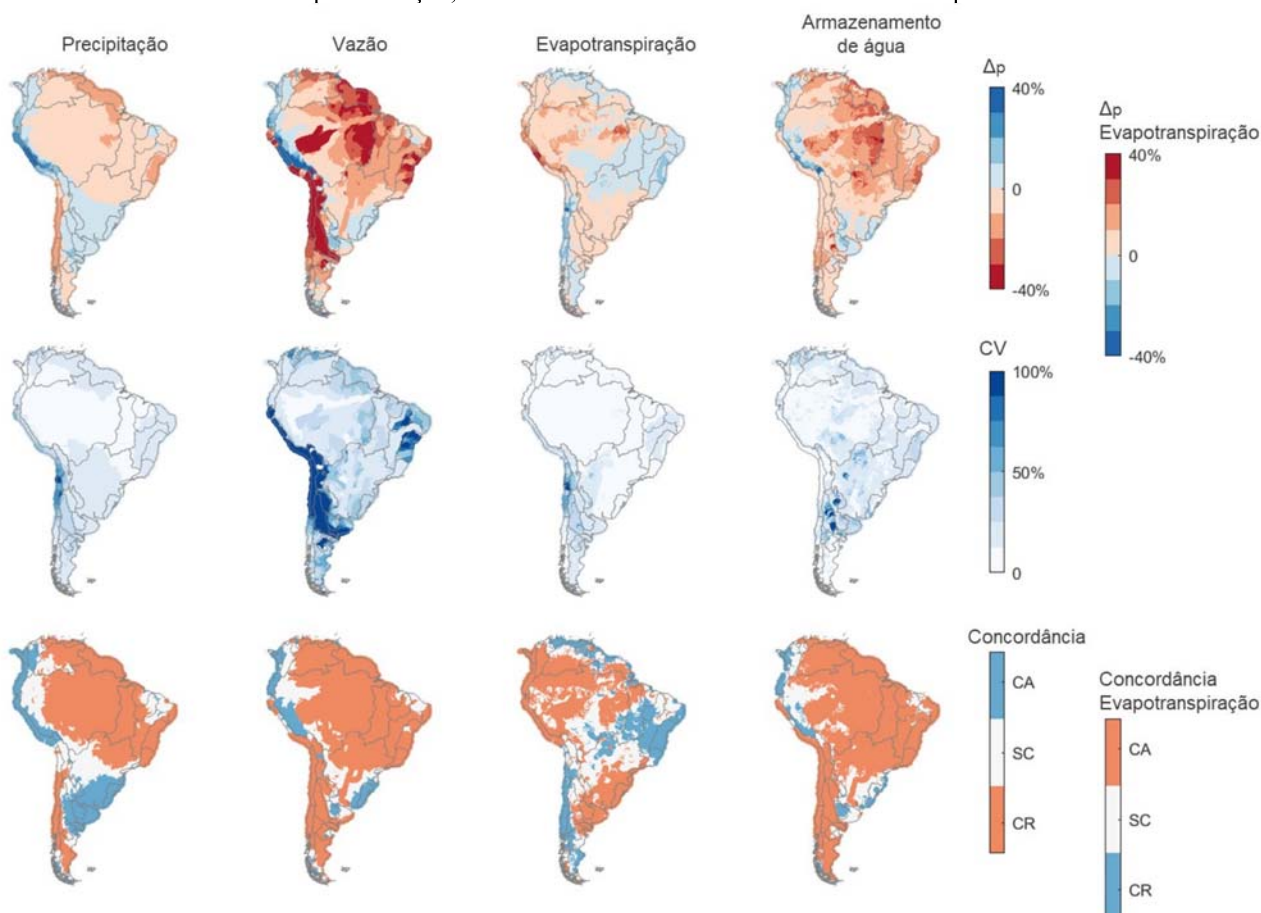


RESULTADOS E DISCUSSÕES

Disponibilidade hídrica

Em uma primeira análise, foram estimadas as alterações projetadas (Δ_p) nos componentes do balanço hídrico (precipitação, vazão, evapotranspiração e armazenamento de água), em valores médios anuais, para avaliação dos impactos na disponibilidade hídrica em diferentes regiões da América do Sul (Figura 2).

Figura 2 – Projeções de impactos na disponibilidade hídrica na América do Sul, a partir da análise da alteração projetada (Δ_p) nos componentes do balanço hídrico, em valores médios anuais. O Coeficiente de Variação (CV) está associado a médias do período histórico. A concordância entre os modelos é avaliada em três classes: CR – concordância para redução, SC – sem concordância e CA – concordância para aumento.



A precipitação média apresenta projeção de redução (entre 0 e -20%) do centro ao norte da América do Sul, e na região mais ao sul do continente, entre a Cordilheira dos Andes e a Patagonia, com concordância entre os modelos exceto para parte da região nordeste do Brasil. Na região sul do Brasil, no Uruguai e parte da Argentina foram observadas projeções de aumento (entre 0 e 10%) na precipitação média, com concordância entre os modelos. A maior parte do Brasil apresenta sinal de redução projetada na vazão média, sendo que na Bacia Amazônica e do Atlântico Leste, e na região entre a Cordilheira dos Andes e a Patagonia são observadas reduções inferiores a -40%. Por outro lado, na região sul do Brasil as vazões médias devem aumentar no período futuro, como também mostra o estudo de Ribeiro Neto et al. (2016).

Para a evapotranspiração média, foi observado sinal de aumento na região da bacia Amazônica e nos Andes Tropicais (entre 0 e 30%) e na região sul do Brasil, no Uruguai e parte da Argentina (até 10%). Neste sentido, Brêda et al. (2020) aponta que a bacia amazônica é muito úmida e em parte composta por *wetlands*, logo, anomalias negativas de precipitação não limitariam a água disponível para evapotranspiração. Ainda, Brêda et al. (2023), apontam para projeções de redução na umidade do solo na maior parte do continente. Com relação ao armazenamento de água médio, foram verificadas projeções de redução na maior parte da América do Sul.

A região nordeste do Brasil e a região entre a Cordilheira dos Andes e a Patagonia apresentam um CV mais alto para vazão média (próximo de 100%), sendo regiões com alta variabilidade natural no regime de vazões. A região nordeste possui baixa disponibilidade hídrica, sendo uma das regiões de mais baixa segurança hídrica conforme o ISH do PNSH, no cenário de 2035 (ANA, 2019). As projeções climáticas na Cordilheira dos Andes são divididas em duas regiões, como observado por Brêda et al. (2020), com sinal positivo (mais úmido) nos Andes Tropicais, e sinal negativo (mais seco) entre a Cordilheira dos Andes e a Patagonia. Contudo, se ressalta a incerteza do modelo hidrológico nessa região, devido a não representação do derretimento das geleiras (Brêda et al., 2020). Em geral, nas regiões em que foram identificadas as maiores alterações na disponibilidade hídrica foi verificada concordância dos modelos climáticos analisados.

Impactos em eventos extremos de cheias e secas

Para a análise de projeções de impactos em eventos extremos, foram estimadas as alterações projetadas (Δ_p) em variáveis significativas para representação de secas ($P_{média}$ e Q_{95}) e cheias ($P_{máx}$ e $Q_{máx}$), em valores médios anuais, em diferentes regiões da América do Sul (Figura 3).

Para a representação das secas, conforme relatado no item anterior, a precipitação média ($P_{média}$) apresenta projeção de redução do centro ao norte da América do Sul e na região mais ao sul do continente e entre a Cordilheira dos Andes e a Patagonia, e projeção de aumento na região sul do Brasil, Uruguai e parte da Argentina, com concordância entre os modelos. Ao mesmo tempo, a maior parte do continente apresenta concordância entre os modelos para uma redução significativa das vazões mínimas (Q_{95}), com valores inferiores a -40%.

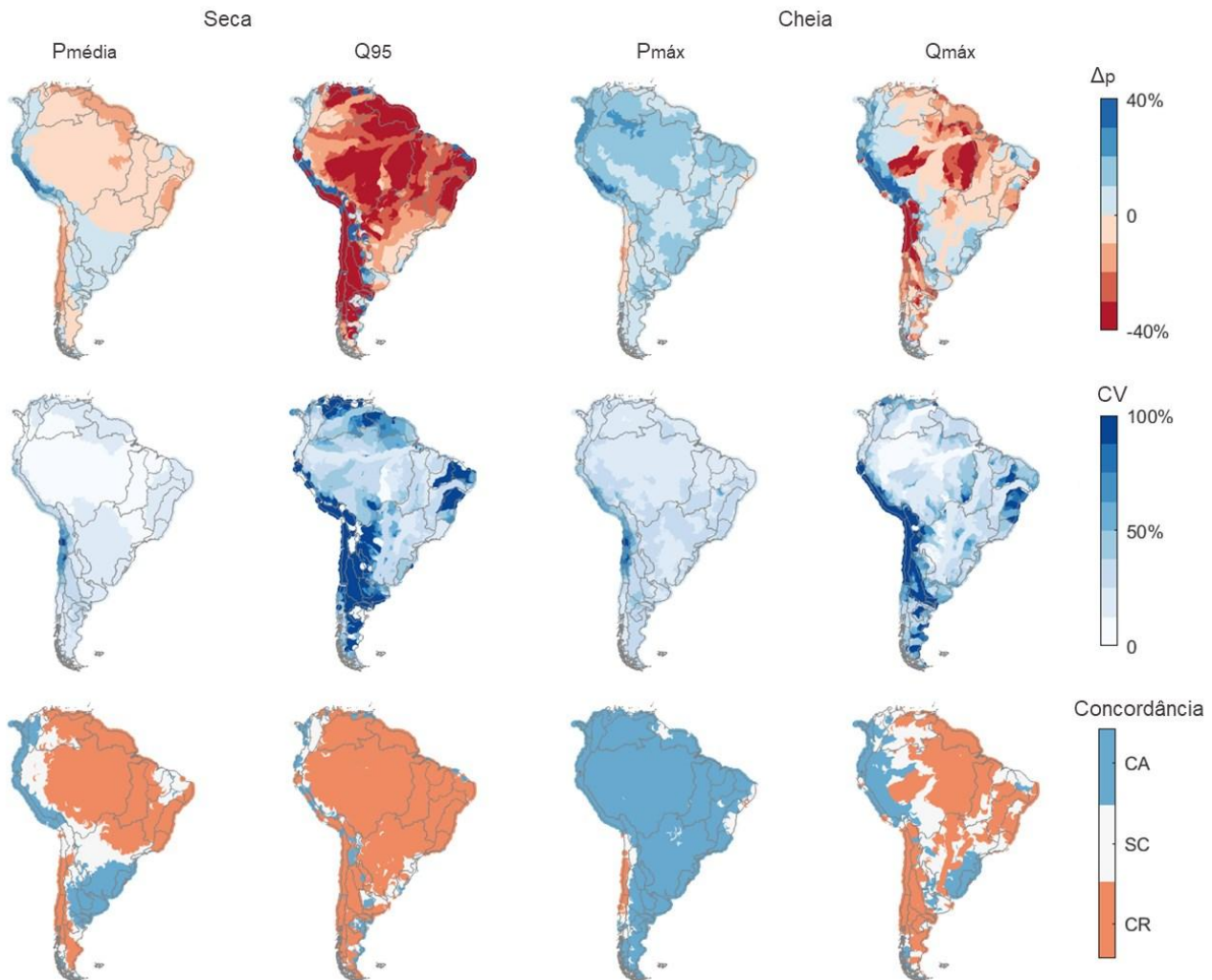
Para a representação das cheias, em geral, foi verificada concordância dos modelos para aumento na precipitação máxima ($P_{máx}$) em praticamente toda a América do Sul. Avaliando a precipitação máxima com tempo de retorno de 2 anos, Brêda et al. (2023) apontou para uma redução em extremos de precipitação mais concentrada na região da bacia do Uruguai, no sudeste da América do Sul. Ainda, foi observado um aumento nas vazões máximas ($Q_{máx}$) na região sul do Brasil e no oeste da Amazônia, conforme também verificado por Brêda et al. (2023) para vazões máxima com tempo de retorno de 2 anos. Por outro lado, foram verificadas projeção de reduções nas vazões máximas em parte da bacia Amazônica, com destaque para as bacias do Purus e Xingu.

Desse modo, as projeções indicam secas de maior magnitude no período futuro, considerando as alterações projetadas (Δ_p) para $P_{média}$ e Q_{95} , nas regiões do centro ao norte da América do Sul e na região mais ao sul do continente, entre a Cordilheira dos Andes e a Patagonia, com concordância

entre os modelos. Em termos de impactos nas projeções de cheias, foi observado um aumento na magnitude destes eventos na região sul do Brasil e no oeste da Amazônia, considerando as alterações projetadas (Δ_p) para $P_{m\acute{a}x}$ e $Q_{m\acute{a}x}$, com concordância entre os modelos.

Por fim, destaca-se que as projeções indicam redução na Q_{95} em praticamente todo o continente, e aumento na $P_{m\acute{a}x}$, também, para maior parte do continente. A redução na Q_{95} pode resultar em impactos significativos para o ecossistema e para a população, uma vez que pode afetar os usos da água. O informe anual de conjuntura da ANA aponta que em bacias do semiárido a maioria dos rios seca no período de estiagem, de forma que a ampliação da garantia de oferta de água só pode ser alcançada a partir de reservatórios artificiais ou por transferências de água de outras bacias (ANA, 2023). Com as estimativas de redução na Q_{95} projetadas para o cenário futuro, entende-se que poderá haver uma maior demanda para a reservação de água na região nordeste do país.

Figura 3 – Projeções de impactos em variáveis significativas para secas ($P_{m\acute{e}dia}$ e Q_{95}) e cheias ($P_{m\acute{a}x}$ e $Q_{m\acute{a}x}$) na América do Sul, a partir da análise da alteração projetada (Δ_p), em valores médios anuais. O Coeficiente de Variação (CV) está associado a médias do período histórico. A concordância entre os modelos é avaliada em três classes: CR – concordância para redução, SC – sem concordância e CA – concordância para aumento.



Proposição inicial dos Índices de Risco Climático para a Segurança Hídrica

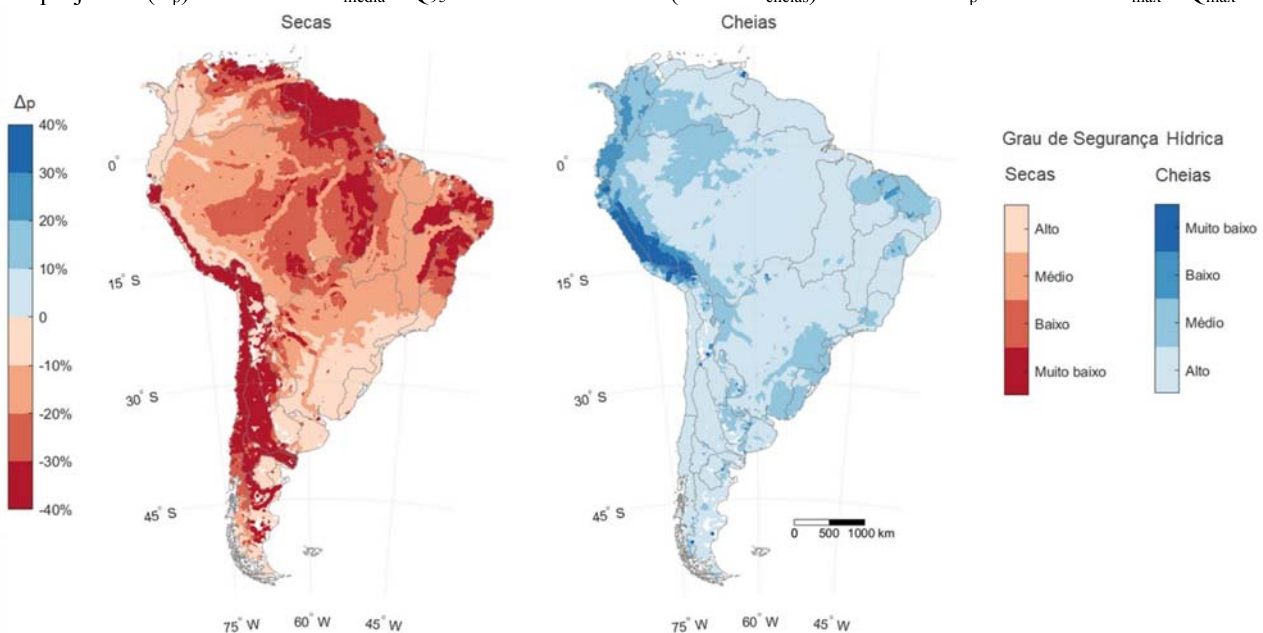
Os Índices de Risco Climático para a Segurança Hídrica na América do Sul foram propostos de forma preliminar, como mostra a Figura 4, considerando as alterações em algumas das variáveis mais significativas para secas ($IRC-SH_{secas}$) e cheias ($IRC-SH_{cheias}$).

No Brasil, foi observado maior grau de insegurança hídrica por risco climático associado a ocorrência de secas (considerando $P_{média}$ e Q_{95}), com destaque para as regiões da bacia Amazônica (principalmente a parte sul e leste da bacia), a parte oeste da bacia do Tocantins-Araguaia, e a região nordeste do país (bacias do Parnaíba, Atlântico Nordeste Oriental, Atlântico Leste, e parte da bacia do São Francisco). Estudos anteriores também apontam para o maior risco a segurança hídrica na região nordeste. Segundo o ISH do PNSH (ANA, 2019), a região nordeste se destaca como uma das áreas com menor segurança hídrica no cenário de 2035, principalmente devido a sua baixa disponibilidade hídrica. Ainda, Gesualdo et al. (2021) avaliaram a segurança hídrica em diferentes regiões do país, considerando a disponibilidade e qualidade da água, efeitos climáticos de eventos extremos e a pressão antropogênica, e, a partir disso, verificaram falta de segurança hídrica em grandes centros urbanos no norte e nordeste brasileiro.

Por outro lado, as regiões sul e sudeste do Brasil apresentaram maior grau de segurança hídrica para risco climático (grau médio a alto). Na região sul, as projeções indicam aumento nas cheias (considerando $P_{máx}$ e $Q_{máx}$), contudo, o IRC-SH_{cheias} aponta para um grau médio de segurança hídrica. Para as cheias, não foram observadas alterações projetadas superiores à 20% em quase todo o Brasil, para o cenário de 2036 a 2100. Ainda, as projeções climáticas na Cordilheira dos Andes são divididas em duas regiões, conforme observado nas projeções de alterações na disponibilidade hídrica. Desse modo, foi observado maior risco de cheias nos Andes Tropicais e maior risco de secas entre a Cordilheira dos Andes e a Patagônia.

Por fim, apesar de se tratar de uma proposta preliminar de índice de risco climático, esta análise demonstra alguns pontos importantes, principalmente relacionados ao risco de secas em regiões como Amazônia e Cerrado. No ISH do PNSH (ANA, 2019) estas áreas apresentam um maior grau de segurança hídrica (cenário de 2035), contudo o ISH atualmente considera apenas a variabilidade pluviométrica associada ao risco climático. Dessa forma, percebe-se a relevância da proposição de índices climáticos mais robustos, que considerem impactos das mudanças climáticas em eventos de secas e cheias. Em etapas futuras, o Índice de Risco Climático para a Segurança Hídrica deverá ser aprimorado, considerando mais variáveis para a representação dos impactos das mudanças climáticas em eventos extremos.

Figura 4 – Grau de Segurança hídrica para secas e cheias no período de 2036 a 2100, conforme o Índice preliminar de Risco Climático para a Segurança Hídrica na América do Sul. O índice para secas (IRC-SH_{secas}) considera a alteração projetada (Δ_p) média entre $P_{média}$ e Q_{95} e o índice de cheias (IRC-SH_{cheias}) considera a Δ_p média entre $P_{máx}$ e $Q_{máx}$.



CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou as projeções de impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica e na ocorrência de eventos extremos (secas e cheias) na América do Sul, utilizando um modelo hidrológico-hidrodinâmico e analisando 28 modelos climáticos em período histórico (1950 a 2014) e futuro (2036 a 2100). Com isso, foi apresentado um Índice preliminar de Risco Climático para a Segurança Hídrica na América do Sul, considerando a alteração projetada, em valores médios anuais, na $P_{média}$ e Q_{95} (secas) e na $P_{máx}$ e $Q_{máx}$ (cheias).

Com relação a disponibilidade hídrica no período futuro (2036-2100), em geral, foram observadas projeções de redução na precipitação e vazão média, na maior parte da América do Sul, com exceção da região sul do Brasil, no Uruguai, parte da Argentina e nos Andes Tropicais. Na Bacia Amazônica e do Atlântico Leste, e na região entre a Cordilheira dos Andes e a Patagonia são observadas reduções superiores a -40% na vazão média. As projeções de evapotranspiração média mostram sinal de aumento principalmente na bacia Amazônica e nos Andes Tropicais. Ainda, foram verificadas projeções de redução do armazenamento de água médio na maior parte do continente.

As projeções de impactos em eventos extremos indicam secas de maior magnitude nas regiões do centro ao norte da América do Sul e entre a Cordilheira dos Andes e a Patagonia, e um aumento na magnitude das cheias na região sul do Brasil e no oeste da Amazônia. Em geral, as projeções indicam redução na Q_{95} (variável de seca) e aumento na $P_{máx}$ (variável de cheia) em praticamente todo o continente, com concordância entre os modelos analisados.

Por fim, foram propostos Índices de Risco Climático para a Segurança Hídrica na América do Sul para secas e cheias. No Brasil, foi observado maior grau de insegurança hídrica por risco de secas, principalmente na região da bacia Amazônica e parte da bacia do Tocantins-Araguaia, e na região nordeste do país. Por outro lado, as regiões sul e sudeste do Brasil apresentaram maior grau de segurança hídrica para risco climático. Destaca-se que, apesar de preliminares, os índices representaram o risco associado a ocorrência de secas no cenário de 2036 a 2100, não apenas na região do semiárido, mas também em regiões como Amazônia e Cerrado. Como próximos passos, tem-se a incorporação de novas variáveis relacionadas a secas e cheias (e.g. tempo de retorno de cheias, número de dias secos consecutivos), a análise de outras métricas (e.g. z-score), e a utilização do CV no cálculo dos Índices. Deste modo, o Índice de Risco Climático seguirá sendo aprimorado, considerando a necessidade da representação acurada dos impactos das mudanças climáticas em eventos extremos na América do Sul.

AGRADECIMENTOS - Os autores agradecem à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e à agência de fomento Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento através do projeto “Cooperação em Tecnologias para Análises Hidrológicas em Escala Nacional – Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos” (nº 02500.047848/2021-20), e a todos os(as) pesquisadores(as) que contribuíram para a elaboração do estudo.

REFERÊNCIAS

- ANA, 2023. *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022: informe anual* / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília. 105 p.
- ANA, 2019. *Plano Nacional de Segurança Hídrica* / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília.
- BABEL, M.S., SHINDE, V.R., SHARMA, D., DANG, N.M., 2020. *Measuring water security: A vital step for climate change adaptation*. Environ. Res. 185, 109400. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109400>

- BRÊDA, J.P.L.F., CAUDURO DIAS DE PAIVA, R., SIQUEIRA, V.A., COLLISCHONN, W., 2023. *Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers*. J. Hydrol. 619, 129284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129284>
- BRÊDA, J.P.L.F., DE PAIVA, R.C.D., COLLISCHONN, W., BRAVO, J.M., SIQUEIRA, V.A., STEINKE, E.B., 2020. *Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections*. Clim. Change 159, 503–522. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9>
- CUNHA LIBANIO, P.A., 2020. *Water reforms in Brazil: Challenges and opportunities for promoting water security in a continental-sized country*. World Water Policy 6, 230–245. <https://doi.org/10.1002/wwp2.12042>
- EMPINOTTI, V.L., BUDDS, J., AVERSA, M., 2019. *Governance and water security: The role of the water institutional framework in the 2013–15 water crisis in São Paulo, Brazil*. Geoforum 98, 46–54. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2018.09.022>
- GARRICK, D., HALL, J.W., 2014. *Water Security and Society: Risks, Metrics, and Pathways*. Annu. Rev. Environ. Resour. 39, 611–639. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-013012-093817>
- GESUALDO, G.C., SONE, J.S., GALVÃO, C. DE O., MARTINS, E.S., MONTENEGRO, S.M.G.L., TOMASELLA, J., MENDIONDO, E.M., 2021. *Unveiling water security in Brazil: current challenges and future perspectives*. Hydrol. Sci. J. 66, 759–768. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1899182>
- GREY, D., GARRICK, D., BLACKMORE, D., KELMAN, J., MULLER, M., SADOFF, C., 2013. *Water security in one blue planet: twenty-first century policy challenges for science*. Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci. 371, 20120406. <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0406>
- HOEKSTRA, A.Y., BUURMAN, J., VAN GINKEL, K.C.H., 2018. *Urban water security: A review*. Environ. Res. Lett. 13, 53002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaba52>
- O'NEILL, B.C., TEBALDI, C., VAN VUUREN, D.P., EYRING, V., FRIEDLINGSTEIN, P., HURTT, G., KNUTTI, R., KRIEGLER, E., LAMARQUE, J.-F., LOWE, J., MEEHL, G.A., MOSS, R., RIAHI, K., SANDERSON, B.M., 2016. *The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6*. Geosci. Model Dev. 9, 3461–3482.
- RIBEIRO NETO, A., DA PAZ, A.R., MARENGO, J.A., CHOU, S.C., 2016. *Hydrological Processes and Climate Change in Hydrographic Regions of Brazil*. J. Water Resour. Prot. 08, 1103–1127. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2016.812087>
- SHEFFIELD, J., GOTETI, G., WOOD, E.F., 2006. *Development of a 50-Year High-Resolution Global Dataset of Meteorological Forcings for Land Surface Modeling*. J. Clim. 19, 3088–3111. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/JCLI3790.1>
- SIQUEIRA, V.A., PAIVA, R.C.D., FLEISCHMANN, A.S., FAN, F.M., RUHOFF, A.L., PONTES, P.R.M., PARIS, A., CALMANT, S., COLLISCHONN, W., 2018. *Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America*. Hydrol. Earth Syst. Sci. 22, 4815–4842. <https://doi.org/10.5194/hess-22-4815-2018>
- THRASHER, B., WANG, W., MICHAELIS, A., MELTON, F., LEE, T., NEMANI, R., 2022. *NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6*. Sci. Data 9, 262.
- TUCCI, C., CHAGAS, M., 2017. *Segurança hídrica: conceitos e estratégia para Minas Gerais*. Rev. Gestão Água da América Lat. 14, 0–0. <https://doi.org/10.21168/rega.v14e12>
- TUNDISI, J.G., TUNDISI, T.M., 2016. *Integrating ecohydrology, water management, and watershed economy: case studies from Brazil*. Ecohydrol. Hydrobiol. 16, 83–91. <https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2016.03.006>
- UN-WATER, 2013. *Water Security & the Global Water Agenda: A UN-Water Analytical Brief*. United Nations University. Hamilton, Canada.
- VÖRÖSMARTY, C.J., MCINTYRE, P.B., GESSNER, M.O., DUDGEON, D., PRUSEVICH, A., GREEN, P., GLIDDEN, S., BUNN, S.E., SULLIVAN, C.A., LIERMANN, C.R., DAVIES, P.M., 2010. *Global threats to human water security and river biodiversity*. Nature 467, 555–561. <https://doi.org/10.1038/nature09440>