

## XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

# ALTERAÇÕES NAS VAZÕES DOS RIOS DA AMÉRICA DO SUL: UMA COMPARAÇÃO ENTRE HISTÓRICO PASSADO E PROJEÇÕES FUTURAS

*Pedro Torres Miranda<sup>1</sup>; Rodrigo Cauduro Dias de Paiva<sup>2</sup>; Cléber Henrique de Araújo Gama<sup>3</sup> & João Paulo Lyra Fialho Brêda<sup>4</sup>*

**Palavras-Chave** – Mudanças climáticas, alterações de vazão, MGB-SA

### RESUMO

A área de recursos hídricos requer planejamentos a longo prazo, contudo, não é adequado utilizar condições atuais para avaliar um período futuro distante, devido ao impacto que mudanças climáticas podem exercer sobre a hidrologia. Tendo isso em vista, o presente estudo compara a alteração de vazões nos rios da América do Sul entre os períodos 1980-1999 e 2000-2019 com resultados de projeções climáticas para o final do século XXI. O artigo mostrou discordância entre os sinais de alteração da vazão média para grande parte da região norte do continente, nas bacias Amazônica e Orinoco. Considerando as 12 principais bacias hidrográficas do Brasil, 6 mostraram pelo menos uma discordância entre as alterações recentes e futuras para vazões mínimas, médias ou máximas. A partir desses resultados, pode-se afirmar que a gestão de recursos hídricos não deve ignorar os efeitos das mudanças climáticas em planejamentos a longo prazo.

### ABSTRACT

Water resource field require long term planning, however it is inadequate to consider only present conditions to evaluate distant future scenarios, due to impacts that hydrology may suffer from climate change. Aligned with this, the present article compares alteration of river discharges in South America between two periods (1980-1999 and 2000-2019) with climate projections for late 21<sup>st</sup> century. The study showed disagreement between mean discharges alterations' signs in most of north region of the continent, contemplating Amazon and Orinoco basins. Considering the 12 main Brazilian basins, 6 of them presented at least one disagreement between recent and future alterations in minimum, mean or maximum discharges. From these results, it can be stated that water management field must not ignore climate change effects in long term planning.

### 1. INTRODUÇÃO

A avaliação dos possíveis impactos de mudanças climáticas na hidrologia vem ganhando espaço dentre os trabalhos científicos da área. A necessidade dessa análise se deve à importância dos recursos hídricos para a sociedade e, também, aos riscos que eventos extremos (cheias e estiagens) oferecem à população. Com o avanço de ferramentas computacionais e de sensoriamento remoto, tem-se usado

1) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, [pedrotorresm121@gmail.com](mailto:pedrotorresm121@gmail.com)

2) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, [rodrigo.paiva@ufrgs.br](mailto:rodrigo.paiva@ufrgs.br)

3) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, [cleber.hag@gmail.com](mailto:cleber.hag@gmail.com)

4) IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, [joapaulolfb@gmail.com](mailto:joapaulolfb@gmail.com)

cada vez mais modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para estudos climáticos, baseados em projeções de modelos climáticos globais, que também se aprimoram com o desenvolvimento tecnológico.

Nessa linha, Brêda *et al.* (2020) mostrou os impactos de mudanças climáticas sobre variáveis hidrológicas e climatológicas médias sobre os principais rios da América do Sul, tais como evapotranspiração, precipitação e vazão. Os autores analisaram dois cenários de emissões de gases de efeito estufa (RCP 4.5 e RCP 8.5) fazendo projeções para o final do século XXI (2081 a 2100), a partir de um grupo de 25 modelos climáticos globais da CMIP5, cujos resultados foram discutidos no relatório de avaliação AR5 (2013) da IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Em outro estudo, Bartiko (2020) avaliou a tendência na magnitude e frequência de cheias no Brasil em dois períodos: 1976-2015 e 1951-2010. Também há iniciativas que visam sintetizar e divulgar resultados de pesquisas científicas acerca de mudanças climáticas para o público geral e para tomadores de decisão, tal como a plataforma YARA, desenvolvida por Amorim *et al.* (2020).

Levando em consideração que na área de recursos hídricos, tanto para a gestão, quanto para estudo sobre obras hidráulicas, se utilizam ferramentas estatísticas para descrever eventos hidrológicos em magnitude e em frequência, é importante conseguir prever mudanças desses comportamentos a longo prazo. Por isso, deve-se comparar tendências de variáveis hidrológicas em um período recente, com seus valores para projeções climáticas, de forma a observar as mudanças esperadas em seus valores. Por exemplo, a tendência de vazões em um trecho de rio pode ter seu sinal invertido a longo prazo, o que não poderia ser previsto sem a consideração de mudanças climáticas.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é avaliar a tendência das vazões mínimas, médias e máximas da rede hídrica da América do Sul nos últimos 40 anos e realizar uma comparação com as projeções de Brêda *et al.* (2020) e com resultados de outros estudos de mudanças climáticas para as principais bacias hidrográficas do Brasil, conferidos através da plataforma YARA (Amorim *et al.*, 2020), podendo-se ter uma noção de quais locais terão o sinal de tendência de vazão invertido, ou mantido. Para isso, utilizou-se dados de vazões diárias simuladas pelo modelo hidrológico MGB-SA (Siqueira *et al.*, 2018), validando-os com dados observados de estações fluviométricas da Agência Nacional das Águas (ANA) e com as tendências encontradas por Bartiko (2020).

## 3. METODOLOGIA

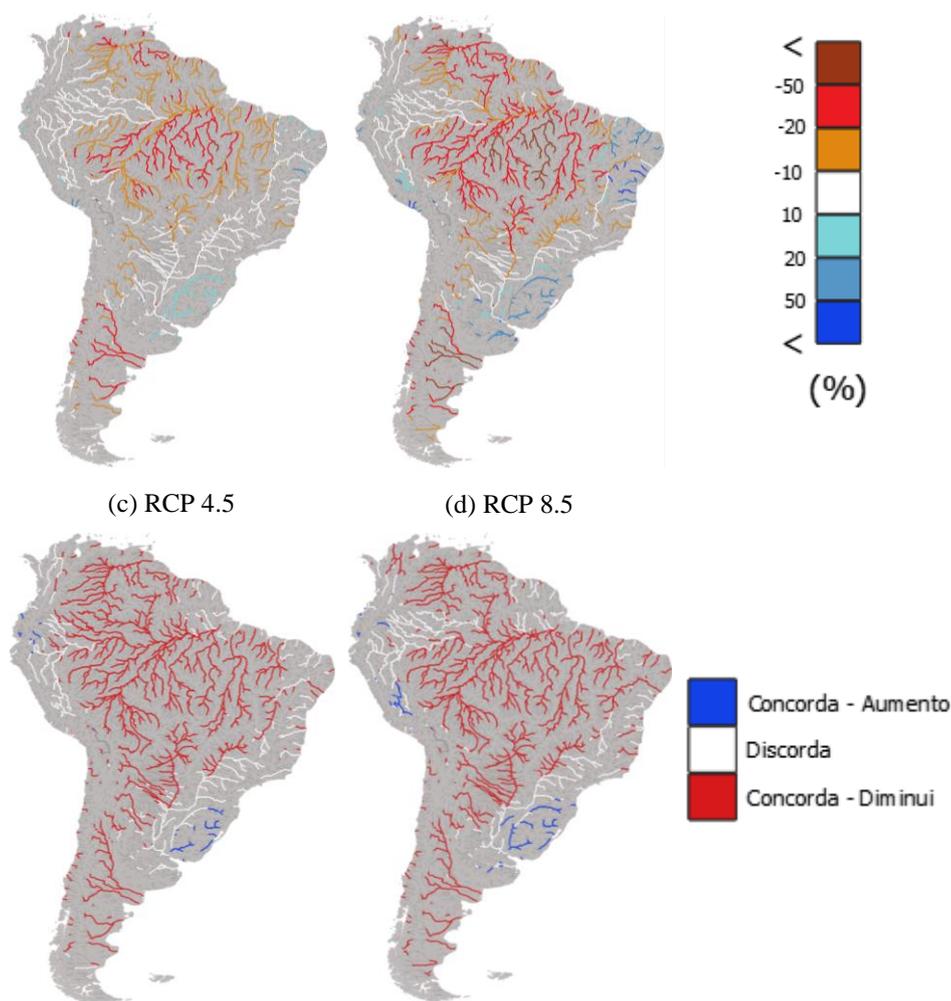
### 3.1. Modelo hidrológico e hidrodinâmico (MGB-SA)

Para a análise de tendência das vazões, utilizou-se a base de dados de vazões diárias do modelo hidrológico e hidrodinâmico para grandes bacias, aplicado em escala continental, MGB-SA (Siqueira *et al.*, 2018), para o período de 1980 a 2020. O modelo representa a rede hídrica com área de drenagem acumulada igual ou superior a 1000 km<sup>2</sup>, segmentada em trechos de aproximadamente 15 km em toda a América do Sul, totalizando cerca de 33 mil segmentos. Cada trecho possui uma área incremental associada, chamada de minibacias, discretizada em unidades de resposta hidrológicas (URHs), de características homogêneas, para as quais são calculados os parâmetros do balanço hídrico, levando em consideração o tipo do solo e o seu uso e o tipo de vegetação presente.

### 3.2. Impactos de mudanças climáticas na América do Sul (SACCI)

O estudo de Brêda *et al.* (2020) mostra os impactos das mudanças climáticas sobre parâmetros do balanço hídrico na América do Sul ao final do século XXI para dois cenários de emissão de gases do efeito estufa distintos: RCP 4.5 e RCP 8.5. Para isso, utilizou um conjunto de 25 modelos climáticos globais (GCMs) da CMIP5. Os resultados desses modelos foram usados como forçantes do MGB-SA. A Figura 1 mostra os resultados obtidos por Brêda *et al.* (2020) para as vazões médias.

Figura 1 – Tendência das vazões médias para 2081-2100 para os cenários (a) RCP 4.5 e (b) RCP 8.5 e concordância entre as previsões dos modelos climatológicos para o (c) RCP 4.5 e para o (d) RCP 8.5 (Brêda *et al.*, 2020)



Por fim, obteve-se os valores médios de vazão no período de 2081 a 2100, para os dois cenários considerados, possibilitando a comparação com os valores médios do período de referência (1986-2005). O estudo mostrou tendências positivas na bacia do rio Uruguai e negativas na região norte, em bacias na região amazônica, como as dos rios Tapajós, Xingu e Purus.

### 3.3. Plataforma YARA

A plataforma YARA (<http://www.labhidro.ufsc.br/yara/>), desenvolvida por Amorim *et al.* (2020), sintetiza os principais resultados de 42 artigos, revisados por pares, acerca dos impactos de mudanças climáticas nos recursos hídricos das principais bacias hidrográficas do Brasil. Os impactos são mostrados para as vazões mínimas, médias e máximas de forma resumida em uma tabela sob dois aspectos: *qualidade* e *consistência*. A *qualidade* é calculada a partir da metodologia do estudo, e a *consistência* é definida a partir das principais conclusões do estudo. O sinal da *consistência* indica a tendência obtida para a vazão no trabalho em questão.

### 3.4. Descrição da variabilidade

Primeiramente, para poder comparar tendências de vazões com as projeções climáticas, foi necessário verificar se o modelo MGB-SA poderia representar tendências de vazões máximas, médias e mínimas satisfatoriamente. Por fins de simplicidade, os cálculos foram realizados por meio de médias aritméticas. Para vazões médias, realizou-se esse procedimento para todas as vazões diárias

em cada um dos dois períodos de 20 anos (1980-1999 e 2000-2019), enquanto para as vazões extremas, aplicou-se a média aritmética para os máximos e mínimos anuais. A Figura 2 mostra os resultados obtidos para as tendências das vazões mínimas, médias e máximas entre os períodos definidos, utilizando os dados simulados do modelo MGB-SA e os dados observados em postos fluviométricos da ANA.

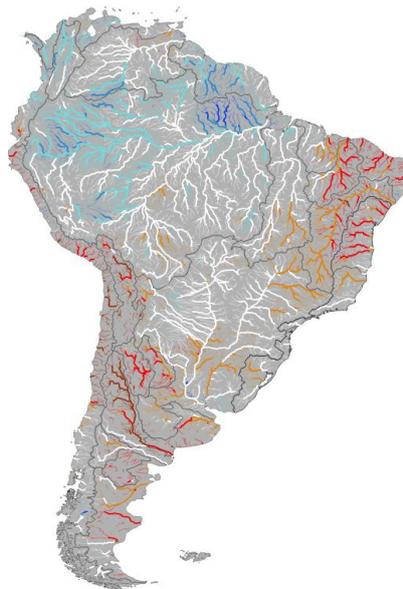
Figura 2 – Tendência de vazões (a)/(d) mínimas, (b)/(e) médias e (c)/(f) máximas entre os períodos 1980-1999 e 2000-

2019 (MGB-SA)

(a) Vazões mínimas (MGB-SA)

(b) Vazões médias (MGB-SA)

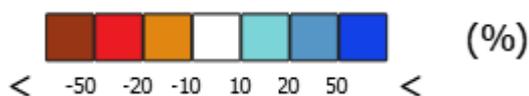
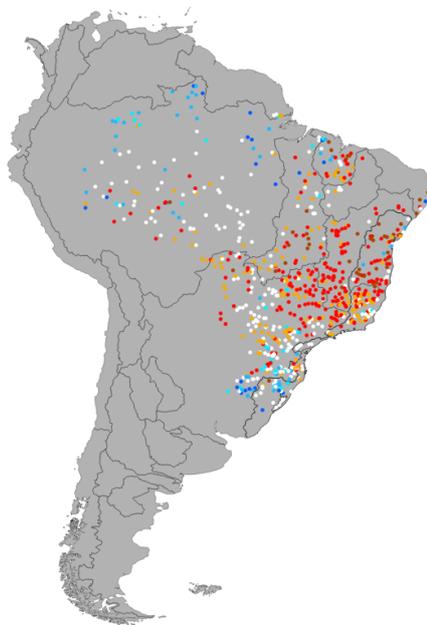
(c) Vazões máximas (MGB-SA)



(d) Vazões mínimas (Postos - ANA)

(e) Vazões médias (Postos - ANA)

(f) Vazões máximas (Postos - ANA)



Os resultados das tendências foram considerados neutros dentro da faixa de  $\pm 10\%$  e positivos, ou negativos, em valores fora desse intervalo. Esse limiar foi considerado adequado, por não ter sido

feita uma análise estatística complexa dos dados. Aplicando esse processo para os valores simulados e observados, pôde-se verificar a concordância entre as tendências obtidas através do modelo MGB-SA e as obtidas através de medições *in loco*.

### 3.5. Triagem dos postos fluviométricos

A seleção de postos fluviométricos a serem utilizados partiu da base de dados da Agência Nacional de Águas. Da qual foram baixados os dados de todas as estações fluviométricas (15536 estações) e aplicada a seguinte sequência de filtros:

- I) Medições identificadas como 0 (zero) m<sup>3</sup>/s no lugar de falha tornam-se falha. A identificação deu-se de forma automática pela consideração de que: em postos com Q90 superior a zero as vazões iguais a zero; em postos com Q90 igual à zero, se medições de 0 m<sup>3</sup>/s ocorrem na vizinhança de falhas ou se a vazão no dia anterior for maior do que 50 m<sup>3</sup>/s, também representam falhas;
- II) Vazões constantes por um longo período tornam-se falhas. Neste caso verificou-se quantas vezes um mesmo valor de medição se repetia ao longo da série disponível. Caso o valor mais repetido na série apresentasse mais que uma vez e meia o número de repetição de 99% dos outros dados, este valor era considerado falho quando ocorrido em dias seguintes;
- III) Medições superiores a 1000mm/dia e vazões negativas tornam-se falhas.
- IV) Estações localizadas em trechos de rio com DOR (*Degree of Regulation*) > 5 são consideradas sob influência de reservatórios e excluídas da base de dados;

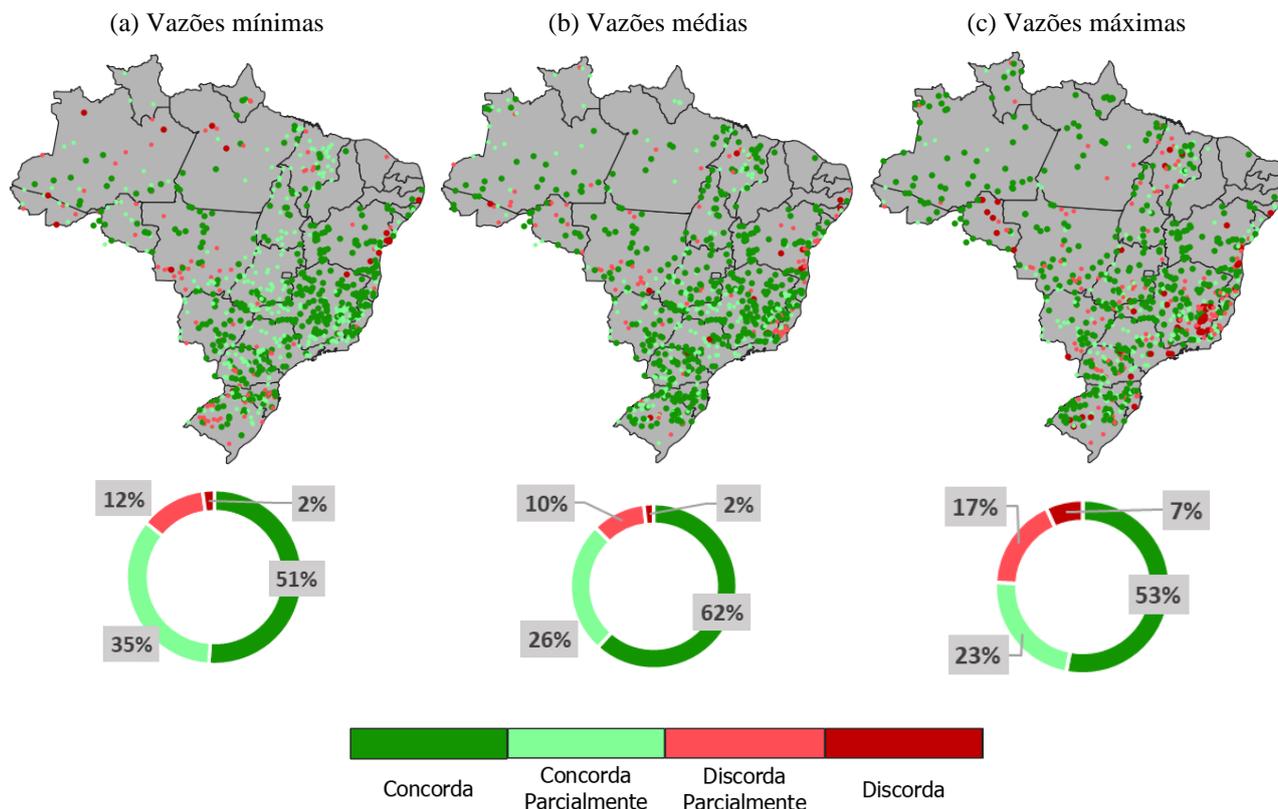
Ao fim desta sequência automática de filtragem, observou-se que alguns postos ainda apresentavam algumas inconsistências nas medições (por exemplo, ruídos na série temporal, valores extremos incoerentes com a realidade do posto, efeitos decorrentes de operação de reservatórios etc.). Para remoção destas estações da base de dados, foi realizada uma inspeção manual.

Por fim, para a seleção dos postos utilizados para os cálculos, utilizou-se um critério de corte de 50 % de dados presentes em cada um dos períodos de 20 anos, ou seja, só foram considerados postos com uma porcentagem de 50 % ou mais de dados para os dois períodos de interesse (1980-1999 e 2000-2019). Ao final do processo, chegou-se a um total de 786 postos fluviométricos selecionados para a validação das tendências simuladas. O cálculo das vazões médias foi feito para todos os dados dos postos triados. Já para a definição das vazões mínimas e máximas anuais, foram utilizados apenas os anos com 100 % de dados. Na Figura 2, pode-se observar a rede de postos utilizada no presente estudo, com as tendências descritas de forma semelhante às vazões simuladas.

### 3.6. Concordância entre dados observados e simulados

Para a verificação da representatividade dos dados simulados, utilizou-se a seguinte caracterização da concordância entre os dados do MGB-SA e os dados observados no Brasil: *Concordância* (para dois valores fora da faixa de  $\pm 10\%$  e de mesmo sinal, ou dois valores neutros), *Concordância Parcial* (para um valor fora da faixa de  $\pm 10\%$  e um valor neutro de mesmo sinal), *Discordância Parcial* (para um valor fora da faixa de  $\pm 10\%$  e um valor neutro de sinal oposto) e *Discordância* (para dois valores fora da faixa de  $\pm 10\%$  e de sinais opostos). As classificações parciais foram criadas devido à abrangência que foi atribuída à faixa neutra, de forma a não perder o sinal da tendência obtido, ao mesmo tempo abrandando o resultado.

Figura 3 – Concordância entre as tendências de vazões (a) mínimas, (b) médias e (c) máximas entre os períodos de 1980-1999 e 2000-2019 dos Postos Fluviométricos (ANA) e dos dados simulados (MGB-SA)



A Figura 3 mostra os resultados gerados pela análise descrita no presente item. Nela, pode-se notar que as maiores discordâncias foram obtidas para as vazões máximas, representando cerca de 24 % dos postos utilizados no estudo, sendo que para as vazões mínimas e médias, as discordâncias se deram próximas a 14 % e 12 %, respectivamente. Por essas observações, considerou-se que as tendências de vazões obtidas através do modelo MGB-SA são representativas para as obtidas através dos dados observados.

### 3.7. Validação da tendência de vazões máximas

Foi realizada uma comparação da tendência de vazões máximas no Brasil obtida no presente artigo, no período entre 1980 e 2019, com a obtida por Bartiko (2020), no período entre 1976 e 2015. Nessa comparação, verificou-se discordâncias principalmente na região sul e em parte da região sudeste, onde Bartiko (2020) encontrou aumento das vazões máximas, enquanto o presente estudo indica um decréscimo na magnitude dos eventos. No restante das regiões do país, houve grande concordância entre o sinal das tendências.

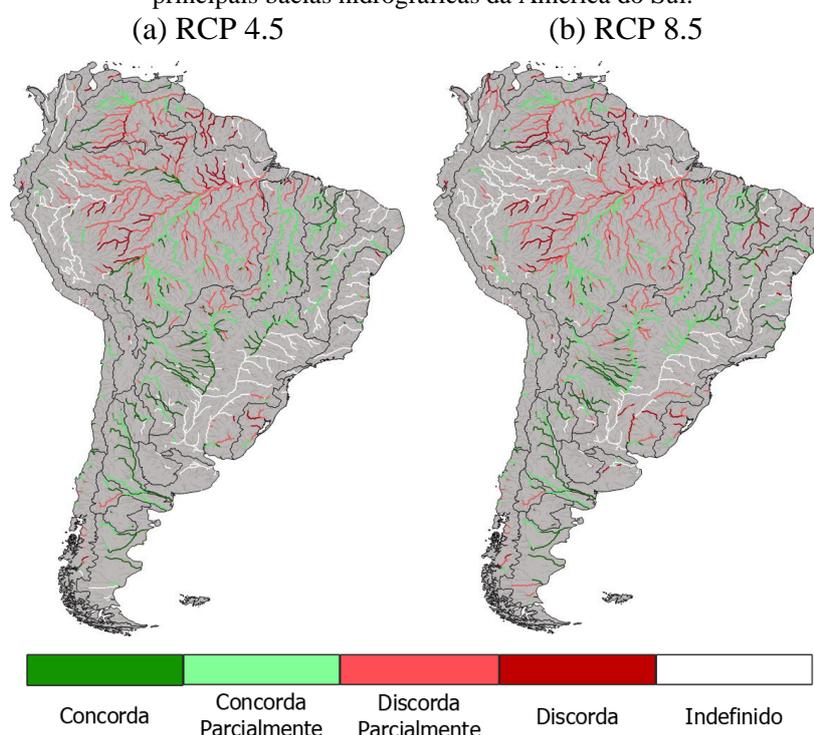
Vale ressaltar que Bartiko (2020) realizou análises estatísticas criteriosas dos dados de postos fluviométricos, enquanto no presente estudo utilizou-se uma avaliação simples, visando a facilidade de aplicação para a verificação da concordância entre vazões simuladas no modelo MGB-SA e vazões observadas em postos fluviométricos da Agência Nacional de Águas (ANA). Tendo em vista essa divergência, os resultados do estudo nessas regiões são menos confiáveis que o restante.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Concordância entre as tendências dos períodos de referência e das projeções climáticas para a América do Sul

Admitindo que o modelo MGB-SA representa tendências de vazões mínimas, médias e máximas satisfatoriamente, pode-se comparar a tendência dos períodos de referência (1980-1999 e 2000-2019) com os valores obtidos a partir de projeções climáticas. Na Figura 4, é mostrada a concordância entre as tendências de vazões médias simuladas para os últimos 40 anos e projetadas por Brêda *et al.* (2020) para o final do século XXI.

Figura 4 – Mapa de concordância entre as tendências de vazões médias do período entre 1980-1999 e 2000-2019 e das projeções climáticas para o período 2081-2100 para os cenários (a) RCP 4.5 e (b) RCP 8.5, com a divisão das principais bacias hidrográficas da América do Sul.



A classe “Indefinido” se refere a trechos de rio em que não houve concordância entre as tendências de vazões dos modelos climáticos globais utilizados por Brêda *et al.* (2020). O restante dos trechos de rio retrata a concordância entre as tendências entre 1980-1999 e 2000-2019 e as projeções climáticas para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. As bacias hidrográficas com maior quantidade de dados são a Orinoco, a Amazônica e a Tocantins-Araguaia, na região norte do continente sul-americano. Em grande parte dos trechos de rio nas bacias hidrográficas Orinoco e Amazônia há discordância entre as tendências atuais e as projeções climáticas. Isso indica que o acréscimo radiativo na atmosfera terrestre das projeções climáticas pode impactar a vazão média dessas regiões de modo que o sinal de sua tendência se torna o oposto do observado no período presente. Já para os locais onde há concordância, torna-se difícil de realizar a mesma análise, visto que não se pode dizer que não haverá grande impacto, já que as mudanças climáticas poderiam intensificar o valor das tendências. Uma maneira de verificar esses últimos casos mais detalhadamente seria analisar o valor das tendências, além de seu sinal, mas, como não houve uma avaliação estatística complexa dos dados, não se pôde seguir essa linha.

## 4.2. Concordância entre as tendências dos períodos de referência e das projeções climáticas para o Brasil

Comparando as tendências obtidas no presente estudo com resultados de estudos sobre projeções climáticas sintetizados na plataforma YARA (Amorim *et al.*, 2020), pôde-se fazer uma análise similar à que foi feita com o estudo de Brêda *et al.* (2020). A Tabela 1 mostra a análise realizada para as bacias (a) Amazônica, (b) Tocantins-Araguaia, (c) Atlântico NE Ocidental, (d) Parnaíba, (e) Atlântico NE Oriental, (f) São Francisco, (g) Atlântico Leste, (h) Atlântico SE, (i) Paraná, (j) Paraguai, (k) Atlântico Sul e (l) Uruguai. Os resultados são dados pelo sinal da tendência média da vazão em cada bacia. Cada vazão (mínima, média e máxima) possui duas colunas: à esquerda, indicando o resultado da tendência entre os períodos 1980-1999 e 2000-2019, e à direita, indicando o resultado das projeções climáticas, obtidos pela plataforma YARA (Amorim *et al.*, 2020).

Tabela 1 – Comparação da tendência de vazões entre os períodos 1980-1999 e 2000-2019 com projeções climáticas obtidas através da plataforma YARA (Amorim *et al.*, 2020). Os símbolos “0 (+)” e “0 (-)” indicam resultados dentro do intervalo de  $\pm 10\%$ , considerado como neutro, enquanto o símbolo de “+” indica tendência positiva e “-” indica tendência negativa.

Tendência (+/-)

Bacia	Vazão mínima		Vazão média		Vazão máxima	
	1980-2019	Projeção Climática	1980-2019	Projeção Climática	1980-2019	Projeção Climática
(a) AMZ	0 (+)	-	0 (+)	-	0 (+)	0
(b) TOC	0 (-)	-	0 (-)	-	-	-
(c) AOC	0 (+)	-	0 (-)	-	-	-
(d) PNB	-	-	-	-	-	-
(e) AOR	-	-	-	-	0 (-)	0
(f) SFO	-	-	-	-	-	-
(g) ALT	-	-	-	-	-	-
(h) ASD	0 (-)	0	0 (-)	0	0 (-)	0
(i) PRN	+	-	0 (-)	-	-	+
(j) PRG	0 (+)	0	0 (-)	0	0 (+)	0
(k) ASU	0 (+)	0	0 (-)	+	0 (-)	+
(l) URU	0 (-)	-	0 (-)	+	0 (-)	+

Pode-se observar que as vazões das bacias Atlântico Sudeste e Paraguai não mostraram susceptibilidade às projeções climáticas e tampouco mostraram uma tendência além da faixa considerada neutra. Dentre as 10 bacias restantes, 6 apresentaram uma alteração da tendência, tendo o seu sinal invertido, ou passando de uma situação neutra a uma alterada. Uma dessas bacias é a Bacia Amazônica, que tem grande expressividade devido a sua extensão e às vazões expressivas de seus rios.

## 5. CONCLUSÕES

O presente estudo mostra que, mesmo com uma análise estatística simples, o modelo MGB-SA consegue representar bem as tendências dos dados observados nos postos fluviométricos da ANA. O cálculo simples das tendências de vazões fez com que se adotasse uma faixa extensa de incerteza, o que também afetou a análise dos resultados. Posteriormente, pode-se determinar as tendências de vazão de forma mais criteriosa, a fim de verificar as discordâncias encontradas na comparação com os valores obtidos por Bartiko (2020) nas regiões Sul e Sudeste do Brasil.

A comparação das tendências das vazões médias nos últimos 40 anos com as projeções feitas por Brêda *et al.* (2020) mostraram uma discordância na maior parte da Bacia Amazônica. A Tabela 1 mostra que 6 das 12 principais bacias hidrográficas brasileiras mostraram diferença entre as tendências dos últimos 40 anos com as de projeções climáticas visto os estudos disponibilizados na plataforma YARA (Amorim *et al.*, 2020). Isso indica que tendências passadas podem não representar bem tendências futuras, com casos de inversão de sinal. Considerando esses aspectos, pode-se afirmar que a gestão de recursos hídricos a longo prazo deve considerar os efeitos de mudanças climáticas, para evitar equívocos a respeito da disponibilidade hídrica em um dado local.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos à Pró-Reitoria de Pesquisa (PROPESQ) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelo apoio financeiro prestado a esse projeto. Também agradecemos ao grupo de pesquisa de Hidrologia de Grande Escala (HGE) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH- UFRGS) e ao Laboratório de Hidrologia (LabHidro) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), que prestaram auxílio com pesquisas científicas e ferramentas utilizadas no presente estudo.

## REFERÊNCIAS

AMORIM, P. B.; SOUZA, K. I. S.; CHAFFE, P. L. B. (2020). “A web-based tool for synthesis assessments of the impacts of climate change on water resources”. *Environmental Modelling & Software*, Volume 133, 2020, 104848, ISSN 1364-8152, <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104848>.

BARTIKO, D. (2020). “Cheias no Brasil: sazonalidade, tendências e análise de frequência”. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 137 p. 2020.

BRÊDA, J. P. L. F.; PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BRAVO, J. M.; SIQUEIRA, V. A.; STEINKE, E. B. (2020). “Climate change impacts on South America water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections”. *Climatic Change* 159, 503–522 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02667-9>

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>.