

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

SENSIBILIDADE DAS VAZÕES À VARIABILIDADE DA PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL

Arthur Kolling Neto¹; Rodrigo C. D. de Paiva²; Walter Collischonn³; Pedro T. Miranda⁴; Julia B. Rossi⁵; Wilany R. G. Alves⁶; Ingrid Petry⁷; Gabriel Matte⁸; Hugo de O. Fagundes⁹ Alexandre A. Araujo¹⁰ & Saulo A. de Souza¹¹

Resumo: Compreender o impacto das mudanças climáticas nos recursos hídricos ainda é desafiador para gestão e planejamento. Entretanto, quantificar a sensibilidade da vazão à variabilidade da precipitação é uma alternativa promissora para identificação de regiões mais vulneráveis, principalmente aos eventos extremos hidrológicos. O objetivo deste estudo foi avaliar a sensibilidade das vazões mínima, média máxima às mudanças climáticas, considerando a variabilidade da magnitude e distribuição temporal da precipitação na América do Sul. Dados de precipitação foram obtidos do conjunto de dados MSWEP e as vazões foram simuladas no modelo hidrodinâmico-hidrológico MGB-SA, de 1979 a 2014. As análises de sensibilidade da vazão às mudanças de precipitação mostraram que a alteração no volume apresentou maior impacto que a mudança da distribuição temporal. A sensibilidade das vazões mínima, média e máxima à alteração do volume de precipitação é maior em regiões de clima semiárido. A sensibilidade da vazão mínima à variação sazonal precipitação é, predominantemente, maior para sua redução, enquanto para vazões média e máxima ocorreu seu aumento. A sensibilidade da vazão à mudança de distribuição temporal das chuvas diárias apresentou menor variação espacial e magnitude, para vazão mínima houve alta elasticidade em regiões de cabeceira dos rios e nas vazões média e máxima baixos valores nos grandes rios. As curvas de elasticidade da vazão avaliadas apresentaram formas distintas, e que por sua vez, podem facilitar o entendimento das respostas das bacias hidrográficas aos eventos extremos hidrológicos.

Palavras-Chave – mudanças climáticas; elasticidade; extremos hidrológicos.

Abstract: Understanding the impact of climate change on water resources remains challenging for management and planning. However, quantifying the streamflow sensitivity to precipitation variability is a promising approach to identify more vulnerable regions, especially to hydrological extreme events. The aim of this study was to evaluate the sensitivity of minimum, mean, and maximum flows to climate changes, considering the variability of precipitation magnitude and temporal distribution in South America. Precipitation data were obtained from the MSWEP dataset,

1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), arthur.kolling@ufrgs.br

2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), rodrigo.paiva@ufrgs.br

3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), collischonn@iph.ufrgs.br

4) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), pedrotorresm121@gmail.com

5) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), juliabrusso@gmail.com

6) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), gabriel.matterios@gmail.com

7) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), wilanyg.alves@gmail.com

8) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), ingrid.petry@ufrgs.br

9) Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), h.o.fagundes@hotmail.com

10) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), alexandre.Araujo@ana.gov.br

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

and flows were simulated using the hydrodynamic-hydrological model MGB-SA, from 1979 to 2014. The sensitivity analysis of streamflow to precipitation changes showed that alterations in volume had a greater impact than changes in temporal distribution. The sensitivity of minimum, mean, and maximum streamflows to precipitation volume alteration was higher in semi-arid climate regions. The sensitivity of minimum flow to seasonal variation in precipitation was predominantly higher for reductions, while for mean and maximum flows, it exhibited an increase. Sensitivity of streamflow to changes in the temporal distribution of daily rainfall showed less spatial variation and magnitude, with high elasticity for minimum flow in headwater regions and low values for mean and maximum flows in large rivers. The evaluated flow elasticity curves presented distinct shapes, which can aid in understanding the responses of watersheds to hydrological extreme events.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e a variabilidade interanual do clima representam desafios significativos para a gestão dos recursos hídricos em escala global (Tang & Lettenmaier, 2012; Yang & Yang, 2011). Com base nas projeções dos modelos climáticos, é esperado um aumento de 1.5°C na temperatura global até o final do século. Mudança que influenciará nos padrões de precipitação em escala global, causando variações substanciais na distribuição e intensidade das chuvas e, conseqüentemente, alterará a evaporação e a vazão (Stocker et al., 2014). Desse modo, é fundamental compreender e quantificar esses efeitos para uma gestão eficaz dos recursos hídricos diante das mudanças climáticas (Stocker et al., 2014; Tang et al., 2019; Yang & Yang, 2011).

De acordo com o estudo realizado por Chou et al., (2014) na América do Sul, espera-se o aumento da precipitação média no Sudeste e sua redução em regiões localizadas entre as latitudes 5° e 20°S. Dentre as variáveis climáticas, a precipitação, influencia no comportamento de outras variáveis hidrológicas e é o principal impulsionador de modelos hidrológicos (Chiew, 2006; Ribeiro Neto et al., 2016), de modo que alterações positivas no regime de chuvas relacionam-se ao aumento de inundações e diminuição das secas, e o oposto ocorre quando as chuvas se tornam mais escassas (Gudmundsson et al., 2021).

Tendências de aceleração e desaceleração do ciclo hidrológico foram observados na América do Sul. Estas, por sua vez, são caracterizadas pelo aumento da frequência de chuvas extremas e inundações, bem como, pela redução da vazão durante as secas hidrológicas (redução da vazão de base), devido ao aumento da sazonalidade (Chagas et al., 2022; Gudmundsson et al., 2021). Além disso, espera-se a intensificação de eventos extremos, com ocorrência de estações úmidas intensas em regiões mais chuvosas e, estiagens prolongadas em regiões mais secas (Chagas et al., 2022; Chou et al., 2013).

Nas últimas décadas a ocorrência de eventos hidrológicos extremos e desastres naturais provocaram impactos negativos em várias regiões do Brasil. Em 2002, a ocorrência de períodos prolongados de estiagem, afetou usinas hidrelétricas e causou crises de apagão na maior parte do país (Valverde & Marengo, 2014). Eventos de secas também foram registrados no Nordeste, de 2012 a 2016, e em 2014 e 2015 no Sudeste do Brasil (Cuartas et al., 2022) e mais recentemente na bacia do Prata (Naumann et al., 2021). Além disso, a bacia do rio Amazonas tem enfrentado vários eventos extremos (Fleischmann et al., 2023). Medições de vazão indicaram o aumento dos níveis máximos de água desde o final da década de 1990, associadas ao aumento das chuvas (Barichivich et al., 2018); apesar disso, partes da Amazônia, como a porção centro-sul, enfrentaram várias secas extremas nos anos 2005 e 2010. Portanto, mudanças no regime de inundação da bacia amazônica podem produzir impactos sem precedentes em escalas locais e globais (Fleischmann et al., 2023).

A mudança climática é uma questão transversal que afeta muitos setores e está ligada a outros desafios globais (Feulner, 2017). E compreender os fatores que estão atuando nas modificações observadas na vazão não é uma tarefa trivial. Nesse contexto, uma alternativa para tal é quantificar a

sensibilidade da vazão às variáveis climáticas, como precipitação, evapotranspiração potencial e temperatura (Yang & Yang, 2011). A sensibilidade ou elasticidade da vazão pode ser definida como a mudança proporcional na vazão em relação à variação numa variável climática (Chiew, 2006). Recentemente, Anderson et al. (2023) descreveu a elasticidade como a variação percentual no balanço hídrico anual ou vazão média anual, resultante de uma mudança de um por cento em uma variável de interesse, considerando o comportamento ao longo de toda a curva de permanência de vazões.

A determinação da sensibilidade de vazões possibilita avaliar a influência da precipitação e demais variáveis sobre as mudanças na hidrologia do sistema, bem como, identificar locais que são mais vulneráveis a mudanças das respostas hidrológicas (Deusdará-Leal et al., 2022). A elasticidade é controlada por diferentes processos hidrológicos em diferentes escalas temporais (Zhang et al., 2022). Desse modo, este estudo tem o objetivo de avaliar a sensibilidade das vazões mínima, média máxima às mudanças climáticas, considerando a variabilidade da magnitude e distribuição temporal da precipitação na América do Sul.

2. METODOLOGIA

A elasticidade da vazão foi calculada para toda América do Sul, utilizando informações de precipitação obtidas a partir do conjunto de dados MSWEP (*Multi-Source Weighted-Ensemble Precipitation*), que possui resolução espacial de 0,25° e temporal de 3 horas. O período de análise foi compreendido entre os anos de 1979 e 2014. Os dados de vazão foram obtidos por meio de simulação com o modelo hidrodinâmico-hidrológico MGB SA (Modelo de Grandes Bacias, América do Sul), desenvolvido por Siqueira et al., (2018). As vazões foram espacializadas na hidrografia com trechos de rios maiores que 10.000 km².

A avaliação da sensibilidade das vazões ao regime de precipitação foi realizada a partir da avaliação da intensificação (atenuação) na magnitude e variabilidade temporal da chuva. O valor médio da alteração na precipitação para cada alteração (aumento/redução) foi obtido conforme proposto por Brêda et al. (2020), baseando-se na equação a seguir.

$$P'(t) = P_{ref}(t) \cdot (1 + fator) \quad (1)$$

em que, P' é a precipitação modificada; P_{ref} é a precipitação de referência no tempo t ; e $fator$ é equivalente aos percentuais de alteração $\pm 20\%$.

Para avaliação da sensibilidade da vazão em relação à magnitude das chuvas, considerou-se a modificação no volume total de precipitação com um aumento ou redução correspondente ao fator de alteração percentual. Na avaliação da distribuição temporal da precipitação foi considerada a intensificação (atenuação) da sazonalidade, caracterizada pelos períodos de cheias e estiagem, e da variação diária (menor duração). Para distribuição sazonal, o volume total de chuvas foi mantido constante, e houve o aumento (diminuição) da chuva na estação chuvosa, e diminuição (aumento) na estiagem. E na distribuição temporal diária, o volume total também se manteve inalterado e, realizou-se o aumento das precipitações mais intensas e a diminuição daquelas mais fracas.

A elasticidade/sensibilidade (ε) de vazão à chuva é dada pela razão entre a variação relativa da vazão e a precipitação, e foi calculada para a vazão média e para as vazões mínima e máxima, com 10% e 95% de permanência no tempo, respectivamente. A elasticidade foi estimada pela seguinte equação:

$$\varepsilon = \frac{(Q' - Q_{ref})/Q_{ref}}{(P' - P_{ref})/P_{ref}} \quad (2)$$

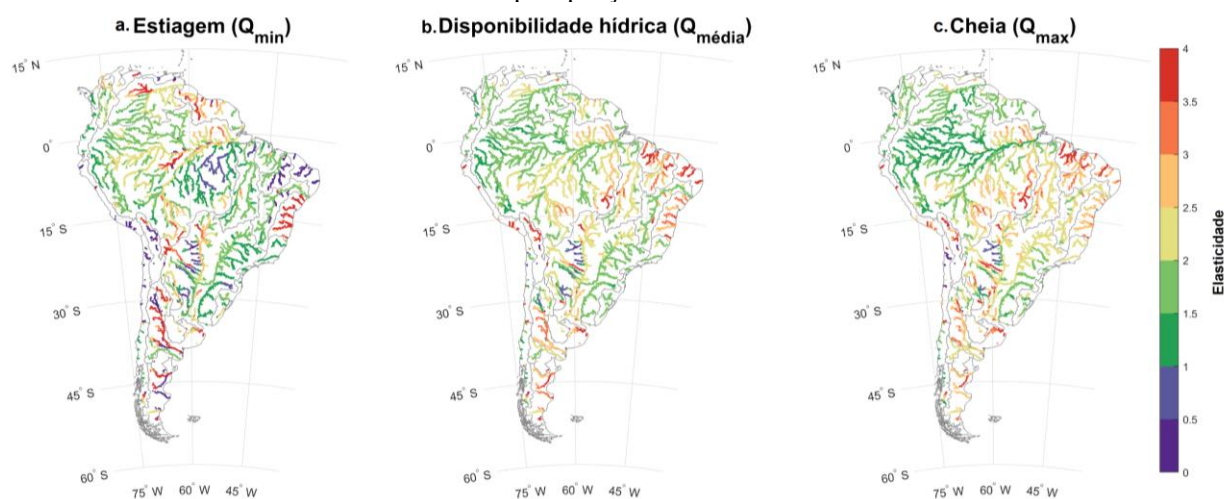
em que ε é a elasticidade; Q' é a vazão para o cenário definido; Q_{ref} é a vazão de referência; P' é a precipitação para o cenário modificado; P_{ref} é a precipitação de referência.

Com o intuito de compreender as respostas hidrológicas em relação a precipitação, utilizando o conceito proposto por Anderson et al., (2023), foram elaboradas “curvas de elasticidade” a partir dos dados obtidos com a alteração do volume de precipitação. As curvas de elasticidade foram geradas por meio da estimativa da elasticidade para toda a curva de permanência de vazões, para rios com diferentes regimes hidrológicos e representativos no contexto nacional, permitindo a avaliação mais completa de como a vazão responde a mudanças na precipitação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 são apresentados mapas de sensibilidade da vazão mínima (Q_{95}), média ($Q_{média}$) e máxima (Q_{10}) para América do Sul, considerando alteração de 20% no volume de precipitação. Em geral, os valores predominantes de elasticidade variaram de 1 a 2 nas diferentes magnitudes de vazão. Considerando o período de estiagem (Q_{min}), os menores valores de elasticidade foram registrados na bacia do Atlântico Nordeste Oriental, no Paraguai (e.g. Gran Chaco) e no sudoeste do continente, locais cujos rios possuem regime intermitente ou de baixas vazões. Por sua vez, os maiores valores de elasticidade ocorreram, principalmente, na região norte da América do Sul, no Atlântico Leste (semiárido) e nos Andes. Nesse sentido, alta elasticidade, como no semiárido brasileiro, significa que uma pequena variação na precipitação causa uma grande variação na vazão.

Figura 1 – Sensibilidade das vazões (a) mínima (Q_{95}), (b) média ($Q_{média}$) e (c) máxima (Q_{10}), à alteração de 20% no volume de precipitação na América do Sul



A vazão média apresentou maior sensibilidade em regiões com baixa precipitação anual, como no sul dos Andes, Patagônia e no semiárido. Apesar disso, alta elasticidade foi registrada em regiões úmidas, como rio Xingu (Brêda et al., 2020). Estes resultados reforçam a influência da precipitação sobre a elasticidade da vazão, uma vez que esta reflete a aridez, e por conseguinte, o coeficiente de escoamento. Valores altos de elasticidade ocorreram em regiões secas (Chiew, 2006; Fu et al., 2007; Ribeiro Neto et al., 2016), e baixa elasticidade em regiões influenciadas por planícies de inundação e intermitência dos rios, como afluentes da margem direita do rio Paraguai (e.g. Gran Chaco).

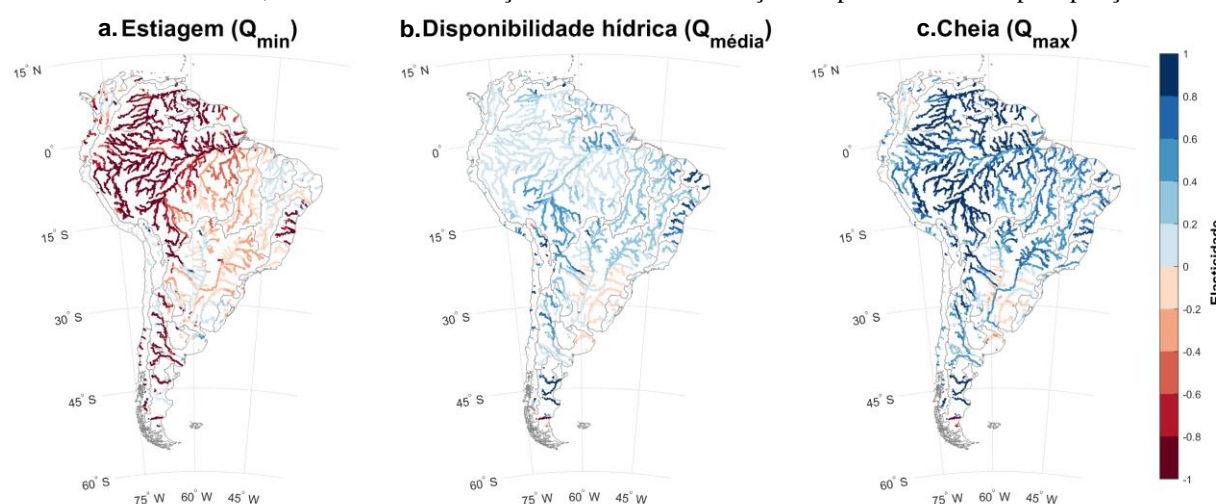
Em geral, os valores de elasticidade para a disponibilidade hídrica estiveram majoritariamente concentrados entre 1,5 e 2,5, indicando que a alteração de 20% no volume de precipitação, provocaria alterações de 30% e 50%, respectivamente, no escoamento superficial. Esta faixa é geralmente consistente com estudos regionais de elasticidade de precipitação de observações (Chiew, 2006; Sankarasubramanian et al., 2001). Elasticidades da vazão à precipitação média foram calculadas para 194 bacias hidrográficas globais, e variaram de 1 a 3 (Tang & Lettenmaier, 2012). Yang & Yang, (2011) relataram elasticidade de precipitação variando de 1,3 a 3,9 em 89 bacias hidrográficas das bacias do rio Hai e do rio Amarelo e Chiew, (2006) encontrou valores de 2 a 3,5 no sudoeste da

Austrália. Os valores da amplitude de variação obtidos (0,5 a 4,5) indicaram coerência com a literatura e que no âmbito da gestão e planejamento regiões, como o semiárido, devem ser sinalizadas.

Para as cheias (Q_{10}) os valores de elasticidade concentraram-se acima de 2 na maior parte das regiões, com exceção da bacia do Amazonas, Pampa e dos afluentes do Gran Chaco, que permaneceram menos sensíveis às diferentes magnitudes da vazão. Ao avaliar a sensibilidade das vazões extremas, rios com planícies de inundação (bacia Amazônica e do Paraguai) foram mais sensíveis às estiagens do que as cheias, enquanto em regiões menos úmidas (bacias do rio São Francisco, Tocantins e Paraná) as vazões máximas foram mais influenciadas pela mudança na chuva.

Na Figura 2 são apresentados mapas de elasticidade média das vazões com alteração da distribuição sazonal de precipitação na América do Sul. Os valores de elasticidade para alteração da distribuição sazonal tiveram menor amplitude (-1 a 1) que o cenário de alteração do volume, além disso, foram encontrados valores negativos (maior sensibilidade à redução da chuva). A intensificação da sazonalidade gerou resultados bem delineados nas vazões de estiagem (Figura 2a), em que o aumento da sazonalidade provocou a redução das vazões mínimas (bacia Atlântico leste e norte da América do Sul). O aumento da elasticidade das vazões mínimas devido a sazonalidade, ocorreu em poucas regiões (e.g. rios Parnaíba e Paraguai) e com baixa magnitude ($\varepsilon = 0,2$). Por fim, elasticidades negativas podem estar relacionadas à maior diminuição da precipitação ou associada à variação de temperatura (Tang et al., 2019; Yang & Yang, 2011).

Figura 2 – Sensibilidade das vazões (a) de estiagem (Q_{95}), (b) disponibilidade hídrica ($Q_{médica}$) e (c) de cheia (Q_{10}) na América do Sul, considerando a alteração de 20% na distribuição temporal sazonal da precipitação



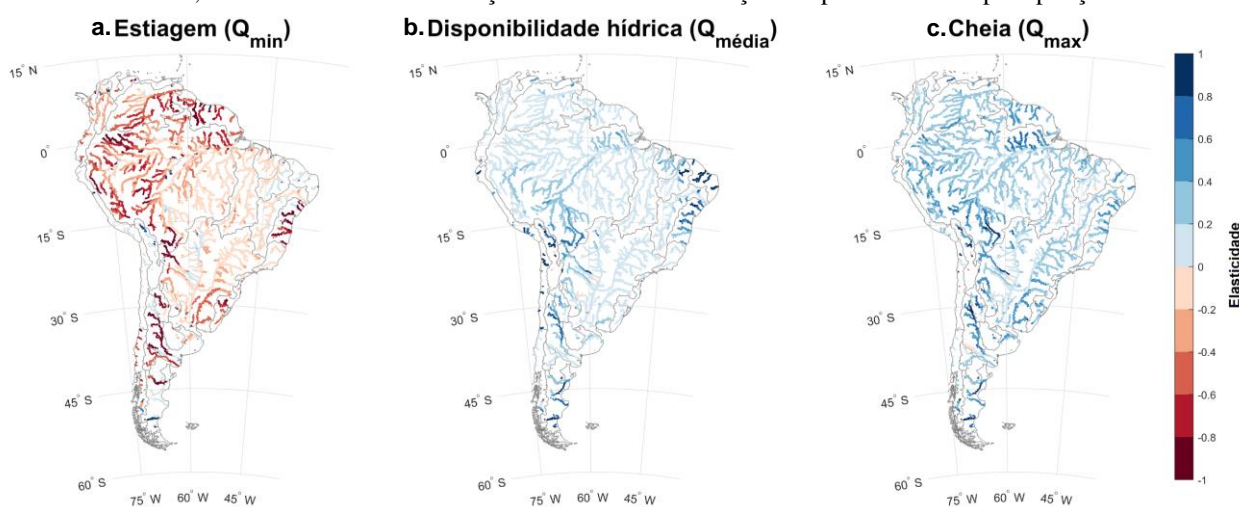
A elasticidade sazonal da vazão média (Figura 2b) apresentou valores que se concentraram em torno 0,4, e maiores elasticidades ($\varepsilon = 0,6$ a 1) no sul da bacia Amazônica (e.g., rio Madeira) e em partes do semiárido. A sazonalidade influenciou com maior intensidade em trechos de rios menores. Já a região dos rios Uruguai e Iguazu apresentaram sensibilidade à redução da vazão com a intensificação da sazonalidade ($\varepsilon = -0,2$). A vazão máxima apresentou maior magnitude nos valores de elasticidade sazonal do que a vazão média. Com maior sensibilidade nos rios da região Norte e menor na porção no Sul, (e.g., rios Paraguai, Uruguai e Iguazu). A região Amazônica apresentou sensibilidade aos extremos hidrológicos, comportamento, que segundo Chagas et al., (2022), advém da aceleração do ciclo hidrológico (enchentes e secas mais severas) e está relacionado a chuvas mais extremas e ao desmatamento.

A intensificação da sazonalidade pode provocar danos socioeconômicos e ecológicos diversos. Períodos mais longos de seca ou enchentes podem causar a perda de ecossistemas úmidos na Amazônia e, conseqüentemente, causar mudanças na composição e distribuição de espécies de fauna e flora adaptadas a esses ambientes, caracterizados por flutuações nos regimes fluviais-lacustres e

fluviais-marinhos (Barros & Albernaz, 2014). O aumento da frequência de enchentes e inundações em grandes cidades acarretaria prejuízos econômicos (Valverde & Marengo, 2014), com riscos de desastres e perdas de vidas humanas. Além disso, a intensificação da estiagem em regiões como planalto brasileiro poderia afetar a produtividade agrícola e a segurança alimentar global (Chagas et al., 2022).

Na Figura 3 são apresentados os mapas de sensibilidade das vazões mínima, média e máxima para alteração da distribuição temporal das chuvas diárias. Em geral, os valores de maior elasticidade (positiva/negativa) não apresentaram continuidade ao longo de grandes rios, ou seja, dispersos geograficamente. Maiores sensibilidade à redução da vazão foram registradas no período de estiagem (Figura 3a), comportamento que pode ser entendido pela incapacidade de recarga das vazões de base, responsáveis pela manutenção das vazões no período de estiagem. Afluentes de grandes rios, principalmente em regiões de cabeceira, mostraram-se mais sensíveis às chuvas diárias.

Figura 3 – Sensibilidade das vazões de (a) estiagem (Q_{95}), (b) disponibilidade hídrica e (c) cheia (Q_{10}) na América do Sul, considerando a intensificação de 20% na distribuição temporal diária de precipitação

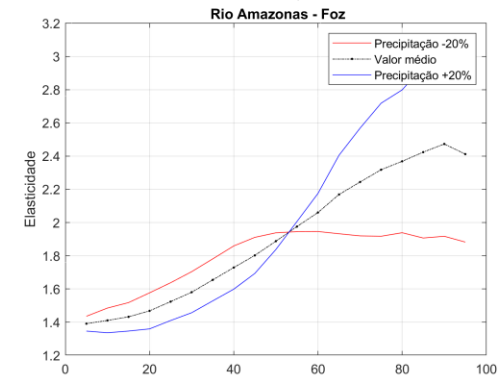
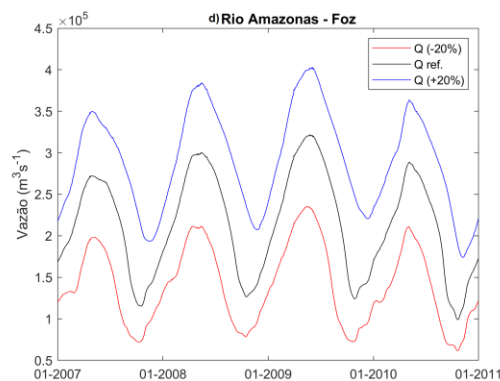
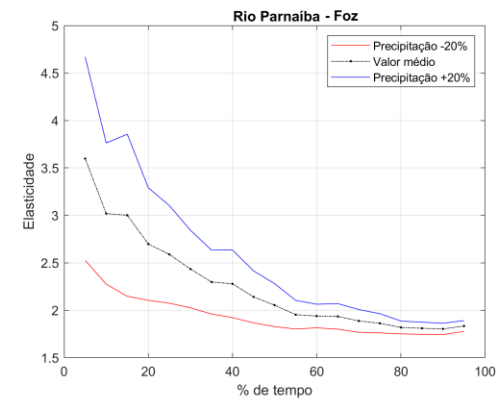
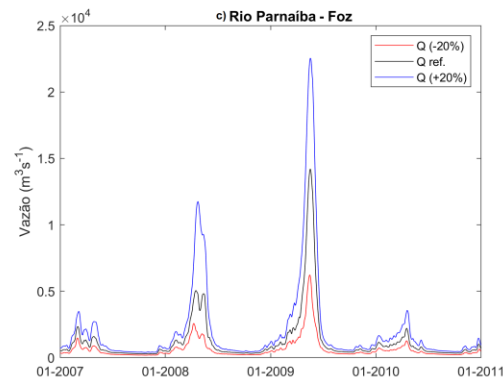
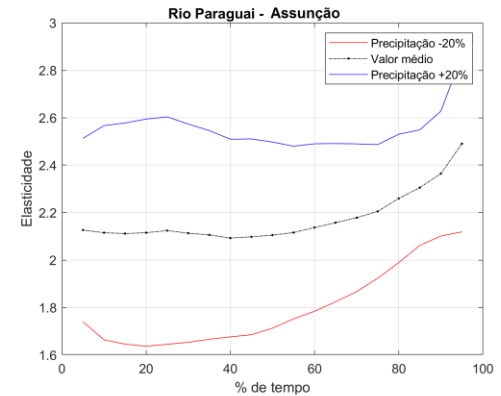
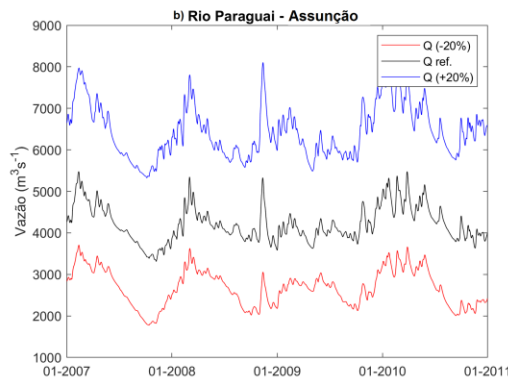
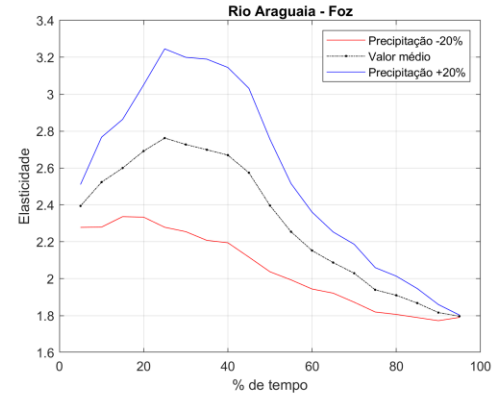
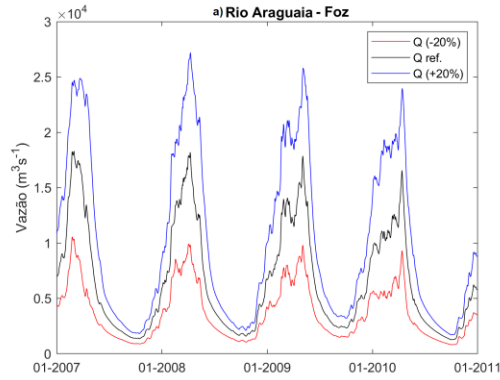
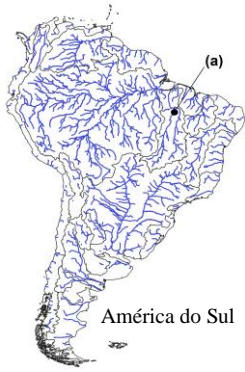


A alteração da precipitação diária na disponibilidade hídrica (Figuras 3b) foi mais sensível ao aumento da vazão média. As regiões com alta elasticidade seguiram os padrões espaciais observados com a modificação da distribuição sazonal da chuva. Maiores valores de elasticidade ocorreram da região do semiárido (e.g. Atlântico Nordeste e Atlântico Leste) e sul da bacia Amazônica (rios Mamoré e Beni). Para a cheia (Figura 3c) a alteração da precipitação diária teve pouca variação na magnitude da elasticidade ($\varepsilon = 0,2$ a $0,6$). Grandes rios (e.g. Amazonas, Tocantins, Paraguai, Paraná) foram menos sensíveis ($\varepsilon = 0,2$) que os cursos d'água menores ($\varepsilon = 0,4$).

A mudança no regime de chuvas pode ocorrer por uma combinação de fatores, de modo que um período em que a precipitação anual é maior pode ser o resultado de chuvas mais frequentes e/ou porque as chuvas são de maior intensidade (Collischonn et al., 2001). E para determinar se tais fatores operam, é necessário analisar sequências de chuvas diárias (Collischonn et al., 2001). O aumento da intensidade da precipitação implicou no aumento do escoamento das vazões média e máxima. Chuvas de grande intensidade, em curtos intervalos de tempo, provocam grandes escoamentos superficiais, mesmo em solos não saturados, podendo ocasionar enchentes, deslizamentos e inundações (Hewlett, 1982).

Na Figura 4 são apresentados hidrogramas e curvas de elasticidade dos rios (a) Araguaia (Foz), (b) Paraguai, em Assunção (PY), (c) Parnaíba (Foz) e (d) Amazonas (Foz), considerando alterações de $\pm 20\%$ no volume total de precipitação.

Figura 4 – Hidrogramas e Curvas de elasticidade dos rios (a) foz do Araguaia (b) Paraguai, em Assunção, (c) foz Parnaíba e (d) foz do Amazonas, simuladas com o modelo hidrológico MGB AS, considerando alterações de $\pm 20\%$ no volume total de precipitação



Segundo Anderson et al., (2023), a sensibilidade da vazão à variação da chuva não é constante ao longo da curva de permanência. No rio Araguaia (Figura 4a), localizado na bacia do rio Tocantins, o regime hidrológico é caracterizado por altos picos de vazões durante meses chuvosos, picos secundários nos períodos de vazantes (repiquetes) e períodos de estiagem (Aquino et al., 2005). A curva de elasticidade apresentou maior sensibilidade entre o intervalo de permanência de 20 a 40%

no tempo e, decresceu, cerca de uma unidade, à medida que se aproximou da vazão mínima. Apesar disso, o rio ainda se mostrou sensível à variação da precipitação na estiagem ($\varepsilon = 1,8$).

No estudo realizado por Gomes et al., (2022) na bacia do rio Araguaia, foi evidenciado que as mudanças no uso e cobertura do solo provocaram impactos maiores e mais significativos sobre o regime hidrológico em relação a fatores naturais. Entretanto, vale ressaltar que a região do Baixo Araguaia apresenta sérias condições de risco, por ser climatologicamente mais chuvosa e sensível aos eventos de La Niña.

O rio Paraguai (Figura 4b) é caracterizado por uma vasta área de inundação, considerada uma das maiores áreas úmidas contínuas do mundo, apresenta amplitude do pulso de inundação e hidrodinâmica à sazonalidade (Oliveira et al., 2013). A curva de elasticidade apresentou comportamento aplanado até vazões de 60 % permanência no tempo, aumentando a sensibilidade nas vazões mínimas. Curvas aplanadas foram obtidas por Anderson et al., (2023) e atribuídas às características físicas das bacias hidrográficas uma vez que indica que as vazões altas e baixas têm aproximadamente a mesma resposta às mudanças de precipitação dentro de uma bacia particular.

Collischonn et al., (2001) notaram o aumento das vazões na bacia do rio Paraguai desde 1970, e que, apesar das intensas modificações no uso e cobertura da bacia este comportamento apresentou consistência com mudança no regime de chuvas. Não obstante, ao avaliar os índices extremos de precipitação na bacia do Paraguai (Valverde & Marengo, 2014), notaram tendências crescentes de dias consecutivos sem chuva em regiões bacia.

No rio Parnaíba (Figura 4c), localizado no semiárido, a variação no nível das águas reflete a influência da estação chuvosa, com uma vazão quase torrencial, e no período de estiagem, composto por rios intermitentes (Lins & de Andrade, 1975). Além da alta magnitude da elasticidade ($\varepsilon > 4$), a curva de elasticidade demonstrou que vazões altas foram mais sensíveis à mudança da precipitação, porém mesmo na estiagem, a sensibilidade possuiu valor de elasticidade igual a 2. Desse modo, a alteração de 20% na precipitação provocaria mudança de 40% no escoamento.

A bacia do rio Amazonas (Figura 4d) é o maior sistema fluvial da Terra e possui regime hidrológico com pulsos de inundação sazonal com duração de meses, e dita a estrutura ecológica e a função de suas planícies aluviais (Fleischmann et al., 2023). Na curva de elasticidade as vazões máximas são menos sensíveis que as mínimas. Além disso, a inversão do sinal entre as curvas de aumento/ redução da precipitação pode ter sido influenciadas pelo efeito das planícies de inundação, uma vez que grandes variações sazonais e interanuais na profundidade e extensão da inundação provocam variações nos níveis de água, a proporção de habitats aquáticos muda consideravelmente (Sorribas et al., 2016).

Cabe salientar que, do ponto de vista do setor hidrelétrico, a sensibilidade das vazões mínimas e médias à mudança do regime de chuvas pode afetar a manutenção dos reservatórios, uma vez que as usinas hidrelétricas são projetadas para atender regimes específicos de vazão (ANA, 2017). Queiroz, (2016) afirma que alterações substanciais nas vazões mínimas e regime sazonal podem afetar fortemente a produção de energia. Além disso, a persistência de déficits de chuvas nos últimos anos tem comprometido a produção de energia de muitas usinas hidrelétricas em todo o Brasil (Amorim & Chaffe, 2019).

No estudo realizado por Anderson et al., (2023) para os rios dos Estados Unidos, foram encontradas curvas de elasticidade com três formas. Curvas decrescentes com maior sensibilidade às vazões mais altas (e.g., rio Parnaíba), curvas planas sensíveis nos extremos hidrológicos e influenciadas pelas características da bacia (e.g., rio Paraguai) e curvas crescentes, com bacias de maior sensibilidade na vazão baixa (e.g., rio Amazonas), outras bacias têm maior sensibilidade nas vazões médias. Além das curvas citadas por Anderson et al. (2023), neste estudo foram encontradas com novos formatos, concavas e convexas (e.g., rio Araguaia) e que, portanto, podem ser exploradas em estudos posteriores.

4. CONCLUSÕES

A compreensão das mudanças climáticas pode ser melhorada a partir da aplicação de metodologias que possibilitem observar tendências e quantificar as alterações do comportamento do ciclo hidrológico ao longo dos anos. Neste estudo, notou-se que a sensibilidade das vazões é maior à alteração de volume da precipitação do que à sua variabilidade na distribuição temporal sazonal ou diária.

A sensibilidade/elasticidade das vazões mínima, média e máxima à alteração do volume de precipitação foi maior em regiões de clima semiárido. Houve concordância na distribuição espacial da elasticidade para vazão média e máxima. A sensibilidade da vazão mínima à variação sazonal precipitação foi, predominantemente, maior para redução das vazões, enquanto para vazões média e máxima ocorreu seu aumento. Além disso, destaca-se que regiões como a bacia Amazônica demonstraram alta elasticidade tanto ao aumento quanto à redução das vazões.

A sensibilidade da vazão à mudança de distribuição temporal das chuvas diárias apresentou menor variação espacial e magnitude, nas quais para vazão mínima houve alta elasticidade em regiões de cabeceira dos rios e para as vazões média e máxima menores sensibilidades foram registradas nos grandes rios. As curvas de elasticidade da vazão avaliadas apresentaram formas distintas, e que por sua vez, podem facilitar o entendimento do comportamento hidrológico e das respostas das bacias hidrográficas aos eventos extremos.

5. REFERÊNCIAS

- ANA, Agência Nacional de Águas (2017). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno*. Brasília.
- Anderson, B. J., Brunner, M. I., Slater, L. J., & Dadson, S. J. (2023). Elasticity curves describe streamflow sensitivity to precipitation across the entire flow distribution. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1–27.
- Aquino, S., Stevaux, J. C., & Latrubesse, E. M. (2005). Regime hidrológico e aspectos do comportamento morfohidráulico do rio Araguaia. In *Ano* (Vol. 6).
- Barichivich, J., Gloor, E., Peylin, P., Brienen, R. J. W., Schöngart, J., Espinoza, J. C., & Pattnayak, K. C. (2018). Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation. *Science Advances*, 4(9). https://doi.org/10.1126/SCIADV.AAT8785/SUPPL_FILE/AAT8785_SM.PDF
- Barros, D. F., & Albernaz, A. L. M. (2014). Possible impacts of climate change on wetlands and its biota in the Brazilian Amazon. *Brazilian Journal of Biology*, 74(4), 810–820. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.04013>
- 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*, 155(1), 37–57.
- Brêda, J. P. L. F., de Paiva, R. C. D., Collischon, W., Bravo, J. M., Siqueira, V. A., & Steinke, E. B. (2020). Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. *Climatic Change*, 159(4), 503–522.
- Chagas, V. B. P., Chaffe, P. L. B., & Blöschl, G. (2022). Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. *Nature Communications*, 13(1), 5136. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32580-x>
- Chiew, F. H. S. (2006). Estimation of rainfall elasticity of streamflow in Australia. *Hydrological Sciences Journal*, 51(4), 613–625. <https://doi.org/10.1623/hysj.51.4.613>
- Chou, C., Chiang, J. C. H., Lan, C. W., Chung, C. H., Liao, Y. C., & Lee, C. J. (2013). Increase in the range between wet and dry season precipitation. *Nature Geoscience* 2013 6:4, 6(4), 263–267. <https://doi.org/10.1038/ngeo1744>
- Chou, S. C., Lyra, A., Mourão, C., Dereczynski, C., Pilotto, I., Gomes, J., Bustamante, J., Tavares, P., Silva, A., Rodrigues, D., Campos, D., Chagas, D., Sueiro, G., Siqueira, G., & Marengo, J. (2014). Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. *American Journal of Climate Change*, 03(05), 512–527. <https://doi.org/10.4236/AJCC.2014.35043>
- 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), 218–238. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00348-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00348-1)
- 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), 601.
- Deusdará-Leal, K., Mohor, G. S., Cuartas, L. A., Seluchi, M. E., Marengo, J. A., Zhang, R., Broedel, E., Amore, D. de J., Alvalá, R. C. S., Cunha, A. P. M. A., & Gonçalves, J. A. C. (2022). Trends and Climate Elasticity of Streamflow in South-Eastern Brazil Basins. *Water* 2022, Vol. 14, Page 2245, 14(14), 2245.

- Feulner, G. (2017). Global Challenges: Climate Change. *Global Challenges*, 1(1), 5. <https://doi.org/10.1002/GCH2.1003>
- Fleischmann, A. S., Papa, F., Hamilton, S. K., Fassoni-Andrade, A., Wongchuig, S., Espinoza, J.-C., Paiva, R. C. D., Melack, J. M., Fluet-Chouinard, E., Castello, L., Almeida, R. M., Bonnet, M.-P., Alves, L. G., Moreira, D., Yamazaki, D., Revel, M., & Collischonn, W. (2023). Increased floodplain inundation in the Amazon since 1980. *Environmental Research Letters*, 18(3), 034024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/acb9a7>
- Fu, G., Charles, S. P., & Chiew, F. H. S. (2007). A two-parameter climate elasticity of streamflow index to assess climate change effects on annual streamflow. *Water Resources Research*, 43(11).
- Gomes, D. J. C., Nascimento, M. M. M., Pereira, F. M., de Moraes Dias, G. F., Meireles, R. R., de Souza, L. G. N., Picanço, A. R. S., & Ribeiro, H. M. C. (2022). Variabilidade da vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Araguaia influenciada pela precipitação em anos extremos e desmatamento. *Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online)*, 57(3), 451–466.
- Gudmundsson, L., Boulange, J., Do, H. X., Gosling, S. N., Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G., Leonard, M., Liu, J., Schmied, H. M., Papadimitriou, L., Pokhrel, Y., Seneviratne, S. I., Satoh, Y., Thiery, W., Westra, S., Zhang, X., & Zhao, F. (2021). Globally observed trends in mean and extreme river flow attributed to climate change. *Science*, 371(6534), 1159–1162.
- Hewlett, J. D. (1982). *Principles of forest hydrology*. University of Georgia press.
- Lins, R. C., & de Andrade, G. O. (1975). Aspectos hidrográficos da bacia do Parnaíba. *Ciência & Trópico*, 3(2).
- Naumann, G., Podesta, G., Marengo, J., Luterbacher, J., Bavera, D., Arias-Munõz, C., Marinho, P. F. B., Cammalleri, C., Chamorro, L., Cuartas, L. A., Jager, A., Escobar, C., Hidalgo, C., Leal, O. L. de M., McCormick, N., Maetens, W., Magni, D., Masante, D., Mazzeschi, M., ... Toreti, A. (2021). The 2019-2021 extreme drought episode in La Plata Basin. *Publications Office of the European Union*. <https://doi.org/10.2760/773>
- Oliveira, R. A. de, Silva, J. S. da, Calmant, S., & Seyler, F. (2013). Caracterização do regime hidrológico do rio Paraguai utilizando dados da missão altimétrica ENVISAT. *XX SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 1–8.
- Queiroz, A. R. de. (2016). Stochastic hydro-thermal scheduling optimization: An overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 382–395. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.04.065>
- 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.
- Sankarasubramanian, A., Vogel, R. M., & Limbrunner, J. F. (2001). Climate elasticity of streamflow in the United States. *Water Resources Research*, 37(6), 1771–1781. <https://doi.org/10.1029/2000WR900330>
- 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. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(9), 4815–4842. <https://doi.org/10.5194/HESS-22-4815-2018>
- Sorribas, M. V., Paiva, R. C. D., Melack, J. M., Bravo, J. M., Jones, C., Carvalho, L., Beighley, E., Forsberg, B., & Costa, M. H. (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin. *Climatic Change*, 136(3), 555–570.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., & Midgley, P. M. (2014). Climate Change 2013 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 9781107057999, 1–1535. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Tang, Q., & Lettenmaier, D. P. (2012). 21st century runoff sensitivities of major global river basins. *Geophysical Research Letters*, 39(6). <https://doi.org/10.1029/2011GL050834>
- Tang, Y., Tang, Q., Wang, Z., Chiew, F. H. S., Zhang, X., & Xiao, H. (2019). Different Precipitation Elasticity of Runoff for Precipitation Increase and Decrease at Watershed Scale. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(22), 11932–11943. <https://doi.org/10.1029/2018JD030129>
- Valverde, M. C., & Marengo, J. A. (2014). Extreme rainfall indices in the hydrographic basins of Brazil. *Open Journal of Modern Hydrology*, 2014.
- Yang, H., & Yang, D. (2011). Derivation of climate elasticity of runoff to assess the effects of climate change on annual runoff. *Water Resources Research*, 47(7), 7526. <https://doi.org/10.1029/2010WR009287>
- Zhang, Y., Viglione, A., & Blöschl, G. (2022). Temporal Scaling of Streamflow Elasticity to Precipitation: A Global Analysis. *Water Resources Research*, 58(1), e2021WR030601. <https://doi.org/10.1029/2021WR030601>

AGRADECIMENTOS - Os autores agradecem à Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA) pelo financiamento do projeto “Cooperação em Tecnologias para Análises Hidrológicas em Escala Nacional”. O primeiro autor também agradece ao CNPq por financiar parcialmente o projeto com uma bolsa.