

## **XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**

### **Cheia de Manias: Mecanismos das Mudanças de Cheias de Diferentes Magnitudes**

*Gabriel Anzolin<sup>1</sup>; Vinícius Bogo Portal. Chagas<sup>2</sup> & Pedro Luiz Borges Chaffe<sup>3</sup>*

**Abstract.** Floods are driven by a combination of rainfall characteristics and antecedent wetness. However, the relative importance of these mechanisms in explaining flood changes of different flood magnitudes is elusive. Here, we explore whether small and large floods have changed differently and their associated drivers. We assess the relative contributions of rainfall peak and antecedent wetness in driving flood changes by analyzing flood elasticities and driving mechanism trends in 765 catchments in Brazil over the last four decades. We find regional differences in the sign of flood change and their driving mechanisms between small and large events, which we interpret in terms of water storage capacity. In regions with high water storage capacity, changes in small and large events are similar, and both are driven by antecedent wetness. Conversely, regions with low water storage capacity, change patterns and driving mechanisms of small and large events are broadly different. While small events are driven by antecedent wetness, large floods are mainly rainfall-driven. These findings highlight the importance of accounting for distinct flood-generating processes across event magnitudes to improve flood prediction and climate change impact assessments.

**Resumo.** Mudanças no regime de cheias são controladas por uma combinação das características da chuva e da umidade antecedente. Entretanto, a importância relativa desses mecanismos em explicar estas mudanças em cheias de diferentes magnitudes ainda é incerta. Aqui, investigou-se se as mudanças nas cheias e seus mecanismos variam conforme a magnitude dos eventos. Avaliou-se as contribuições relativas do pico de chuva e da umidade antecedente nas mudanças nas cheias, por meio da análise das elasticidades das cheias e das tendências dos mecanismos em 765 bacias hidrográficas no Brasil ao longo das últimas quatro décadas. Foram encontradas diferenças regionais tanto no sinal quanto no mecanismo de mudança das cheias, as quais são interpretadas em função da capacidade de armazenamento das bacias. Em regiões com alta capacidade de armazenamento, as mudanças em eventos de pequena e grande magnitude são semelhantes, sendo ambos controlados pela umidade antecedente. Por outro lado, em regiões com baixa capacidade de armazenamento, os padrões de mudança e seus mecanismos variam de acordo com a magnitude do evento. Enquanto eventos de pequena magnitude são controlados principalmente pela umidade antecedente, cheias de grande magnitude são predominantemente controladas pela chuva. Esses resultados destacam a importância de considerar processos distintos de mudança de cheias conforme a magnitude dos eventos, visando aprimorar a previsão de cheias e as avaliações de impacto das mudanças climáticas.

**Palavras-Chave** – Cheias; Chuvas extremas; Umidade antecedente.

---

1) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Eng. Ambiental, gabriel\_anzolin@hotmail.com.

2) Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Eng. Ambiental, vbchagas@gmail.com.

3) Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Eng. Sanitária e Ambiental, pedro.chaffe@gmail.com.

## INTRODUÇÃO

A frequência e magnitude de eventos de cheia mudaram significativamente nas últimas décadas (e.g., Do et al., 2017; Gudmundsson et al., 2021; Slater et al., 2021; Wasko et al., 2021). Geralmente, a detecção e atribuição de mudanças se baseia no comportamento médio das cheias, assumindo que as mudanças são independentes da magnitude do evento (e.g., Bertola et al., 2019; Blöschl et al., 2019; Chagas et al., 2022b). Entretanto, tanto as mudanças nas cheias quanto seus mecanismos costumam ser diferentes de acordo com a magnitude do evento (e.g., Bertola et al., 2021; Slater & Villarini, 2016; Wasko et al., 2021; Wasko & Nathan, 2019), sugerindo que é necessário ir além do comportamento médio das cheias para uma melhor compreensão das mudanças em eventos extremos.

Os mecanismos e as mudanças nos eventos de cheia de diferentes magnitudes apresentam diferenças regionais em todo o mundo. Na Europa, pequenas e grandes cheias máximas anuais apresentam padrões de mudança distintos; no entanto, suas mudanças são geralmente controladas por um único mecanismo. Por exemplo, no noroeste da Europa, as cheias de pequena e grande magnitude são predominantemente controladas pela chuva máxima anual, enquanto na região leste estão mais associadas aos processos de derretimento de neve (Bertola et al., 2020, 2021). Na Austrália e na Baviera (estado na Alemanha), avaliações em escala de evento sugerem a existência de um possível limiar a partir do qual a mudança nas cheias se torna amplamente independente da umidade antecedente; nesses casos aumentos na chuva extrema resultam em maiores magnitudes de cheia (Brunner et al., 2021; Wasko & Nathan, 2019). Esses resultados também têm sido observados em escala global, em diferentes regiões climáticas, onde mudanças em eventos de grande magnitude estão mais associadas às alterações na chuva do que à umidade antecedente, especialmente para eventos de curta duração (Wasko et al., 2021).

Uma limitação comum na atribuição de mudanças nas cheias é a comparação direta entre séries temporais de cheias máximas anuais e chuvas máximas anuais, em que se assume que o pico anual de cheia é diretamente causado pelo pico anual da chuva (e.g., Bertola et al., 2020, 2021; Chagas et al., 2022b; Tarasova et al., 2023). Essa suposição representa uma grande simplificação dos processos hidrometeorológicos relacionados às cheias, já que as datas de ocorrência das cheias máximas anuais frequentemente diferem dos picos de chuva (Berghuijs et al., 2016, 2019; Chagas et al., 2022a; Wasko et al., 2020), indicando que análises em escala de evento são necessárias. Na escala de eventos, as atribuições de mudanças em cheias baseiam-se, em sua maioria, em avaliações em escala regional por meio do acoplamento de modelos climáticos e hidrológicos, em vez de observações diretas (Brunner et al., 2021). Essas atribuições também podem se basear em comparações entre tendências de cheias e de seus mecanismos, sem considerar as diferentes sensibilidades da resposta das cheias à chuva extrema e à umidade antecedente (Wasko et al., 2021; Wasko & Nathan, 2019). Para um melhor entendimento do comportamento das cheias, ainda é necessária uma avaliação em larga escala da contribuição relativa da chuva extrema e da umidade antecedente para a mudança nas cheias em escala de evento.

Neste trabalho, analisou-se dados diários de vazão e precipitação de 765 bacias hidrográficas brasileiras (1980–2018) para investigar se as mudanças nas cheias e seus mecanismos variam conforme a magnitude dos eventos. A detecção e atribuição dessas mudanças foram feitas combinando as tendências dos mecanismos associados às cheias com suas respectivas elasticidades em escala de evento através da regressão linear quantílica.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo e dados hidrometeorológicos

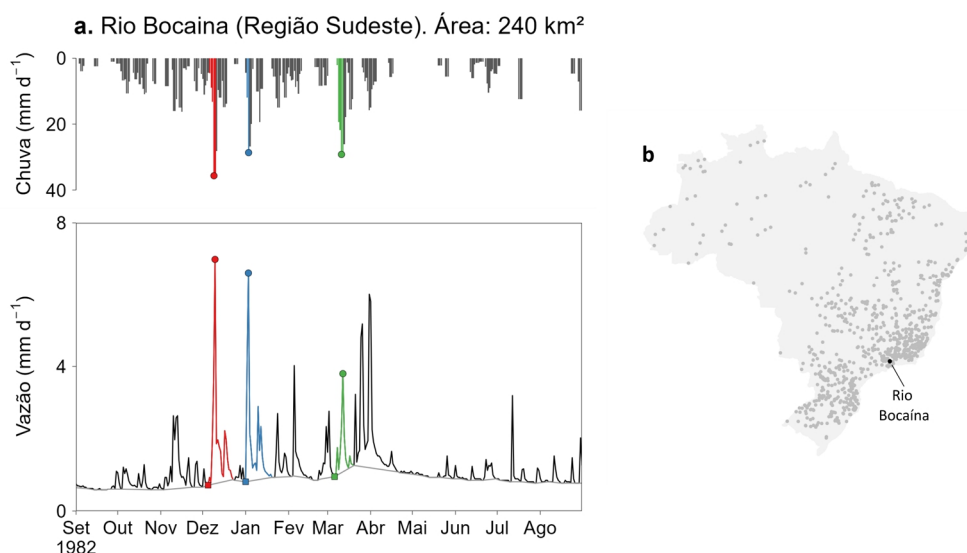
Utilizamos dados diários de vazão (1980-2018) de 765 bacias hidrográficas do Brasil, disponibilizados pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) por meio do sistema HidroWeb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>) e organizados na versão brasileira da base de dados *Catchment Attributes and Meteorology for Large-Sample Studies* (CAMELS-BR; Chagas *et al.*, 2020). Os dados foram filtrados conforme os seguintes critérios: (i) pelo menos 20 anos hidrológicos completos (iniciando em setembro), sendo considerado válido o ano hidrológico sem nenhum valor ausente; (ii) ausência de valores espúrios, como ordens de grandeza incorretas ou zeros inseridos no lugar de dados ausentes, conforme os procedimentos de controle de qualidade do CAMELS-BR; (iii) influência antrópica inferior a 30%, medida pela razão entre o volume total de armazenamento em reservatórios artificiais e a vazão anual da bacia (i.e., grau de regularização de vazão). Para os dados de chuva, utilizou-se a precipitação média diária de cada bacia, provenientes da base de dados *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS v2.0; Funk *et al.*, 2015), também disponível no CAMELS-BR.

### Identificação dos eventos de cheia

Eventos de cheia (Fig. 1a) foram identificados da seguinte maneira: eventos independentes de vazão foram extraídos utilizando um método não paramétrico de separação de escoamento de base, baseado em mínimos locais da série temporal diária de vazão (IH, 1980). Para evitar a detecção de respostas de vazão muito pequenas, apenas os eventos com vazão de pico superior à mediana de longo prazo da vazão são mantidos para análise. A chuva de evento foi atribuída com base em uma série temporal de precipitação de uma média móvel de 3 dias e no ramo ascendente do evento de vazão, i.e., no intervalo entre as datas de início e pico do evento de vazão (Merz *et al.*, 2018). Assumiu-se que toda a chuva que ocorre durante o ramo ascendente contribui para a geração da vazão. Para cada evento, definiu-se a vazão de pico ( $\text{mm d}^{-1}$ ), pico da chuva ( $\text{mm d}^{-1}$ ) e a umidade antecedente ( $\text{mm d}^{-1}$ ). O estado de umidade antecedente também foi aproximado com base no ramo ascendente, utilizando-se o valor da vazão um dia antes do início do evento (e.g., Ettrick *et al.*, 1987; Merz *et al.*, 2018; Tarasova *et al.*, 2018).

Por fim, selecionou-se os eventos de cheia utilizando a abordagem *peak-over-threshold*. Apenas eventos com picos de chuva superiores a um limiar que garante, em média, três eventos por ano são mantidos na amostra. Por exemplo, em uma série temporal com 30 anos de dados, foram selecionados os 90 maiores picos de chuva. Os eventos de cheia foram amostrados com base nas magnitudes da chuva para garantir que as condições antecedentes sejam independentes da resposta hidrológica (e.g., Brunner *et al.*, 2021; Ettrick *et al.*, 1987; Wasko *et al.*, 2021; Wasko & Nathan, 2019). A seleção de eventos com base na precipitação, e não na vazão, minimiza o viés das condições antecedentes, uma vez que grandes respostas hidrológicas tendem a ocorrer sob condições mais úmidas.

Figura 1 – Exemplo de identificação de evento de cheia. Séries temporais de vazão e precipitação para (a) o Rio Bocaina, uma bacia hidrográfica da região Sudeste, com uma área de 240 km<sup>2</sup> (estação fluviométrica ID 58220000). (b) Localização das estações fluviométricas selecionadas para este estudo, mostrado em destaque a estação fluviométrica do rio Bocaina. As barras nos painéis superiores em (a) representam a série temporal de precipitação, e as linhas cinza e preta nos painéis inferiores indicam, respectivamente, o escoamento de base estimado e a série temporal de vazão observada. As cores destacam os eventos selecionados. Os círculos indicam os picos de precipitação e de vazão nos painéis superior e inferior, respectivamente, e os quadrados no painel inferior representam o valor da umidade antecedente.



## Detecção e atribuição de mudanças em eventos de cheia

A detecção e atribuição das mudanças nas cheias foi investigada por meio de regressão quantílica (Koenker, 2005). A regressão quantílica permite ir além da frequência média dos eventos, possibilitando uma análise robusta das mudanças nas cheias e de seus mecanismos tanto no centro quanto na cauda da distribuição probabilística dos eventos de cheia. Selecionou-se dois quantis de interesse: o quantil 0,50 (mediana), que representa o comportamento médio das cheias ou eventos de menor magnitude; e o quantil 0,95, que representa os eventos de cheia de grande magnitude.

Para a detecção de mudanças, assumimos uma dependência log-linear entre a variável de interesse ( $y$ ) e o tempo ( $t$ , em dias), ou seja,

$$\log_{10}(y_i)^{(\tau)} = \alpha^{(\tau)} + \beta_y^{(\tau)} t_i + \varepsilon_i^{(\tau)} \quad (1)$$

em que  $y$  é a variável de interesse – pico da cheia ( $q$ ), pico da chuva ( $p$ ) ou umidade antecedente ( $w$ ),  $\tau$  é o quantil de interesse,  $\alpha^{(\tau)}$  e  $\beta_y^{(\tau)}$  representam o intercepto e o coeficiente angular do modelo linear, respectivamente, e  $\varepsilon_i^{(\tau)}$  são o erro (resíduos).

Para o modelo de atribuição, analisamos a variabilidade interanual dos picos de cheia e de seus mecanismos em um modelo linear multivariado, assumindo uma dependência log-log entre os picos de cheia ( $q$ ) e os picos de precipitação ( $p$ ) e a umidade antecedente ( $w$ ), ou seja,

$$\log_{10}(q_i)^{(\tau)} = \alpha^{(\tau)} + \beta_p^{(\tau)} \log_{10}(p_i) + \beta_w^{(\tau)} \log_{10}(w_i) + \varepsilon_i^{(\tau)} \quad (2)$$

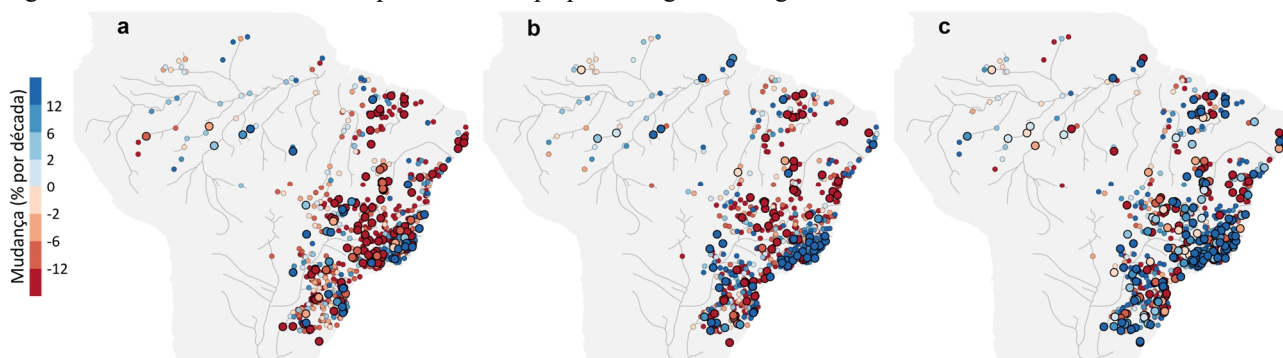
em que  $\beta_p^{(\tau)}$  e  $\beta_w^{(\tau)}$  são os coeficientes angular do modelo linear de atribuição para a chuva extrema e para a unidade antecedente, respectivamente. A regressão log-log permite interpretar os coeficientes do modelo como elasticidades, ou seja, eles representam a variação percentual no pico de cheia resultante de uma variação de 1% em um dos mecanismos. Também estimamos a contribuição de cada mecanismo para a mudança nas cheias, de forma semelhante a Bertola *et al.* (2021). A contribuição de cada mecanismo é estimada multiplicando sua elasticidade (Eq. 2) pela mudança observada nesse mecanismo (Eq. 1) para o quantil correspondente. Assumindo que a contribuição dos mecanismos é aditiva, estimou-se a contribuição relativa de cada mecanismo como a razão entre sua contribuição absoluta e a soma dos valores absolutos das contribuições individuais. A significância dos parâmetros dos modelos foi avaliada utilizando estimadores robustos da matriz de covariância, com nível de significância local ( $\alpha$ ) de 5%, levando em conta possíveis efeitos de heterocedasticidade, autocorrelação e não normalidade dos resíduos. Além disso, utilizamos o método *False Discovery Rate* (FDR; Benjamini & Hochberg, 1995) para lidar com a superestimativa de resultados significativos ao realizar múltiplos testes estatísticos em diferentes bacias hidrográficas (Wilks, 2006), para avaliar a significância regional (Renard *et al.*, 2008), e para garantir uma análise robusta de variáveis com dependência espacial (Wilks, 2016). Seguimos a recomendação de Wilks (2016) para dados altamente dependentes no espaço e assumimos um nível de significância ajustado pelo FDR equivalente ao dobro do nível de significância local (i.e.,  $\alpha_{FDR} = 10\%$ ).

## RESULTADOS

Os dados observados sugerem que eventos de cheia de pequena e grande magnitude têm mudado de forma distinta no Brasil (Fig. 2). As tendências nos eventos de pequena magnitude (Fig. 2a) são majoritariamente negativas em todo o país, com 70,2% das bacias apresentando redução nas magnitudes. As mudanças observadas nesses eventos variam de -48,4% a +50% por década, com mediana de -4,5% por década. Das 765 bacias analisadas, 17,3% apresentaram mudanças estatisticamente significativas ( $\alpha_{FDR} = 10\%$ ), valor 3,5 vezes superior ao nível de significância local esperado de 5%. Em contraste, os eventos de cheia de grande magnitude (Fig. 2b) apresentam uma proporção maior de bacias com aumento nas magnitudes (43,5%) em comparação com os eventos pequenos. As mudanças observadas nesses eventos variam de -76,6% a +59,2% por década, com tendência mediana de -1,8% por década. Também se observou uma proporção maior do que o esperado de mudanças estatisticamente significativas nos eventos de grande magnitude (13,7%), cerca de 2,7 vezes acima da proporção esperada. Esses padrões contrastantes são destacados na Fig. 2c, que mostra a diferença entre as mudanças nas cheias de grande e pequena magnitude. Na maior parte do Brasil, os eventos grandes estão aumentando mais (ou diminuindo menos) do que os eventos pequenos, o que pode ser facilmente observado pela grande proporção de diferenças positivas na Fig. 2c (57,5%). Diferenças marcantes entre as mudanças em eventos de pequena e grande magnitude são observadas nas regiões Sudeste e Sul, onde a maioria das cheias pequenas apresenta redução de magnitude (tendência mediana de -2,4% e -6% por década, respectivamente), enquanto as cheias de grande magnitude estão aumentando (ambas com tendência mediana próxima de +3% por década). Na região Norte, as cheias de pequena magnitude estão diminuindo a taxas mais elevadas do que as grandes (tendências medianas de -9,4% e -4,2% por década, respectivamente). Nas regiões da Amazônia e do Centro-Oeste, os eventos de pequena e grande magnitude estão mudando de forma semelhante.



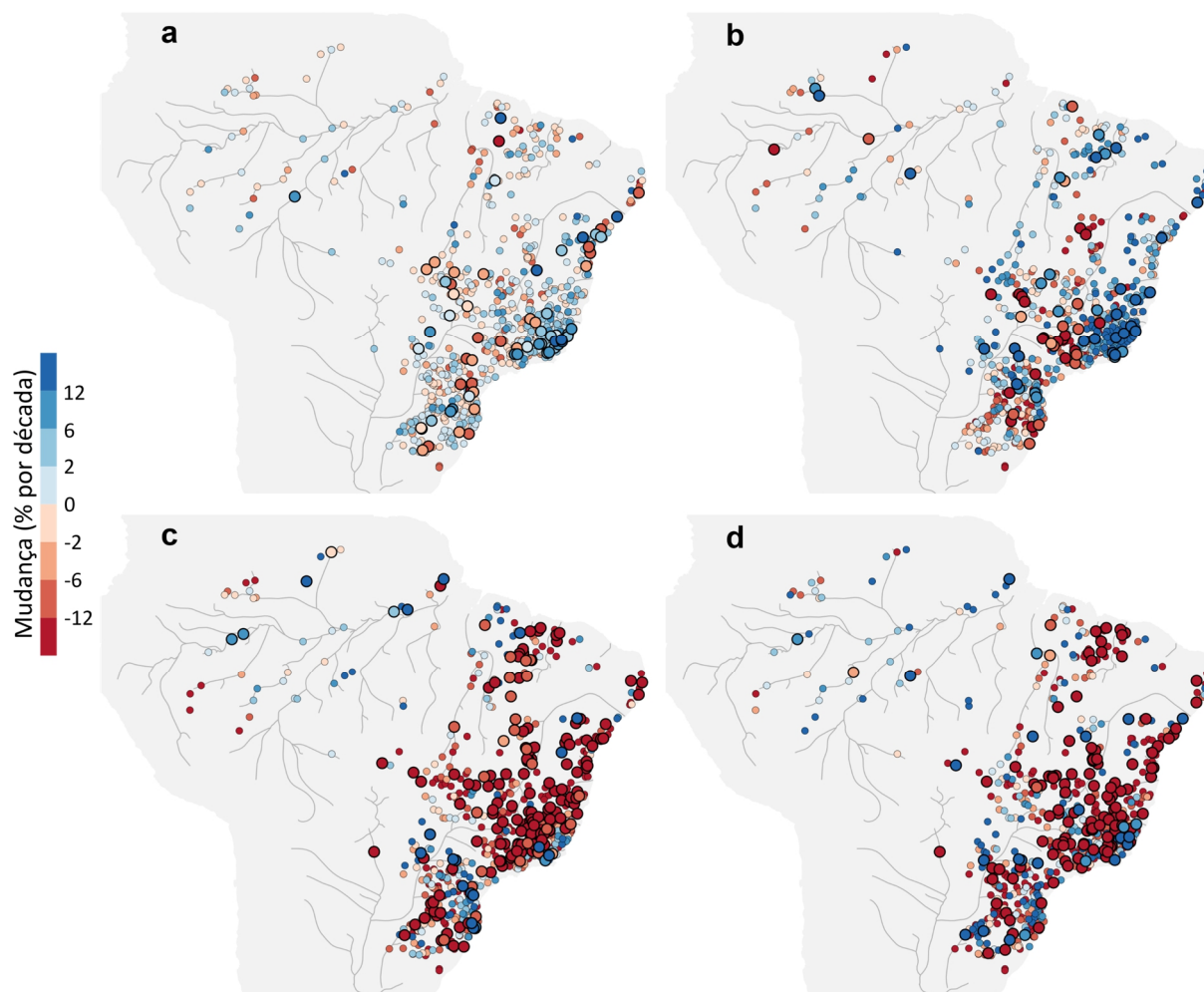
Figura 2 – Mudanças observadas, em % por década, para eventos de cheia de (a) pequena e (b) grande magnitude. (c) Diferenças entre as mudanças nas cheias grandes e pequenas. Os círculos grandes com bordas grossas em (a-b) indicam significância estatística com nível de significância ajustado por FDR ( $\alpha_{FDR} = 10\%$ ). A significância em (c) refere-se à significância estatística observada para cheias de pequena ou grande magnitude.



Para compreender as causas das mudanças, analisou-se as mudanças na chuva extrema e na umidade antecedente (Fig. 3), o que permite investigar a interação entre as mudanças nas cheias e a mudança de seus mecanismos. A chuva extrema (Fig. 3a e 3b) está aumentando em magnitude na maior parte do Brasil, especialmente nas regiões Sudeste, Sul e Nordeste. O padrão espacial do sinal das mudanças na precipitação extrema é bastante semelhante para eventos de pequena e grande magnitude na maioria das regiões, mas os valores absolutos das mudanças aumentam consideravelmente com a magnitude do evento. Na região Norte, observa-se uma mudança marcante no sinal das tendências de precipitação entre os eventos pequenos e grandes. Em contraste, a umidade antecedente está diminuindo na maior parte do Brasil (Fig. 3c e 3d), com exceção de partes das regiões Sul, Amazônia e Sudeste, onde a umidade antecedente está aumentando. O padrão de mudança na umidade antecedente é bastante semelhante em sinal e magnitude para pequenos e grandes eventos. A relação aqui encontrada entre mudanças no regime de chuvas e cheias é bastante contrastante. Apesar dos aumentos observados na chuva, tais aumentos nem sempre se traduzem em aumento na magnitude das cheias.

As mudanças na precipitação extrema, isoladamente, não explicam a variabilidade espacial das mudanças nas cheias em muitas regiões do Brasil, especialmente para eventos de menor magnitude. Essas diferenças entre extremos de precipitação e mudanças nas cheias podem ser parcialmente atribuídas às alterações nas condições de umidade antecedente, em que a redução da umidade antecedente supera os aumentos na precipitação extrema. Isso é corroborado por evidências de que o aumento das temperaturas tende a intensificar os extremos de precipitação (Berg *et al.*, 2013; Trenberth, 2011), ao mesmo tempo em que aumenta os períodos de seca (Dai, 2013), reduzindo a umidade do solo no início dos eventos de chuva e, conseqüentemente, levando à diminuição das cheias mesmo sob aumento da magnitude dos eventos de chuva (Sharma *et al.*, 2018).

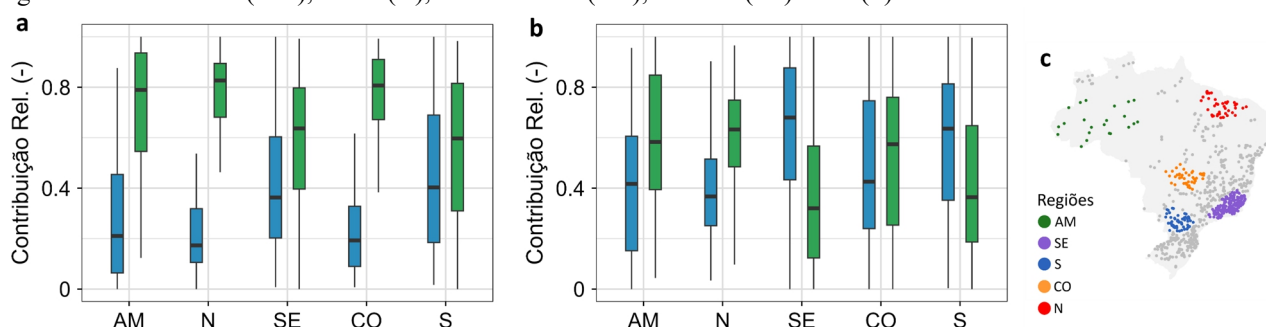
Figura 3 – Mudanças observadas nos mecanismos das cheias, em % por década. (a-b) Mudanças na precipitação extrema para (a) eventos de pequena magnitude e (b) eventos de grande magnitude. (c-d) O mesmo que (a-b), porém para a umidade antecedente. Círculos grandes com bordas grossas em (a-d) indicam significância estatística com nível de significância ajustado por FDR ( $\alpha_{FDR} = 10\%$ ).



Estes resultados podem ser melhor compreendidos através da análise da contribuição relativa (Fig. 4), que combina as elasticidades das cheias com as tendências nos mecanismos, permitindo estimar a fração relativa da mudança nas cheias explicada por cada mecanismo. Para as cheias pequenas (Fig. 4a), as mudanças nas cheias estão mais associadas à umidade antecedente do que à precipitação extrema em 69,8% das bacias, especialmente na Amazônia (mediana da contribuição relativa de 0,80), Norte (0,82), Centro-Oeste (0,81) e Sudeste (0,64), com contribuições baixas a moderadas da precipitação extrema — a contribuição relativa da chuva é de, no máximo, 0,36. Na região Sul, apesar da maior contribuição mediana da umidade antecedente (0,60), há uma grande sobreposição com a contribuição relativa da precipitação extrema, sugerindo que o mecanismo dominante varia consideravelmente entre as bacias. Para as cheias de grande magnitude, a importância da precipitação extrema aumenta: em 58,8% das bacias, as mudanças nas cheias estão mais associadas às mudanças na precipitação extrema do que na umidade antecedente. Observa-se uma mudança clara nos mecanismos que explicam as mudanças nas cheias grandes nas regiões Sudeste e Sul (Fig. 4b), onde as mudanças tornam-se predominantemente controlada pela precipitação, com contribuição relativa mediana de 0,68 e 0,64, respectivamente. Nas demais regiões, o mecanismo dominante continua sendo a umidade antecedente, como na Amazônia (0,58) e Norte (0,63), embora haja maiores

contribuições da precipitação extrema em comparação às cheias pequenas. Nestas regiões, as contribuições relativas são de até 0,42. No Centro-Oeste, nenhum mecanismo se destaca como predominante, pois as distribuições das contribuições relativas se sobrepõem amplamente. Ainda assim, a umidade antecedente apresenta contribuição mediana ligeiramente maior (0,57) em relação à precipitação extrema (0,43).

Figura 4 – Contribuições relativas dos mecanismos para as mudanças nas cheias de pequena grande magnitude. Contribuição relativa da precipitação extrema (azul) e da umidade antecedente (verde) para as mudanças nas cheias em: (a) eventos de pequena magnitude; e (b) eventos de grande magnitude, em cada uma das regiões mostrados em (c). As regiões são: Amazônia (AM), Norte (N), Centro-Oeste (CO), Sudeste (SE) e Sul (S).



As diferenças regionais entre mudanças em pequenas e grandes cheias e seus mecanismos estão relacionadas à capacidade de armazenamento das bacias, conforme descrito anteriormente para mecanismos de geração de Cheias no Brasil (Chagas et al., 2022a). O primeiro padrão encontrado – mudanças similares (em termos de sinal e mecanismos) entre cheias de pequena e grande magnitude é mais frequentemente observada em regiões com alta capacidade de armazenamento, como as regiões da Amazônia, Centro-Oeste e Norte, em que vários atributos da paisagem controlam a responsividade das bacias hidrográficas, incluindo solos profundos e altamente permeáveis, baixas declividades e a formação de extensas planícies de inundação, tornando essas regiões menos sensíveis a mudanças em extremos de precipitação. O segundo padrão encontrado – diferentes padrões de mudança e mecanismos entre pequenas e grandes cheias, é mais frequentemente observado em regiões com baixa capacidade de armazenamento, como as regiões Sul e Sudeste, em que os atributos da paisagem são caracterizados por regiões com cadeias de montanhas com grandes declividades e solos mais rasos, tornando essas bacias hidrográficas mais sensíveis a mudanças em extremos de precipitação.

## CONCLUSÃO

Neste trabalho, investigou-se se as mudanças nas cheias e seus mecanismos variam conforme a magnitude dos eventos. Para tanto, combinou-se a análise de elasticidades em escala de evento com tendências dos mecanismos das cheias via regressão quantílica. As tendências para cheias de pequena magnitude são predominantemente negativas, enquanto eventos de grande magnitude estão aumentando mais do que os de pequena magnitude. Apesar dos aumentos observados nas chuvas extremas, tais aumentos nem sempre se traduzem em aumentos na magnitude das cheias, especialmente para cheias de pequena magnitude.

Diferenças regionais tanto no sinal quanto no mecanismo de mudança das cheias são interpretadas em função da capacidade de armazenamento das bacias. Em regiões com alta capacidade de



armazenamento, as mudanças em eventos de pequena e grande magnitude são semelhantes, sendo ambos controlados pela umidade antecedente. Por outro lado, em regiões com baixa capacidade de armazenamento, os padrões de mudança e seus mecanismos variam consideravelmente de acordo com a magnitude do evento. Enquanto eventos de pequena magnitude são controlados principalmente pela umidade antecedente, cheias de grande magnitude são predominantemente controladas pela chuva.

Os padrões nem sempre intuitivos de mudança em pequenas e grandes cheias motivou o título deste trabalho, que faz alusão à música “Cheia de Manias”. Destaca-se a importância de considerar processos distintos de mudança de cheias conforme a magnitude dos eventos, visando aprimorar a previsão de cheias e as avaliações de impacto das mudanças climáticas.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## REFERÊNCIAS

- BENJAMINI, Y.; HOCHBERG, Y. (1995). “*Controlling the False Discovery Rate: A Practical and Powerful Approach to Multiple Testing*”. Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology, 57(1), pp. 289–300.
- BERG, P.; MOSELEY, C.; HAERTER, J. O. (2013). “*Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures*”. Nature Geoscience, 6(3), pp. 181–185.
- BERGHUIJS, W. R.; HARRIGAN, S.; MOLNAR, P.; SLATER, L. J.; KIRCHNER, J. W. (2019). “*The Relative Importance of Different Flood-Generating Mechanisms Across Europe*”. Water Resources Research, 55(6), pp. 4582–4593.
- BERGHUIJS, W. R.; WOODS, R. A.; HUTTON, C. J.; SIVAPALAN, M. (2016). “*Dominant flood generating mechanisms across the United States*”. Geophysical Research Letters, 43(9), pp. 4382–4390.
- BERTOLA, M.; VIGLIONE, A.; BLÖSCHL, G. (2019). “*Informed attribution of flood changes to decadal variation of atmospheric, catchment and river drivers in Upper Austria*”. Journal of Hydrology, 577, 123919.
- BERTOLA, M.; VIGLIONE, A.; LUN, D.; HALL, J.; BLÖSCHL, G. (2020). “*Flood trends in Europe: are changes in small and big floods different?*” Hydrology and Earth System Sciences, 24(4), pp. 1805–1822.
- BERTOLA, M.; VIGLIONE, A.; VOROGUSHYN, S.; LUN, D.; MERZ, B.; BLÖSCHL, G. (2021). “*Do small and large floods have the same drivers of change? A regional attribution analysis in Europe*”. Hydrology and Earth System Sciences, 25(3), pp. 1347–1364.
- BLÖSCHL, G. et al. (2019). “*Changing climate both increases and decreases European river floods*”. Nature, 573(7772), pp. 108–111.
- BRUNNER, M. I. et al. (2021). “*An extremeness threshold determines the regional response of floods to changes in rainfall extremes*”. Communications Earth & Environment, 2(1), 173.

- CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; BLÖSCHL, G. (2022). “*Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle*”. *Nature Communications*, 13(1).
- CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L. B.; BLÖSCHL, G. (2022). “*Process Controls on Flood Seasonality in Brazil*”. *Geophysical Research Letters*, 49(5).
- CHAGAS, V. B. P. et al. (2020). “*CAMELS-BR: Hydrometeorological time series and landscape attributes for 897 catchments in Brazil*”. *Earth System Science Data*, 12(3), pp. 2075–2096.
- DAI, A. (2013). “*Increasing drought under global warming in observations and models*”. *Nature Climate Change*, 3(1), pp. 52–58.
- DO, H. X.; WESTRA, S.; LEONARD, M. (2017). “*A global-scale investigation of trends in annual maximum streamflow*”. *Journal of Hydrology*, 552, pp. 28–43.
- ETTRICK, T. M.; MAWDLSLEY, J. A.; METCALFE, A. V. (1987). “*The influence of antecedent catchment conditions on seasonal flood risk*”. *Water Resources Research*, 23(3), pp. 481–488.
- FUNK, C. et al. (2015). “*The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes*”. *Scientific Data*, 2(1), pp. 1–21.
- GUDMUNDSSON, L. et al. (2019). “*Observed Trends in Global Indicators of Mean and Extreme Streamflow*”. *Geophysical Research Letters*, 46(2), pp. 756–766.
- Institute of Hydrology (1980). *Low flow studies*. Report No. 1, Wallingford, UK.
- KOENKER, R. (2005). *Quantile regression*. (Vol. 38). Cambridge University Press.
- MERZ, B. et al. (2018). “*Spatial coherence of flood-rich and flood-poor periods across Germany*”. *Journal of Hydrology*, 559, pp. 813–826.
- RENARD, B. et al. (2008). “*Regional methods for trend detection: Assessing field significance and regional consistency*”. *Water Resources Research*, 44(8).
- SHARMA, A.; WASKO, C.; LETTENMAIER, D. P. (2018). “*If Precipitation Extremes Are Increasing, Why Aren't Floods?*”. *Water Resources Research*, 54(11), pp. 8545–8551.
- SLATER, L. et al. (2021). “*Global Changes in 20-Year, 50-Year, and 100-Year River Floods*”. *Geophysical Research Letters*, 48(6), pp. 1–10.
- TARASOVA, L. et al. (2018). “*Exploring Controls on Rainfall-Runoff Events: 1. Time Series-Based Event Separation and Temporal Dynamics of Event Runoff Response in Germany*”. *Water Resources Research*, 54(10), pp. 7711–7732.
- TARASOVA, L. et al. (2023). “*Shifts in flood generation processes exacerbate regional flood anomalies in Europe*”. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 49.
- TRENBERTH, K. E. (2011). “*Changes in precipitation with climate change*”. *Climate Research*, 47(1–2), pp. 123–138.
- WASKO, C.; NATHAN, R.; PEEL, M. C. (2020). “*Changes in Antecedent Soil Moisture Modulate Flood Seasonality in a Changing Climate*”. *Water Resources Research*, 56(3).
- WASKO, C.; NATHAN, R.; STEIN, L.; O'SHEA, D. (2021). “*Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change*”. *Journal of Hydrology*, 603, 126994.
- WILKS, D. S. (2006). “*On 'Field Significance' and the False Discovery Rate*”. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 45(9), pp. 1181–1189.

WILKS, D. S. (2016). *“The Stippling Shows Statistically Significant Grid Points: How Research Results are Routinely Overstated and Overinterpreted, and What to Do about It”*. Bulletin of the American Meteorological Society, 97(12), pp. 2263–2273.