

DESAFIANDO AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS? UM OLHAR ATENTO ÀS SIMULAÇÕES CLIMÁTICAS NA HIDROLOGIA URBANA

Veber Afonso Figueiredo Costa, Priscilla Macedo Moura & Viviane Borda Pinheiro Rocha¹

RESUMO – As mudanças climáticas antropogênicas (MCAs) se tornaram um assunto de grande importância nas ciências hidrológicas, principalmente em razão das preocupações relacionadas à intensificação do ciclo hidrológico e à incapacidade potencial das infraestruturas existentes em se adaptar às alterações dos processos climáticos. A maior parte das afirmações nesse sentido são baseadas em projeções climáticas que são frequentemente consideradas como representações precisas da evolução temporal dos sistemas climáticos. Entretanto, as saídas de modelos climáticos podem ser fortemente enviesadas e associadas a grandes níveis de incertezas, o que pode assim levar a erros na tomada de decisão. Esse artigo aborda os aspectos teóricos dos modelos climáticos que podem explicar sua natureza intrinsecamente estocástica, as causas dos vieses não sistemáticos e as consequências potenciais de se privilegiar as abordagens determinísticas tradicionais que sustentam projetos hidráulicos e a definição das medidas de adaptação. Mais detalhadamente, são abordadas as dificuldades de conciliar as resoluções espaçotemporais incompatíveis dos modelos climáticos para a avaliação de mudanças climáticas em pequenas bacias hidrográficas urbanas, o que, ao contrário do senso comum, vai além dos problemas de escala. De modo geral, defende-se que a gestão dos cenários climáticos futuros, particularmente em ambientes urbanos, deve apoiar-se na análise estocástica e na simulação para estimar de maneira apropriada os riscos futuros de inundação.

Palavras-Chave – Mudança climática antropogênica, correção de vies, consideração das incertezas, manejo de águas pluviais urbanas, gestão do risco futuro de inundações.

ABSTRACT – Anthropogenic climate change (ACC) has become a matter of utmost importance in Hydrological Sciences, mainly because the concerns of intensification of the water cycle and the potential inability of existent infrastructure for accommodating changes in hydroclimatic processes. Most claims in this sense are based on climate projections, which are frequently assumed as accurate representations of the climate system evolution in time. However, climate model outputs may be highly biased and uncertain, which may then misinform decision-making. This paper discusses theoretical aspects of climate models that may explain their inherently stochastic nature, the causes of non-systematic bias, and the potential consequences of favoring traditional deterministic approaches underlying hydraulic design and the definition of adaptation measures. In more detail, we address the difficulties of reconciling incompatible spatiotemporal resolutions of climate models and climate change assessment in small urban catchments, which, as opposed to common sense, goes beyond scale issues. Overall, we argue that dealing with future climate scenarios, particularly in urban environments, should rely on stochastics and simulation for properly estimate future flood risks.

Key-words – Anthropogenic climate change, bias-correction, uncertainty account, urban drainage, future flood management.

1) Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. UFMG; Av. Antônio Carlos, 6627 - 31 270-901 - Belo Horizonte - MG. - veber@ehr.ufmg.br; priscilla.moura@ehr.ufmg.br; viviane.pinheiro@ehr.ufmg.br.

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas antropogênicas (MCAs) ocupam lugar central no debate científico e político contemporâneo. Nesse sentido, modelos climáticos globais e regionais emergiram como as principais ferramentas para projetar a evolução futura do sistema climático, sustentando desde políticas internacionais de mitigação até o dimensionamento de obras de engenharia. Sob a premissa de que tais modelos representam, com razoável acurácia, os processos físicos que governam o clima, suas projeções têm sido utilizadas como evidência central para a comunicação da chamada "crise climática", muitas vezes ultrapassando, sem justificativas embasadas, as fronteiras do conhecimento científico consolidado.

Com efeito, é necessário reconhecer que os modelos climáticos não são capazes de reproduzir fielmente a dinâmica observada do clima. Tais modelos são simplificações matemáticas de um sistema complexo e caótico, e, dessa maneira, seus resultados são fortemente influenciados por estruturas conceituais, parametrizações, condições iniciais e de contorno, e erros amostrais. A existência de dezenas de modelos – como os do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6, Eyring, 2016), – que frequentemente produzem trajetórias divergentes entre si e, em alguns casos, levam a estados fisicamente irreais, o que evidencia a necessidade de uma abordagem estocástica para se lidar com as projeções climáticas. No entanto, ainda persiste, tanto em pesquisas quanto em projetos, a prática de selecionar um único modelo ou de utilizar a média do conjunto como uma trajetória determinística, ignorando-se uma parcela significativa da incerteza envolvida.

A essas limitações, soma-se a dificuldade em distinguir a variabilidade climática natural dos efeitos antropogênicos, especialmente diante da persistência de longo termo observada em processos climáticos. Estudos em larga escala recentes sugerem que as projeções, após correção de viés, não são compatíveis com as mudanças observadas, particularmente no que diz respeito à variabilidade dos processos. Tal fato, por sua vez, levanta a preocupação de que os modelos climáticos, em lugar de reduzir as incertezas, podem subestimar os riscos futuros.

Diante desse cenário, este artigo busca colocar em perspectiva o papel real dos modelos climáticos, questionando sua capacidade de fornecer informações úteis para a concepção de medidas de adaptação. A partir de reflexões teóricas e aplicações na hidrologia urbana, argumenta-se que uma abordagem estocástica e condicional (e.g., Koutosoyiannis e Montanari, 2022) é indispensável para lidar com as incertezas e para fundamentar decisões efetivas diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

2 MODELOS CLIMÁTICOS: A NECESSIDADE DE RECONCILIAR EXPECTATIVAS E EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS SOB UMA PERSPECTIVA CIENTÍFICA ADEQUADA

As mudanças climáticas antropogênicas tornaram-se uma questão de grande preocupação em todo o mundo em meio a um acirrado debate político-filosófico que, frequentemente, exclui das análises acerca de alterações no sistema climático evidências científicas adequadas ou um rigoroso raciocínio físico. As MCAs também têm preocupado pesquisadores e profissionais que, frequentemente, precisam desenvolver estratégias de adaptação e mitigação, apesar do conhecimento incompleto ou imperfeito sobre a evolução do sistema climático. Sustentando essas duas linhas de raciocínio se encontram modelos climáticos globais e regionais, que, tanto para fins de pesquisa quanto de engenharia, são considerados representações precisas (ou pelo menos suficientemente precisas) dos processos climáticos que podem ser trivialmente extrapolados para cenários futuros sob forçantes conhecidas (determinísticas), como as emissões de gases de efeito estufa (IPCC, 2022). Sob tal premissa, as saídas dos modelos climáticos, ou, mais rigorosamente, o valor esperado do processo em um determinado ponto no tempo, têm constituído a principal, senão única, evidência para proclamar e comunicar a chamada “crise climática” muito além dos domínios reais da ciência.

Ao contrário do senso comum, no entanto, os modelos climáticos não são aptos a materializar a dinâmica real (observada) dos processos climáticos. De fato, os modelos climáticos compreendem simplificações matemáticas do sistema climático (Koutsoyiannis, 2024), e, como tal, são fortemente afetados pela complexidade estrutural, processos representados, parametrização, erros amostrais, e condições de contorno e iniciais (Santos et al., 2025). As distintas hipóteses de modelagem necessariamente implicam diferentes resultados ou trajetórias para os processos modelados, independentemente de variáveis forçantes comuns. Por exemplo, o CMIP6 envolve mais de 50 modelos que podem discordar fortemente entre si e descrever estados físicos completamente irreais (Hausfather et al., 2022). Esse fato, por si só, exigiria uma abordagem estocástica para se lidar com projeções climáticas, de modo que a tomada de decisão possa ser calcada nas probabilidades associadas a cada possível trajetória do processo – note-se, no entanto, que a dispersão do *ensemble* não sumaria a incerteza geral da modelagem, a qual é provavelmente muito maior. Contudo, ainda é prática comum selecionar um único modelo, geralmente sem um raciocínio teórico adequado, ou se recorrer à média do conjunto de modelos para se obter uma única trajetória determinística para as simulações climáticas.

Por outro lado, uma descrição completamente determinística da dinâmica climática ainda não é possível (Koutsoyiannis e Montanari, 2022). Com efeito, observações e saídas de modelos tomadas

em um mesmo ponto do tempo podem ser notavelmente diferentes para muitas variáveis climáticas, como temperatura e precipitação, quase independentemente das condições forçantes – geralmente materializadas por cenários determinísticos de emissão e desenvolvimento socioeconômico. Essa discordância decorre tanto da trajetória selecionada (implicitamente, dos erros amostrais e não amostrais) quanto das resoluções incompatíveis dos modelos climáticos e das medições empíricas – ao se tomar médias espaciais e temporais, são eliminados os detalhes dos processos climáticos, ocultando particularmente suas realizações extremas, que tipicamente constituem o principal interesse de pesquisadores e profissionais. Isso tem motivado um grande esforço de pesquisa para a “correção de viés” das estimativas brutas dos modelos climáticos, que, embora baseadas em modelos sofisticados, ainda são incapazes de lidar com estruturas de erros complexas. Dessa maneira, saídas similares de modelos podem estar associadas a observações muito diferentes, o que novamente destaca as inconsistências entre expectativa e realidade, e a natureza fortemente incerta dos modelos climáticos.

Questões adicionais decorrem da incapacidade de se distinguir completamente a variabilidade climática natural dos efeitos das MCAs. Com efeito, os processos climáticos geralmente apresentam persistência de longo termo, que pode ser facilmente confundida com mudanças graduais nos processos climáticos subjacentes devido aos agrupamentos de eventos (secas e cheias) comumente observados nesse tipo de processo e à pesquisa exploratória inadequada baseada em testes de tendência (Koutsoyiannis, 2024; Serinaldi et al., 2018). Por um lado, tal confusão pode sugerir que as trajetórias dos modelos climáticos, que frequentemente englobam tendências crescentes nas medidas de tendência central, são alternativas “mais prováveis” do que um processo estacionário persistente. Por outro lado, estudos de larga escala recentes (e.g., Koutsoyiannis, 2020) não relataram mudanças em variáveis hidroclimáticas compatíveis com projeções de modelos, particularmente com respeito à variabilidade dos processos, mesmo após a correção de viés. Portanto, é provável que os resultados dos modelos climáticos subestimem o risco, em vez de fornecer informações mais confiáveis sobre a dinâmica futura do clima.

Diante do exposto, acredita-se que o real papel dos modelos climáticos deve ser colocado em perspectiva: tais modelos podem fornecer informações úteis para a elaboração de medidas de adaptação? Suas estimativas podem ser incorporadas à análise estatística e ao projeto após a correção de viés? Como lidar com a incerteza ao utilizar projeções de modelos climáticos? Neste artigo, busca-se abordar essas questões, ainda que não se pretenda questionar o legítimo debate sobre as mudanças climáticas. O principal objetivo é lançar luz sobre aspectos teóricos dos modelos climáticos que são

frequentemente negligenciados em simulações, mas que podem afetar fortemente a tomada de decisão. Particularmente, reflete-se sobre o uso de tais modelos na hidrologia urbana, para a qual as características do microclima podem não ser adequadamente acomodadas em modelos climáticos de resolução grosseira e a intervenção antrópica deve ser o fator proeminente para as mudanças no ciclo hidrológico.

3 O PAPEL DO VIÉS E DA INCERTEZA NA MODELAGEM CLIMÁTICA

Os modelos climáticos têm constituído os alicerces das políticas de adaptação e mitigação. No entanto, como qualquer modelo, suas estimativas são corrompidas por distintas fontes de erros, principalmente relacionadas à estrutura, parametrização, e condições iniciais e de contorno. Em particular, virtualmente todas as relações entre os componentes do modelo são altamente não lineares, o que amplifica os efeitos dos erros amostrais e não amostrais e pode introduzir grandes vieses não sistemáticos nas previsões das variáveis climáticas em qualquer ponto no tempo (Koutsoyiannis, 2010). Além disso, a discretização grosseira desses modelos, particularmente no espaço, implica superfícies excessivamente suavizadas para os processos climáticos, potencialmente ocultando os maiores desvios das condições médias (ou de longo termo). Como consequência, não se deve esperar que as saídas dos modelos climáticos forneçam representações precisas das trajetórias observadas. Essa constatação simples tem motivado o desenvolvimento de uma variedade de técnicas de *downscaling* e correção de viés. No entanto, tais técnicas não são projetadas para resolver os detalhes do sistema (o que deveria envolver probabilidades), mas sim para aproximar seus estados em termos médios (i.e., deterministicamente). Como resultado, mesmo ferramentas sofisticadas podem não ser capazes de melhorar a informação transmitida pelas saídas dos modelos climáticos, particularmente com respeito às realizações extremas dos processos. Em outras palavras, como o *downscaling* e a correção de viés lidam com expectativas incondicionais, tais procedimentos, por si, podem ser insuficientes para fornecer trajetórias críveis para a evolução futura dos sistemas.

Outro aspecto importante é que o sistema oceano-atmosfera é de natureza caótica. Em outras palavras, sua evolução não pode ser prevista com precisão mesmo para reduzidos *lead times*, e mesmo pequenas perturbações nas condições iniciais podem levar o sistema a estados completamente diferentes. Consequentemente, para fins práticos, não basta identificar os estados mais prováveis do sistema em um determinado momento; a tomada de decisão informada exigiria focar na variabilidade condicional e nas probabilidades condicionais como meios de simular trajetórias críveis e investigar a viabilidade e eficácia de medidas de adaptação, sejam estruturais ou não estruturais, em uma base de probabilidade-consequência. Em outras palavras, é necessário avaliar a dispersão das realizações

dos processos em análise em torno dos valores esperados providos pelos modelos climáticos, de maneira a se caracterizar (condicionalmente) a incerteza associada às predições (Koutsoyiannis e Montanari, 2022; Santos et al., 2025). Negligenciar a grande incerteza associada às projeções climáticas, independentemente do cenário de emissão, pode aumentar grandemente o risco para a operação de sistemas de recursos hídricos e acarretar severas perdas para a sociedade e o meio ambiente.

4 MODELOS CLIMÁTICOS E HIDROLOGIA URBANA: SOMENTE UMA QUESTÃO DE ESCALA?

Avaliar os efeitos das mudanças climáticas em bacias urbanas é uma tarefa desafiadora e problemática. Com efeito, as pequenas extensões espaciais dessas unidades fisiográficas e suas rápidas respostas a chuvas intensas as tornam altamente suscetíveis a inundações, as quais, segundo as projeções de modelos, devem se tornar mais pronunciadas, tanto em frequência quanto em intensidade, devido às mudanças climáticas. Por outro lado, as dificuldades para atualizar sistemas de drenagem existentes ou implementar novos dispositivos para condução de cheias podem tornar a adaptação e mitigação das mudanças climáticas inviáveis, considerando-se somente a adoção de medidas estruturais. Nesse sentido, torna-se necessário considerar adequadamente os efeitos da mudança dos regimes de chuvas intensas para minimizar os impactos à sociedade no ambiente urbano e propor também estratégias não estruturais eficazes, como soluções baseadas na natureza, para lidar com as inundações futuras.

Tipicamente, o projeto de estruturas hidráulicas urbanas baseia-se em curvas intensidade-duração-frequência (IDF). Tais modelos têm sido atualmente adaptados para reproduzir mudanças em eventos extremos de precipitação com base nas saídas de modelos climáticos, após *downscaling* e correção de viés (Lima et al., 2016, 2018). No entanto, tais iniciativas, em grande medida, negligenciam aspectos críticos das projeções de mudanças climáticas. Primeiro, as resoluções espaçotemporais dos modelos climáticos são incompatíveis com as pequenas áreas de drenagem das bacias urbanas. Assim, o *downscaling* espacial pode não contabilizar eventos extremos reais e a desagregação temporal envolveria premissas muito restritivas sobre o regime de escala em diferentes durações. De fato, não é direto acomodar mudanças nos expoentes de escala por meio de raciocínio dedutivo, mas, ao mesmo tempo, as projeções dos modelos climáticos sugerem fortemente a intensificação das precipitações extremas para durações muito curtas e curtas de interesse típico na drenagem urbana devido ao aumento das temperaturas. Isso cria um problema prático: enquanto a correção de viés pode ser amplamente ineficaz para eventos futuros de precipitação localizada de

curta duração, transferir o conhecimento atual sobre o comportamento da precipitação para realizações futuras do processo pode acarretar conclusões enganosas sobre as intensidades das chuvas de projeto.

Até certo ponto, desenvolvimentos recentes em modelos de convecção explícita (CPMs, sigla em inglês de *Convective Permitting Models*) abordam as inadequações da resolução espacial, mas a remoção formal do viés ainda precisa ser enfrentada. Cabe notar, contudo, que os CPMs ainda não estão disponíveis em muitas partes do mundo. Com base nesses argumentos, acredita-se que, particularmente em pequenas bacias urbanas, uma representação totalmente estocástica das saídas dos modelos climáticos é necessária para considerar adequadamente o risco de inundação, conceber estratégias de adaptação não estruturais, e comunicar eficazmente os riscos futuros às partes interessadas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As mudanças climáticas tornaram-se um tópico de pesquisa onipresente, com muitas aplicações na quantificação de riscos futuros de inundação. Na maioria das vezes, as projeções climáticas são utilizadas tanto no projeto de estruturas hidráulicas quanto o desenvolvimento de estratégias de adaptação e mitigação para um regime de chuvas extremas em mudança. No entanto, limitações e premissas simplificadoras de tais modelos raramente são totalmente reconhecidas, e muitos acadêmicos e profissionais têm a forte crença de que apenas expedientes de correção de viés seriam suficientes para “compatibilizar” as estimativas dos modelos e as evidências empíricas, tornando assim as saídas dos modelos uma ferramenta apropriada para a gestão de inundações.

Este artigo tenta contestar esse raciocínio falho com base em considerações teóricas. Com efeito, os modelos climáticos não são diferentes de qualquer outro modelo – todas as premissas de modelagem envolvem incerteza e, portanto, estimar somente valores esperados das variáveis de interesse é insuficiente para a tomada de decisão. Nesse sentido, argumenta-se que confiar exclusivamente nas saídas dos modelos climáticos pode, na verdade, subestimar o risco, já que a correção de viés apenas aproximaria nossas expectativas, em lugar de contabilizar a enorme variabilidade dos processos decorrentes da natureza caótica do sistema atmosférico e da representação imperfeita da evolução do sistema nas estruturas dos modelos.

O problema delineado é particularmente crítico em pequenas bacias urbanas, nas quais resoluções espaçotemporais inadequadas podem informar erroneamente as mudanças no regime de chuvas extremas – novamente, valores esperados, por si só, são insuficientes para compreender e

modelar adequadamente as inundações futuras. Nesse sentido, acredita-se que as mudanças climáticas devem ser abordadas por meio de simulação condicional e estocástica, de modo a acomodar erros amostrais e não amostrais, bem como escalas incompatíveis entre modelos e observações, tanto no espaço quanto no tempo, para conceber medidas estruturais e não estruturais para a gestão de inundações.

Este artigo está vinculado ao projeto de pesquisa "Inundações urbanas: compreensão dos processos de escoamento em contexto de mudanças climáticas", cujo objetivo principal é investigar a influência das MCAs em eventos futuros de inundação. As motivações para escrever este manuscrito foram as dificuldades enfrentadas pelos autores para abordar as mudanças climáticas de maneira cientificamente sólida, tanto no contexto urbano brasileiro quanto no francês. Ao compartilhar essas preocupações com outros pesquisadores, espera-se impulsionar a busca por soluções mais adequadas para enfrentar os desafios das MCAs.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, Fapemig, Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e Cofecub pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- EYRING, V. et al. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937–1958. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
- HAUSFATHER, Z.; MARVEL, K.; SCHMIDT, G. A.; NIELSEN-GAMMON, J. W.; ZELINKA, M. "Climate simulations: recognize the 'hot model' problem." *Nature*, v. 605, p. 26-29, 2022.
- IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. doi:10.1017/9781009325844.
- LIMA, C. H. R.; KWON, H.; KIM, Y. "A Bayesian beta distribution model for estimating rainfall IDF curves in a changing climate." *J. Hydrol.*, v. 540, p. 744-756, 2016.
- LIMA, C. H. R.; KWON, H.; KIM, Y. "A local-regional scaling-invariant Bayesian GEV model for estimating rainfall IDF curves in a future climate." *J. Hydrol.*, v. 566, p. 73-88, 2018.
- KOUTSOYIANNIS, D. "A random walk on water." *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 14, p. 585-601, 2010.
- KOUTSOYIANNIS, D. "Revisiting the global hydrological cycle: is it intensifying?" *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 24, p. 3899-3932, 2020.
- KOUTSOYIANNIS, D. *Stochastics of Hydroclimatic Extremes - A Cool Look at Risk*. 4. ed. Athens: Kallipos Open Academic Editions, 2024. p. 1-400.
- KOUTSOYIANNIS, D.; MONTANARI, A. "Climate Extrapolations in Hydrology: The Expanded Bluecat Methodology." *Hydrology*, v. 9, n. 5, p. 86, 2022.

SANTOS, L. R.; BARBOSA, A. G.; LEITE, C. C. O.; SILVA, G. M.; MENDIONDO, E. M.; COSTA, V. A. F. "*Assessing future changes in hydroclimatic processes in the Metropolitan Region of Belo Horizonte, Brazil, with the expanded Bluecat framework.*" *Front. Water*, v. 7, p. 1541052, 2025.

SERINALDI, F.; KILSBY, C. G.; LOMBARDO, F. "*Untenable nonstationarity: An assessment of the fitness for purpose of trend tests in hydrology.*" *Adv. Water Resour.*, v. 111, p. 132-155, 2018.