

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

PRECIPITAÇÕES EXTREMAS E MUDANÇAS DO CLIMA: UMA BREVE REVISÃO

Helano dos Santos Sena¹, Dirceu Silveira Reis Junior²

RESUMO

O clima influencia diretamente as chuvas intensas que incidem sobre grande parte do planeta. As estruturas relacionadas com recursos hídricos sofrem impacto direto das precipitações, além das comunidades que habitam planícies alagáveis ou encostas naturais. O presente estudo visa mostrar evidências das mudanças climáticas e o impacto dessas alterações sobre as chuvas intensas. As abordagens mais comumente utilizadas para incorporar as mudanças climáticas nas curvas IDF serão apresentadas, bem como os principais resultados e níveis de incerteza. Dado o panorama atual sobre o assunto, serão mostradas as experiências internacionais com o emprego dessas técnicas e abordagens, e a posterior aplicação dos resultados em guias/manuais de projeto. Serão evidenciadas as baixas taxas de utilização das curvas IDF com base na incorporação das mudanças climáticas.

Palavras-Chave – Curvas IDF, mudanças do clima, adaptação.

ABSTRACT

Climate directly influences storms that fall on a large part of the planet. Structures related to water resources are directly impacted by rainfall, as are communities living in floodplains or natural slopes. This study aims to show evidence of climate change and the impact of these changes on heavy rainfall. The most commonly used approaches to incorporate climate change into IDF curves will be presented, as well as the main results and levels of uncertainty. Given the current panorama on the subject, international experiences with the use of these techniques and approaches will be shown, and the subsequent application of the results in design guides/manuals. The low-rate use of IDF curves based on the incorporation of climate change will be highlighted.

Key-Words – IDF Curves, climate change, adaptation.

INTRODUÇÃO

As chuvas intensas são responsáveis por variações significativas nos níveis d'água dos rios, bem como podem desencadear deslizamentos de terra. Allaire (2018) ressalta que os prejuízos decorrentes das enchentes em áreas habitadas atingem não só as comunidades diretamente afetadas

como também as pessoas envolvidas indiretamente. Há cada vez mais evidências de que as mudanças climáticas em curso impactam diretamente as chuvas (em intensidade, duração e frequência de ocorrência) com certo grau de imprecisão quanto aos locais de incidência. De qualquer forma, identifica-se claramente a necessidade de incorporar variações climáticas na construção de curvas IDF, dadas as consequências que as variáveis hidrometeorológicas causam nas precipitações extremas. Quanto às metodologias usualmente adotadas para tal finalidade, as principais são GCMs, RCMs, CPMs, modelos de redução de escala e modelos com base em covariáveis para ajuste de parâmetros de determinadas distribuições estatísticas. Diversos estudos analisam o cenário atual e os níveis de incerteza existentes nos dados de entrada e nos resultados. Importante ressaltar também algumas das experiências internacionais relacionadas com a aplicação prática desse conhecimento em guias e manuais técnicos para projetos de infraestrutura hídrica, ainda que não haja um consenso sobre um método unificado. Apesar dos casos internacionais descritos, a utilização desse conhecimento ainda é pouco difundida e grande parte utiliza modelos simplificados objetivando menores graus de incerteza nos resultados e menores níveis de complexidade do estudo.

IMPACTOS DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NAS PRECIPITAÇÕES INTENSAS

Dois mecanismos físicos justificam a expectativa de que o aquecimento da atmosfera possa afetar a magnitude e frequência de chuvas intensas num dado local. O primeiro mecanismo está relacionado com os processos termodinâmicos que ocorrem na atmosfera, pois um ar mais aquecido tem uma maior capacidade de reter vapor d'água, como mostra a equação de Clausius-Clapeyron, que relaciona a temperatura do ar com a tensão de saturação de vapor. Mais vapor d'água na atmosfera, em média, aumenta o potencial de ocorrência de chuvas intensas. Em tese, para cada 1K de aumento de temperatura, a atmosfera consegue reter um volume de vapor d'água 7 % maior, entretanto estudos observacionais mostram que essa taxa de 7 % no aumento da intensidade de chuva para cada 1K não é necessariamente observada em todos os lugares (O'Gorman e Schneider, 2009; Sugiyama *et al.*, 2010; Fowler *et al.*, 2021; Marra *et al.*, 2023), e a explicação para esse fato está relacionada com outros fatores intervenientes no processo de formação de chuva, como por exemplo, limites no fornecimento de vapor d'água, mudanças na taxa adiabática úmida e nos padrões de vento vertical, bem como o valor da temperatura no momento da ocorrência da chuva extrema (O'Gorman e Schneider, 2009). O excesso de calor latente desprendido para a atmosfera durante a condensação do vapor também pode intensificar uma tempestade (Seneviratne *et al.*, 2021). O segundo mecanismo físico, com repercussões mais importantes numa escala regional, está relacionado com os processos dinâmicos que ocorrem na atmosfera, associados com a circulação atmosférica de larga escala, que pode ser afetada pelo aquecimento, com possíveis repercussões tanto na magnitude quanto na direção do transporte de vapor na atmosfera, o que pode aumentar ou diminuir as intensidades de chuva numa região específica. Alguns estudos, baseados em modelagem climática de larga escala, permitiram decompor os efeitos oriundos dos processos termodinâmicos e da dinâmica da atmosfera (Pfahl *et al.*, 2017). O resultado da composição dessas duas classes de mecanismos é que vai indicar uma intensificação ou redução das chuvas intensas num dado local, mas a quantificação do papel da dinâmica atmosférica em diversos locais do mundo ainda é incerta, sendo uma fonte de incerteza relevante nos prognósticos futuros.

As mudanças são evidentes em todos os componentes do sistema climático: a atmosfera e o oceano aqueceram, as quantidades de neve e gelo diminuíram, o nível do mar subiu, o oceano acidificou e seu conteúdo de oxigênio diminuiu, além de que as concentrações atmosféricas de gases de efeito estufa aumentaram, IPCC (2012).

Vários estudos relatados em Seneviratne *et al.* (2021) mostram que, em diversas partes do globo, observa-se uma intensificação das chuvas intensas ao nível diário sobre os continentes, principalmente no hemisfério norte, onde há informações com densidade espacial mais refinada e séries históricas mais longas, permitindo conclusões mais confiáveis. Por exemplo, Fischer e Knutti (2015), empregando dados observacionais ao longo do século XX, modelagem climática para estimativa do contrafactual, e fazendo uso da métrica FAR (*Fraction of Attributable Risk*), interpretada como o nível de contribuição causal por fator antrópico, estimaram o grau de contribuição antrópica dos eventos de chuva diária que ultrapassam os quantis de 99% e 99,9%, estimados com base no período pré-industrial, para diferentes níveis de aquecimento global. Eles concluíram que, com o nível de aquecimento registrado na época do estudo, aproximadamente 18% das chuvas extremas (acima do quantil 99,9%) são resultado do aquecimento global. A análise permite ainda inferir que os valores de FAR podem aumentar substancialmente para níveis de aquecimento mais elevados, podendo chegar a 30% e 52% para níveis de aquecimento de 1,5 e 3,0°C, respectivamente. Na escala sub-diária, a quantidade de estudos é menor e a quantidade de informação disponível dificulta conclusões mais enfáticas, muito embora os resultados apontem quase sempre para a intensificação das chuvas.

Centenas de estudos já foram realizados ao redor do mundo na tentativa de detecção de mudanças nas séries observacionais para diferentes escalas temporais das chuvas intensas, muito embora as análises a nível diário sejam as mais comuns. No Brasil, tem-se observado um aumento nas intensidades de precipitações máximas diárias nas regiões sudeste e sul com alguma confiança, e um pouco na região Amazônica, muito embora Souza *et al.* (2020) tenham encontrado uma proporção relativamente pequena de estações com tendências significativas no território brasileiro, em torno de 3% apenas, mas com número mais elevado de estações nas regiões hidrográficas do Paraná e Atlântico Sul.

METODOLOGIAS PARA ADEQUAÇÃO DAS CURVAS IDF

Os estudos de estruturação de curvas IDF levam em consideração a localização espacial e a quantidade disponível de dados históricos. De modo a incorporar projeções climáticas futuras na estruturação de chuvas intensas e em suas curvas IDF, estudos desenvolvidos mundo afora apresentam algumas diferentes metodologias. Para a construção das curvas IDF, os principais métodos de análise de valores extremos normalmente utilizados são as precipitações anuais máximas (AMP – Anual Maxima Series) e as séries que consideram os picos acima de determinado limite pré-estabelecido (POT – Peak Over Threshold). A utilização da POT tem a vantagem de incorporar mais de um valor extremo em um dado ano (caso isso tenha efetivamente ocorrido naquela situação), aumentando, portanto, a extensão da série observada, Kourtis e Tsihrintzis (2022). Isso leva a resultados mais representativos.

As abordagens mais frequentemente utilizadas para incorporação das mudanças climáticas na construção de curvas IDF são: GCM – Global Climate Models, RCM – Regional Climate Models, CPM – Convective Permitting Models, ou uma combinação entre os modelos citados, Kourtis e Tsihrintzis (2022). Conforme enfatizado por Fosser *et al.* (2024), o conjunto que forma o método CPM reduz substancialmente as incertezas da modelagem em mais de 50%. Entretanto, deve-se reconhecer que, devido a recursos limitados (por exemplo, tempo e poder computacional), isso pode não ser viável para a utilização dessa metodologia, Kourtis e Tsihrintzis (2022).

As outras duas abordagens, GCM e RCM, em geral apresentam bons resultados quanto a projeções de temperaturas futuras do planeta, porém têm um grande ponto fraco no que se refere às projeções futuras de chuvas. Outro problema é que, nesses dois casos, as escalas espaciais são grandes

a ponto de não representarem adequadamente a climatologia de um local específico (resoluções da ordem de 100km, Chen *et al.* (2021)). Para fins de comparação, as chuvas convectivas reais possuem uma escala de incidência espacial inferior a 10km de distância.

Além da questão espacial, existe um aspecto relacionado à duração de medição da chuva. Na tentativa de resolver esses problemas, os profissionais da área passaram a construir modelos de redução de escala para adequação às chuvas de um determinado local. Dentre esses modelos, existem os estatísticos e os dinâmicos.

O estudo de Alam e Elshorbagy (2015) apresenta a utilização de dois métodos de redução de escala baseados em aspectos estatísticos. Um deles combina o gerador meteorológico estocástico LARS-WG com o K-NN para reduzir a saída de precipitação diária dos GCMs para dados de precipitação horária e sub-horária na escala local. O outro método emprega abordagens baseadas em regressão. A comparação entre os valores da chuva de projeto na escala local, resultantes de ambos os métodos, reflete a possível incerteza devido ao processo de redução de escala.

Ainda quanto aos modelos estatísticos para redução de escala, Aneesh Goly (2013) cita o emprego de: Canonical Correlation Analysis (CCA), MLPK, MLPS, MLPR, Radial Basis Function (RBF) e SDMS. O mesmo estudo indica a utilização dos modelos dinâmicos Hadley centre Regional climate Model (HadRM3) e Climate High Resolution Model (CHRM) para reduzir sete índices sazonais de precipitação intensa em duas redes de estações no nordeste e sudeste da Inglaterra. Os resultados demonstraram que os modelos MLPK, MLPS, MLPR foram considerados os melhores na modelagem da variabilidade interanual dos índices.

A abordagem de precipitação simulada, descrita por Schlef *et al.* (2023), utiliza GCMs para simular valores de precipitação e ajustar distribuições extremas, com base na obtenção de valores de precipitação sobre períodos históricos e futuros. Os valores simulados requerem redução de escala espacial e correção de viés.

A abordagem baseada em covariáveis, citada pelo mesmo grupo de autores (Schlef *et al.* (2023)), ajusta os parâmetros das distribuições extremas com base em covariáveis como índices climáticos ou tempo, considerando a não estacionariedade. Por fim, são criadas projeções futuras forçando as distribuições com projeções das covariáveis utilizadas. Outra questão importante mencionada nesse mesmo estudo é a regionalização, que é usada para melhorar estimativas em locais sem dados suficientes, agrupando regiões homogêneas. No entanto, há desafios em identificar regiões não-estacionárias e ajustar distribuições.

Ainda assim, dadas as grandes variabilidades dos resultados apresentados, identifica-se que, embora muitos modelos de redução de escala tenham sido desenvolvidos na última década, nenhum deles apresentou resolução espacial ideal para reduzir as projeções de precipitação. Ou seja, não existe um consenso para a adoção de um modelo específico.

Uma parte importante do estudo das melhores metodologias para incorporação das mudanças climáticas na construção das curvas IDF é a correção de viés dos resultados, sendo feita uma comparação entre esses e as observações de chuvas reais. Abdelmoaty e Papalexiou (2023) mencionam o SPQM (Semi-Parametric Quantile Mapping), que preserva as tendências nas projeções, as probabilidades empíricas de todos os quantis projetados e a distribuição observada. A aplicação dessa abordagem é feita diretamente no AMP – Anual Maxima Series, corrigindo vieses em extremos e não em séries temporais diárias. Essa abordagem demonstra eficiência, na medida que preserva a não estacionariedade nas projeções, conforme testes de hipóteses utilizados.

EXPERIÊNCIAS INTERNACIONAIS DE DETERMINAÇÃO DE CURVAS IDF

Os resultados de projeções climáticas futuras e seus efeitos sobre as magnitudes de chuvas intensas (Kourtis e Tsihrintzis, 2022) são fatos que mostram aumentos significativos nesses eventos hidrológicos ao longo dos anos. Portanto, os impactos desses incrementos na infraestrutura relacionada (drenagem urbana por exemplo) são importantes e não devem ser negligenciados, sendo imprescindível que a engenharia mundial inicie um processo de desenvolvimento de técnicas e abordagens que incorporem as mudanças climáticas nas chuvas intensas.

Os métodos normalmente empregados são baseados em modelagem climática (modelos globais, GCMs, regionais, RCMs, e modelos de alta resolução capazes de detalhar os processos de chuva convectiva, CPMs). Alternativamente, há modelos mais simplificados que aplicam uma definição de fatores de majoração das curvas IDF existentes, que consideram apenas registros históricos dos climas passado e presente.

Ainda assim, grande parte dos países, cidades e regiões do planeta não possui guias ou manuais técnicos que incorporem essas variações do clima nas chuvas de projeto utilizadas na engenharia para a elaboração de projetos hidráulicos de obras de infraestrutura. As consequências, já mencionadas ao longo desse texto, são muito prejudiciais às pessoas envolvidas e até mesmo ao poder público em cada localidade.

Nos casos de localidades em que há utilização de métodos ou modelos de incorporação de projeções climáticas futuras na construção de curvas IDF, as abordagens mais frequentemente adotadas se referem aos modelos simplificados (modelos que consideram a majoração das curvas IDF existentes), devido a uma carga de incerteza menos relevante nos resultados e devido à menor complexidade do estudo.

Importante frisar que, apesar de modelos mais complexos apresentarem um nível elevado de incerteza nas projeções futuras, as modelagens mais simplificadas são, em muitos casos, baseadas em estudos que tenham empregado tais modelos (Luca *et al.* (2024); Madsen *et al.* (2014); Martel *et al.* (2021)).

Localidades como Bélgica, Willems (2013), Dinamarca, Martel *et al.* (2021), Suécia, Reino Unido (UK DEPARTMENT OF INFRASTRUCTURE (2020), Alemanha, Hennegriff *et al.* (2006), Noruega, Lawrence e Hisdal (2011), Austrália e a cidade de Quebec, MDDELCC (2017), adotaram fatores de majoração para as curvas IDF existentes, com acréscimos variando entre 5% e 30%, sendo que os fatores admitidos são variáveis de acordo com região geográfica (bacia hidrográfica), tempo de retorno estudado, ou alguma variável meteorológica que possa sofrer mudanças no futuro e impactar diretamente nas chuvas intensas, como é o caso da temperatura.

Outra situação importante de incorporação das mudanças climáticas nas curvas IDF para guiar a elaboração de projetos de infraestrutura hidrológico-hidráulica foi feito pela Associação Americana de Engenheiros Civis (ASCE). Essa associação iniciou há cerca de duas décadas o processo, gerando uma estruturação do conhecimento sobre o tema e contribuindo para o avanço metodológico da análise e dimensionamento da infraestrutura sob influência das mudanças do clima, Ayyub, (2018); Olsen (2015); Surampalli *et al.* (2013). Além disso, têm sido desenvolvidos estudos com maior refinamento metodológico para o dimensionamento de estruturas ao longo do tempo, considerando maior durabilidade frente aos incrementos de chuva futuros.

Ao longo desse processo, outras instituições responsáveis pela manutenção e implementação de infraestrutura, não necessariamente hídrica, desenvolveram seus próprios métodos de avaliação, resultando, por exemplo, numa nova Circular, Kilgore *et al.* (2023), emitida pelo Departamento de

Transporte dos Estados Unidos, com recomendações sobre as análises hidrológicas a serem adotadas em estudos e projetos de pontes e infraestrutura de drenagem, que incorporam novos métodos específicos para levar em consideração as mudanças do clima.

Ao final da análise dos estudos documentados atualmente no mundo acadêmico sobre o assunto, foi identificada uma lacuna importante no estudo de chuvas intensas relacionadas às mudanças climáticas, principalmente no que se refere à elaboração de guias ou manuais técnicos para projetos de infraestrutura hídrica. Sendo assim, torna-se importante o estudo das metodologias/ abordagens mais representativas relacionadas ao tema, para que posteriormente seja possível sugerir adequações aos documentos técnicos pertinentes.

DISCUSSÕES FINAIS

As mudanças climáticas no planeta, que hoje são evidenciadas em estudos especializados sobre o tema, incorrem em aumentos significativos nos índices de chuvas intensas em determinados locais, havendo ainda incertezas e resultados inconclusivos sobre onde e quando irão incidir.

Quanto à incorporação das projeções futuras do clima nas chuvas intensas, há diferentes metodologias em prática atualmente. A maioria delas é baseada em modelos climáticos globais ou regionais. Uma abordagem importante ajusta os parâmetros das distribuições extremas com base em covariáveis climáticas, como temperatura ou duração de chuva, sendo que a redução de escala é aplicada em quase todas as situações. Porém os resultados não mostram um consenso. Além de incertezas associadas a diferentes métodos, em grande parte dos casos há necessidade de aplicação de técnicas para correção de viés dos resultados.

Internacionalmente, o conhecimento adquirido até hoje para construção de curvas IDF com base em mudanças do clima, e posterior aplicação dos resultados em guias/manuais técnicos para projetos de engenharia hídrica é ainda pouco utilizado. Esse fato levanta uma questão importante a ser melhor difundida mundialmente.

Importante relembrar que as cheias, deslizamentos de terra em áreas urbanas e outras consequências decorrentes de chuvas intensas trazem prejuízos relevantes para comunidades envolvidas direta ou indiretamente. Portanto, para que as obras de infraestrutura hídrica resultem em estruturas resilientes às precipitações futuras, é necessário que mais países, cidades e outras regiões do planeta considerem a incorporação das mudanças climáticas nas chuvas de projeto. Dado que as pesquisas e estudos sobre o tema vêm se intensificando ao longo dos últimos anos (vide datas dos artigos de referência) o prognóstico é favorável, entretanto é importante mencionar os grandes desafios para incorporar essas incertezas e obter valores confiáveis e representativos.

REFERÊNCIAS

- Abdelmoaty, H. M., e Papalexiou, S. M. (2023). Changes of Extreme Precipitation in CMIP6 Projections: Should We Use Stationary or Nonstationary Models? *Journal of Climate*, 36(9), 2999–3014. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-22-0467.1>.
- Alam, Md. S., e Elshorbagy, A. (2015). Quantification of the climate change-induced variations in Intensity–Duration–Frequency curves in the Canadian Prairies. *Journal of Hydrology*, 527, 990–1005. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.059>.
- Allaire, M. (2018). Socio-economic impacts of flooding: A review of the empirical literature. *Water Security*, 3, 18–26. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2018.09.002>.
- Ayyub, B. M. (2018). *Climate-resilient infrastructure : adaptive design and risk management* (ASCE manuals and reports on engineering practice No. 140). Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers. Retrieved from <https://ascelibrary.org/doi/book/10.1061/9780784415191>.
- Chen, D., Rojas, M., Samset, B. H., Cobb, K., Niang, A. D., Edwards, P., et al. (2021). Framing, Context, and Methods. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, et al., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 147–286). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. Retrieved from <https://doi.org/10.1017/9781009157896.005>.
- Fischer, E. M., e Knutti, R. (2015). Anthropogenic contribution to global occurrence of heavy-precipitation and high-temperature extremes. *Nature Climate Change*, 5(6), 560–564. <https://doi.org/10.1038/nclimate2617>.
- Fosser, G., Gaetani, M., Kendon, E. J., Adinolfi, M., Ban, N., Belušić, D., et al. (2024). Convection-permitting climate models offer more certain extreme rainfall projections. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 7(1), 51. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00600-w>.
- Fowler, H. J., Lenderink, G., Prein, A. F., Westra, S., Allan, R. P., Ban, N., et al. (2021). Anthropogenic intensification of short-duration rainfall extremes. *Nature Reviews Earth e Environment*, 2(2), 107–122. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-00128-6>.
- Goly, A. (2013). Influences of Climate Variability and Change on Precipitation Characteristics and Extremes. *Dissertation Submitted to the Florida Atlantic University in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy*.
- Hennegriff, W., Kolokotronis, V., Weber, H., e Bartels, H. (2006). Climate Change and Floods – Findings and Adaptation Strategies for Flood Protection. *KA-Abwasser, Abfall*, 53(8), 770–779.
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (p. 582). Cambridge, U.K., and New York, NY, USA: Cambridge Universtiy Press.
- Kilgore, R., Atayee, A. T., Curtis, D., Harris, J., Herrmann, G. “Rudy,” e Thompson, D. (2023). *Highway Hydrology: Evolving Methods, Tools, and Data* (No. FHWA HIF-23-050).
- Kourtis, I. M., e Tsirhrintzis, V. A. (2022). Update of intensity-duration-frequency (IDF) curves under climate change: a review. *Water Supply*, 22(5), 4951–4974. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.152>.

Lai, Y., Lopez-Cantu, T., Dzombak, D. A., e Samaras, C. (2022). Framing the Use of Climate Model Projections in Infrastructure Engineering: Practices, Uncertainties, and Recommendations. *Journal of Infrastructure Systems*, 28(3), 04022020. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000685](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000685).

Lawrence, D., e Hisdal, H. (2011). *Hydrological projections for floods in Norway under a future climate* (No. Report no. 5 – 2011). Oslo, Norway: Norwegian Water Resources and Energy Directorate.

Luca, D. L. D., Ridolfi, E., Russo, F., Moccia, B., e Napolitano, F. (2024). Climate change effects on rainfall extreme value distribution: the role of skewness. *Journal of Hydrology*, 634, 130958. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130958>.

Madsen, H., Lawrence, D., Lang, M., Martinkova, M., e Kjeldsen, T. R. (2014). Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. *Journal of Hydrology*, 519, 3634–3650. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.003>.

Marra, F., Koukoula, M., Canale, A., & Peleg, N. (2023). Predicting extreme sub-hourly precipitation intensification based on temperature shifts. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(2), 375–389. <https://doi.org/10.5194/hess-28-375-2024>.

Martel, J.-L., Brissette, F. P., Lucas-Picher, P., Troin, M., e Arsenault, R. (2021). Climate Change and Rainfall Intensity–Duration–Frequency Curves: Overview of Science and Guidelines for Adaptation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(10), 03121001. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0002122](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0002122).

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC). (2017). *Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales*. Quebec.

O’Gorman, P. A., e Schneider, T. (2009). The physical basis for increases in precipitation extremes in simulations of 21st-century climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(35), 14773–14777. <https://doi.org/10.1073/pnas.0907610106>.

Olsen, J. R. (2015). *Adapting Infrastructure and Civil Engineering Practice to a Changing Climate*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784479193>.

Pfahl, S., O’Gorman, P. A., e Fischer, E. M. (2017). Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. *Nature Climate Change*, 7(6), 423–427. <https://doi.org/10.1038/nclimate3287>.

Schlef, K. E., Kunkel, K. E., Brown, C., Demissie, Y., Lettenmaier, D. P., Wagner, A., et al. (2023). Incorporating non-stationarity from climate change into rainfall frequency and intensity-duration-frequency (IDF) curves. *Journal of Hydrology*, 616, 128757. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128757>.

Seneviratne, S.I., Zhang, X., Adnan, M., Badi, W., Dereczynski, C., et al. (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, et al., *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1513–1766). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. Retrieved from <https://doi.org/10.1017/9781009157896.013>.

Souza, S. A. de, Amorim, R. S., Reis, D. S., (2020). Influência da correlação temporal e da multiplicidade de testes na detecção de tendências de índices de chuva no território brasileiro. *Revista Brasileira de Climatologia, ISSN: 2237-8642 (Eletrônica)*.

Sugiyama, M., Shiogama, H., e Emori, S. (2010). Precipitation extreme changes exceeding moisture content increases in MIROC and IPCC climate models. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(2), 571–575. <https://doi.org/10.1073/pnas.0903186107>.

Surampalli, R. Y., Zhang, T. C., Ojha, C. S. P., Gurjar, B., Tyagi, R. D., e Kao, C. M. (2013). *Climate Change Modeling, Mitigation, and Adaptation*. (R. Y. Surampalli, T. C. Zhang, C. S. P. Ojha, B. Gurjar, R. D. Tyagi, e C. M. Kao, Eds.). Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784412718.ch17>.

UK Department of Infrastructure. (2020). *Design of highway drainage systems* (No. CG 501 Version 2.1.0). National Highways.

Willems, P. (2013). Revision of urban drainage design rules after assessment of climate change impacts on precipitation extremes at Uccle, Belgium. *Journal of Hydrology*, 496, 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.05.037>.