

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA PRECIPITAÇÃO MÁXIMA DIÁRIA NAS CAPITAIS BRASILEIRAS

Saulo A. De Souza¹ & Dirceu S. Reis Jr.²

Resumo – O aumento das temperaturas devido ao aquecimento global e os subsequentes aumentos do teor de humidade atmosférica aumentam o risco de extremos climáticos. Dessa forma, a premissa da estacionaridade passa a ser questionada, sendo necessário novos estudos para melhor compreender os impactos que tais mudanças possam trazer nos sistemas de recursos hídricos. Este artigo apresenta os resultados preliminares de um estudo em andamento que procura avaliar os impactos dos cenários de mudanças climáticas nas precipitações máximas diárias para as capitais das unidades federativas do Brasil. Os resultados preliminares indicam a possibilidade de fortes mudanças na intensidade das precipitações máximas anuais no clima futuro. O impacto na probabilidade de excedência de máximos ocorre em qualquer faixa de tempo de retorno. O cenário mais crítico corresponde ao RCP 8.5 na segunda metade do século XXI, no entanto verifica-se substanciais impactos para cenários mais recentes, inclusive para cenários menores forçantes radiativas (RCP4.5).

Palavras-Chave – precipitação máxima diária e mudanças climáticas.

EVALUATION OF THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE IN THE DAILY MAXIMUM RAINFALL IN THE BRAZILIAN CAPITAL

Abstract – The increase in temperature and atmospheric humidity may result in an increase of risk of extreme climate events. Therefore, the assumption of stationarity, often assumed in statistical analysis employed in engineering projects, should be carefully analyzed so one can understand the true impacts of a changing climate in the frequency of extremes. This paper reports some preliminary results of an on-going study that aims at evaluating the impact of climate change in the frequency curve of the annual maximum precipitation in the capitals of the Brazilian states. Preliminary results indicate the possibility of strong changes in the exceedance probability of some quantiles in the future climate. These changes in exceedance probabilities are expected for the whole range return period. The most critical scenario is associated with RCP 8.5 for the second half of the XXI century, although substantial change in exceedance probability is expected also for the RCP 4.5 scenario.

Keywords – Maximum annual rainfall and climate change.

¹ Aluno de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTRAH/UnB) e Analista da Agência Nacional de Águas. Email: saulo.souza@ana.gov.br

² Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade de Brasília (PTRAH/UnB). Email: discreu.reis@gmail.com.

INTRODUÇÃO

As atividades humanas no século passado causaram um aumento da temperatura global (IPCC, 2012). De acordo com a equação de Clausius-Clapeyron, as temperaturas crescentes aumentam a capacidade de retenção de água da atmosfera em cerca de 7% para cada 1°C aquecimento, afetando diretamente a precipitação (Asadieh e Krakauer, 2015; Cheng e AghaKouchak, 2014). Com o vapor de água atmosférico mais elevado, espera-se uma maior ocorrência de eventos de precipitação mais intensos (Cheng e AghaKouchak, 2014). Deste modo, com o aumento das temperaturas devido ao aquecimento global e os subsequentes aumentos do teor de umidade atmosférica aumentam o risco de extremos climáticos, incluindo inundações e danos a infraestruturas, tais como barragens, estradas e sistemas de esgotos e drenagem de águas pluviais (Asadieh e Krakauer, 2015; Cheng e AghaKouchak, 2014; IPCC, 2012; Min et al., 2011; Bates et al 2008).

Os valores de precipitação empregados em estudos de engenharia e de recursos hídricos, normalmente associados a uma dada probabilidade de excedência, são estimados com base numa análise de frequência (ANA, 2013; Aires de Souza, 2006). Essa abordagem é usualmente empregada na definição das curvas de intensidade-duração-frequência (IDF), base de estudo de drenagem urbana e controle de cheias. Em muitas regiões, a precipitação máxima diária é aquela de menor duração disponível para estudos dessa natureza em virtude da falta de dados com durações menores (Gonçalves, 2011).

Uma premissa fundamental normalmente empregada na análise de frequência é a hipótese de estacionaridade, que implica na invariância no tempo dos parâmetros da distribuição de probabilidade. Com o advento das mudanças climáticas tal premissa passa a ser questionada, necessitando que novos estudos sejam realizados de modo a melhor compreender os impactos de tais mudanças em direção a uma abordagem mais genérica no intuito de considerar a não-estacionaridade (Lima *et al.*, 2016; Milly *et al.*, 2008). Na última década, houve um aumento na quantidade de estudos avaliando o impacto das mudanças climáticas em séries de extremos (Simonovic, 2007; Sugahara *et al.*, 2009; Peck *et al.*, 2012; Das *et al.*, 2013; Schardong *et al.*, 2014; Lima *et al.*, 2016). No âmbito da gestão de risco de cheias, a identificação e a melhor compreensão de eventuais alterações na precipitação máxima anual causadas por mudanças do clima podem possibilitar uma melhoria no conhecimento sobre a severidade da mudança, o que inclui a estimativa dos diversos riscos envolvidos, assim como o grau de vulnerabilidades da região eventualmente impactada, permitindo o planejamento e a definição de estratégias de adaptação, assim como a implementação de tais estratégias (Cheng e AghaKouchak, 2014).

O objetivo geral do estudo é avaliar os impactos de cenários de mudanças climáticas no padrão estatístico das precipitações máximas diárias para as capitais das unidades federativas do Brasil. O impacto avaliado no estudo foi realizado por meio da análise de eventuais mudanças nas probabilidades de excedência dos quantis de precipitação máxima diária anual estimada no clima atual. A avaliação empregou os diferentes cenários de projeções climáticas futuras oriundas das rodadas dos modelos de circulação geral (MCG) do Coupled Model Inter-Comparison Phase 5 (CMIP5), porém em uma escala mais refinada, ou seja, após um downscaling estatístico realizado pela NASA.

METODOLOGIA

A metodologia deste estudo envolveu um total de 8 etapas nas quais cada uma destas apresentam uma metodologia específica. A primeira etapa envolveu o levantamento dos dados de precipitação diária do banco de dados HIDRO, da Agência Nacional de Águas (ANA), para todo o Brasil. Estes dados serviram de base para a definição das séries de máximos anuais nas capitais

brasileiras, assim como para a etapa de correção de viés dos dados oriundos dos modelos climáticos.

A segunda etapa compreende o levantamento dos dados dos modelos climáticos oriundos do projeto NEXGDDP (*NASA Earth Exchange (NEX) Global Daily Downscaled Projections (GDDP)*) (NEXGDDP, 2015). Os dados do NEXGDDP compreendem um amplo *downscaling* estatístico dos cenários climáticos globais derivados das rodadas dos modelos de circulação geral (MCGs) definidas no âmbito da quinta fase do IPCC (CMIP5), e utiliza dois dos quatro cenários de emissões de gases de estufa conhecido. Este conjunto de dados inclui um *downscaling* dos experimentos no clima presente (experimento controle), RCP4.5 e RCP8.5 de 21 modelos para os quais os dados diários foram originalmente produzidos e distribuídos no âmbito do CMIP5. A resolução espacial adotada no NEXGDDP foi de 0.25° graus (aprox. 25 km x 25 km) de modo que os dados produzidos apresentam sempre a mesma grade independentemente do modelo climático. O período de dados do experimento controle denominado *historical* é de 1950 a 2005 (período adotado pelo NEXDDP). O período de dados disponíveis para as projeções *RCP4.5* e *RCP8.5* é de 2006 a 2100 (NEXGDDP, 2015).

A terceira etapa abrangeu a aplicação de procedimentos estatísticos voltados para corrigir eventuais vieses identificados nos dados dos modelos climáticos oriundos do NEXGDDP obtidos na etapa anterior. A metodologia de remoção de viés proposta é a denominada mapeamento quantil-quantil (Bárdossy e Pegram, 2011), baseada na comparação das funções de distribuição acumulada das variáveis observadas e simuladas pelo modelo no clima presente.

A quarta e quinta etapa compreenderam a definição da série de máximos anuais da precipitação diária para todas as 27 capitais do Brasil utilizando dados observados e dados dos MCGs. Os dados dos modelos utilizados já consideram as séries com viés corrigido na etapa anterior.

Uma parte fundamental no estudo foi a avaliação da representatividade das séries de máximos anuais dos MCGs em representar os dados observados. Dado o grande número de modelos e as projeções tão divergentes fornecidos pelos modelos globais do CMIP5, é importante realizar uma avaliação que seja capaz de identificar os modelos que representam adequadamente o clima nas localidades de interesse, para que a incerteza associada às projeções do conjunto de modelos possa ser dimensionada e tratada. Deste modo, foram aplicados testes clássicos de aderência Qui-Quadrado e o de Kolmogorov-Smirnov entre a séries observada e a série do experimento *historical* de cada modelo. Modelos climáticos, cujas séries foram consideradas estatisticamente dos dados históricos foram descartados na análise de clima futuro.

A etapa seis e sete compreendem a análise de frequência dos dados observados do HIDRO e dos modelos climáticos do NEXGDDP considerados como factíveis para representar cenários futuros. Estas etapas compreendem tanto a seleção da distribuição de probabilidade, quanto a inferência dos valores para diferentes tempos de retorno. A distribuição de probabilidade selecionada foi a distribuição Gama com ajuste dos parâmetros pelo método do momentos L. Os ajustes para as séries dos MCGs foram realizados considerando 3 períodos distintos: o atual, cujo o período abrangeu os dados do clima presente, o período P1 (2006-2052), que considera os dados da primeira metade do século XXI das projeções dos modelos, e o período P2 (2053- 2100), que considera os dados da segunda metade.

A última etapa compreendeu a avaliação dos impactos nos máximos diários de precipitação considerando os diferentes modelos e cenários de mudanças climáticas. Este impacto foi avaliado a partir da verificação do valor do tempo de retorno obtido para cada MCG utilizando o valor para determinado tempo de retorno inferido dos dados observados. Por exemplo, uma das análises será avaliar qual seria o tempo de retorno no clima futuro da chuva com tempo de retorno de 100 anos no clima presente. Esses valores permitem avaliar o grau de impactos das mudanças do clima em

termos de mudanças no risco hidrológico, um conceito conhecido em bastante empregado em projetos de drenagem urbana e em estudos de gestão de risco de cheias.

RESULTADOS

No levantamento dos dados pluviométricos, obtidos a partir do banco de dados HIDRO, foram consideradas todas as estações dentro de um raio de 30 km da sede municipal de cada capital que tivessem pelo menos 20 anos de dados sem falha, e que os dados dessas séries se estendessem até períodos mais recentes. Com base nessas estações, foi definida as séries de máximos diários de cada uma das 27 capitais brasileiras. Paralelamente, foram também definidas as séries de máximos de cada um dos 20 modelos climáticos para as 27 capitais.

Verificou-se, de um modo geral, a presença de um viés sistemático de subestimativa dos valores máximos de precipitação nas séries dos MCGs. Para a correção desse viés, aplicou-se o mapeamento quantil-quantil (Bárdossy e Pegram, 2011). Este procedimento de correção se mostrou adequado, verificou-se que, praticamente em todas as capitais, as séries observadas superpõe a parte central do conjunto de séries dos MCGs, sugerindo uma preservação das características médias nos dados após a correção. Aplicaram-se os testes de aderência qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov aos dados dos modelos e dados observados para avaliar se as distribuições eram estatisticamente diferentes entre si. Nenhum modelo foi rejeitado.

De posse dos dados observados e dos dados de máximos anuais dos MCGs corrigidos, empregou-se a análise de frequência estatística, de acordo com a metodologia apresentada anteriormente, a fim de avaliar o impacto das mudanças climáticas nas 27 capitais brasileiras.

A análise inicialmente considerou só as séries observadas e o período presente (experimento historical) dos MCGs. O objetivo dessa análise inicial era avaliar os eventuais comportamento de mudança apresentados nas séries atuais. De um modo geral, pode-se verificar que os modelos não conseguem capturar os comportamentos de mudança já observados atualmente. Teste de tendência foram aplicados aos dados observados, e quando se observava a presença de tendência, o mesmo teste era realizado para os valores simulados pelos modelos. Verificou-se que o percentual de modelos que também tinham suas séries identificadas como não-estacionárias para o local de análise era muito pequeno ou nulo. Com relação ao sentido das mudanças, verifica-se que o percentual de acertos é maior que o resultado geral (significância e sentido). Em média, o percentual de acerto fica em torno de 50%, sendo que algumas capitais, como Florianópolis e Curitiba, o percentual de concordância foi superior 70%, principalmente nas capitais de região sudeste e sul.

Com relação ao impacto na série de máximos, a Figura 1 ilustra os resultados dos diferentes tempos de retorno obtidos para o ajuste da distribuição gama às séries de máximos de precipitação diária para os 20 modelos climáticos empregados e para cada um dos períodos analisados. Verifica-se que há uma alteração forte dos tempos de retorno nos períodos futuros para quantil de 100 anos, estimado com base nos dados observados.

O primeiro diagrama de caixa (vermelho) apresenta os valores do quantil de 100 anos estimado com base nos dados obtidos pelos modelos no clima presente. Pode-se verificar a boa aderência aos dados históricos. Observa-se uma grade dispersão de resultados para a primeira metade do século XXI (gráficos azuis e amarelo) para as cidades de Curitiba e Florianópolis. Percebe-se também que para o cenário RCP8.5, uma parte significativa dos modelos (pelo menos 50%) sugere uma redução do tempo de retorno de 100 anos para as três capitais, um indicativo de que as precipitações máximas diárias tendem a aumentar no futuro sob este cenário, embora tenha havido modelos com perspectiva de redução da intensidade.

Para a cidade de Curitiba, o valor do cenário RCP8.5 foi sempre mais impactante que o cenário RCP4.5. Para Florianópolis, a segunda metade do cenário RCP4.5 foi similar a primeira

metade do RCP8.5. Para Porto Alegre, a segunda metade do cenário RCP4.5 foi mais impactante que a primeira metade do RCP8.5. O valor máximo para o período P2 do cenário RCP8.5, considerando todas as capitais, fica na ordem de 75 anos, estimado para a cidade de Florianópolis, ou seja, na melhor das hipóteses, para esse cenário, uma precipitação máxima atualmente esperada para 100 seria de 75 anos. Para Porto Alegre, esse valor seria na ordem de 25 anos, uma redução extremamente alta.

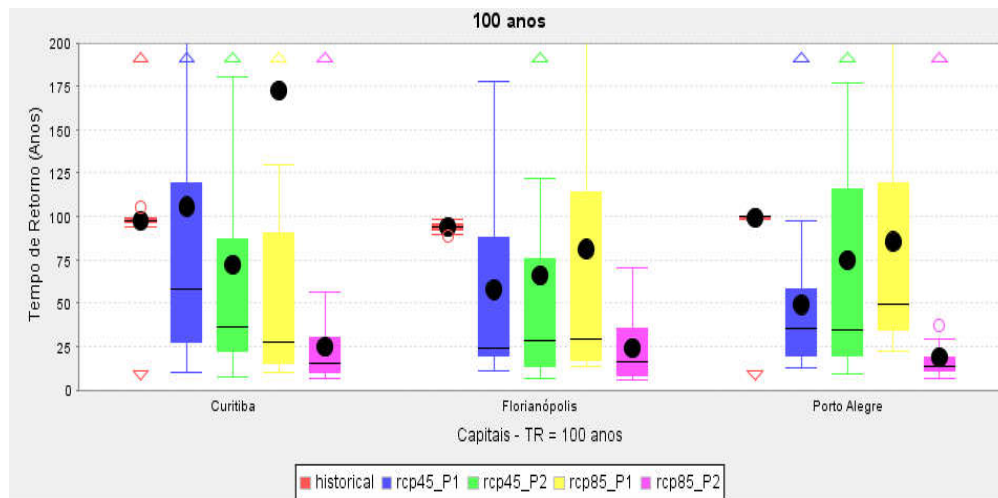


Figura 1 – Tempos de retorno para o valor de 100 anos de tempo de retorno obtido na série de máximos observadas das capitais de região Sul do Brasil.

A Figura 2 ilustra, para diferentes tempos de retorno, os resultados para as 3 capitais da região Sul. Verifica-se um padrão comum entre as diferentes faixas tempos de retorno. Os resultados demonstram que o impacto na frequência de máximos ocorre em qualquer faixa de tempo de retorno. O cenário mais crítico corresponde ao RCP 8.5 na segunda metade do século XXI, no entanto verificam-se substanciais impactos para cenários mais recentes, inclusive para cenários com menores forçantes radiativas (RCP4.5). Os resultados para as capitais das outras regiões brasileiras foram similares.

CONCLUSÃO

O artigo apresenta os resultados preliminares de um estudo em andamento, que procura avaliar os impactos de cenários de mudanças climáticas nas curvas de frequência das precipitações máximas diárias para as capitais das unidades federativas do Brasil. O impacto avaliado no estudo foi realizado por meio da análise de eventuais mudanças futuras nas probabilidades de excedência de quantis estimados no clima presente. Os resultados indicam um número expressivo dos modelos empregados sinalizando para um aumento na intensidade das precipitações máximas diárias no clima futuro, e esse padrão foi o mesmo para todas as capitais do Brasil. O impacto na frequência de máximos ocorre em qualquer faixa de tempo de retorno. O cenário mais crítico corresponde ao RCP 8.5 na segunda metade do século XXI, no entanto verifica-se substanciais impactos para cenários mais recentes, inclusive para cenários menores forçantes radiativas (RCP4.5).

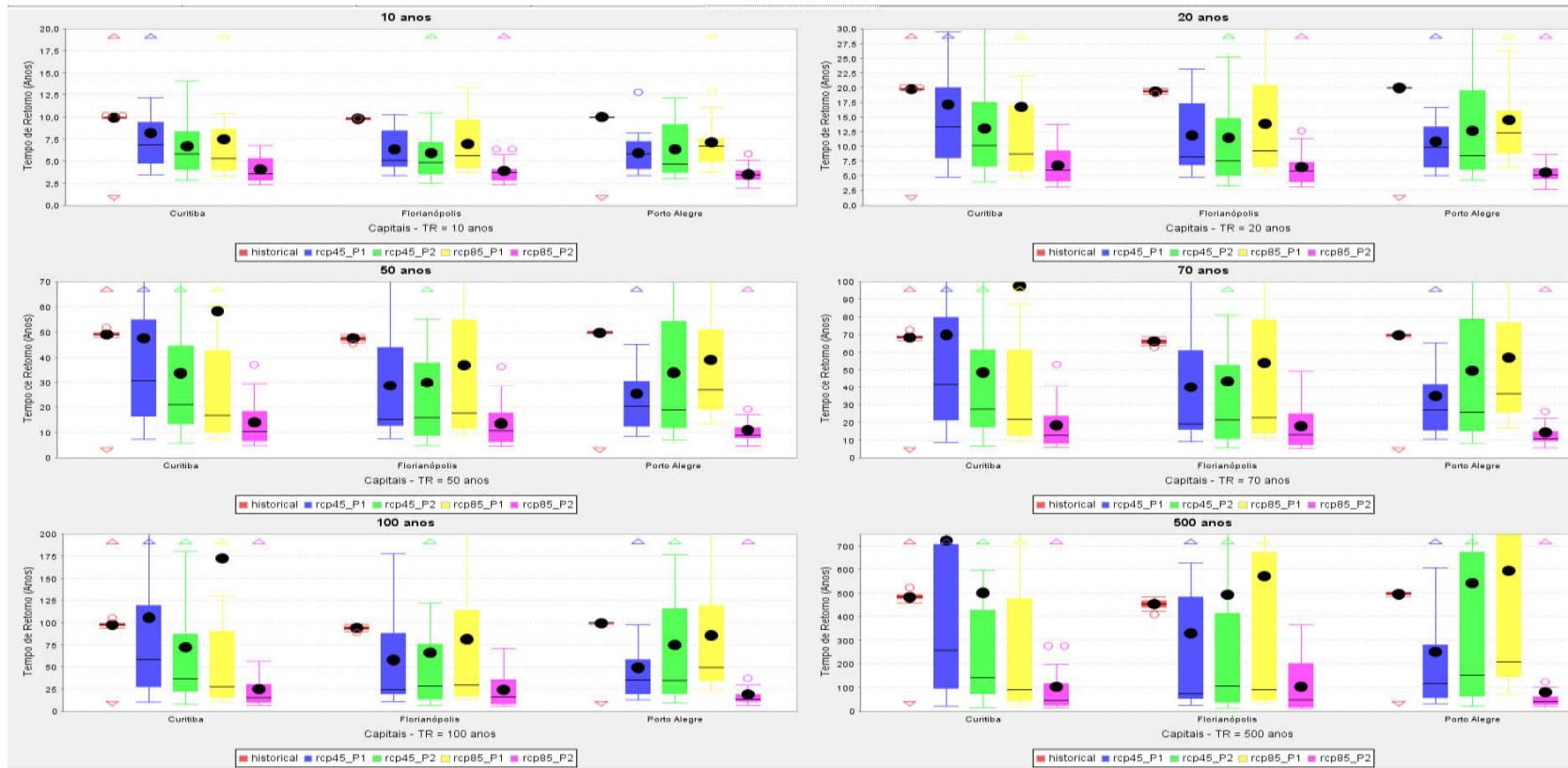


Figura 2 – Resultados dos tempos de retorno obtidos para do ajuste da distribuição Gama as séries de máximos de precipitação diária dos 20 MCGs considerando o experimento histórico, rcp45_p1 (primeira metade), rcp45_p2 (segunda metade), rcp85_p1 (primeira metade) e rcp85_p2 (segunda metade) para as capitais de região Sul.

AGRADECIMENTOS

Este artigo é uma contribuição da Rede Brasileira de Pesquisas sobre Mudanças Climáticas Globais, convênio FINEP/ Rede CLIMA 01.13.0353-00. Os autores também gostariam de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Agência Nacional de Águas (ANA) pelo financiamento do projeto intitulado “Impacto das Mudanças Climáticas em Extremos Hidrológicos (secas e cheias)” por meio do Edital CAPES/ANA de Mudanças Climáticas e Recursos Hídricos No. 19/2015.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANA – Agência Nacional de Águas (2013). Implementação de funções para análise de vazões máximas e para subsídio à estimativa de disponibilidade hídrica em uma ferramenta integrada para apoio a estudos hidrológicos. Nota Técnica nº 032/2013/SPR-ANA, 2013.

Asadieh, B.; Krakauer, N.Y. (2015). Global trends in extreme precipitation: climate models versus observations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19, 877–891.

Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu, and J. P. Palutikof. (2008). Climate change and water. IPCC Tech. Paper 6, 210 pp.

Cheng, L.; AghaKouchak, A. (2014). Nonstationary precipitation intensity-duration-frequency curves for infrastructure design in a changing climate. *Sci. Rep.* 4 (7093), 1–5. <http://dx.doi.org/10.1038/srep07093>.

Das, N.; Millington, N.; Simonovic, S. P. (2013). Distribution choice for the assessment of design rainfall for the city of London (Ontario, Canada) under climate change. *Canadian Journal Civil Eng.* 40: 121–129.

Gonçalves, L. S. (2011). Relações intensidade-duração-frequência com base em estimativas de precipitação por satélite. Dissertação de Mestrado Submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas

IPCC. (2013). Summary for Policymakers. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M., (eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Lima, C.H.R; Kwon, H.; Kim, J. (2016). A Bayesian beta distribution model for estimating rainfall IDF curves in a changing climate. *Journal of Hydrology.* 540. 744–756

Min, S.-K., Zhang, X., Zwiers, F. W., and Hegerl, G. C. (2011). Human contribution to more-intense precipitation extremes, *Nature*, 470, 378–81, doi:10.1038/nature09763.

NEXGDDP (2015). NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections. Technical Note. Junho, 2015 (Disponível em: https://cds.nccs.nasa.gov/wp-content/uploads/2015/06/NEX-GDDP_Tech_Note_v1_08June2015.pdf).

SCHARDONG, A.; SRIVASTAV, R. K.; SIMONOVIC, S. Atualização da equação intensidade-duração-frequência para a cidade de São Paulo sob efeito de mudanças climáticas. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 4, p. 176-185, 2014.



SUGAHARA, S.; ROCHA, R. P.; SILVEIRA, R. (2009). Non-stationary frequency analysis of extreme daily rainfall in São Paulo, Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 29, n. 9, p. 1339–1349.

WESTRA, S.; ALEXANDER, L. V.; ZWIERS, F. W. (2013). Global Increasing Trends in Annual Maximum Daily Precipitation. *Journal of Climate*, 26, 3904-3918.