

Construção de curvas Intensidade-Duração-Frequência com cenários futuros de mudanças climáticas para a cidade de São Carlos - SP visando ao dimensionamento de técnicas compensatórias

Development of curves of Intensity-Duration-Frequency with future scenarios of climate change in São Carlos-SP, Brazil for the design of LID techniques

• **Data de entrada:**
14/08/2019

• **Data de aprovação:**
23/07/2021

Vivian Jochelavicius¹ | Eduardo Mario Mendiondo¹ | Marcus Nóbrega Gomes Júnior¹ | Marina Batalini de Macedo^{1*}

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2022.065>

ORCID ID

Jochelavicius V  <https://orcid.org/0000-0002-4219-3408>
Mendiondo EM  <https://orcid.org/0000-0003-2319-2773>

Gomes Júnior MN  <https://orcid.org/0000-0002-8250-8195>
Macedo MB  <https://orcid.org/0000-0003-2829-754X>

Resumo

No Brasil, os eventos extremos de precipitação ainda são uma das principais causas de desastres ambientais. Com os cenários de mudanças climáticas, os extremos tendem a se intensificar. Assim, é necessário desenvolver medidas adaptativas que possam lidar com esses problemas, reduzindo os riscos à população, como técnicas compensatórias de drenagem urbana (TC). No entanto, os dimensionamentos atuais não levam em consideração os cenários futuros de mudanças climáticas e seus efeitos não estacionários. Assim, é necessário desenvolver novas curvas intensidade-duração-frequência (IDF), para mesmas durações e tempos de retorno, considerando as mudanças climáticas. Esse trabalho visou a realizar o ajuste dessas curvas para a cidade de São Carlos. Para tal, foram feitas estimativas de dados máximos futuros com o modelo climático regional (RCM) Eta – HadGEM e Eta – MIROC5, para RCP 4.5 e 8.5, para anos futuros. Como resultado, espera-se que essas IDFs sejam incorporadas ao dimensionamento modular de TC para serem usadas como medidas adaptativas às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Modelo climático regional. Intensidade de precipitação. Atualização de IDF.

Abstract

In Brazil, extreme events of precipitation are still one of the main causes of environmental disasters. With climate change scenarios, the extremes tend to intensify. Thus, it is necessary to develop adaptive measures that can address these problems by reducing the risks to the population, such as Low Impact Development practices (LID). However, the current scales do not take into account future scenarios of climate change, and their non-stationary effects. Therefore, it is necessary to develop new intensity-duration-frequency (IDF) curves for the same durations and return times. This work aimed to perform the adjustment of these curves to the city of São Carlos. For that, estimates of future maximum data were made with the regional climate model (RCM) Eta - HadGEM and Eta - MIROC5,

¹ Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - São Carlos - São Paulo - Brasil.

***Autora correspondente:** marinabatalini@usp.br.

for RCP 4.5 for future years. As a result, these IDF's are expected to be incorporated into the modular design of LID, to be used as adaptive measures for climate change.

Keywords: Regional climate model. Rainfall intensity. IDF update.

1 INTRODUÇÃO

As principais causas de desastres no Brasil, atualmente, são os eventos extremos de inundações e secas (Santos, 2007; Young et al., 2015), que acometem principalmente os centros urbanos e produção agrícola. Tendo em vista que a principal atividade econômica do país é a exportação de commodities, esses desastres levam a importantes perdas econômicas, em nível nacional. Quando esses desastres acontecem nos centros urbanos, notam-se também perdas econômicas, em nível mais individual e normalmente acometendo pessoas de baixa renda, localizadas em regiões de risco, podendo haver inclusive perdas de vida. Além disso, os sistemas de abastecimento de água são comprometidos, afetando a segurança hídrica da população.

Adicionalmente, o acelerado processo de urbanização, que ocorre mundialmente desde a década de 30 e no Brasil se acelera na década de 50, ocasiona modificações estruturais e ambientais nas bacias urbanas, aumentando a pavimentação, reduzindo a infiltração no solo, aumentando a quantidade de poluentes depositados (Leopold, 1968; Konrad & Booth, 2005; Wong & Eadie, 2000; Stoven et al., 2012), por exemplo, como também modifica as condições sociais, gerando locais de vulnerabilidade e risco para a população. Como consequência dessas mudanças, há um expressivo aumento do escoamento superficial, fazendo com que os riscos do ciclo hidrológico natural se tornem um problema urbano. Eventos extremos de precipitação são elementos precursores de riscos à população (Santos, 2007; Young et al., 2015), com maior vulnerabilidade às inundações e desliza-

mentos. Estes podem se agravar com as mudanças climáticas (Debortoli et al., 2017; Valverde & Marengo, 2010; Marengo et al., 2010).

Considerando os cenários de mudanças climáticas, os eventos extremos e suas consequências tendem a se tornar cada vez mais frequentes, conforme já se pode observar (Debortoli et al., 2017; Marengo et al., 2010). Aumento no volume de chuva, intensidade de chuva e incidentes de desastres naturais são consequências previstas pelos estudos (IPCC, 2007). Os estresses adicionais nas infraestruturas, construções e condições ambientais (Carmin et al., 2009), além da grande concentração populacional em centros urbanos (mais de 70% da população mundial até 2050), fazem com que as cidades sejam um dos principais palcos dos impactos das mudanças climáticas.

Após a problematização da importância das cidades no cenário de mudanças climáticas, tanto como contribuinte como sofrendo as consequências, as 40 maiores cidades do mundo formaram o grupo C40 para discutir e intercambiar ações e políticas de gestão pública que visem diminuir os impactos gerados e sofridos por elas, contando atualmente com outros centros urbanos. Em 2014 este grupo lançou um relatório de diagnóstico e avaliação de suas ações propostas. Neste relatório (C40, 2014), 90% das cidades que compõem o grupo indicam que as mudanças climáticas apresentam riscos significativos para suas cidades, sendo os principais associados a inundações e estresse hídrico. No mais, também apontam a drenagem como chave para gestão de riscos de inundações, em que os sistemas al-

ternativos de drenagem urbana ocupam o terceiro lugar nas ações mais realizadas pelo grupo.

Nota-se a importância da drenagem urbana como medida de adaptação para tornar as cidades mais resilientes, destacando o Brasil que, mesmo antes das mudanças climáticas, as inundações já se apresentavam como principal causa de desastres. As técnicas compensatórias de drenagem urbana (TC) se baseiam no reestabelecimento do ciclo hidrológico natural, ou de pré-urbanização, focando na infiltração da água e eficiência integrada no controle quali-quantitativo do escoamento. Assim, as técnicas variam entre infiltração induzida, retenção, (bio)filtração, controle na fonte de geração dos escoamentos (Eckart et al., 2017).

No entanto, algumas lacunas científicas ainda permanecem. Apesar de possuírem objetivo de retenção de cheias e remoção de poluentes da água de drenagem, os dimensionamentos atuais não levam em consideração os cenários futuros, em relação à mudança do uso e ocupação do solo (urbanização), mas principalmente aos efeitos não estacionários das mudanças climáticas. Assim, para que essas técnicas realmente possam ser utilizadas como medidas adaptativas frente aos cenários previstos pelo IPCC para mudanças do clima, é necessário incorporar esses fatores no dimensionamento.

Dessa forma, este estudo visa atender uma das perguntas que ainda faltam ser respondidas para o dimensionamento de TCs: como se podem incorporar as mudanças não-estacionárias no dimensionamento das técnicas? Para tal, propõe-se que o dimensionamento incorpore novas IDF's construídas a partir dos dados regionais de precipitação simulados para os cenários de emissão de gases do efeito estufa do IPCC. No entanto, essas IDF's ainda são desconhecidas e precisam ser construídas. É essa última lacuna que se visa atender com esse estudo.

Por fim, este estudo está integrado ao Projeto Temático INCT Mudanças Climáticas-II (FAPESP 2014/50848-9 e CNPq 465501/2014-1), liderada por CEMADEN/MCTIC e IAG/USP (MARENGO e AMBRIZZI, 2016). No INCT-MC anterior foram desenvolvidos estudos sobre impactos, adaptações, vulnerabilidade e inovação tecnológica relacionados às mudanças climáticas, contribuindo para os relatórios do IPCC AR5 e o PBMC, com resultados sobre extremos e variabilidades climáticas sobre a vulnerabilidade dos centros urbanos.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Este estudo compõe outros projetos em desenvolvimento, dentro do tema de pesquisa maior sobre drenagem urbana alternativa e técnicas compensatórias. Dessa forma, a área de estudo abordada é definida como a cidade de São Carlos, SP, Brasil. Essa área experimental é representativa de outras localidades brasileiras com urbanização variando entre taxas médias a aceleradas. Em relação ao clima, a área de estudo é classificada como Cwa (clima subtropical úmido, com invernos secos e verões quentes), de acordo com a classificação de Koeppen. No mais, São Carlos apresenta uma temperatura média diária de 21.5 °C, umidade relativa média diária de 74.3% e média de precipitação anual de 1361.6 mm, com maior concentração no mês de janeiro e menor concentração em julho e agosto (EMBRAPA, 2017).

A metodologia é composta de três etapas principais: (1) sintetizar as curvas IDF's já existentes para a cidade de São Carlos com seus respectivos anos de elaboração e avaliação de necessidade de atualização para o cenário atual, (2) atualização da IDF para o cenário atual e verificação da sua aplicabilidade comparando com IDF's já consolidadas e, (3) sua atualização considerando diferentes cenários futuros de mudanças climáticas.

2.1 Metodologia de construção de curvas IDF

As curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) relacionam a intensidade máxima de chuva (mm/h) com sua duração (min) e seu tempo de retorno (anos). Essas curvas são importantes para determinar as intensidades máximas de precipitação, para elaboração de chuva de projeto para obras de engenharia. A equação da IDF é obtida a partir de uma série de dados de chuvas intensas, suficientemente longa e representativa para o local em questão, e segue o formato apresentado na Eq. 1. A metodologia de sua determinação já é bastante conhecida em literatura, e será apresentada resumidamente nessa seção.

$$I = \frac{K \times TR^m}{(t + t_0)^n} \quad (1)$$

onde: I é intensidade de precipitação (mm/h), TR é o tempo de retorno para determinada curva IDF (anos), t é o tempo de duração da chuva de projeto (min), e K, m, n e t₀ são parâmetros específicos a serem obtidos para cada localidade.

Primeiramente, foi realizada a análise da série histórica de precipitação, sendo considerados os anos que apresentam menos de 10 dias de falhas no ano e que não tiveram falhas no período chuvoso. Em seguida, é necessária a verificação da ocorrência de “outliers”, sendo desconsiderados os anos cujas máximas precipitações estavam fora do intervalo dos limites de “outlier”. Para tal verificação, foram realizados os seguintes passos: as precipitações foram colocadas em ordem decrescente; identificaram-se a mediana, o menor e o maior valor da série, a mediana entre o menor número da série e a mediana geral (Q1) e a mediana entre o maior número da série e a mediana geral (Q2). A seguir, foi calculado o interquartil (IQR) segundo a Eq. 2.

$$IQR = Q_3 - Q_1 \quad (2)$$

Assim, o limite de “outlier” (L0) foi obtido pela Eq. 3.

$$L_0 = IQR \times 1,5 \quad (3)$$

Foram considerados “outliers” os valores da série abaixo de (Q₁ - L₀) ou acima de (Q₃ + L₀). Os valores da série histórica que se encontravam fora desse intervalo foram desconsiderados, a fim de se garantir um bom ajuste ao realizar o modelo probabilístico de Gumbel, conforme proposto por Pinheiro (2013).

Para a construção da curva IDF, calculou-se a média das máximas precipitações diárias de cada ano (\bar{X}) e seu desvio padrão (σ_x). Em função do tamanho da amostra N, consulta-se os valores da média reduzida (\bar{y}_n) e do desvio padrão reduzido (σ_n) para o método de Gumbel.

Em seguida, é necessário encontrar a equação de precipitação teórica para os tempos de retorno desejados, escolhidos aqui como 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Utilizando-se os tempos de retorno, determina-se o valor da variável de Gumbel (y) pela Eq. 4.

$$y = -\ln(-\ln(1 - \frac{1}{TR})) \quad (4)$$

Assim, calcula-se o valor do fator de frequência K1 e da lâmina teórica ($X_{teórico}$) conforme Eq. 5 e 6.

$$K1 = \frac{y_1 - \bar{y}_n}{\sigma_n} \quad (5)$$

$$X_{teórico} = \bar{X} + K1 \cdot \sigma_x \quad (6)$$

As lâminas teóricas foram desagregadas para as durações de 5 min, 15 min, 30 min, 1 h, 6 h, 12 h e 24 h, utilizando desagregadores obtidos a partir dos dados observados por Barbassa (1991). Para a conversão da chuva diária na chuva de 24 ho-

ras utilizou-se o coeficiente de desagregação da chuva indicado por Cetesb (1979) para a cidade de São Paulo, com valor igual a 1,14. Posteriormente, as lâminas de precipitação são convertidas para intensidade de precipitação (mm/h).

Posteriormente, os parâmetros K, a, b e c da curva IDF (Eq. 1) são ajustados por regressão linear, a partir do método dos mínimos quadrados. Para tal, a Eq. 1 foi reescrita na forma da Eq. 7 e 8.

$$I = \frac{C}{(t + t_0)^n} \quad (7)$$

$$C = K \cdot TR^m \quad (8)$$

onde: C é um novo parâmetro de simplificação.

As duas equações são então linearizadas por meio de transformação logarítmica, obtendo-se as Eq. 9 e 10. Para fazer o ajuste linear, os dados de intensidade máxima de precipitação, duração da chuva e tempo de retorno também são logaritimizadas.

$$n(I) = \ln(C) - n \ln(t + t_0) \quad (9)$$

$$\ln(C) = \ln(K) + m \ln(TR) \quad (10)$$

Plotando os pares coordenados da Eq. 9 obtém-se o valor de n e os valores de C para cada TR. Para isso, o valor de TR é arbitrariamente escolhido de modo que o coeficiente de linearização das retas resulte o mais próximo de 1. Com os valores de C obtidos anteriormente, é plotado o gráfico proveniente da Eq. 10, determinando-se os valores de m e k. Por fim, obtendo-se todos os parâmetros para a cidade escolhida, pode-se escrever a equação de intensidade de chuvas e traçar o gráfico de IDF, para diferentes TR.

Nesse estudo, os dados históricos de precipitação foram obtidos do site do INMET para a cidade de São Carlos, sendo utilizada a série de 1961 a 2019. Após o cálculo da IDF para o cenário atual, os parâmetros da equação foram comparados com outras curvas IDFs já estabelecidas para São Carlos, de modo a confirmar o método utilizado. Os dados históricos de precipitação foram obtidos do site do INMET.

2.2 Atualização das IDFs para os cenários de mudanças climáticas

As estimativas de precipitação e outros parâmetros climáticos para os cenários futuros de mudanças climáticas para cada local são feitos com base em Modelos de Circulação Global (GCM), que fazem uma modelagem física dos processos climáticos frente aos cenários de concentração de gases do efeito estufa na atmosfera (IPCC, 2007).

Existem vários GCM utilizados atualmente, e seus resultados variam em precisão de acordo com o local, resolução espacial e temporal desejada. Esses modelos podem ser usados com diferentes finalidades. No caso desse trabalho, serão utilizados os valores estimados de precipitação, para atualização das IDFs considerando os cenários futuros. No entanto, esses modelos apresentam resolução espacial incompatível com a escala de bacia hidrográfica, principalmente quando se trata de drenagem urbana. Assim, para que os dados sejam utilizados com maior acurácia, é necessário fazer uma equivalência para escala reduzida. Esse processo é chamado de *downscaling*. Os modelos climáticos regionais já apresentam dados realizando o *downscaling* dinâmico e normalmente são mais indicados para dados de precipitação.

Assim, para este estudo, foram utilizados os modelos regionais de clima (RCM) desenvolvidos pelo INPE-PROJETA (CHOU et al., 2014 e LYRA et al., 2018) para a região de São Carlos, Brasil, com

base nos GCMs, sendo eles o Eta – HadGEM (5 x 5km) e Eta-MIROC5 (20x20km), para os cenários RCP 4.5 e 8.5 de forçante radioativa, representando um cenário mais otimista e pessimista de mudanças no clima.

Para o procedimento de correção de viés, empregou-se o programa CMHyd, uma vez que este apresenta código aberto e já vem sendo amplamente utilizado para modelagens hidrológicas com mudanças climáticas, principalmente ligadas ao modelo SWAT (*Soil and Water Assesment Tool*), um modelo em escala de bacia hidrográfica desenvolvido para prever os efeitos de diferentes usos, coberturas e manejos do solo na produção de água e sedimentos e na qualidade da água (Neitsch et al., 2009). No programa CMHyd, para a correção de viés foram utilizados 44 anos de dados sobrepostos históricos observados (pela estação do INMET) com dados históricos obtidos pelos modelos empregados, sendo utilizado o intervalo de 1961 a 2005, e o ajuste foi feito por meio dos métodos *distribution mapping* e *power transformation*.

Posteriormente, foi realizado o *downscaling* temporal para o período futuro de 2015 a 2099, procedimento necessário para construção das IDF's com mudanças climáticas (Srivastav et al., 2014; Simonovic et al., 2017; Saboia et al., 2017). Para o *downscaling* temporal, os dados de máximos diários foram desagregados em máximos subdiários com os fatores de desagregação obtidos por Barbassa (1991) e Cetesb (1979) para ambos os modelos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Revisão de IDF's para a cidade de São Carlos

Para a cidade de São Carlos, diversos autores propuseram diferentes curvas. Barbassa, em 1991, utilizou 27 anos de dados pluviográficos do período de 1950 a 1988 fornecidos pelo IN-

MET para proceder ao ajuste da IDF. Desenvolveu programas que forneceram as séries para cada duração de precipitação e realizou a verificação de aderência à curva de Gumbel.

Cavalcanti, Silva e Reis (2015) utilizaram dados do INMET (estação convencional e automática) e da rede de monitoramento implantada pela EES-C-USP. Os dados utilizados para a análise deveriam seguir os seguintes critérios: o mínimo de horas sem chuva entre eventos ser de 4 horas e a precipitação mínima acumulada durante o evento ser de 10 mm. Os autores verificaram que os dados da estação INMETa apresentam inconsistências e, assim, a estação INMETc foi considerada mais confiável e foi utilizada como referência para a análise de consistência dos postos da rede de monitoramento instalada mais recentemente.

Outros estudos mais antigos também apresentaram seus parâmetros específicos para a cidade de São Carlos, sendo esses apresentados de forma resumida na Tabela 1. Observando a diversidade dos valores de intensidades de chuva obtidos por meio das diferentes IDF's existentes para São Carlos, indica-se a necessidade da atualização da equação de chuva.

Tabela 1 - Parâmetros das IDF's já consolidadas para a cidade de São Carlos

Referência	K	m	t0	n
Barbassa (1991)	1681,8	0,199	16,00	0,936
Righetto (1998)	1519	0,236	16,00	0,935
SMOP (2014)	1681,8	0,199	16,00	0,916
Cavalcanti, Silva e Reis (2015)	1504	0,1307	12,24	0,8274

Fonte: Cavalcanti, Silva e Reis (2015)

3.2 Atualização da IDF para São Carlos no cenário atual

Utilizando-se a metodologia apresentada, foi construída a IDF para São Carlos apresentada na Eq. 11 e, graficamente, na Fig. 1. Para fins de comparação com as IDF's já consolidadas para a

cidade de São Carlos, a Fig. 2 apresenta a comparação da curva obtida nesse estudo com as previamente apresentadas na Tabela 1, para os tempos de retorno de 5 e 50 anos.

$$I = \frac{845,4 \times TR^{0,1703}}{(t + 12)^{0,764}} \quad (11)$$

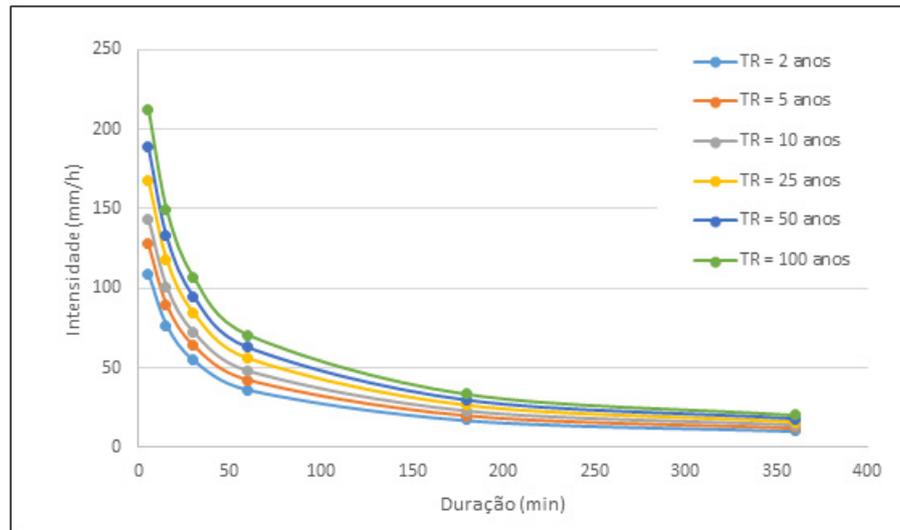


Figura 1 - IDF atualizada para os Tempos de Retorno de 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos

A curva obtida foi comparada com as outras curvas apresentadas, sendo mais próxima da proposta por Cavalcanti, Silva e Reis (2015), pois, por ser a mais recente, tem dados de precipitação mais similares com a construída nesse artigo. Quanto menor o tempo de retorno e a duração da chuva, maiores são as diferenças entre as curvas. A discrepância maior ocorreu entre a curva obtida e a proposta por Righetto (1998) (in CAVALCANTI, SILVA E REIS, 2015).

As diferenças entre as curvas são dadas tanto pela quantidade e atualidade dos dados históricos obtidos como tratamento dos dados (verificação de falhas e outliers), mas também apresentam grande influência dos desagregadores, como já apresentado anteriormente no trabalho de Cavalcanti, Silva e Reis (2015). Assim, recomenda-se maior estudo relacionado aos desagregadores subsidiários, como também, quando

possível, utilização de dados históricos que apresentem resolução espacial menor (como de minuto, ou horários). No entanto, no Brasil ainda é difícil encontrar uma base de dados com tamanho suficientemente grande que apresente essa resolução espacial necessária.

3.3 Atualização da IDF para São Carlos para períodos futuros com projeções climáticas

Verificaram-se as precipitações máximas diárias para cada um dos anos de 2015 a 2099 com os modelos Eta - HadGEM e Eta - MIROC5, para RCP 4.5 e 8.5. Com os valores obtidos utilizando-se os modelos de correção de viés (*Distribution Mapping - DM* e *Power Transformation - PT*), construíram-se novas IDF's que incorporam esses cenários de mudanças climáticas e cujos parâmetros são apresentados na Tabela 2 e 3.

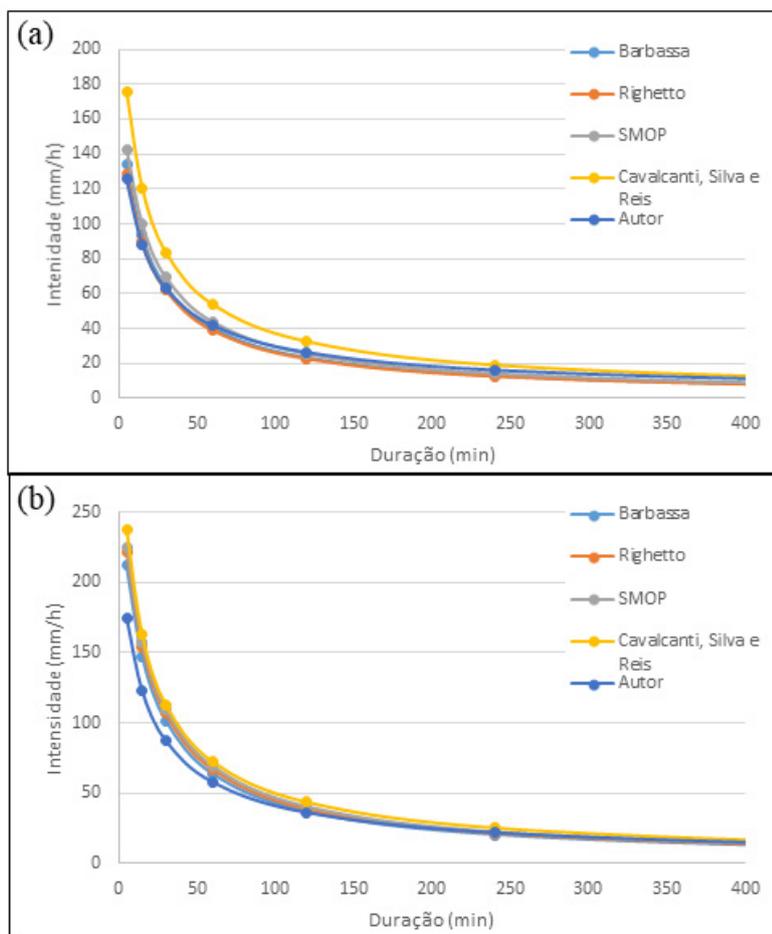


Figura 2 - Comparação de IDFs de diversos autores para TR de (a) 5 anos e (b) 50 anos

Para melhor visualização e futuros dimensionamentos, as IDFs são apresentadas para dois períodos: de 2015 a 2050 e de 2050 a 2099. Os dados para o modelo climático HadGEM apresentavam inconsis-

tências e, por esse motivo, foi realizada a atualização apenas para o RCP 4.5. Por esse motivo também, são apresentadas para discussão posterior apenas as IDFs construídas a partir do modelo MIROC5.

Tabela 2 - Parâmetros das IDFs obtidas para o período de 2015 a 2050 e para cada modelo incorporando mudanças climáticas

	MIROC5 RCP 4.5		MIROC5 RCP 8.5		HadGEM RCP 4.5	
	DM	PT	DM	PT	DM	PT
K	764.56	772.40	890.52	899.82	978.48	883.24
a	0.30	0.31	0.22	0.22	0.26	0.27
b	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
c	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76

Tabela 3 - Parâmetros das IDF's obtidas para o período de 2051 a 2099 e para cada modelo incorporando mudanças climáticas

	MIROC5 RCP 4.5		MIROC5 RCP 8.5		HadGEM RCP 4.5	
	DM	PT	DM	PT	DM	PT
K	965.94	1007.77	1034.01	1036.49	858.77	725.96
a	0.21	0.26	0.20	0.24	0.31	0.44
b	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00	12.00
c	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76	0.76

As Fig. 3 e 4 apresentam as IDF's de forma gráfica obtidas por meio do modelo MIROC5, para os cenários RCP 4.5 e 8.5, para os modelos DM e PT, para os períodos de 2015 a 2050 e 2051 a 2099, respectivamente. Para o período de 2015 a 2050 (Fig. 5), a diferença entre os dois modelos de correção de viés utilizados é mínima, de forma que há uma sobreposição quase comple-

ta das curvas para ambos os cenários, embora seja possível observar que há uma ligeira discrepância para o cenário RCP 4.5 e TR 50 anos. Já para o período mais futuro (intervalo 2051 a 2099, Fig. 4), as diferenças entre os modelos se acentuam, de forma que há uma menor sobreposição de curvas para o RCP 4.5 e para tempos de retorno maiores.

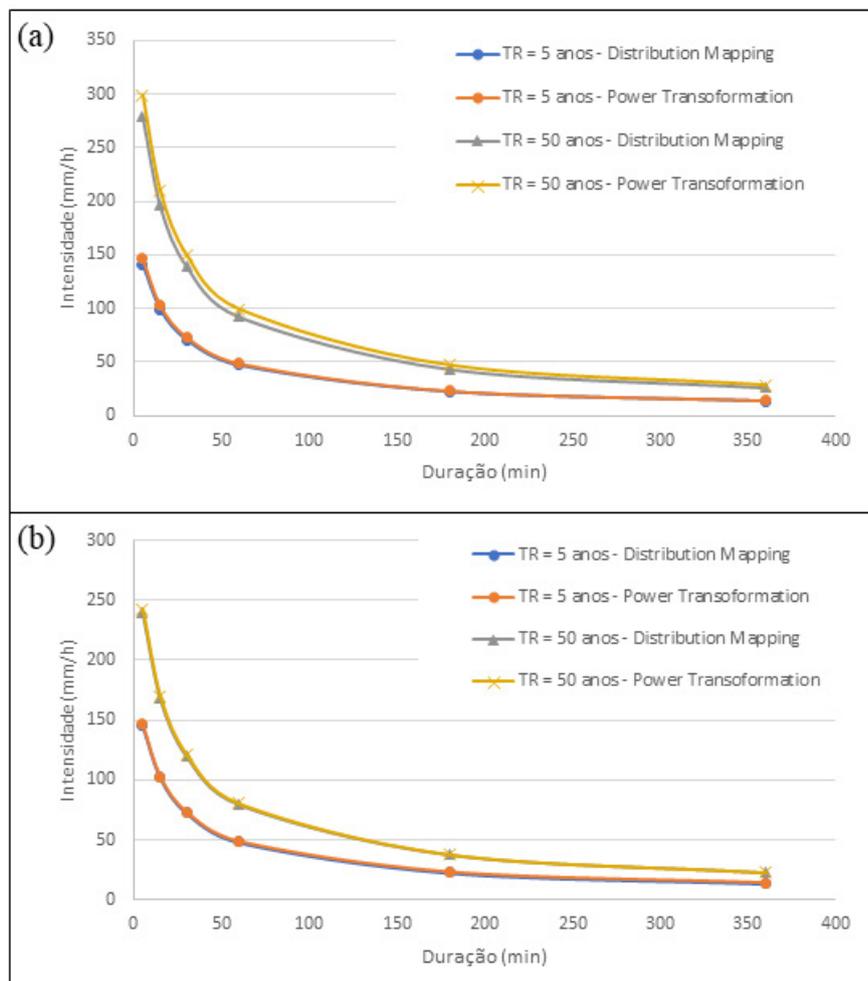


Figura 3 - IDF's para o período de 2015 a 2050 para (a) RCP 4.5 e (b) RCP 8.5

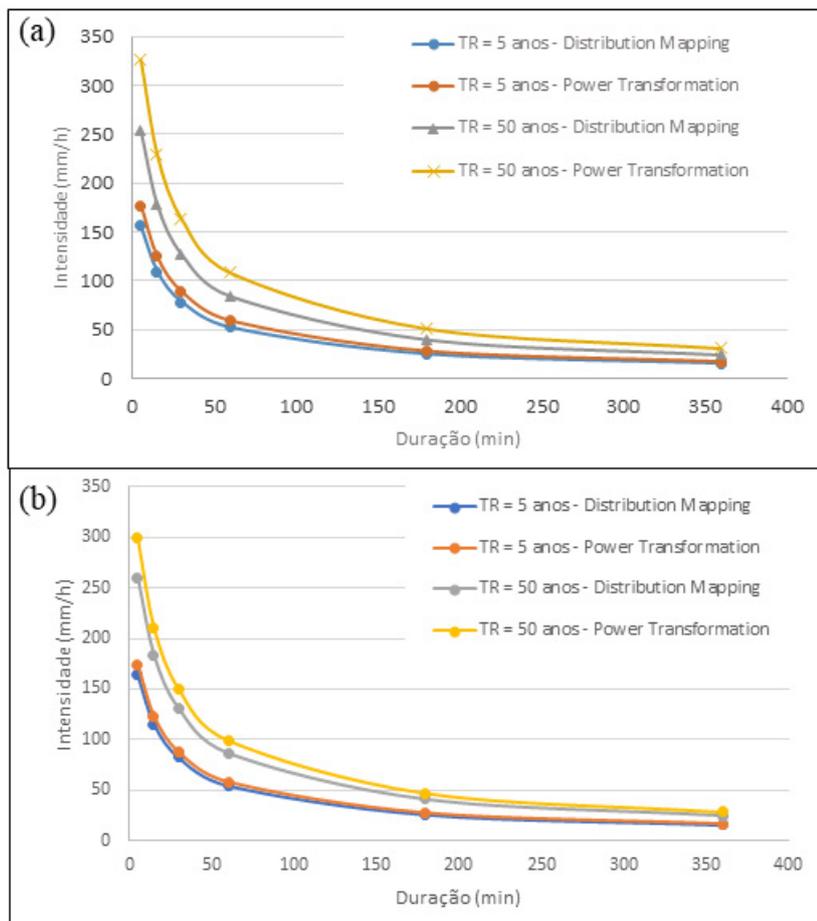


Figura 4 - IDFs para o período de 2051 a 2099 para (a) RCP 4.5 e (b) RCP 8.5

Os tempos de retorno maiores representam maiores intensidades de precipitação. Além disso, de acordo com os trabalhos de Chou et al. (2014) e Lyra et al. (2018), também foi obtido que o aumento da forçante radioativa irá ocasionar uma maior seca na região sudeste do Brasil, porém podendo ter eventos de precipitação mais intensos. Assim, os cenários RCP 4.5 com tempo de retorno maior representam maiores volumes de precipitação, comparativamente com o cenário RCP 8.5 e menores tempos de retorno. Dessa forma, percebe-se que há uma maior importância do modelo de downscaling escolhido quanto maior a magnitude da intensidade de precipitação. Assim, a escolha do modelo de downscaling a ser utilizado deve levar em consideração o tipo de variável climática

a ser avaliada e, para o caso de precipitação, o intervalo de magnitude a ser avaliado.

Existem incertezas intrínsecas aos modelos futuros de mudanças climáticas (tanto para os GCMs como os RCMs), mesmo após os métodos de downscaling e correção de viés, que já fazem o ajuste dos dados futuros projetados com base em uma diminuição dos erros entre os dados históricos projetados e os dados históricos observados. Essas incertezas devem ser levadas em consideração quando utilizados os dados projetados futuros tanto para estudos de simulação como para sua utilização em dimensionamento de obras (como no caso de chuva de projeto por meio de IDFs). Devido à dificuldade de calcular essas incertezas estatisticamen-

te, Willems & Vrac (2011) sugeriram a utilização de cenários de variabilidade, em que se consideram diferentes modelos, diferentes métodos de downscaling e correção de viés e diferentes cenários de projeção de emissão de gases de efeito estufa. O tomador de decisão deve levar esses cenários de variabilidade em consideração durante a escolha dos parâmetros e dados de entrada nos diferentes estudos ou dimensionamento de obras. Para o caso de estruturas de drenagem, há uma maior segurança na obra e redução da ocorrência de falhas se as estruturas são dimensionadas considerando o limite externo superior do cenário de variabilidade,

que resulta em eventos de maior magnitude. Assim, recomenda-se a utilização do modelo PT e cenário de forçante radioativa que cause maior volumes e intensidades de chuva.

Nas Fig. 5 e 6, exploram-se as diferenças das IDFs considerando as mudanças climáticas em relação à IDF construída para a cidade de São Carlos com base nos dados observados. Para os tempos de retorno de 5 e 50 anos e duração de 30 minutos, são apresentadas na Tabela 4 as diferenças relativas percentuais quando se compara a IDF obtida para São Carlos com os dados históricos (IDF atual) e com dados que incorporam mudanças climáticas.

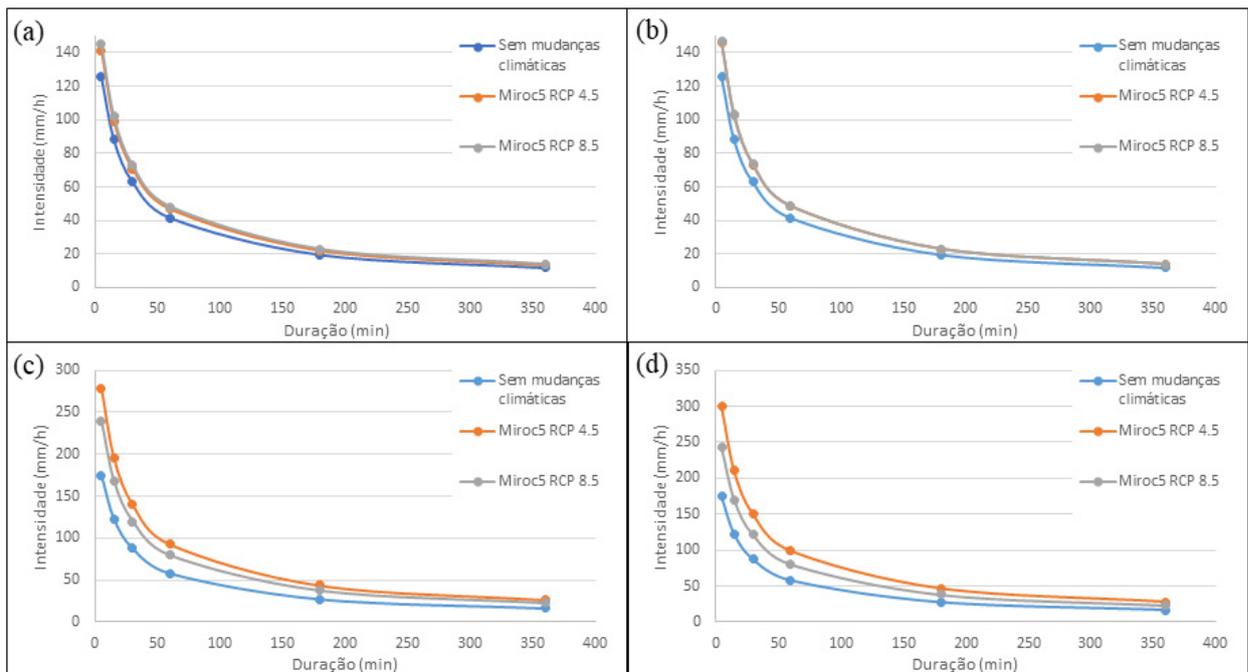


Figura 5 - Comparação das IDFs para o período atual e para o período de 2015 a 2050 com mudanças climáticas: (a) DM para TR 5 anos, (b) PT para TR 5 anos, (c) DM para TR 50 anos e (d) PT para TR 50 anos.

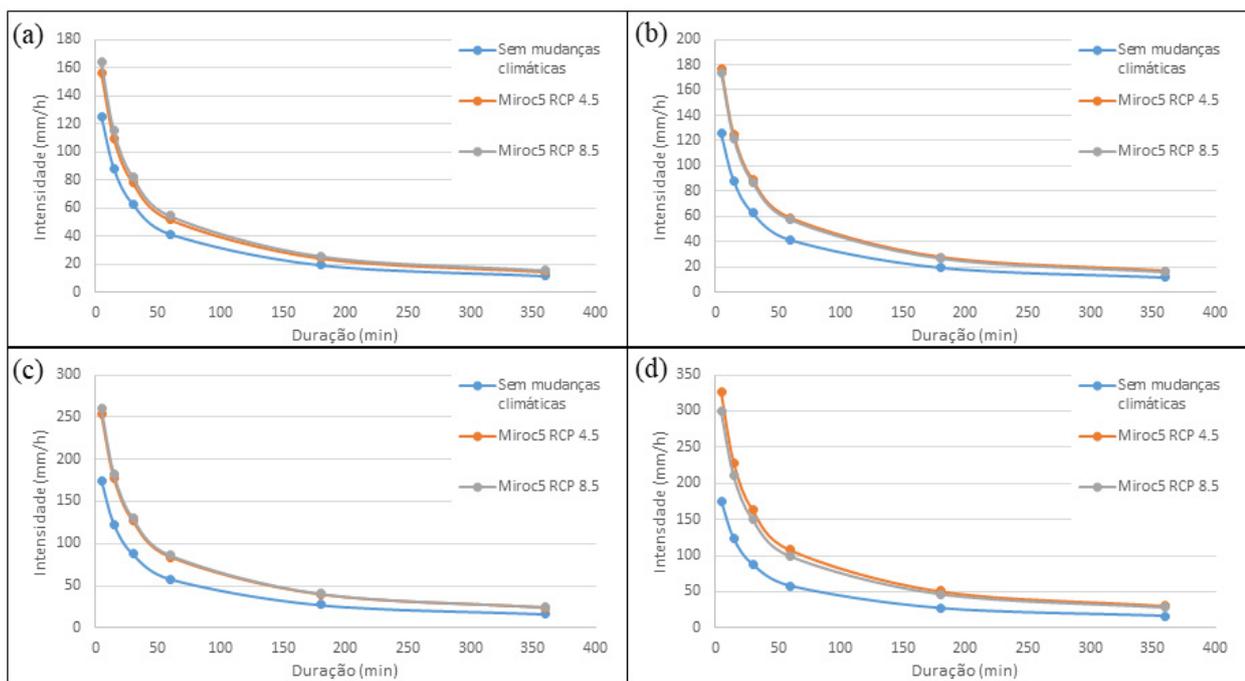


Figura 6 - Comparação das IDFs para o período atual e para o período de 2051 a 2099 com mudanças climáticas: (a) DM para TR 5 anos, (b) PT para TR 5 anos, (c) DM para TR 50 anos e (d) PT para TR 50 anos.

Tabela 4 - Diferenças relativas entre as intensidades de precipitação em relação à IDF atual de São Carlos

	2015 a 2050		2050 a 2099	
	TR = 5 anos		TR = 5 anos	
	MIROC5 RCP 4.5	MIROC5 RCP 8.5	MIROC5 RCP 4.5	MIROC5 RCP 8.5
DM	13%	16%	24%	31%
PT	58%	46%	41%	39%
	TR = 50 anos		TR = 50 anos	
	MIROC5 RCP 4.5	MIROC5 RCP 8.5	MIROC5 RCP 4.5	MIROC5 RCP 8.5
	DM	59%	37%	45%
PT	40%	17%	86%	71%

Percebe-se que, tanto para o RCP 4.5 como para o 8.5, as intensidades de precipitação são maiores que as calculadas para a IDF sem mudanças climáticas, sendo que as diferenças são acentuadas quanto maior o tempo de retorno estudado, ou seja, maiores intensidades e volumes de precipitação, assim como para a influência do modelo de correção de viés. A diferença relativa chega a atingir valores de até 86% para o cenário MIROC5 com RCP 4.5, TR de 50 anos, para modelo PT e período 2051 a 2099, sendo esse o ce-

nário mais crítico em relação a volume e intensidade de chuva. No entanto, mesmo para TR de 5 anos e período 2015 a 2050, o menor valor de diferença relativa é de 13%. Esses incrementos nas precipitações geram uma diferença significativa nos volumes das estruturas alternativas de drenagem urbana a serem dimensionadas para mitigação de cheias. Se não forem levados em consideração os cenários futuros no dimensionamento das obras, haverá uma defasagem mais rápida, aumentando os riscos da população.

4 CONCLUSÃO

Como conclusão deste trabalho, percebe-se que as mudanças climáticas influenciarão os padrões de precipitação no futuro de forma a aumentar a intensidade de precipitação. A atualização de IDF considerando os efeitos não estacionários das mudanças climáticas deve ser feita para a obtenção de chuvas de projeto mais realistas para os cenários futuros. Considerando esses efeitos, as obras de drenagem urbana conseguirão ser projetadas de forma a prevenir e mitigar os efeitos dos eventos extremos para um cenário de médio e longo prazo.

Entretanto, devido às incertezas intrínsecas presentes tanto nos GCMs e RCMs como na própria construção da IDF, é importante que os projetos de engenharia lidem com cenários de incerteza estatísticas ou de variabilidade. Neste estudo, foi apresentado um cenário de variabilidade para a cidade de São Carlos, considerando diferentes métodos de correção de viés e cenários de projeção. Os incrementos de intensidade de precipitação para os cenários futuros variaram de 13 a 58% para TR de 5 anos e intervalo de 2015 a 2099, sendo o menor incremento para o método de correção de viés DM e projeção RCP 4.5 e com maior incremento para o método de correção de viés PT e também para projeção RCP 4.5. Já no caso do período de retorno de 50 anos, os incrementos são maiores (entre 17 e 86%), sendo o menor incremento para o método PT e projeção RCP 8.5 e maior incremento para o método PT e projeção RCP 4.5.

Assim, o tomador de decisão deve adotar o cenário de variabilidade que atenda ao objetivo da obra a ser dimensionada. Para obras de drenagem urbana com visão mais conservadora, aconselha-se adotar cenários com maior incremento de precipitação para reduzir os riscos de falha das estruturas. No entanto, os cenários com maior incremento de precipitação terão maiores dimensões, ocasionando em maiores custos. Estudos de otimização multi-critério podem ser feitos para auxiliar na obtenção do tamanho ótimo das estruturas.

5 AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq pela bolsa de iniciação científica para realização desse projeto e ao Projeto Temático INCT Mudanças Climáticas-II (FAPESP 2014/50848-9 e CNPq 465501/2014-1).

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Macedo MB, Mendiondo, EM, e Jochelavicius V; **Metodologia:** Macedo MB, Jochelavicius V e Gomes Junior MN; **Investigação:** Jochelavicius V e Macedo MB; **Redação – Primeira versão:** Jochelavicius V, Macedo MB, Gomes Junior, MN; **Redação – Revisão & Edição:** Jochelavicius V e Macedo MB; **Aquisição de Financiamento:** Mendiondo, EM; **Recursos:** Mendiondo, EM; **Supervisão:** Mendiondo, EM

7 REFERÊNCIAS

- BARBASSA, A. P. **Simulação do efeito da urbanização sobre a drenagem pluvial da cidade de São Carlos – SP.** 1991, Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1991. 312 p.7
- C40, **Climate Action in Megacities: C40 Cities Baseline and Opportunities.** Volume 2.0. Feb, 2014. Acesso em: 21 out 2016. Disponível em: <http://issuu.com/c40cities/docs/c40_climate_action_in_megacities/149?e=10643095/6541335> .
- CARMIN, J.; ANGUELOVSKI, I. **Planning Climate Resilient Cities: Early Lessons from Early Adapters.** 2009.
- CAVALCANTI, D. O.; SILVA, D. F.; REIS, L. F. R. Análises preliminares de dados de monitoramento das bacias urbanas do município de São Carlos – SP. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. Brasília. 2015. 8p. **Anais...**
- CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Drenagem Urbana: manual de projeto.** São Paulo, 1979. 476p.
- CHOU, S. C., LYRA, A., MOURÃO, C., DERECZYNSKI, C., PILOTTO, I., GOMES, J., ... & CAMPOS, D. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n.5, p. 512-525, 2014. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2014.35043>
- DEBORTOLI, N. S.; CAMARINHA, P. I. M.; MARENGO, J. A.; RODRIGUES, R. R. An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in

context of climate change. **Nat Hazards**, <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2705-2>, 2017.

ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISSETTI, T.. Performance and implementation of low impact development—a review. **Science of The Total Environment**, v. 607, p. 413-432, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.254>

EMBRAPA. **Condições Meteorológicas Estação da Embrapa Pecuária Sudeste**. Disponível em: <<http://www.cppse.embrapa.br/meteorologia/index.php?pg=caracterizacao>>. Acesso em: 01 jun. 2017.

IPCC. **Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change**. Geneva, Switzerland, p. 104, 2007.

KONRAD, C.P., BOOTH, D.B. Hydrologic changes in urban streams and their ecological significance. **American Fisheries Society Symposium**. v. 47, p. 157–177, 2005.

LEOPOLD, L.B. Hydrology for urban land planning: A guidebook on the hydrological effects of urban land use. Circ. No. 554. U.S. **Geological Survey**, Washington, DC. 1968.

LYRA, A., TAVARES, P., CHOU, S. C., SUEIRO, G., DEREZYNSKI, C., SONDERMANN, M., ... & GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non-hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 132, n.1-2, p. 663-682, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2067-z>

MARENGO, J. A.; SCHAEFFER, R.; ZEE, D.; PINTO, H. S. **Mudanças climáticas e eventos extremos no Brasil**. Disponível em: http://www.fbds.org.br/cop15/FBDS_MudancasClimaticas.pdf. Acesso em Out., 2010.

MARENGO, J. A., AMBRIZZI, T. **Programa INCT Mudanças Climáticas (INCT-MC-II)**, CNPq 465501/2014-1. 2016.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R.; **Soil and Water Assessment Tool – Theoretical documentation**, Version 2009. Texas Water Resources Institute, 2011.

PINHEIRO, E. C. **Contribuições e influência e modelagem de valores extremos**. Tese (Doutorado). Instituto de Matemática e Estatística da Universidade de São Paulo. 2013. 171p.

SABÓIA, M. A. M., SOUZA FILHO, F. A., ARAÚJO JUNIOR, L. M.; SILVEIRA, C. S. Climate changes impact estimation on urban drainage system located in low latitudes districts: a study case in Fortaleza–CE. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, 2017. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.011716074>

SANTOS. **Vulnerabilidade ambiental: desastres naturais ou fenômenos induzidos?** MMA, 2007.

SRIVASTAV, R.K., SCHARDONG, A., SIMONOVIC, S.P. Equidistance Quantile Matching Method for Updating IDF Curves Under Climate Change. **Water Resources Management: An International Journal**, 28(9): 2539-2562, 2014. : <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0626-y>

SIMONOVIC, S.P. Adapting to Climate Change: a Web Based Intensity-Duration-Frequency (IDF) Tool, **Geotechnical news**, 35(3):40-42, 2017.

VALVERDE, M. C.; MARENGO, J. A. Mudanças na circulação atmosférica sobre a América do Sul para cenários futuros de clima projetados pelos modelos globais do IPCC AR4. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 1, p. 125-145, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000100011>

WILLEMS, P., & VRAC, M. Statistical precipitation downscaling for small-scale hydrological impact investigations of climate change. **Journal of Hydrology**, v. 402 n.3-4, p. 193-205, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.030>

WONG, T.H.F., EADIE, M.L. Water sensitive urban design—a paradigm shift in urban design. In: Xth World Water Congress, 12:16. http://gabeira.locaweb.com.br/cidadesustentavel/biblioteca/%7B30788FE6-98A8-44E5-861E-996D286A78B3%7D_Wong1.pdf. 2000. **Anais...**

YOUNG, C. E. F.; AGUIAR, C.; SOUZA, E. **Valorando Tempestades: Custo econômico dos eventos climáticos extremos no Brasil nos anos de 2002 – 2012**. Observatório do clima. São Paulo, 2015.