

Atualização da equação intensidade-duração-frequência para a cidade de São Paulo sob efeito de mudanças climáticas

Andre Schardong; Roshan K. Srivastav

Post doctoral Fellow, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, N6A 5B9;
aschardo@uwo.ca; roshan.srivastav@uwo.ca

Slobodan P. Simonovic

Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Western Ontario, London, Ontario, Canada, N6A 5B9;
simonovic@uwo.ca

Recebido: 29/01/14 - revisado: 01/05/14 - aceito: 05/06/14

RESUMO

Existe grande preocupação na comunidade científica em entender de forma adequada e abrangente a influência das alterações no clima sobre eventos hidrológicos extremos, cuja frequência e intensidade reconhecidamente tiveram variação significativa nas recentes décadas. Apesar de controverso o real motivo da alteração no clima, mais diretamente observada pela alteração na temperatura média do planeta, existe consenso de que o aumento desta é um dos principais fatores causadores dos distúrbios na precipitação. Neste artigo, é apresentada uma metodologia simplificada para atualização de curvas intensidade duração frequência (IDF) considerando o impacto das mudanças climáticas. Curvas IDF são frequentemente utilizadas para projetos de drenagem urbana, drenagem de estradas, estruturas de controle de enchentes e inundações, entre outros. É uma forma expedita e não requer conhecimento específico para a geração de hietogramas (tormentas) de projetos. A premissa nestes casos, é de que o hietograma utilizado representa de forma adequada as condições hidrológicas durante a vida útil da estrutura projetada. A metodologia consiste em relacionar, através de desagregação espacial e utilização de função de transferência, o período de dados históricos observados em uma estação com as simulações do período/cenário histórico ou de controle dos modelos de circulação global(GCM). A correlação ou correção de viés, estabelecida entre o período histórico de dados observados e o de controle dos GCM é aplicada à equação e ajustada à IDF para os cenários futuros do modelo GCM, gerando assim as curvas IDF atualizadas sob efeito da mudança projetada no clima. A metodologia é aplicada a uma estação pluviométrica localizada na cidade de São Paulo, Brasil, cuja equação é oficialmente utilizada pela prefeitura da cidade em seus projetos. Os resultados obtidos são comparados às duas equações existentes e a outra ajustada aos dados mais recentes disponíveis. O modelo GCM utilizado na análise foi o CanESM2 do “Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis”. Os resultados apresentam uma tendência de aumento das precipitações extremas tomando como base a curva ajustada aos dados mais recentes disponíveis. O incremento obtido de aproximadamente 4,5%, para cenário de menor emissão é cerca de 31% para cenário de emissão alta e períodos de retorno maiores.

Palavras Chave: Curvas IDF. Modelos de circulação global. Drenagem. Modelagem matemática

INTRODUÇÃO

O clima possui influência direta sobre as atividades humanas e, historicamente, limitou e influenciou o seu desenvolvimento, principalmente em termos de recursos disponíveis para manutenção da vida (SCHARDONG; SIMONOVIC, 2013).

Os dois últimos relatórios de avaliação do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) *Assessment Report* 4 e 5, AR4 e AR5 (IPCC, 2007, 2013) apontam que as mudanças nos valores médios de temperatura (incremento na grande maioria das regiões do planeta) são fortemente relacionados aos níveis de gases com efeito estufa, como dióxido de carbono, metano e óxido de nitrogênio. Apesar de controverso se este fato é atribuído à ação antrópica neste processo, é consenso de que o impacto da alteração na temperatura média do planeta afeta parcialmente o regime de chuvas, de forma a aumentar a frequência e magnitude (WILCOX; DONNER, 2007; ALLAN; SODEN, 2008 & SOLAIMAN; SIMONOVIC, 2011). Regiões mais próximas aos polos provavelmente experimentarão acréscimo médio significativo nos níveis de precipitação, enquanto regiões mais próximas aos trópicos poderão sofrer incrementos menores ou até redução significativa, em relação aos níveis atuais. Na região da América do Sul, mais especificamente, variações significativas

são esperadas (MARENGO et al., 2011). A região Amazônica e Nordeste brasileiro poderão sofrer diminuição significativa em até 30% nos níveis de precipitação atual, enquanto a região da Bacia do Prata pode sofrer incremento positivo de até 10%. Esta tendência é confirmada pelo último relatório de avaliação do IPCC - AR5 (TAYLOR et al., 2012, IPCC, 2013), no qual há indicação de variações positivas na temperatura média do planeta na faixa de 0,3% à 4,8% até o final de 2100, tomando como base o período histórico de duas décadas anteriores até 2005 (KHARIN et al., 2013).

Usualmente, as equações ou curvas intensidade duração frequência (IDF) são obtidas através do ajuste de uma função de probabilidades de valores extremos. Este ajuste geralmente é realizado nos valores máximos anuais da precipitação de variadas durações intra-diárias obtidas de séries históricas observadas. As durações das precipitações utilizadas geralmente são: 5, 10, 15, 30 minutos, 1, 2, 6, 12 e 24 horas. As distribuições mais comumente utilizadas nos ajustes aos dados máximos anuais são Gumbel – EV1 e GEV (*generalized extreme values*), embora Log-Pearson 3P também seja utilizada (DAS et al., 2013). Uma vez ajustada a distribuição, é possível determinar a intensidade e a altura da precipitação para diferentes períodos de retorno - T, geralmente 2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos. Esta metodologia é baseada

na hipótese de que a observação histórica representa de forma adequada as condições futuras, ou seja, que a série observada seja estacionária, o que pode não ser realista, e questionável sob condições de alterações de regime hidrológico por efeito de mudanças climáticas (MILLY et al., 2008 e SUGAHARA et al., 2009).

Com intuito de incorporar esta expectativa de mudanças na precipitação em cenários futuros devido a alterações no clima, alguns estudos buscam extrair as relações dos modelos de circulação global - GCMs para atualização de equações IDF (MAILHOT et al., 2007; NGUYEN et al., 2007; PRODANOVIC; SIMONOVIC, 2007; KAO; GANGULY, 2011; PECK et al., 2012; HASSANZADEH et al., 2013 e MIRHOSSEINI et al., 2013).

Autores como Prodanovic e Simonovic (2007), Peck e Simonovic (2009), Peck et al. (2012), Solaiman e Simonovic (2011) e Das et al. (2013) utilizaram a metodologia que envolve aplicação de modelo estatístico para o processo de desagregação espacial combinada com fatores de alteração mensais, que representam a alteração dos modelos GCMs em relação ao período de base. A desagregação espacial é realizada utilizando um modelo estocástico KnnCAD ("k"ésimo vizinho mais próximo) desenvolvido por Sharif et al. (2007) e Eum & Simonovic (2012) e atualizado por King et al. (2013). O modelo estocástico de geração de séries KnnCAD, e outros como o SDMS (Statistical Downscaling Model) desenvolvidos por Wilby e Dawson (2007) são utilizados para gerar longas séries sintéticas de dados, que são então utilizadas nas análises da metodologia.

Outros autores como Salathé Jr. et al. (2007) e Piani et al. (2010) propõem a utilização de mapeamento por quantis relacionando curvas de frequências das séries de dados históricos observados nas estações de monitoramento e dos GCMs. Esta metodologia foi aplicada por Schardong e Simonovic (2013), na qual a curva de frequência acumulada (CFA) ajustada aos dados históricos (valores máximos diários) e às séries extraídas dos modelos GCMs, seja diretamente ou das séries sintéticas gerados pelos modelos estocásticos. Nguyen et al. (2007) utilizaram o processo de desagregação espacial/temporal para atualização de curvas IDF usando GCMs como dados de entrada. Assim como outros autores, a desagregação espacial é realizada com auxílio do modelo estocástico SDMS para geração de séries sintéticas e o ajuste temporal realizado com ajuste de distribuição GEV aos dados observados e séries sintéticas geradas. Alguns autores como Li et al. (2010) propuseram uma metodologia baseada em mapeamento de quantis, relacionado, através de função acumulada de distribuição de frequência aos máximos mensais de valores de temperatura, à função acumulada ajustada aos máximos mensais dos modelos GCMs. Esta é a metodologia similar aplicada por Nguyen et al. (2007), serviram de inspiração para o estudo apresentado neste artigo, cuja metodologia proposta relaciona diretamente as equações ajustadas às curvas IDF, após o ajuste da distribuição de probabilidades, e desta forma, não depende de qual delas foi utilizada no ajuste, seja ela Gumbel – EV1, GEV ou até mesmo Log-Pearson.

Em alguns estudos, modelos regionais com melhor precisão espacial e temporal foram utilizados na construção das curvas IDF. Mailhott et al. (2007) utilizou um modelo regional,

que possui como condição de contorno o cenário AB1 do CMIP3 de um dos modelos de circulação global. Essa metodologia ainda possui muitas limitações devido ao alto custo computacional que estes modelos regionais impõem, justamente por conta de melhor discretização espacial e temporal.

A grande maioria dos estudos disponíveis na literatura, utiliza os modelos do Coupled Model Inter-Comparison Phase 3 (CMIP3) preparados para o IPCC AR4. Neste estudo, foram utilizados os novos modelos do Coupled Model Inter-Comparison Phase 5 (CMIP5) - WCRP (2013) preparados para o IPCC AR5 (IPCC, 2013). A principal diferença entre ambos está nos cenários de emissão de poluentes projetados para o futuro. No CMIP3, foram utilizados os cenários A2, AB1 e B1 (NAKICENOVIC et al., 2000), onde A2 representa o cenário com emissão mais elevada e B1 o de emissão mais baixa. Desta forma, A2 é geralmente associado às alterações de temperatura e precipitação média mais severas, enquanto o B1 associado à alterações menos proeminentes nos extremos. Estes cenários foram substituídos pelos chamados RCPs (Representative Concentration Pathways) no CMIP5, e foram projetados de forma a acomodar uma gama de possibilidades de desenvolvimento econômico e social (TAYLOR et al., 2012, KHARIN et al., 2013). Três RCPs principais são utilizados para as simulações do século 21 (2006 a 2100): RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5. O número associado ao RCP é o valor do fluxo de calor ou radiativo ao final do século XXI em Watts/m² o que equivale, respectivamente, a um nível de emissão de CO₂ de 490 p.p.m (partes por milhão), 650 p.p.m e 1370 p.p.m. (VUUREN et al., 2011). O cenário RCP 4.5 é o cenário desejado, ou seja, no qual os países consigam controlar os níveis de emissões, e o nível de CO₂ na atmosfera se estabilize logo após 2100. Entretanto, o cenário RCP 8.5 é reconhecidamente o mais provável. Adicionalmente, as rodadas dos cenários de controle (ou de base ou ainda históricos) dos GCMs são realizadas de 1850 a 2005. De forma similar aos cenários do CMIP3, estes três novos cenários representam, respectivamente, um cenário de menor, médio e maior impacto, especialmente na variação esperada da temperatura. A precipitação, assim como no CMIP3, varia negativa ou positivamente dependendo da região do planeta, e a magnitude da alteração esperada é relativa ao nível de emissões de cada um dos RCPs (KHARIN et al., 2013).

A próxima seção do artigo apresenta a metodologia utilizada, seguida pela descrição do estudo de caso, análise e apresentação de resultados, seguido das conclusões do estudo.

METODOLOGIA

Neste artigo, é apresentada uma metodologia para atualização de curvas IDF considerando o efeito de mudanças climáticas utilizando modelos de circulação global aplicada à uma estação pluviométrica/pluviográfica localizada no município de São Paulo – SP. O método consiste, inicialmente, em extrair os máximos anuais das séries de dados observados (para cada um dos intervalos de tempo intra-diários). Da mesma forma, valores máximos diários dos GCMs são extraídos, e em ambos os casos, uma função de probabilidades é ajudada (Gumbel – EV1, neste caso), curvas IDF determinadas e equações ajustadas para cada

uma das rodadas e cenários futuros dos modelos GCM. As equações são então relacionadas, para: 1) estabelecer a relação entre dados históricos observados e as rodadas de controle do GCM (também conhecido como ajuste/correção de viés) e 2) inferir a alteração para cenários futuros com base no cenário de controle dos GCMs e os RCPs. Um fluxograma da metodologia descrita é apresentado na Figura 1. Os passos da metodologia são descritos detalhadamente a seguir.

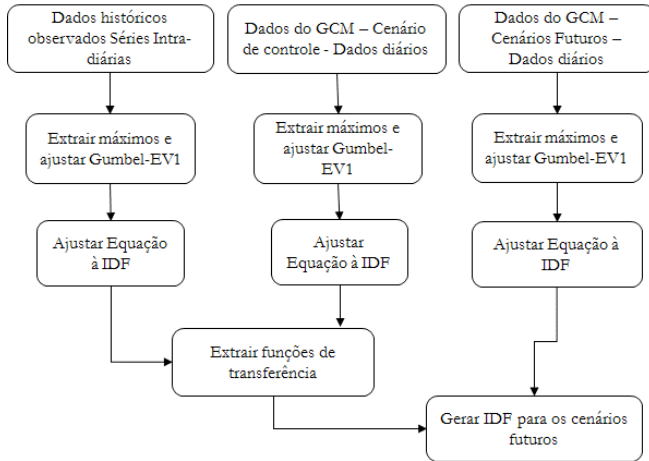


Figura 1 - Fluxograma da Metodologia de Atualização

Os dados dos modelos GCM são convertidos em escala local utilizando a interpolação de quatro pontos da grade do modelo mais próximos à estação com os dados observados. Neste estudo, foi utilizado o método do inverso da distância, conforme equação (1). Esta transformação é realizada tanto para as rodadas de controle quando para todas as rodadas dos três cenários futuros do modelo GCM.

$$P_{gcm}^k = \sum_{i=1}^4 w_i P_{gcm,i} \quad (1)$$

$$w_i = \frac{d_i^2}{\sum_{i=1}^4 d_i^2}$$

Em que é a precipitação diária extraída do modelo no ponto da estação de interesse, a precipitação no ponto de grade i do modelo GCM, a distância do ponto de grade i do GCM à estação e é o peso atribuído a cada ponto do GCM para cálculo da média ponderada da precipitação.

A partir dos dados de observações históricas, e dos dados diários de precipitação média obtida do modelo GCM, são extraídos os máximos anuais (equação 2).

$$PMO_{i,j} = \max\{PO_{i,m}\} \quad (2)$$

Em que é a precipitação máxima anual para cada um dos intervalos de tempo intra-diários i (10min, 20min, 30min, 1h, 2h, 3h, 6h, 12h, 18h, 24h) e ano j . e m os dias da série histórica.

De forma similar, os máximos anuais diários para cada uma das séries do modelo GCM são determinados, conforme equação (3).

$$PMG_{k,j} = \max\{P_{gcm,k,n}^k\} \quad (3)$$

Em que é a precipitação máxima diária anual para cada uma das rodadas e cenários (k) do modelo GCM, j o ano e n o número dias em cada uma das séries. A distribuição de Gumbel – EV1 utilizada para o ajuste das séries históricas de precipitações máximas anuais, cuja função de probabilidade acumulada é apresentada na equação 4:

$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\beta}\right)\right] \quad (4)$$

onde é a probabilidade acumulada, e os parâmetros da distribuição. Utilizando o método dos momentos para estimar os parâmetros da distribuição, conforme Hosking e Wallis (1997), a precipitação pode ser calculada pela equação (5):

$$P_t = \mu + \beta \cdot y_T \quad (5)$$

onde é a precipitação estimada (IDF), e a variável reduzida dada pela equação (6), a média dos valores de x é dada pela equação (7) e o desvio padrão pela equação (8).

$$y_T = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (6)$$

$$\varepsilon = \mu + \gamma \cdot \beta \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{\beta \cdot \pi}{\sqrt{6}} \quad (8)$$

em que T é o período de retorno em anos, é a constante de Euler-Mascheroni (aproximadamente 0,5772) e a constante PI (aproximadamente 3,14159).

Após o cálculo da curva IDF pela equação (5) a equação (9) é ajustada aos valores de precipitação obtidos pela distribuição de probabilidades. Esta equação é comparada com a determinada por Júnior e Magni (1999) - equação (10), embora qualquer outro formato possa ser utilizado.

$$I(t,T) = \frac{k \cdot T^m}{(t+n)^p} \quad (9)$$

$$I(t,T) = A \cdot (t+B)^C + D \cdot (t+E)^F \cdot \left[G + H \cdot \ln \ln \frac{T}{T-1}\right] \quad (10)$$

Onde t é a duração do evento de precipitação, T o período de retorno em anos, $I(t,T)$ é a intensidade de precipitação em mm/min e A, B, C, D, E, F, G, H e k, m, n e p , são coeficientes de ajuste da equação. Para o ajuste dos dados diários do GCM foi utilizada a equação (11)

$$I(t,T) = r \cdot \ln(T) + q \quad (11)$$

Em que r e q são constantes ajustadas e T o período de retorno em anos. Após o ajuste da equação, são calculados os valores para os períodos de duração da chuva (vários intervalos para o período histórico e diário para os GCMs). Após o ajuste das equações, são determinadas as relações de correlação das rodadas de controle do modelo GCM em relação à equação ajustada na curva IDF (equação 9) determinadas pelos dados observados, resultando em uma relação entre ambas. Esta relação, equação (12), é descrita pela função de transferência, que relaciona a IDF obtida do período de controle do GCM com cada uma das durações da equação ajustada à IDF obtidas dos dados históricos observados (1h, 2h, 3h, 6h, 12h, 18h e 24h). Esta é a etapa de correção de viés do GCM, equivalente ao mapeamento de quantis descrito por Li et al. (2010).

$$P_{H,i,j} = f_{1i}(P_{GF}^d j) \quad (12)$$

Em que é o valor obtido pelo ajuste da equação (11) à IDF obtida dos dados extraídos dos cenários futuros do GCM, j cada uma das rodadas para os cenários futuros (RCP2.6, RCP4.5 ou RCP8.5), é a precipitação corrigida e/ou ajustada às condições futuras para cada intervalo intra-diário i , e cada um dos cenários futuros j . As relações entre as equações da IDF para as rodadas de controle do GCM (equação 11), e as equações das IDFs ajustadas aos dados históricos (equação 9) são exponenciais, e desta forma podem ser escritas conforme equações (13).

$$P_{H,i,j} = a_i \cdot e^{b_i \cdot P_{GF}^d j} \quad (13)$$

Em que a_i e b_i são os coeficientes de ajuste, e i índice do tempo de duração dos intervalos sub-diários disponíveis (exemplo: 5, 10, 15, 20, 30 minutos, 1, 2, 3h, 6, 12, 18 e 24 horas). Determinados os parâmetros a_i e b_i , a equação ajustada à IDF gerada a partir dos máximos diários anuais para os cenários futuros, é então atualizada segundo equação (12). Este ajuste corresponde à correção de viés (ou descolamento do modelo GCM em relação aos dados observados).

A metodologia apresentada é simples, porém eficaz principalmente em termos computacionais, e de fácil aplicação. Como estudo de caso, uma estação localizada na cidade de São Paulo - SP foi selecionada.

ESTUDO DE CASO

A metodologia foi aplicada à uma estação pluviométrica/pluviográfica na cidade de São Paulo, com código E3-035 possui coordenadas latitude 23°39'S e longitude 46°38'W e altitude de 799,0 m acima do nível do mar. A estação está localizada no Parque do Estado, conforme mapa da Figura 2. A estação é operada pelo IAG USP (Instituto de Astronomia e Geografia da Universidade de São Paulo). A instituição fornece dados de forma gratuita sob demanda, e são disponibilizados dados horários no período de 1933 a 2013. Dados com intervalos de tempo menores de 1 hora estão disponíveis de observações de pluviógrafo pelo SIGRH (Sistema Integrado de Gerenciamento

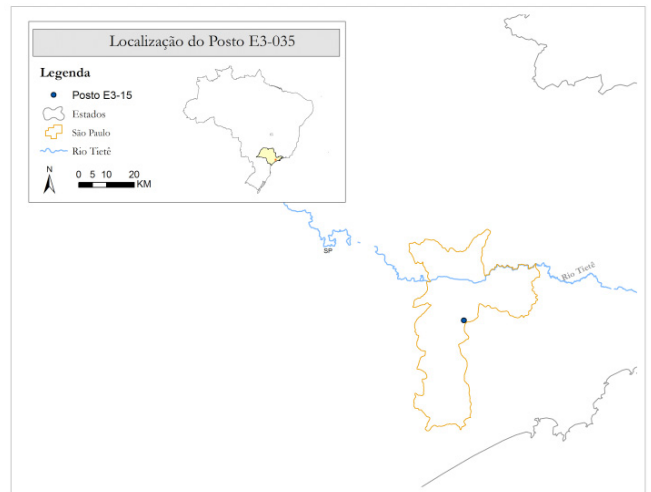


Figura 2 - Mapa com a localização do estação E3-035 IAG USP na cidade de São Paulo

de Recursos Hídricos de São Paulo) de 1931 a 1998. Desta forma, as duas séries foram combinadas e os eventos de chuva máxima anual para os períodos de 10, 20, 30 minutos e 1, 2, 3, 6, 12, 18 e 24 horas nos intervalos de 1933 e 1998 foram utilizados para aplicação da metodologia. As curvas IDF determinada por Junior & Magni (1999) para a mesma estação são utilizadas como comparação.

O modelo GCM utilizado para o estudo foi o CanESM2 (*The Second Generation Earth System Model*) do CCCma (*Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis*). Este modelo foi selecionado por possuir bom desempenho para a Bacia do Prata, conforme análise realizada por Silveira et al. (2013), embora qualquer modelo possa ser utilizado para aplicação da metodologia aqui proposta. Do modelo selecionado, os três cenários futuros analisados foram: RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5 sendo que para cada cenário, cinco rodadas (*ensembles*) estão disponíveis e são utilizadas. O objetivo deste estudo é a aplicação da metodologia proposta e portanto apenas um dos modelos GCM foi avaliado. Os dados deste e de outros modelos estão disponíveis em (<http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5>) no formato NetCDF (UNIDATA, 2003). Os dados foram extraídos dos arquivos NetCDF com auxílio de uma biblioteca específica para tal (escrita em C++), combinada em código desenvolvido em C# (C Sharp).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia foi aplicada à estação pluviométrica/pluviográfica e o modelo GCM apresentado no estudo de caso. Inicialmente, foi realizado um teste de correlação entre os máximos diários anuais do modelo GCM e os máximos anuais extraídos da estação. Na Figura 3 é apresentada a correlação entre máximos diários anuais de uma das rodadas de controle do modelo GCM com os máximos anuais dos dados observados na estação pluviométrica E3-035, utilizando duração de 6 e 24 horas. A boa correlação apresentada no gráfico é notada para todos os outros intervalos de tempo da série histórica observada e

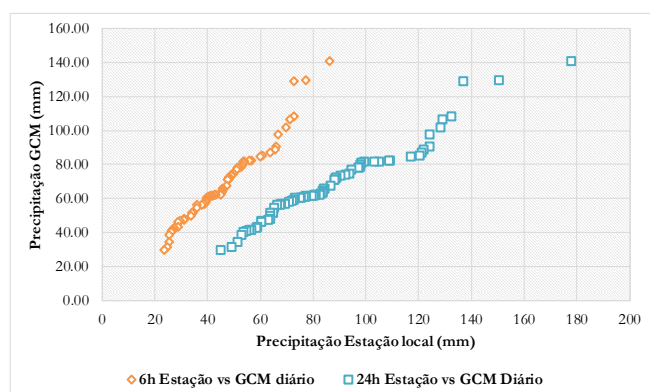


Figura 3 - Correlação entre máximos diários anuais do modelo GCM com os máximos anuais dos dados observados na estação pluviométrica, utilizando duração de 6 e 24 horas

todas as rodadas do modelo GCM. Essa verificação é importante pelo fato da metodologia proposta estar relacionando, mesmo que indiretamente, as séries diárias do modelo GCM com cada uma das séries intra-diárias dos dados históricos observados na estação pluviométrica.

Na Tabela 1 é apresentada a IDF calculada com a equação determinada por Junior e Magni (1999) e na Tabela 2 a IDF com a equação aqui ajustada. A série histórica de dados horários foi utilizada para gerar a precipitação máxima de chuva para cada duração (10, 20, 30 minutos e 1, 2, 3, 6, 12, 18 e 24 horas). Entretanto, como enfatizado na metodologia, o procedimento pode ser aplicado à qualquer intervalo de tempo disponível. A Figura 4 apresenta um gráfico com a comparação das curvas obtidas para T: 100 anos pelas duas equações. Os valores dos parâmetros determinados para equação (9) foram: $k = 22,82$, $m = 0,166$, $n = 0,835$ e $p = 12,4$.

Tabela 1 - IDF obtida através da equação determinada por Junior e Magni (1999) com dados de 1933 a 1998

Duração t (minutos)	Período de Retorno - T (Anos)					
	2	5	10	25	50	100
10	16,2	21,1	24,4	28,5	31,6	34,6
20	24,9	32,5	37,6	44,0	48,7	53,4
30	30,3	39,8	46,0	53,9	59,8	65,6
60	39,3	51,8	60,1	70,5	78,3	86,0
120	46,8	62,1	72,3	85,1	94,6	104,0
180	50,5	67,3	78,4	92,5	102,9	113,2
360	55,7	74,9	87,6	103,6	115,5	127,2
720	60,2	81,5	95,6	113,5	126,8	139,9
1080	62,5	85,2	100,1	119,1	133,1	147,0
1440	64,1	87,7	103,3	123,0	137,6	152,1

As rodadas de controle do GCM para o CMIP5 possuem séries disponíveis de 1850 a 2005, e os cenários futuros de 2006-2100. Para a correlação com a IDF ajustada aos dados observados, foram extraídas do GCM apenas as séries correspondentes à janela disponível no posto E3-035, isto é, de 1933 a 1998.

Especificamente, para o modelo CanEMS2 estão disponíveis cinco rodadas, tanto para o período de controle como para cada um dos três cenários futuros, num total de 20 rodadas. Às

Tabela 2 - IDF obtida através da equação ajustada neste estudo no período de dados de 1933 a 1998. Os períodos determinados foram 10, 20, 30 min e 1, 2, 3, 6, 12, 18 e 24 h

Duração t (minutos)	Período de Retorno - T (Anos)					
	2	5	10	25	50	100
10	19,1	22,2	24,9	29,0	32,5	36,5
20	28,0	32,6	36,6	42,6	47,8	53,7
30	33,6	39,1	43,9	51,1	57,3	64,3
60	43,0	50,0	56,1	65,3	73,3	82,2
120	51,9	60,4	67,8	78,9	88,5	99,3
180	57,0	66,3	74,4	86,6	97,2	109,1
360	65,6	76,4	85,7	99,8	112,0	125,6
720	74,6	86,9	97,5	113,5	127,3	142,8
1080	80,1	93,3	104,7	121,9	136,7	153,4
1440	84,2	98,1	110,0	128,1	143,7	161,3

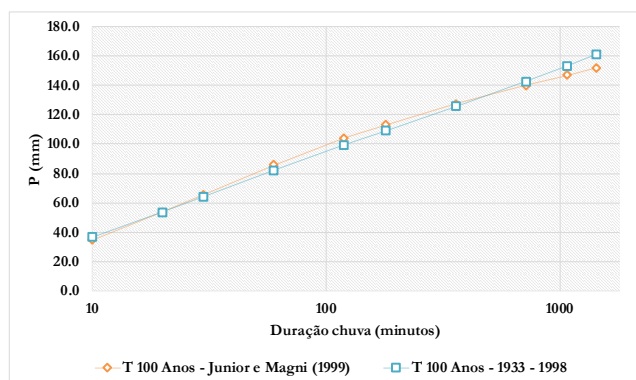


Figura 4 - Comparação da curva de precipitação de período de retorno de 100 anos para equações ajustadas por Junior e Magni (1999) e a equação ajustada neste estudo

cinco rodadas de cada cenário foram ajustadas à distribuição de probabilidade Gumbel, utilizando o método dos momentos e a IDF determinada. Uma IDF média de todas as rodadas foi calculada, possibilitando o ajuste da equação (11). A título de exemplo, o gráfico da Figura 5 apresenta a comparação das IDFs obtidas de cada rodada para o período de controle, e a curva ajustada à IDF média deste cenário. O mesmo procedimento foi realizado para os cenários futuros RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5,

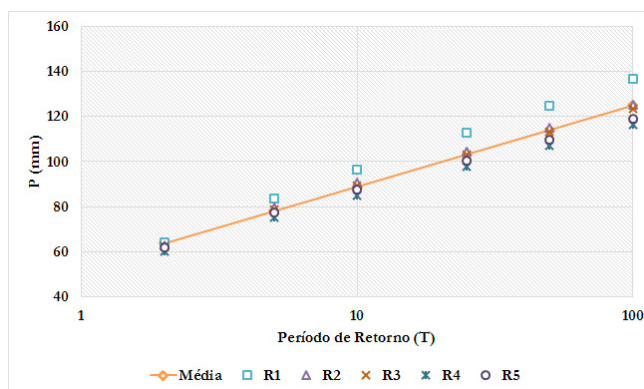


Figura 5 - Comparação das curvas de Precipitação para duração diárias das cinco rodadas do período de controle do GCM com a curva da equação da IDF média ajustada

possibilitando desta forma, reduzir o número de coeficientes necessários para estabelecer as relações entre o período histórico, de controle e os cenários futuros. Os coeficientes r e q da equação (11) ajustada são apresentados na Tabela 3 para cada um dos cenários indicados.

Tabela 3 - Coeficientes da equação ajustada à IDF dos cenários de controle e cenários futuros RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5 do GCM

Cenário	r	q
Controle	15,674	52,795
RCP 2.6	19,463	55,606
RCP 4.5	19,326	55,377
RCP 8.5	19,267	56,571

A comparação da precipitação resultante das curvas ajustadas é apresentada no gráfico da Figura 6. É importante notar que as curvas extraídas do modelo GCM não estão corrigidas, e por este motivo estão defasadas em relação à curva da IDF ajustada aos dados históricos. É interessante observar também que todos os cenários futuros geraram curvas com valores bastante similares umas às outras.

Os coeficientes a_i e b_i que contabilizam a correção das curvas geradas pelo do modelo GCM às geradas com os dados históricos observados, são apresentados na Tabela 4, para cada um dos intervalos de tempo (10, 20, 30 min, 1, 2, 3, 6, 12, 18 e 24h).

As equações de correções da Tabela 4, aplicadas às equações ajustadas aos cenários futuros do GCM resultam nas IDF apresentadas nas Tabelas 5, 6 e 7 para os cenários RCP 2.6,

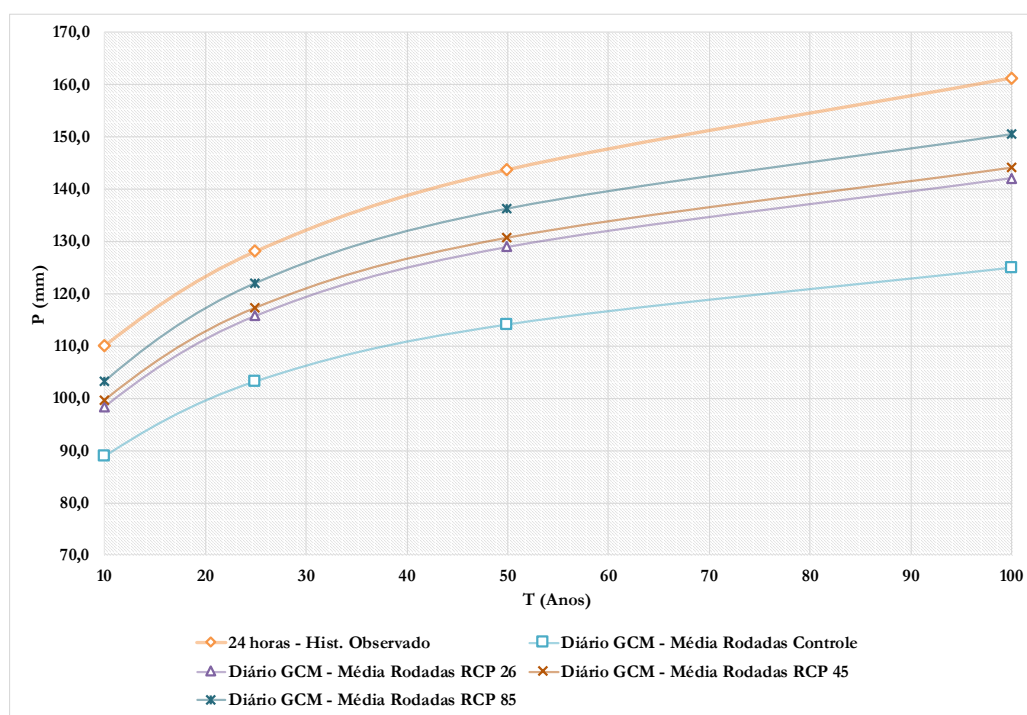


Figura 6 - Comparação das curvas de Precipitação para duração de 24 horas (dados históricos observados) e duração diária das médias das rodadas para cada cenário futuro do modelo GCM sem ajuste (correção de viés)

Tabela 4 - Coeficientes da Relação entre o cenário de controle e a IDF determinada com base nos dados históricos observados para cada intervalo de tempo

Duração t (minutos)	a_i	b_i
10	9,719	0,0106
20	14,280	0,0106
30	17,110	0,0106
60	21,888	0,0106
120	26,440	0,0106
180	29,026	0,0106
360	33,440	0,0106
720	38,014	0,0106
1080	40,833	0,0106
1440	42,917	0,0106

Tabela 5 - Equação IDF média obtida para as rodadas do cenário futuro RCP 2.6. Os períodos determinados foram 10, 20, 30 min e 1, 2, 3, 6, 12, 18 e 24 h

Duração t (minutos)	Período de Retorno T					
	2	5	10	25	50	100
10	19,9	24,0	27,6	33,2	38,1	43,8
20	29,3	35,2	40,5	48,7	56,0	64,4
30	35,1	42,2	48,5	58,4	67,1	77,2
60	44,8	53,9	61,9	74,4	85,5	98,3
120	54,1	65,1	74,8	89,9	103,3	118,7
180	59,4	71,4	82,1	98,7	113,4	130,3
360	68,5	82,3	94,6	113,7	130,7	150,2
720	77,8	93,6	107,5	129,2	148,5	170,7
1080	83,6	100,5	115,5	138,8	159,6	183,4
1440	87,9	105,6	121,4	145,9	167,7	192,7

RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente. As alterações calculadas em relação à IDF histórica são o acréscimo na faixa de 4,47% (para o cenário RCP 2.6) com tempo de retorno T de 2 anos, à 30,94% para o período de retorno de 100 anos (no cenário RCP 8.5).

Estes resultados são similares com os encontrados por Schardong e Simonovic (2013), no qual os autores utilizaram os modelos do CIMP3 com metodologia distinta da utilizada neste estudo, aplicada à mesma estação pluviométrica, porém com série de dados ligeiramente diferentes devido à diferente extensão de dados disponíveis nos modelos GCM do CIMP3.

Tabela 6 - Equação IDF média obtida para as rodadas do cenário futuro RCP 4.5. Os períodos determinados foram 10, 20, 30 min e 1, 2, 3, 6, 12, 18 e 24 h

Duração t (minutos)	Período de Retorno T (em anos)					
	2	5	10	25	50	100
10	20,1	24,3	28,0	33,7	38,8	44,8
20	29,5	35,6	41,1	49,5	57,1	65,8
30	35,4	42,7	49,2	59,4	68,4	78,8
60	45,2	54,5	62,8	75,7	87,2	100,4
120	54,6	65,8	75,8	91,4	105,3	121,3
180	59,9	72,3	83,2	100,3	115,6	133,1
360	69,1	83,2	95,9	115,6	133,2	153,4
720	78,5	94,6	109,0	131,4	151,4	174,4
1080	84,3	101,7	117,1	141,2	162,6	187,3
1440	88,6	106,8	123,1	148,4	170,9	196,8

Tabela 7 - Equação IDF média obtida para as rodadas do cenário futuro RCP 8.5. Os períodos determinados foram 10, 20, 30 min e 1, 2, 3, 6, 12, 18 e 24 h

Duração t (minutos)	Período de Retorno T (em anos)					
	2	5	10	25	50	100
10	20,5	25,0	29,0	35,4	41,2	47,9
20	30,1	36,7	42,7	52,1	60,6	70,4
30	36,0	44,0	51,1	62,4	72,6	84,4
60	46,0	56,1	65,2	79,5	92,4	107,4
120	55,5	67,8	78,8	96,1	111,7	129,8
180	61,0	74,4	86,5	105,5	122,6	142,5
360	70,3	85,7	99,6	121,5	141,2	164,1
720	79,9	97,4	113,2	138,1	160,5	186,6
1080	85,8	104,6	121,6	148,4	172,4	200,4
1440	90,2	110,0	127,8	155,9	181,2	210,6

Nas Figuras 7 e 8 é apresentada a comparação da equação IDF ajustada aos dados históricos observados e as equações determinadas para os cenários futuros RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5. As curvas apresentadas são para o período de retorno de 50 e 100 anos, respectivamente, e diferentes durações (10, 20, 30 min e 1, 2, 3, 6, 12, 18 e 24h). Na Figura 9 é apresentada a IDF com duração de 24 horas e diferentes períodos de retorno T, ajustada ao período histórico observado (1933 a 1998) e os cenários futuros RCP 2.6, 4.5 e 8.5.

Estes resultados confirmam a tendência do cenário RCP 8.5 ter impacto maior, conforme esperado. Já os cenários RCP

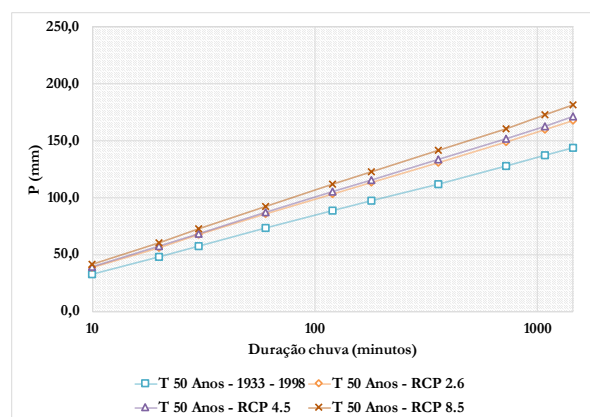


Figura 7 - Precipitação gerada pela IDF determinada, para T: 50 anos e diferentes durações. As curvas apresentadas foram determinadas tomando como base o período observado 1933-1998 ajustadas para os cenários futuros do modelo GCM, RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5

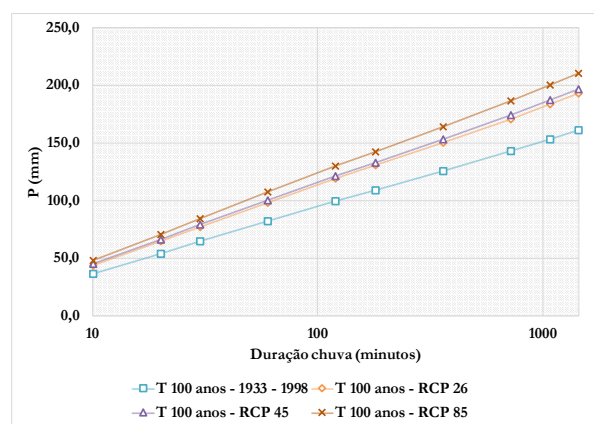


Figura 8 - Precipitação gerada pela IDF determinada, para T: 100 anos e diferentes durações. As curvas apresentadas foram determinadas tomando como base o período observado 1933-1998 ajustadas para os cenários futuros do modelo GCM, RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5

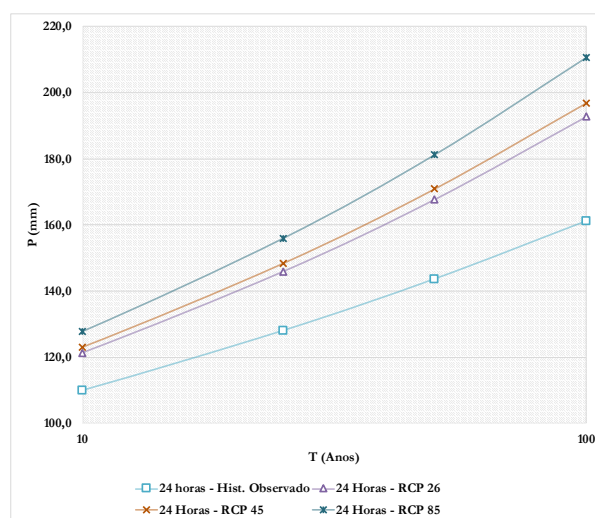


Figura 9 - IDF de 24 horas para diferentes períodos de Retorno (T). As curvas apresentadas foram determinadas tomando como base o período histórico observado (1933-1998) e os cenários futuros do modelo GCM, RCP 2.6, RCP 4.5 e RCP 8.5

2.6 e RCP 4.5 possuem comportamento similar, com resultados bastante próximos entre ambos. Evidentemente existe a incerteza associada à previsão de ID.

CONCLUSÃO

Neste artigo, é apresentada uma metodologia para estimativa de impacto das possíveis mudanças climáticas em curvas IDF, que geralmente são utilizadas para determinar tormentas de projeto. A metodologia consiste em corrigir as curvas IDF com base nas simulações dos modelos de circulação global (GCM) para cenários futuros, tomando como base dados históricos observados e aplicando a correção através de equações, que buscam estimar o erro sistemático naturalmente embutido nestes modelos GCM.

Foram analisados três cenários futuros de um modelo GCM, RCP 2.6, 4.5 e 8.5 e cinco rodadas de cada um dos cenários futuros. Do cenário de controle mais cinco rodadas foram utilizadas para a correlação e ajuste do modelo GCM em relação aos dados históricos observados.

A metodologia sugerida neste artigo foi aplicada a um estudo de caso utilizando dados de uma estação pluviométrica/pluviográfica localizada na cidade de São Paulo. Os resultados indicam que existe expectativa de aumento dos eventos extremos, considerando as simulações do modelo GCM entre aproximadamente 4,5% (para períodos de retorno menores) e RCP 2.6, e mais de 30% para períodos de retorno maiores (100 anos) no RCP 8.5. As incertezas acerca da assertividade das previsões são grandes e, em caso de tomada de decisão, são necessárias extensivas análises de todo o conjunto de modelos e rodadas disponíveis, a fim de explorar de forma exaustiva os limites inferiores e superiores destas possíveis alterações. Se a tendência se confirmar de fato, é evidente que muitas das estruturas projetadas utilizando a IDF baseada apenas em dados históricos, poderá falhar mais frequentemente em sua vida útil do que o projeto inicialmente.

A metodologia apresentada se mostra eficaz e de fácil aplicação com baixo uso de recursos computacionais. Embora a tendência seja a utilização, no futuro, de modelos mais detalhados, os chamados modelos regionais com melhor resolução espacial e temporal, os recursos computacionais que estes requerem tornam a sua utilização proibitiva. Ainda assim, é possível aplicar a mesma metodologia de ajuste a modelos regionais ou com melhor resolução espacial e temporal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq (Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento) ao primeiro autor concedido sob forma de bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- ALLAN, R. P.; SODEN, B. J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, v. 321, n. 5895, p. 1481-1484, Sept. 2008.
- EUM, H.-I.; SIMONOVIC, S. P. Assessment on variability of extreme climate events for the Upper Thames River basin in Canada. *Hydrological Processes*, v. 26, n. 4, p. 485-499, 2012.
- IPCC. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor e H.L. Miller (Ed.)].
- IPCC. *Summary for Policymakers*. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. .
- JUNIOR, F. M.; MAGNI, N. L. G. *Equações de Chuvas Intensas do Estado de São Paulo*. Governo do Estado de São Paulo - Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras - Departamento de Águas e Energia Elétrica -Centro Tecnológico de Hidráulica e Recursos Hídricos. São Paulo: [s.n.], (1999).
- HASSANZADECH, E.; NAZEMI, A.; ELSHORBAGY, A. Quantile-Based Downscaling of Precipitation using Genetic Programming: Application to IDF Curves in the City of Saskatoon. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 19, n. 5, p. 943-955, 2013.
- KAO, S.-C.; GANGULY, A. R. Intensity, duration, and frequency of precipitation extremes under 21st-century warming scenarios. *Journal of Geophysical Research*, v. 116, n. D16, (2011).
- KHARIN, V. V.; ZWIERS, F. W.; ZHANG, X.; HEGGERL, G. Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations. *Journal of Climate*, v. 20, n. 8, p. 1519-1444, 2007.
- LI, H.; SHEFFIELD, J.; WOOD, E. F. Bias correction of monthly precipitation and temperature fields from Intergovernmental Panel on Climate Change AR4 models using equidistant quantile matching. *Journal of Geophysical Research*, v. 115, n. D10, 2010.
- MAILHOT, A.; DUCHESNE, S.; CAYA, D.; TALBOT, G. Assessment of future change in intensity-duration-frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology*, v. 347, N. 1-2, p. 197-210, Dec. 2007.

- MARENGO, J. A.; CHOU, S. C.; KAY, G.; ALVES, L. M.; PESQUERO, J. F.; SOARES, W. R.; TAVARES, P. Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTEC/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins. *Climate Dynamics*, v. 38, n. 9-10, p. 1829–1848, May 2011.
- MILLY, P. C. D.; BETANCOURT, J.; FALKENMARK, M.; HIRSCH, R. M.; KUNDZEWICZ, Z. W.; DENNIS, P.; LETTENMAIER, D. P.; STOUFFER, R. J. Stationarity Is Dead: Whither Water Management? *Science*, v. 319, n. 5863, p. 573–574, 2008.
- MIRHOSSEINI, G.; SRIVASTAVA, P.; STEFANOVA, L. The impact of climate change on rainfall Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves in Alabama. *Regional Environmental Change*, v. 13, n. S1, p. 25–33, Aug. 2012..
- NAKICENOVIC, N.; SWART, R. (Ed.). *IPCC Special Report on Emission Scenarios*. Cambridge: Cambridge University Press, UK, 2000.
- NGUYEN, V.-T.-V.; NGUYEN, T.-D.; CUNG, A. (2007). A statistical approach to downscaling of sub-daily extreme rainfall processes for climate-related impact studies in urban areas. *Water Science & Technology: Water Supply*, v. 7, n. 2, p. 183, 2007.
- PECK, A.; PRODANOVIC, P.; SIMONOVIC, S. P. P. Rainfall Intensity Duration Frequency Curves Under Climate Change: City of London, Ontario, Canada. *Canadian Water Resources Journal*, v. 37, n. 3, p. 177–189, 2012.
- PIANI, C.; WEEDON, G. P.; BEST, M.; GOMES, S. M.; VITERBO, P.; HAGEMANN, S.; HAERTER, J. O. Statistical bias correction of global simulated daily precipitation and temperature for the application of hydrological models. *Journal of Hydrology*, v. 395, n. 3-4, p. 199–215, 2010.
- PRODANOVIC, P.; SIMONOVIC, S. P. *Development of rainfall intensity duration frequency curves for the City of London under the changing climate*. London, Ontario, Canada: Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario, 2007. Water Resources Research Report no. 058, Facility for Intelligent Decision Support.
- SALATHÉ JR., E. P.; MOTE, P. W.; WILEY, M. W. Considerations for selecting downscaling methods for integrated assessments of climate change impacts. *International Journal of Climatology*, v. 27, p. 1611–1621, 2007.
- SHARIF, M.; BURN, D. H.; WEY, K. M. Daily and Hourly Weather Data Generation using a K-Nearest Neighbour Approach. In: CANADIAN HYDROTECHNICAL CONFERENCE, 18., 2007, Manitoba. Proceedings... Manitoba: [s.n.], 2007. p. 1-10.
- SILVEIRA, C. S.; SOUZA FILHO, F. A.; LÁZARO, Y. M. C. Avaliação de Desempenho dos Modelos de Mudança Climática do IPCC-AR4 Quanto a Sazonalidade e os Padrões de Variabilidade Interanual da Precipitação Sobre o Nordeste do Brasil, Bacia do Prata e Amazônia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 1, p. 177–194, 2013.
- SIMONOVIC, S. P.; PECK, A. *Updated rainfall intensity duration frequency curves for the City of London under the changing climate*. London, Ontario, Canada: Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario, 2009. Water Resources Research Report no. 065, Facility for Intelligent Decision Support, 2009.
- SOLAIMAN, T. A.; KING, L. M.; SIMONOVIC, S. P. Extreme precipitation vulnerability in the Upper Thames River basin: uncertainty in climate model projections. *International Journal of Climatology*, v. 31, n. 15, p. 2350–2364, 2011.
- SOLAIMAN, T. A.; SIMONOVIC, S. P. *Development of Probability Based Intensity-Duration Frequency Curves under Climate Change*. London, Ontario, Canada: Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario, 2011. Water Resources Research Report no. 072, Facility for Intelligent Decision Support.
- SUGAHARA, S.; ROCHA, R. P.; SILVEIRA, R. Non-stationary frequency analysis of extreme daily rainfall in São Paulo, Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 29, n. 9, p. 1339–1349, 2009.
- TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 93, n. 4, p. 485–498, Apr. 2012..
- UNIDATA, (2013). *netCDF Documentation* Disponível em:- <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/>. Acesso em: 30 set. 2013.
- VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; ROSE, S. K. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, v. 109, n. 1-2, p. 5–31, 2011.
- WILBY, R. L.; DAWSON, C. W. (*SDSM 4.2* – A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. Version 4.2 User Manual. [s.l.: s.n.], 2007.
- WILCOX, E. M.; DONNER, L. J. The frequency of extreme rain events in satellite rain-rate estimates and an atmospheric general circulation model. *Journal of Climate*, v. 20, n. 1, p. 53–69, 2007.
- WCRP. Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5. CLIVAR Exchanges Newsletter, v. 15, n. 2, 2011. Special Issue of the CLIVAR Exchanges Newsletter, No. 56.

WCRP Coupled Model Intercomparison Project – Phase
5 (2011): Special Issue of the CLIVAR Exchanges
Newsletter, No. 56, Vol. 15, No. 2

Update of the intensity-duration-frequency equation for the city of são paulo under the effect of climate changes

ABSTRACT

There is great concern among the scientific community to understand adequately and comprehensively the effects of climate change on extreme hydrological events such as precipitation, whose frequency and intensity admittedly have changed significantly in recent decades. Although the real reason for climate change is somehow controversial, there is increasing consensus that this is one of the main factors causing disturbances in precipitation. This paper presents a simplified methodology to update the intensity duration frequency curves (IDF) considering the impact of climate change. IDF curves are frequently used to design urban drainage, road drainage and flood control structures. It is an expedient method to obtain design isographs and does not require specific knowledge. The assumption is that the IDF used properly represents hydrological conditions during the life of the designed structure. The methodology consists of creating a correlation through spatial disaggregation and the use of transfer function from the historical data observed to the historical scenarios of the global circulation models (GCM). The correlation or bias correction established between the historical period of observed data and the historical scenario of the GCM is applied to the IDF equation adjusted for future scenarios, generating the updated IDF curves under the influence of projected change in climate. The methodology is applied to a station located in the city of São Paulo, Brazil, whose equation is officially used by the city in their designs. The results are compared to an existing equation and an equation fitted to the latest available data. The GCM model used in the analysis was the CanESM2 from the Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis. The results show an increasing trend of extreme precipitation compared to the IDF adjusted to the most recent data available. The increase is in a range of 4.5 % for a lower emissions scenario to about 31 % for a scenario with higher emissions and longer return periods.

Keywords: IDF curves. Global circulation models. Drainage. Mathematical modeling