

XIV SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

COMPARAÇÃO ENTRE OS ESCOAMENTO SUPERFICIAIS PRODUZIDOS POR TORMENTAS REGISTRADAS E PADRONIZADAS EM GRAVES ALAGAMENTOS NOTICIADOS NO MUNICÍPIO DE TERESINA, PI.

Breno Diego Lopes dos Santos¹; Roberto José Amorim Rufino Fernandes²;

Josélia de Carvalho Leão,³

RESUMO – Este trabalho apresenta uma análise sobre a influência da distribuição temporal da chuva na formação do escoamento superficial, tendo como principal objetivo comparar as vazões de picos e os volumes escoados para cada distribuição. Para isso, foi realizado o estudo de casos de graves alagamentos noticiados, simulando os hidrogramas para chuvas de projeto padronizadas pelos métodos de Huff e Blocos Alternados. Os hidrogramas obtidos foram comparados com os resultantes da aplicação de hietogramas registrados (históricos), assumindo que esses fornecem os resultados mais precisos. Foram analisados seis casos, para os quais foram calculados os tempos de recorrência das precipitações registradas através de equações IDF's, identificando, em cada caso, o subevento mais crítico. Apresentam-se os resultados obtidos para os critérios adotados em caráter comparativo, sendo possível observar a forte relação de dependência entre a distribuição das chuvas e o formato do hidrograma, demonstrando que chuvas de igual tempo de retorno provocam diferentes escoamentos em função da mudança de hietograma, embora os volumes escoados permaneçam praticamente os mesmos, independentemente do modelo de distribuição.

ABSTRACT– This work presents an analysis on the influence of the temporal distribution of the rain in the formation of the superficial flow, having as main objective to compare the peak flows and the volumes drained for each distribution. For this, the study of cases of severe flooding reported, simulating hydrographs for design rainfall standardized by the Huff and Alternating Blocks methods. The hydrographs obtained were compared with those obtained from the application of recorded (historical) hietographs, assuming that they provide the most accurate results. Six cases were analyzed in computational software, for which the precipitation recurrence times recorded by IDF equations were calculated, identifying in each case the most critical sub-event. We present the results obtained for the criteria adopted in a comparative study, and it is possible to observe the strong relationship of dependence between the rainfall distribution and the hydrograph format, demonstrating that rainfall of the same time of return causes different flows as a function of the change in hietographs, although the drained volumes remain practically the same, regardless of the distribution model.

Palavras-Chave – Distribuição temporal da chuva; Escoamento superficial direto; Método de Huff.

¹ Centro de Tecnologia e Urbanismo da Universidade Estadual do Piauí; Rua espírito Santo, 996, Acarape, Teresina/PI, CEP 64003-750. Tel (086) 3213-2424. Email: joselialeao@gmail.com; rjarf.pi@gmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Nos estudos hidrológicos que subsidiam os projetos de obras de engenharia, concebidas a fim de reduzir os efeitos indesejados provocados pelos escoamentos, são utilizados dados das características hidráulicas e geomorfológicas, bem como as precipitações de projeto.

Os dados das precipitações de projeto são normalmente obtidos a partir de equações IDF's e distribuídos temporalmente através de modelos padronizados para a definição do hietograma de projeto.

Neste contexto de diferentes formas de concepção de uma chuva de projeto, a escolha do padrão de distribuição temporal é um fator de fundamental importância para a definição das vazões de projeto, que, dependendo da metodologia adotada, podem resultar em valores bastante distintos. Segundo Canholi (2014) a adequada definição do hidrograma nos pontos de interesse da bacia é parte fundamental para o sucesso das medidas adotadas.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho propõe analisar e comparar os hidrogramas obtidos através de processo de transformação chuva-vazão, responsáveis por falhas importantes em sistemas de drenagem.

Assim, a sua metodologia estrutura-se em seis etapas, com a sequência descrita abaixo:

- i. Identificar, por meio de matérias jornalísticas, eventos chuvosos que tenham provocados prejuízos significativos em microbacias urbanas;
- ii. Pesquisar em dados registrados por órgão oficiais sobre a ocorrência de tais eventos chuvosos nos dias indicados;
- iii. Caso confirmada a ocorrência do evento chuvoso, identificar a parte considerada mais crítica na precipitação registrada;
- iv. Investigar as características das sub-bacias onde os alagamentos foram registrados;
- v. Simular o comportamento da bacia para as precipitações obtidas nos registros históricos e para aquelas calculadas pelas curvas IDF com distribuição temporal pelos métodos de Huff e blocos alternados;
- vi. Comparação entre os volumes escoados obtidos através das simulações dos hidrogramas.

2.1 LOCALIZAÇÃO DO ESTUDO

A metodologia apresentada será aplicada em microbacias urbanas no município de Teresina/PI. A cidade possui área de aproximadamente 1453 km² com taxa de urbanização igual a 94,27% e densidade demográfica de 461,39 hab/km² (PNUD, Ipea e FJP, 2013). Está localizada no meio-norte do nordeste brasileiro apresentando característica climáticas da região semiárida, com

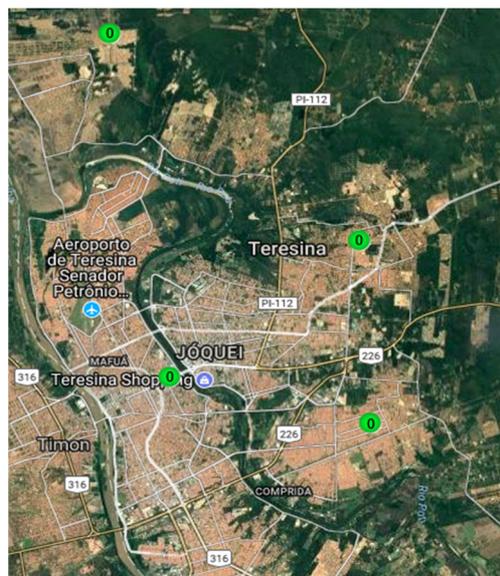
média anual de precipitação acumulada igual a 1332mm, apesar disso, sua distribuição é bastante irregular com cerca de 75,6% da chuva nos primeiros quatro meses do ano e os 24,4% distribuídos ao longo dos oito meses restantes (INMET, 2018).

Quanto ao relevo, a cidade é em sua maior parte plana, caracterizada por uma grande região de planície (SEMPPLAN, 2010).

2.2 SELEÇÃO DOS EVENTOS E CONSULTA À REDE DE PLUVIÓGRAFOS

Os dados das precipitações foram obtidos em consulta a rede de pluviômetros automáticos do CEMADEN, que dispõe para o município de Teresina o total de quatro estações bem distribuídas por toda capital, com registros de dados a partir de maio de 2015 e discretização em intervalos de 10 minutos. Para o uso dos dados dos pluviômetros digitais disponíveis, foi utilizado o critério de proximidade ao local da falha considerada. A Figura 1 mostra a localização dos postos automáticos.

Figura 1. Distribuição dos pluviômetros automáticos do CEMADEN



Fonte: CEMADEN/MCTIC

A individualização das precipitações responsáveis pelas falhas do sistema de drenagem é de fundamental importância. Freitas et al (2014), ao realizar um estudo sobre a influência dos critérios de separação de subeventos dentro de um evento chuvoso, verificou que a intensidade média destes é normalmente maior que a intensidade do evento completo e, essas intensidades aumentam ou diminuem conforme os critérios de separação adotados.

Foram consideradas independentes as chuvas em que existissem entre elas, um mínimo intervalo de tempo de três horas consecutivas com precipitação máxima registrada de 0,5mm. Dessa forma, os eventos selecionados e precipitações correspondentes encontram-se descritos a seguir.

EVENTO 01: ALAGAMENTO E ROMPIMENTO DE PARTE DO CORPO ESTRADAL NA AV. CELSO PINHEIRO - O ponto onde ocorreu o rompimento é o exutório da bacia PE09 (Nomenclatura dada pelo plano diretor), tem área de drenagem igual a 221,2 ha, tempo de concentração de 14,75 min e Curve Number – CN de 87,9 (TERESINA, 2012). Dados da precipitação na estação Ilhotas do CEMADEN.

EVENTO 02: ALAGAMENTO NA RUA DAS ORQUÍDEAS – AUTOMÓVEIS SÃO ARRASTADOS E POPULAÇÃO FICA “ILHADA” PELA ENXURADA - O local do alagamento está localizado na bacia PD14, que tem área de drenagem igual a 425 ha, possui tempo de concentração de 16,89 minutos e Curve Number – CN igual a 87,2. Dados da precipitação na estação Renascença do CEMADEN na data do evento.

EVENTO 03: ALAGAMENTO NA AVENIDA PEDRO ALMEIDA – ZONA LESTE - O local do alagamento está localizado na bacia PD12, tem área de drenagem igual a 538,1 ha, possui tempo de concentração de 14,81 minutos e Curve Number – CN igual a 87,3 (TERESINA, 2012). Dados da precipitação na estação pluviométrica do CEMADEN.

EVENTO 04: ALAGAMENTO EM TRECHO DA BR-343 – ROMPIMENTO DE PARTE DO ACOSTAMENTO - O local do alagamento está localizado na bacia PD11, que tem área de drenagem igual a 8.982,8 ha, sendo a maior sub-bacia urbana de Teresina. Mesmo assim, segundo o PDDrU/THE, possui tempo de concentração de apenas 29,12 minutos e Curve Number – CN igual a 77,4 (TERESINA, 2012). Dados da precipitação registrada na estação Santa Isabel do CEMADEN.

EVENTO 05: ALAGAMENTO NA AV. JOAQUIM NELSON: INVASÃO DAS ÁGUAS A UMA DISTRIBUIDORA DE AÇO E AVENIDA INTERDITADA - A bacia onde ocorreu o evento é a mesma do Evento 04, a PD11. Dados da precipitação registrada na estação Renascença do CEMADEN no dia do evento.

EVENTO 06: ROMPIMENTO DA BR-343 E ALAGAMENTO NO BAIRRO RECANTO DAS PALMEIRAS - Novamente o evento registrado ocorreu na sub-bacia PD11. Dados da precipitação registrada na estação Santa Isabel do CEMADEN.

2.3 DETERMINAÇÃO DA CHUVA CRÍTICA CORRESPONDENTE E DISTRIBUIÇÃO TEMPORAL

A chuva crítica para cada evento foi determinada utilizando as equações IDF's da localidade de modo inverso, isto é, partindo-se dos maiores valores das precipitações registradas para cada duração, pôde-se calcular os tempos de retorno associados a estes e, assim, determinar aquela mais significativa.

Para o cálculo do tempo de retorno foram as equações IDF's desenvolvidas pelo PDDrU (Teresina, 2012) e pela CPRM (Nascimento et al., 2017), respectivamente equações (01) e (02).

$$i = \frac{1194,273T^{0,1738}}{(t + 10)^{0,7457}} \quad (01) \qquad i = \frac{2491,6T^{0,142}}{(t + 20)^{0,8943}} \quad (02)$$

Os dados para cada evento estão sintetizados na Tabela 2.

Tabela 2. Tempo de Retorno dos subeventos mais críticos

Evento	Duração (min)	Altura Precipitada (mm)	Subevento mais Crítico			Tempo de Recorrência (ano)	
			Duração (min)	Altura (mm)	Intensidade (mm/min)	PDDrU	CPRM
01	110	53,2	30	42,8	1,43	2,0	2,5
02	120	88,4	40	72,6	1,82	20,3	42,1
03	70	45,6	30	42,6	1,42	1,9	2,4
04	130	94	120	93,8	0,78	9,6	23,2
05	360	139,2	140	122,2	0,87	33,3	117,2
06	600	163,6	590	163	0,28	17,2	162,5

Percebe-se a partir da observação da Tabela 2 que em eventos mais raros e ainda para aqueles em que a duração mais crítica se aproxima da duração total da chuva, o tempo de retorno calculado pelas duas equações tendem a divergir. Essa diferença pode ser explicada pela base de dados utilizadas para a determinação das duas equações IDF's. A equação definida pela CPRM utilizou dados de um pluviógrafo com 19 anos hidrológicos registrados. Já a equação definida no PDDrU utilizou dados de duas estações pluviométricas com 88 e 95 anos de registro diário, os quais foram desagregados com a ajuda de coeficientes desagregação definidos pela Prefeitura Municipal de Teresina - PMT (Teresina, 2012).

Uma vez determinado o tempo de retorno de cada subevento, foi possível calcular o valor das precipitações para a mesma duração de subevento e distribuí-las temporalmente segundo os métodos dos blocos alternados e de Huff. A Tabela 3 apresenta os valores de referência.

Tabela 3. Distribuição Temporal de 1º Quartil para cada nível de excedência

p/ptotal d/dtotal	1º Quartil - Curva de excedência				
	10%	20%	30%	40%	50%
0%	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
5%	0.508579	0.404523	0.331781	0.273286	0.222933
10%	0.733744	0.629629	0.547218	0.474725	0.407395
15%	0.836201	0.750809	0.677502	0.608973	0.541847
20%	0.887735	0.819422	0.757681	0.697623	0.636643
25%	0.918995	0.864673	0.813790	0.762863	0.709776
30%	0.945848	0.901993	0.858464	0.813162	0.764453
35%	0.962145	0.926844	0.890096	0.850595	0.807006
40%	0.972733	0.944213	0.913277	0.879081	0.840495
45%	0.980725	0.957981	0.932181	0.902805	0.868878
50%	0.986754	0.969041	0.947947	0.923155	0.893813
55%	0.991372	0.978022	0.961159	0.940574	0.915508
60%	0.993334	0.982763	0.969245	0.952589	0.932130
65%	0.995463	0.987393	0.976553	0.962774	0.945453
70%	0.997105	0.991216	0.982818	0.971733	0.957408
75%	0.998720	0.995226	0.989504	0.981268	0.969951
80%	0.999594	0.997953	0.994660	0.989272	0.981165
85%	0.999018	0.996846	0.993621	0.989242	0.983449
90%	0.999325	0.997952	0.995987	0.993376	0.989970
95%	0.999758	0.999189	0.998322	0.997121	0.995509
100%	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000

Fonte: Adaptado de Rocha (2017)

2.4 SIMULAÇÕES DOS HIDROGRAMAS

Para cada evento selecionado foram simulados 4 hidrogramas, sendo um para cada hietograma diferente do evento, a saber: precipitação registrada, blocos alternados (uma para cada equação idf) e método de Huff. Os resultados para cada evento estão relacionados nos gráficos abaixo.

EVENTO 01

Gráfico 1. Hietograma para duração crítica do evento 01

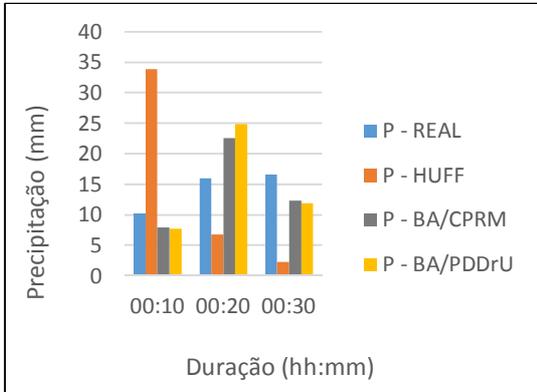
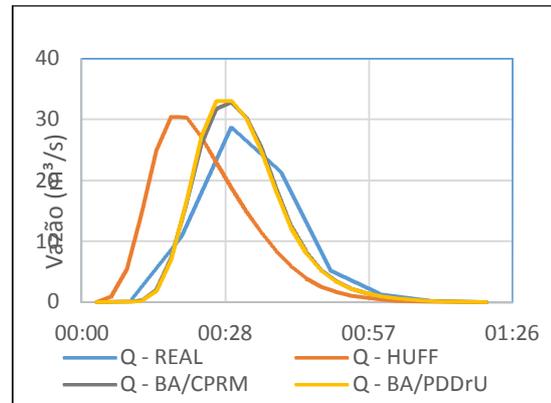


Gráfico 2. Simulação hidrológica para o subevento crítico 01



EVENTO 02

Gráfico 3. Hietograma para a duração crítica do evento 02

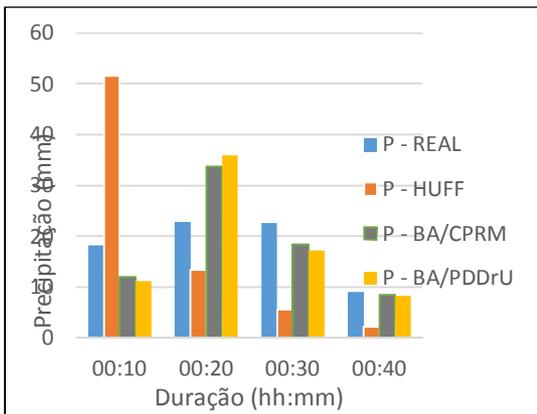
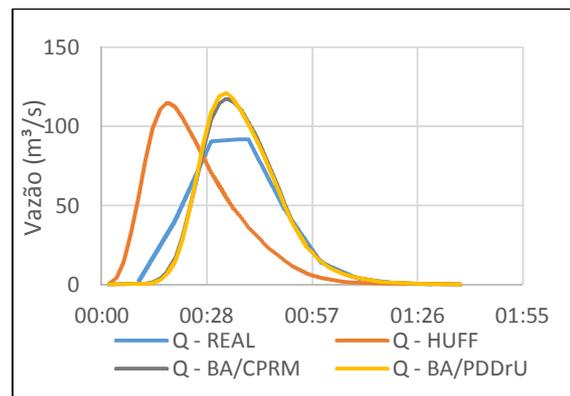


Gráfico 4. Simulação hidrológica para o subevento crítico 02



EVENTO 03

Gráfico 5. Hietograma para a duração crítica do evento 03

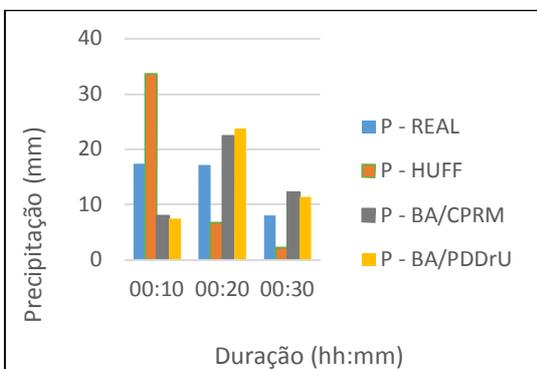
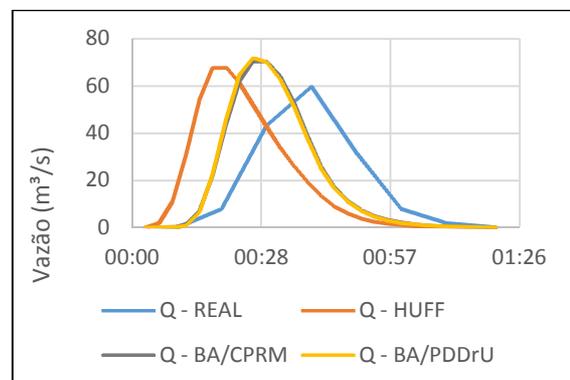


Gráfico 6. Simulação hidrológica para o subevento crítico 03



EVENTO 04

Gráfico 7. Hietograma para a duração crítica do evento 04

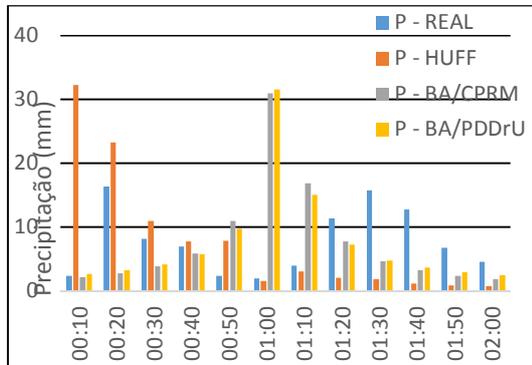
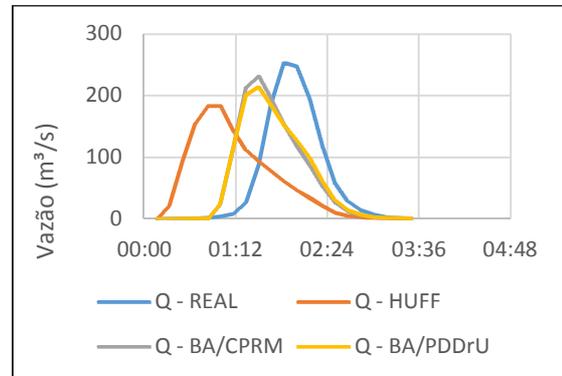


Gráfico 8. Simulação hidrológica para o subevento crítico 04



EVENTO 05

Gráfico 9. Hietograma para a duração crítica do evento 05

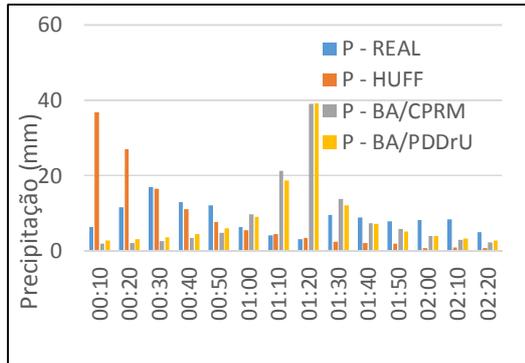
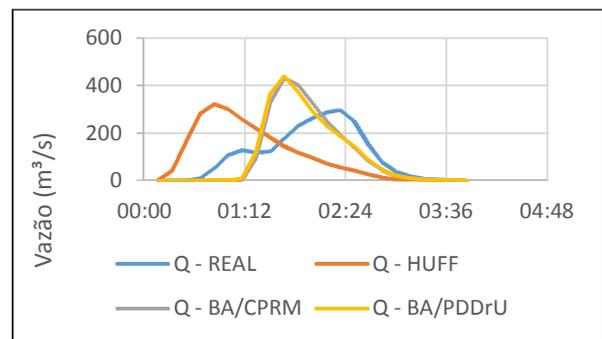


Gráfico 10. Simulação hidrológica para o subevento crítico 05



EVENTO 06

Gráfico 11. Hietograma para a duração crítica do evento 06

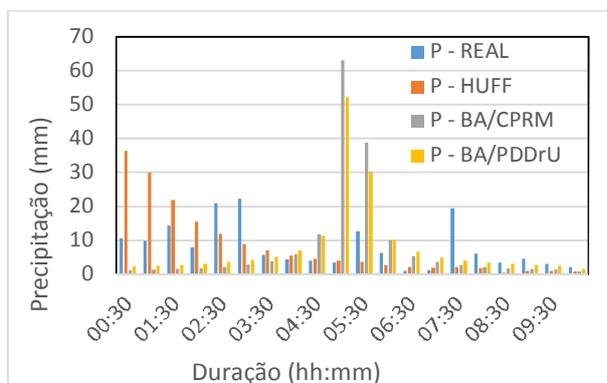
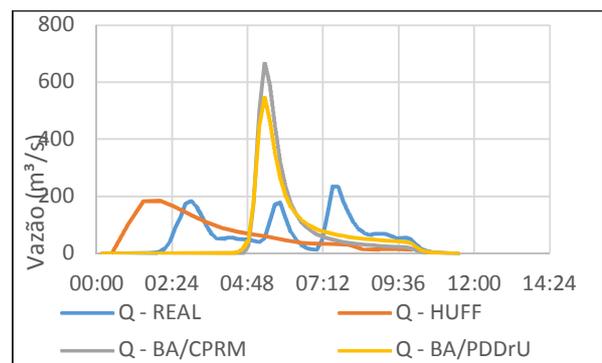


Gráfico 12. Simulação hidrológica para o subevento crítico 06



2.5 RESULTADOS

A partir da observação dos eventos analisados pode-se realizar algumas inferências. Em todos os eventos estudados, percebe-se, especialmente na parte inicial da chuva, uma grande diferença

entre os valores precipitados e os distribuídos pelo método de Huff/Teresina. Em relação ao pico das precipitações também é possível perceber diferenças, maiores ou menores em cada caso, ilustradas na Tabela 4.

Tabela 4. Precipitação máxima para cada distribuição

OCORRÊNCIA	d (min)	PRECIPITAÇÃO MÁXIMA (mm)			
		REAL	BA/CPRM	BA/PDDrU	HUFF
EVENTO 01	30	16,60	24,90	22,53	33,81
EVENTO 02	40	22,80	33,73	35,95	51,53
EVENTO 03	30	17,40	22,42	23,82	33,65
EVENTO 04	120	16,40	30,99	31,55	32,33
EVENTO 05	140	17,00	39,00	39,21	36,90
EVENTO 06	590	22,20	63,13	52,22	36,33

Em relação a vazão de pico, todos eventos analisados tiveram o pico da distribuição real abaixo dos valores de pico calculados pelas equações IDF's e distribuídos pelos métodos padronizados de Huff/Teresina e dos Blocos Alternados, exceto para o evento 04, que mostra para uma precipitação de igual ocorrência na bacia, diferentes valores de escoamento. Isso demonstra a importante relação das distribuições temporais na formação do escoamento. A Tabela 5 mostra a diferença porcentual das vazões de pico em cada distribuição relativa aos eventos observados.

Tabela 5. Variação da vazão de pico para cada distribuição

OCORRÊNCIA	d (min)	VARIÇÃO DA VAZÃO DE PICO			
		REAL	BA/CPRM	BA/PDDrU	HUFF
EVENTO 01	30	-	14%	15%	6%
EVENTO 02	40	-	24%	31%	25%
EVENTO 03	30	-	17%	20%	13%
EVENTO 04	120	-	-9%	-16%	-27%
EVENTO 05	140	-	46%	49%	8%
EVENTO 06	590	-	184%	133%	-21%

Analisando os hidrogramas dos casos estudados, observa-se para subeventos críticos de maiores durações, uma grande diferença entre os formatos dos hidrogramas obtidos pelas distribuições teóricas e observadas. Isso pode ser explicado pela notável diferença entre os hidrogramas registrados e padronizados, já que nos dados obtidos dos pluviógrafos é possível notar significantes volumes precipitados tanto na parte inicial como no final da chuva. Ademais destaca-se dos valores observados de vazão, a grande diferença entre as vazões de pico simuladas no evento 06. Para esse evento, as vazões calculadas para as equações IDF's distribuídas pelo método dos blocos alternados apresentaram valores muito acima daqueles observados nas simulações com a precipitação real, entretanto para o método de Huff/Teresina essas vazões de pico têm mesma ordem de grandeza, apesar de terem tempos de picos bastante diferentes.

A partir da análise, também foi possível perceber que, para todos os eventos estudados, os hidrogramas calculadas pelas precipitações registradas apresentam picos deslocados, em maior ou

menor escala, em relação àqueles obtidos pelas distribuições padronizadas pelo método de Huff/Teresina.

Em relação ao volume de água escoado, foi percebido que em todos os eventos analisados, não há divergência significativa entre os volumes dos hidrogramas calculados para as tormentas registradas e para os métodos de distribuição teórica, com valores máximos de desvio de apenas 1,50%. A Tabela 6 mostra os desvios dos volumes escoados obtidos a partir dos hietogramas teóricos e da distribuição real observada (negativos quando o volume real é maior que para as distribuições teóricas). Isto indica que a determinação da chuva efetiva total pelo método do SCS não é afetada pela distribuição temporal da chuva, podendo as diferenças serem explicadas por erros de arredondamento.

Tabela 6. Variação em torno do volume escoado real

OCORRÊNCIA	d (min)	VARIÇÃO DOS VOLUMES ESCOADO (m³)			
		REAL	BA/CPRM	BA/PDDrU	HUFF
EVENTO 01	30	-	0,47%	0,43%	0,52%
EVENTO 02	40	-	1,46%	1,50%	1,44%
EVENTO 03	30	-	0,07%	0,12%	0,03%
EVENTO 04	120	-	0,00%	-0,35%	-0,12%
EVENTO 05	140	-	-0,04%	-0,04%	-0,11%
EVENTO 06	590	-	0,32%	0,07%	0,30%

3 CONCLUSÃO

O presente trabalho procurou, através de estudo de casos de alagamentos na cidade de Teresina, estudar a influência da distribuição temporal de precipitações na formação do escoamento, avaliando a representatividade que tormentas padronizadas possuem em relação aos eventos ocorridos em diferentes microbacias urbanas.

Tendo em vista os resultados apresentados em relação às vazões de pico observadas para as diferentes distribuições, foi possível observar, para subeventos críticos estudados que a distribuição segundo o método de Huff/Teresina apresentou menores desvios em relação aos valores registrados, sendo assim classificada como a mais representativa para esses eventos.

Percebeu-se que, para subeventos de maior raridade e em que a duração crítica se aproxima da duração total do evento, os tempos de retorno, calculado para as duas equações de chuva utilizada, tendem a divergir. Usualmente, em obras de drenagem os tempos de retorno são fixados *a priori*, e essa divergência pode provocar o superdimensionamento ou subdimensionamento dessas estruturas.

Também foi possível observar que, apesar das diferenças, em alguns eventos, entre os valores de vazão de pico para cada distribuição simulada, não houve divergência significativa quanto aos volumes escoados para os eventos estudados.

Por fim, da observação dos hidrogramas foi possível analisar, que para o evento 04, a vazão de pico escoada não seria prevista por nenhum dos métodos de distribuição teóricos aplicados, demonstrando que uma chuva de igual tempo de retorno, pode produzir escoamento, em termos de vazão de pico, maiores que aqueles previstos pelos métodos comumente adotados no dimensionamento de obras de drenagem. Assim, pode-se perceber que o tempo de retorno das precipitações difere do tempo de recorrência dos deflúvios. Por esse motivo Canholi (2014) destaca a importância da simulação contínua no dimensionamento de bacias de retenção e outras soluções não-convencionais com forte dependência da distribuição temporal do hietograma de projeto. Além disso, a partir de simulações contínuas pode-se, selecionando valores de pico e volume máximos anuais, realizar análise estatísticas do tipo vazão x frequência ou volume x frequência, eliminando o inconveniente de ter que admitir tempo de recorrência igual para a precipitação e o deflúvio.

4 REFERÊNCIAS

CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. 2ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014. 384 p.

CEMADEN/MCTIC. Centro Nacional de monitoramento e alertas de desastres naturais. Ministério da Ciência, Tecnologia, Informação e Comunicação. **Mapa Interativo CEMADEN** 2018.

CUNHA, S. F. et al. **Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 837-848, dez. 2015.

FREITAS, E. S.; ALMEIDA, C. N.; BARBOSA, L. R.; LEAL, A. M. F. **Avaliação das intensidades de eventos chuvosos na bacia experimental do riacho Guaraíra-Paraíba**. In: XI ENES, João Pessoa-PB, 2014.

PFAFSTETTER, O. **Chuvas Intensas no Brasil**. 1ª edição. Rio de Janeiro: DNOCS, 1957. 419p.

SEMPPLAN. **Teresina. Teresina em dados e números**. 2010.

SILVEIRA, A. L. L. **Equação para os coeficientes de desagregação de chuva**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [S.l.], v. 5, n. 4, p. 143-147, dez. 2000.

TERESINA. **Plano diretor de drenagem urbana de Teresina**. TOMO 05. Teresina: [s.n.], 2012. 206 p. v. 25. Disponível em: <<http://semplan.teresina.pi.gov.br/saneamento-downloads/>>. Acesso em: 28 maio 2018.

TOMAZ, P. **Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais: Piscinões, galerias, bueiros, canais; métodos SCS, Denver, Santa Bárbara, Racional, TR-55**. 2ª. ed. [S.l.]: Navegar, 2011. 478 p.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia Aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, 1975. 244 p.