

Monitoramento, Modelagem e Simulação de Cenários para a Bacia do Córrego Barbado - Cuiabá/MT

Nilma de Oliveira Faria¹, Ademir Paceli Barbassa¹, Alexandre Silveira²
nilmafaria@hotmail.com; barbassa@ufscar.br; Alexandre.silveira@unifal-mg.edu.br

Recebido: 16/05/13 - revisado: 11/07/13 - aceito: 23/09/13

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo simular hidrológicamente a bacia do Córrego Barbado, na cidade de Cuiabá-MT, por meio do modelo SWMM (Storm Water Management Model) e avaliar as respostas para diferentes cenários de impermeabilização da bacia. A aquisição de dados envolveu trabalhos de monitoramento de chuva e vazão, que permitiram a construção de uma curva-chave para a seção de monitoramento até a cota 80 cm, extrapolada até a cota 2,60 m. Na modelagem, a calibração dos parâmetros, realizada manualmente para dois eventos, apresentou valores médios de coeficiente de determinação médio de 0,912, de coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,842 e erro de 0,025 % entre as vazões de pico observadas e estimadas pelo modelo, portanto considerados satisfatórios. O modelo foi validado para dois outros eventos sendo obtidos ajustes próximos dos encontrados na calibração. A simulação dos cenários para chuvas de retorno de 2 a 100 anos revelaram um aumento na vazão de pico de 12,6% a 16,9% para o Cenário 2 e aumento de 11,7% a 22,0% para o Cenário 3, ambos comparados com o Cenário 1 de ocupação atual. Mesmo para períodos de retorno de 2 anos foram verificadas inundações no cenário 1 em um ponto e nos cenários 2 e 3 em três pontos. As enchentes são causadas preponderantemente pelo aumento do Tr, pois a bacia está quase totalmente urbanizada.

Palavras-chave: Drenagem urbana, calibração, modelo SWMM.

INTRODUÇÃO

Diante do processo de intensa ocupação urbana tem-se verificado uma busca por soluções para amenizar os efeitos do escoamento superficial nas áreas urbanas durante eventos de precipitação. Estudos do comportamento hidrológico da área são essenciais, acompanhados de estudos urbanísticos, sanitários e viários para se atingir uma solução global.

Uma das ferramentas que possibilita a análise de diferentes soluções é a modelagem hidráulica e hidrológica. Os dados para a modelagem necessitam ser de boa qualidade e origem confiável, o que ainda é escasso no Brasil, pois o monitoramento de bacias está longe do ideal.

Neste trabalho objetivaram-se caracterizar, monitorar e modelar a bacia do córrego Barbado, localizado na cidade de Cuiabá-MT. Realizou-se o

monitoramento hidrológico para obtenção de dados de precipitação, nível de água, vazão e curva chave utilizados no modelo SWMM - Storm Water Management Model (LEEHS, 2012). Calibrou-se e validou-se o SWMM, então simularam-se as respostas da bacia para períodos de retorno de 5, 10, 20, 50 e 100 anos, para um cenário atual, outro com a ocupação dos lotes vazios e um terceiro com a homogeneização da impermeabilização da região mais urbanizada da bacia.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O trabalho foi realizado na bacia do córrego Barbado com área de drenagem total de 12,97 km². A bacia, conforme Figura 1, se encontra inteiramente dentro do perímetro urbano do município de Cuiabá-MT, entre as coordenadas 56°3'48,36" e 56°04'48,55" de longitude oeste e 15°33'37,12" e 15°38'0,25" de latitude sul.

O clima da região é o tropical continental com dois períodos distintos: chuvoso (outubro a maio) e seco (junho a setembro). A precipitação média anual da cidade, verificada pela Estação Mes-

¹ Universidade Federal de São Carlos

² Universidade Federal de Alfenas

tre Bomble, é de 1.333,0 mm. Historicamente, as maiores alturas pluviométricas ocorrem em janeiro, fevereiro e março. A temperatura média anual da cidade é 27°C, mas são frequentes máximas diárias de 38°C, não raro alcançando valores acima de 40°C (CUIABÁ, 2009; BORDEST, 2003; FARIA et al, 2006).

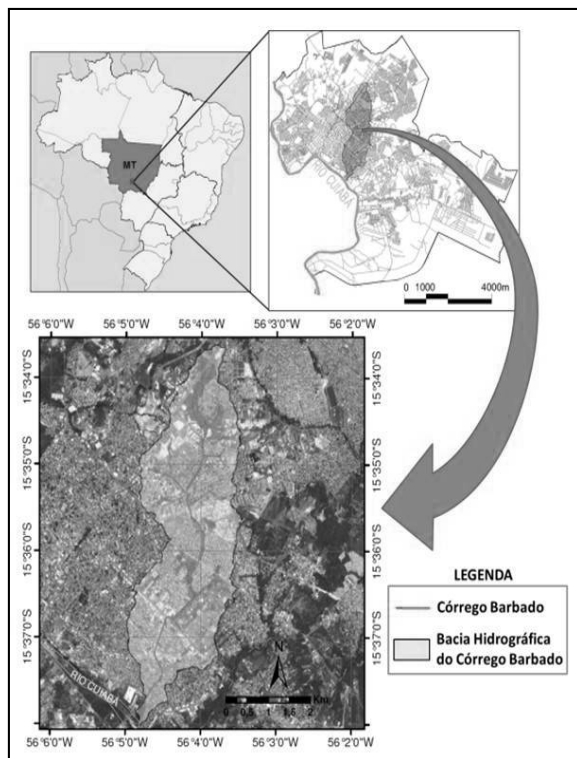


Figura 1 - Localização da Bacia do Córrego do Barbado.

Geologicamente, a bacia assenta-se sobre rochas pré-cambrianas datadas do Proterozóico médio constituída principalmente por filitos e subordinadamente metarenitos, metarcóseos e quartzitos do Grupo Cuiabá. Predomina o Neossolo Litólico, um solo raso, com espessura entre 0,5 e 2m, muito pedregoso, com baixa condutividade hidráulica e ocorrência esporádica de afloramentos de rocha (THOMÉ FILHO, 2004; BORDEST, 2003).

O relevo da bacia é dissecado em colinas e morros, geralmente com declividades suaves a moderadas, posicionada entre as cotas 149 e 224m correspondente à Depressão Cuiabana (THOMÉ FILHO, 2004; BORDEST, 2003).

A vegetação encontra-se muito alterada. A região da cabeceira apresenta-se mais preservada, é onde há uma reserva ecológica instalada. O córrego tem vários trechos canalizados devido à implantação

do sistema viário, mais de 2 km são revestidos por concreto na região próxima da foz no Rio Cuiabá.

A caracterização fisiográfica da bacia, apresentada na Tabela 1, foi obtida através de ferramentas computacionais de geoprocessamento e de cálculos consagrados pela literatura. Considerou-se a saída na seção de monitoramento fluviográfico. A delimitação desta bacia, denominada Bacia de Estudo do Córrego Barbado (BECB), resultou na área de drenagem de 10,71 km². As características da BECB indicam um formato estreito e longo, características que tendem a atenuar enchentes.

Tabela 1 - Características físicas da Bacia de Estudo do Córrego Barbado (BECB) com saída na Avenida Tancredo Neves, nas coordenadas 56°4'35,15" Oeste e 15°37'6,06" Sul.

Parâmetro	Valores
Área de drenagem (<i>A</i>)	10,71 km ²
Perímetro da bacia (<i>P</i>)	20,14 km
Comprimento do rio principal (<i>L_p</i>)	7,08 km
Índice de conformação (<i>K_f</i>)	0,21
Índice de compacidade (<i>K_c</i>)	1,72
Densidade de drenagem (<i>D_d</i>)	1,64 km/km ²
Declividade média canal principal (<i>d₂</i>)	6,29 m/km
Declividade média da bacia (<i>I_m</i>)	4,79%
Tempo de concentração (Picking)	2,06h
Tempo de concentração (Ven Te Chow)	1,98h
Elevação máxima da bacia	240 m
Elevação mínima da bacia	152 m



Figura 2 - Mapa de espacialização da ocupação da BECB.

Estudaram-se a impermeabilização e a conectividade hidráulica no lote por meio da visita *in loco* de uma amostra estatisticamente calculada. Estimaram-se os percentuais e a espacialização da impermeabilização para diferentes usos e ocupações conforme é apresentado na Figura 2 (FARIA, 2013).

MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

O monitoramento da precipitação realizou-se com auxílio do pluviógrafo e pluviômetro da estação “Mestre Bombled”, no campus da Universidade Federal de Mato Grosso, coordenadas 56°03’38,94” Oeste e 15°36’25,3” Sul, conforme Figura 3.

Efetou-se o monitoramento fluviográfico junto da passarela sobre o córrego do Barbado denominado posto “Tancredo Neves”, localizado na avenida de mesmo nome, entre as ruas Rua A e prolongamento da Rua Amâncio Pedroso, coordenadas 56°4’35,15” Oeste e 15°37’6,06” Sul, conforme indicado na Figura 3.

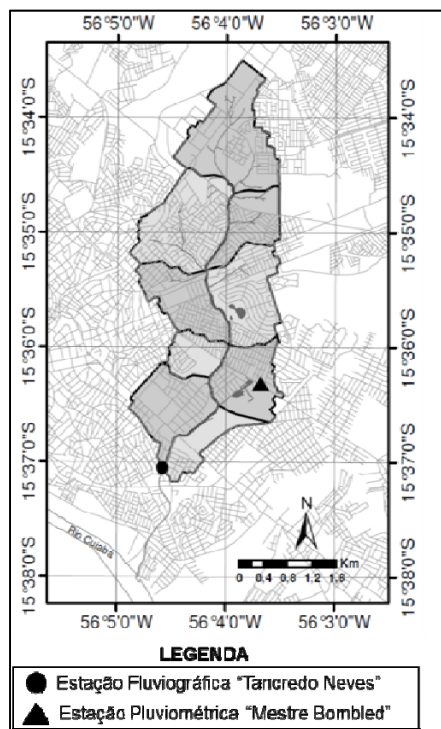


Figura 3 - Postos de monitoramento e delimitação da bacia de estudo do córrego Barbado (BECB) e sub-bacias.

Monitorou-se o nível de água por sensor de nível e a velocidade por molinete, ADCP e flutuadores, este último com recomendações de EPA (1997) e EMBRAPA (2007). Devido às características locais, o uso do molinete e ADCP foram inviabilizados. A seção do córrego do Barbado é ilustrada na Figura 4.

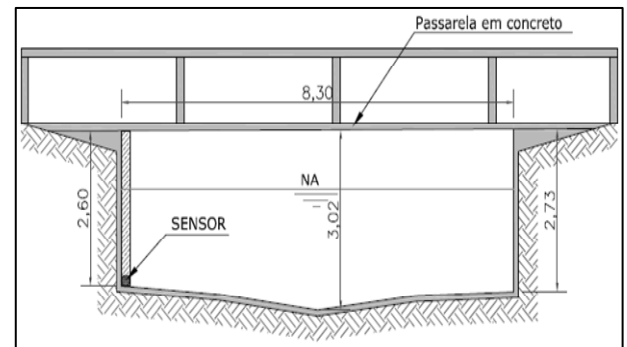


Figura 4 - Seção transversal do canal no local do monitoramento fluviográfico.

Representaram-se as medições de nível de água e vazão pelas curvas chave obtidas pelos métodos Logarítmico e de Stevens respectivamente, conforme Porto (2001) e Sefione (2002).

MODELAGEM DA BACIA

Optou-se pelo modelo SWMM versão 5.5 por ser considerado pela literatura um modelo completo, amplamente utilizado e com boa documentação de consulta (LEEHS, 2012).

Realizou-se a modelagem da Bacia de Estudo do Córrego Barbado (BECB) definida pela área de contribuição com saída na seção do monitoramento fluviográfico conforme Figura 3. Nesta definição da bacia consideraram-se os caminhos preferenciais do escoamento superficial. Para representação no modelo, discretizou-se a bacia em 9 (nove) sub-bacias ilustradas na Figura 3. Representou-se a rede de drenagem por meio do canal principal sendo o modelo de infiltração escolhido, o de Horton, descrito por Chow et al (1988).

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Avaliaram-se as influências de alguns parâmetros do modelo por comparação gráfica dos hidrogramas resultantes. Utilizou-se o evento ocorrido no dia 18 de janeiro de 2011. Admitiu-se um valor inicial para cada parâmetro e a este valor adicionaram-se -90% e +90%, conforme Collischonn (2001).

Os parâmetros analisados foram: largura das sub-bacias (W), porcentagem de áreas impermeáveis (AIDC), coeficiente de rugosidade de Manning de áreas impermeáveis (n_i) e permeáveis (n_p), capacidade de armazenamento de áreas impermeáveis (d_i) e permeáveis (d_p), porcentagem do escoamento encaminhado de áreas impermeáveis para áreas permeáveis (AINC), os parâmetros de infiltração de Horton (I_0 , I_b e k) e coeficiente de rugosidade de Manning para condutos (n_c).

CALIBRAÇÃO DOS EVENTOS

Realizou-se somente a calibração dos parâmetros dos quais houve considerável incerteza quanto aos seus valores. A área e declividade das sub-bacias não foram calibradas, pois diz respeito aos aspectos físicos da bacia que foram medidos. Da mesma forma, as taxas de impermeabilização, pois se obtiveram por levantamento estatístico criterioso *in loco*, conforme Faria (2013).

Adotaram-se os valores iniciais dos parâmetros calibrados conforme recomendações do Manual do Usuário do SWMM 5.0 (LEEHS, 2012) e experiências de trabalhos anteriores de Barbassa (1991) e Barbassa et al. (2005).

Calibrou-se a largura das sub-bacias com variações de -20% a +20% sobre os valores iniciais. Para os demais parâmetros adotaram-se variações sugeridas pelo Manual do Usuário SWMM 5.0 (LEEHS, 2012). Apresentam-se na Tabela 2 os valores iniciais e intervalos adotados na calibração dos parâmetros.

A calibração consistiu no ajuste manual, por tentativa e erro, assim como fizeram Garcia (2005) e Barbassa et al. (2005). Verificou-se o ajuste visualmente por sobreposição dos hidrogramas e também pelo cálculo das eficiências da calibração dados pelos Coeficientes de Determinação (R^2) e de Eficiência de Nash e Sutcliffe (COE), além do cálculo do erro da vazão de pico (E_p), conforme as equações 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 - Intervalo de valores utilizados na calibração.

Parâmetro	Valores		
	Mín.	Inicial	Máx.
n_i - Coeficiente de rugosidade de Manning para superfície impermeável da bacia	0,011	0,013	0,024
n_p - Coeficiente de rugosidade de Manning para superfície permeável	0,05	0,35	0,80
d_i - Armazenamento (lâmina) em depressão na parcela impermeável (mm)	1,27	1,5	2,54
d_p - Armazenamento (lâmina) em depressão na parcela permeável (mm)	2,54	4,9	7,62
I_0 - Taxa de infiltração máxima (mm/h)	25,4	28,8	254
I_b - Taxa de infiltração mínima (mm/h)	0,25	9,4	120,4
k - Coeficiente de decaimento (1/h)	2	4,5	7
n_{c1} - Coeficiente de rugosidade de Manning para canais naturais	0,030	0,045	0,07
n_{c2} - Coeficiente de rugosidade de Manning para canais com gabião	0,020	-	0,035
n_{c3} - Coeficiente de rugosidade de Manning para canais de concreto abertos	0,011	0,013	0,020

$$R^2 = \left(\frac{\text{cov}(Q_o, Q_c)}{S_o S_c} \right)^2 \quad (1)$$

Em que,

$\text{cov}(Q_o, Q_c)$ é a covariância da vazão observada e a vazão calculada e;

S_o e S_c são os desvios padrões da vazão observada e calculada respectivamente.

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^m (Q_{obs_i} - Q_{est_i})^2}{\sum_{i=1}^m (Q_{est_i} - \bar{Q})^2} \quad (2)$$

Em que,

Q_{obs} a vazão observada;

Q_{est} a vazão estimada pelo modelo;

\bar{Q} a vazão média observada;

m o número de dados no evento considerado.

$$E_p (\%) = \frac{Q_{p_{est}} - Q_{p_{obs}}}{Q_{p_{obs}}} * 100 \quad (3)$$

Em que,

Qp_{obs} a vazão de pico observada;

Qp_{est} a vazão de pico estimada pelo modelo.

Calibrou-se com os eventos dos dias 11 de dezembro de 2010 e 01 de janeiro de 2011 monitorados pela estação pluviométrica e fluviométrica.

VALIDAÇÃO

Teve por objetivo avaliar a eficiência da calibração. Simularam-se eventos diferentes da calibração com valores de parâmetros iguais a média dos obtidos na calibração. Verificou-se o ajuste por meio da comparação dos hidrogramas, pelos coeficientes R^2 e COE e erro no cálculo da vazão de pico (Ep). Utilizaram-se os eventos dos dias 19 de janeiro de 2011 e 26 de março de 2011.

CENÁRIOS

Construíram-se três cenários de urbanização, um atual e dois futuros com o objetivo de prever o comportamento hidrológico. A área da bacia foi separada em:

- AIDC - Área Impermeabilizada Diretamente Conectada, área cujo escoamento gerado é direcionado ao sistema de drenagem.
- AINC - Área Impermeabilizada Não Conectada, área impermeável que direciona as águas pluviais para áreas permeáveis, oportunizando a infiltração;
- AP - Área Permeável, parcela permeável da bacia, composta pelos parques, jardins, áreas de preservação e outras áreas não pavimentadas;
- AI - Área impermeabilizada total, soma da AIDC e AINC.

Os cenários são:

- Cenário 1: ocupação urbana atual da bacia.
- Cenário 2: simulação da ocupação dos lotes da bacia, atualmente vazios, com taxas de impermeabilização correspondente aos lotes ocupados atualmente.
- Cenário 3: simulação da impermeabilização de todas as sub-bacias com a mesma taxa de

impermeabilização da sub-bacia 9 no cenário 2, que apresenta características de área central. A definição deste cenário é baseada nos resultados obtidos por Fontes e Barbas (2003), no trabalho da análise da impermeabilidade do município de São Carlos, no qual se verificou que há uma tendência das áreas marginais atingirem taxas de impermeabilização das regiões centrais da cidade.

As taxas de impermeabilização dos Cenários 1, 2 e 3 são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 - Taxas de impermeabilização das sub-bacias para diferentes cenários de ocupação.

Sub-bacia	CENARIO 1			CENARIO 2			CENARIO 3		
	AIDC (%)	AINC (%)	AI (%)	AIDC (%)	AINC (%)	AI (%)	AIDC (%)	AINC (%)	AI (%)
1	39,99	1,49	41,48	57,26	2,13	59,39	78,05	3,37	81,42
2	51,17	1,17	52,34	85,65	2,85	88,50	78,05	3,37	81,42
3	35,14	1,27	36,41	64,06	2,31	66,37	78,05	3,37	81,42
4	65,20	2,74	67,94	79,45	3,34	82,79	78,05	3,37	81,42
5	50,02	1,81	51,83	81,82	2,96	84,78	78,05	3,37	81,42
6	54,27	2,42	56,69	54,27	2,42	56,69	78,05	3,37	81,42
7	65,52	3,07	68,59	75,97	3,56	79,53	78,05	3,37	81,42
8	59,75	2,69	62,44	79,66	3,59	83,25	78,05	3,37	81,42
9	72,02	3,11	75,13	78,05	3,37	81,42	78,05	3,37	81,42

Na elaboração dos cenários consideraram-se as áreas de ruas e calçadas como áreas impermeabilizadas diretamente conectadas. Além disso, simularam-se todos os cenários para chuvas de projeto com tempo de retorno de 2, 10, 20, 50 e 100 anos.

As chuvas de projeto foram inseridas no modelo por meio de hietogramas elaborados pelo método dos blocos alternados conforme Chow et al. (1988). Utilizou-se a equação de chuva do município de Cuiabá, ilustrada pela Equação 4, construída por Castro et al. (2011) a partir dos registros pluviográficos de 12,8 anos obtidos no 9º Distrito Meteorológico do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia).

$$i = \frac{1016,453 \cdot Tr^{0,133}}{(t + 7,5)^{0,739}} \quad (4)$$

Em que,

i = intensidade da chuva, em mm/h;

Tr = Tempo de retorno, em anos;

t = duração da chuva, em minutos;

Adotaram-se chuvas com duração de 120 minutos, com base no resultado de tempo de concentração da bacia. A chuva foi dividida em 6 intervalos de 20 minutos e obteve-se os incrementos de chuva para cada intervalo. Os valores incrementais foram reorganizados de forma que o incremento máximo se apresentasse no meio da duração da chuva total. Optou-se pelo arranjo dos intervalos organizados na seguinte sequência: 5-3-1-2-4-6.

RESULTADOS

Mediram-se vinte e quatro eventos de chuva e variação de nível, mas todos resultaram em níveis de água abaixo de 0,80 m.

As alturas de chuvas medidas no pluviômetro e os dados do pluviógrafo apresentaram diferenças desprezíveis implicando que os dados coletados são consistentes.

As medidas de vazões efetuadas por moinete e ADCP foram inviabilizadas devido à alta velocidade do fluxo de água do córrego Barbado, chegou-se a registrar 5,11m/s que resulta no número de Froude igual a 1,82. Desta forma, as vazões foram medidas utilizando o método dos flutuadores seguindo metodologias apresentadas por EPA (1997) e EMBRAPA (2007).

A curva-chave logarítmica resultou na Equação 5 com coeficiente de determinação igual a 0,98.

$$Q = 42,95139 (H + 0,06944)^{1,073354} \quad (5)$$

Em que,

Q=vazão, em m³/s;

H=nível do rio, em metros.

A curva-chave de Stevens resultou na Equação 6 com coeficiente de determinação igual a 0,99.

$$Q = 0,0223 H - 0,0089 - 9E-06 H^2 \quad (6)$$

Em que,

Q=vazão, em m³/s;

H=nível do rio, em metros.

Ambas curvas foram obtidas para níveis de água até 0,8 e extrapoladas até 2,6m, conforme Figura 5.

Verificou-se que para níveis de água entre 0 e 2,6m as equações 5 e 6 são muito semelhantes conforme se vê na Figura 5.

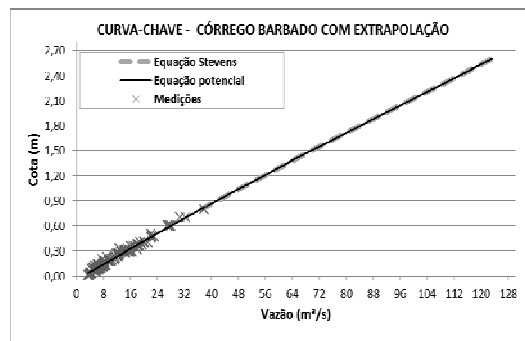


Figura 5 - Curva chave do Córrego do Barbado na seção de monitoramento hidrológico.

As análises de sensibilidade dos diversos parâmetros do modelo SWMM 5.0 são ilustradas pelos gráficos das Figuras 6 a 13.

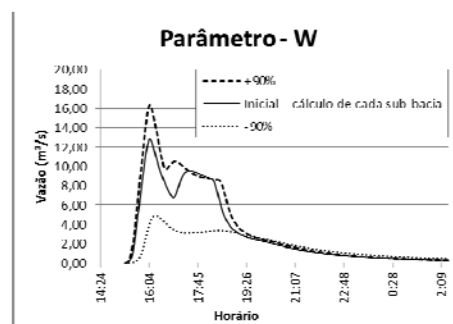


Figura 6 - Influência da largura (W) das sub-bacias no hidrograma de saída na seção do monitoramento pluviográfico.

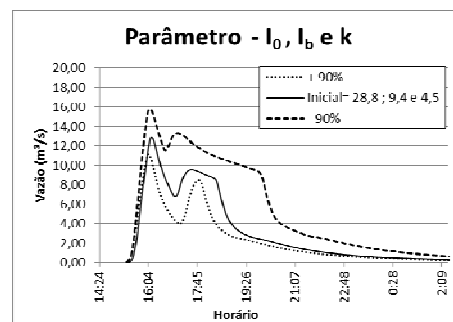


Figura 7 - Influência dos parâmetros de infiltração (I_0 , I_b e k) no hidrograma de saída na seção do monitoramento pluviográfico.

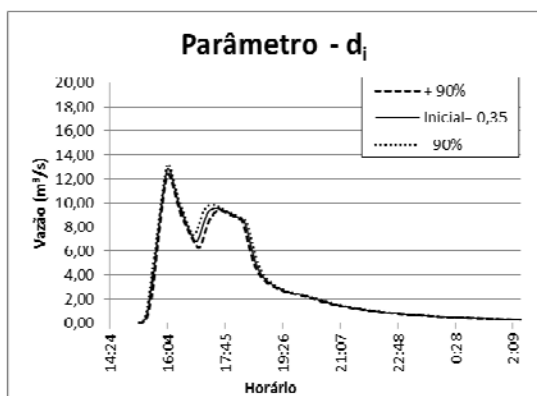


Figura 8 - Influência do armazenamento de áreas impermeáveis (d_i) no hidrograma de saída na seção do monitoramento fluvigráfico.

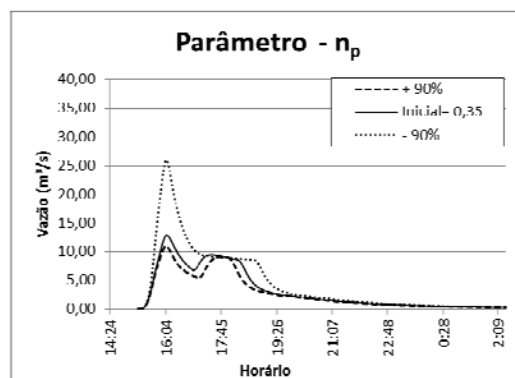


Figura 11 - Influência do coeficiente de Manning para áreas permeáveis (n_p) no hidrograma de saída na seção do monitoramento fluvigráfico.

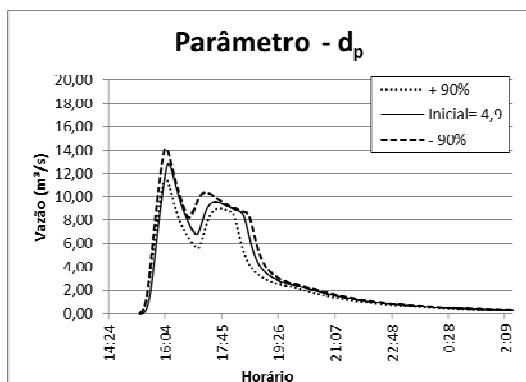


Figura 9 - Influência do armazenamento de áreas permeáveis (d_p) no hidrograma de saída na seção do monitoramento fluvigráfico.

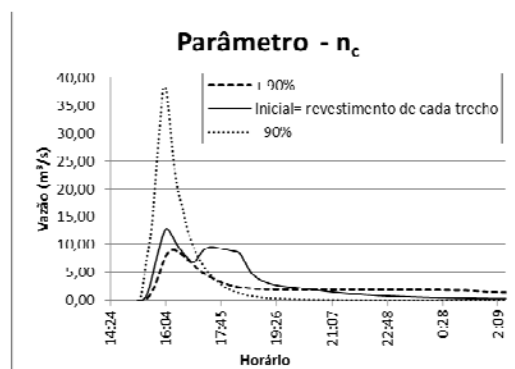


Figura 12 - Influência do coeficiente de Manning para condutos (n_c) no hidrograma de saída na seção do monitoramento fluvigráfico.

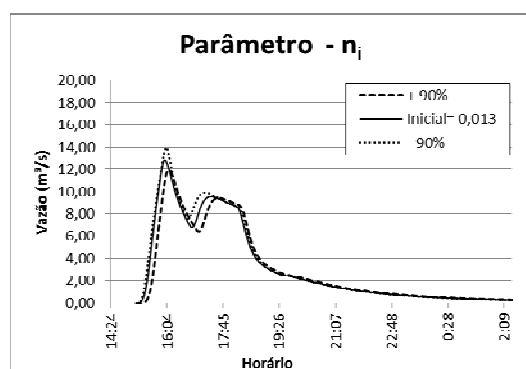


Figura 10 - Influência do coeficiente de Manning para áreas impermeáveis (n_i) no hidrograma de saída na seção do monitoramento fluvigráfico.

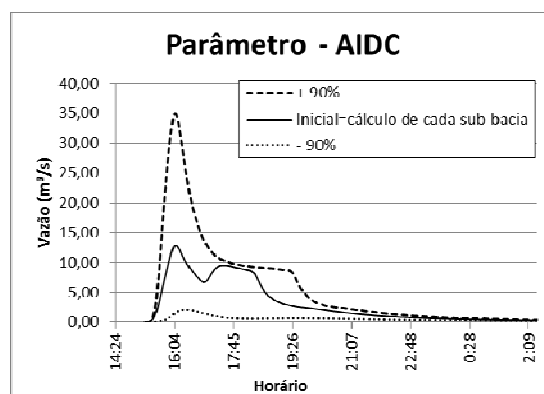


Figura 13 - Influência da AIDC no hidrograma de saída na seção do monitoramento fluvigráfico.

Constatou-se que o parâmetro AIDC é o que exerce maior influência na variação da vazão de pico

do modelo construído para a bacia do Barbado. O coeficiente de Manning para condutos também apresentou grande influência sobre o hidrograma seguidos por: coeficiente de Manning para áreas permeáveis (n_p), largura da sub-bacia (W), parâmetros de infiltração (I_0 , I_b e k), armazenamento de áreas permeáveis (d_p), coeficiente de Manning para áreas impermeáveis (n_i) e armazenamento de áreas impermeáveis (d_i).

Procedeu-se à calibração do SWMM com eventos dos dias 11/12/2010 e 01/01/2011 que podem ser vistos graficamente pelas Figuras 14 e 15. Vazões menores que $2,42\text{m}^3/\text{s}$ foram obtidas pela equação de Manning, pois o zero do sensor de nível não coincidiu com a menor cota do canal.

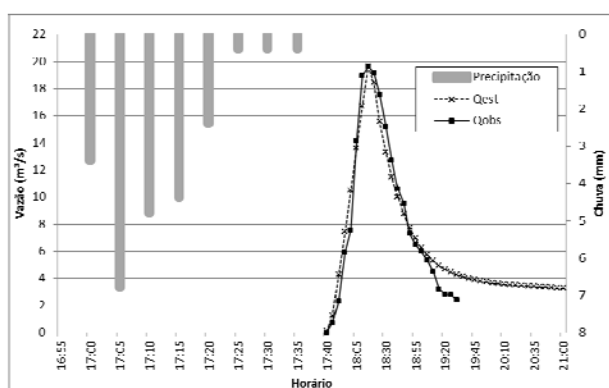


Figura 14 - Calibração do modelo SWMM para o evento do dia 11/12/2010.

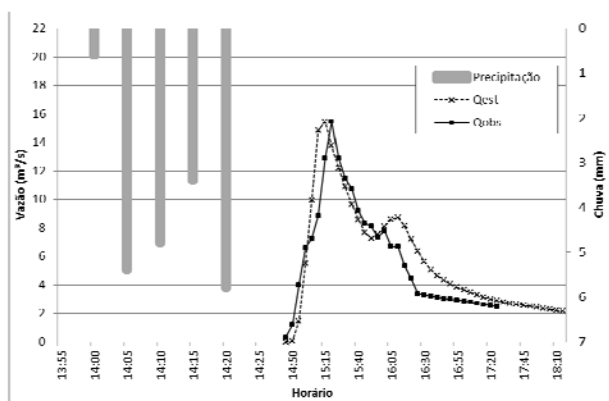


Figura 15 - Calibração do modelo SWMM para o evento do dia 01/01/2011.

Apresentam-se os resultados da avaliação da calibração na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados estatísticos da calibração do modelo.

Avaliação	Evento do dia 11/12/2010	Evento do dia 01/01/2011	Média
R ²	0,974	0,850	0,912
COE	0,862	0,822	0,842
Ep (%)	0,051	0,000	0,025

Observa-se que os ajustes verificados pelo coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) resultaram em valores superiores a 0,85 e 0,82 respectivamente.

Garcia (2005) obteve COE médio de 0,90, 0,82 e 0,72 para conjuntos de eventos de cheia, de alta intensidade e de baixa intensidade pluviométrica respectivamente; Collodel (2009) obteve COE médios de 0,83 na calibração dos parâmetros não variáveis espacialmente e 0,75 para demais parâmetros; e Shinma (2011) obteve COE médio de 0,87 utilizando calibração multiobjetivo para três eventos.

O erro entre as vazões de pico observada e estimada (Ep) revelam diferenças menores que 0,1%. Por tudo isso se considerou as calibrações satisfatórias.

Verificou-se, pela validação, a eficiência da calibração do modelo por meio da comparação dos hidrogramas observados e estimados dos eventos do dia 19/01/2011 e 26/03/2011. A comparação gráfica pode ser conferida pelas Figuras 16 e 17.

A avaliação da calibração realizada pelo coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) e pela porcentagem do erro no cálculo da vazão de pico (Ep) resultaram nos valores apresentados pela Tabela 5.

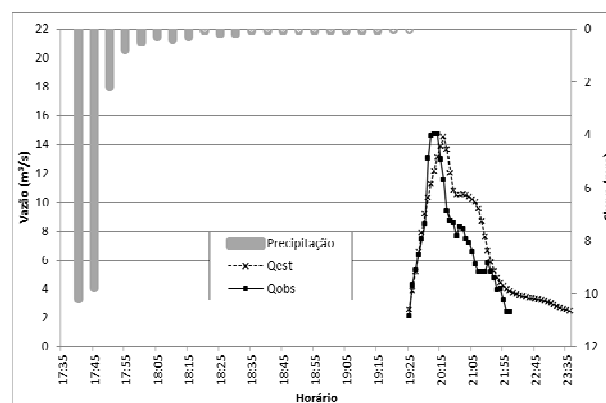


Figura 16 - Validação do modelo SWMM para o evento do dia 19/01/2011.

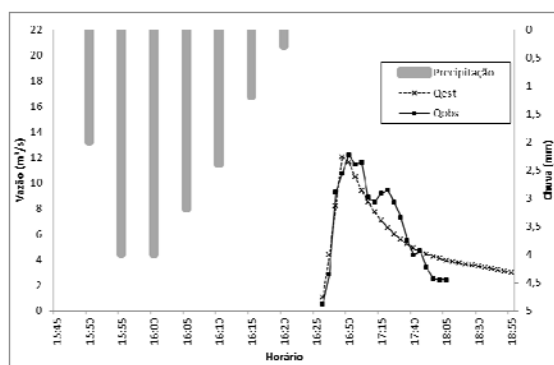


Figura 17 - Validação do modelo SWMM para o evento do dia 26/03/2011.

Tabela 5 - Resultados estatísticos da validação do modelo.

Avaliação	Evento do dia 19/01/2011	Evento do dia 26/03/2011
R ²	0,826	0,893
COE	0,744	0,728
Ep (%)	-1,627	-1,066

Constata-se que o ajuste verificado pelo coeficiente de determinação (R^2) e coeficiente de Nash-Sutcliffe (COE) resultou em valores geralmente obtidos em estudos semelhantes. Ressalta-se o baixo erro verificado para o cálculo da vazão de pico (E_p). A diferença verificada entre a vazão de pico observada e estimada permaneceu abaixo de 2% para os dois eventos analisados.

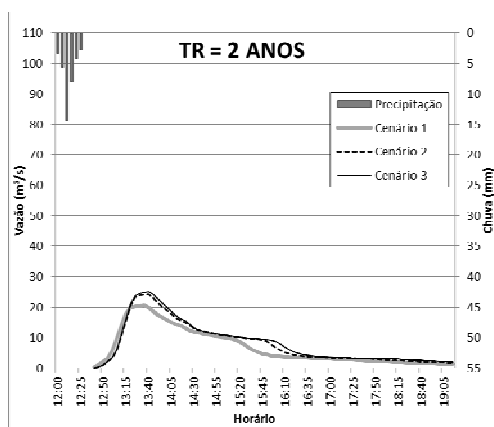


Figura 18 - Comparação de diferentes cenários para chuva com Tr = 2 anos.

Os hidrogramas obtidos com a simulação dos diferentes cenários para eventos de precipitação

com mesmo tempo de retorno são apresentados nas Figuras 18 a 22.

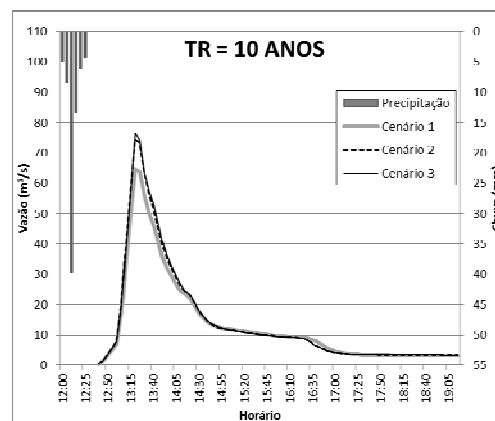


Figura 19 - Comparação de diferentes cenários para chuva com Tr = 10 anos.

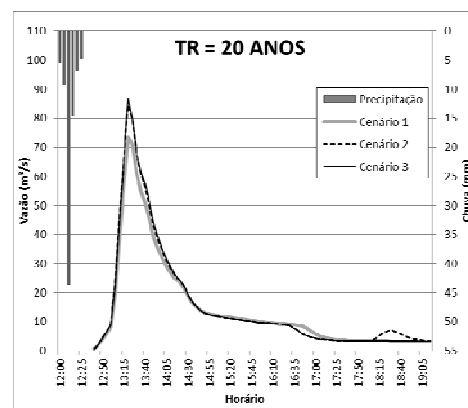


Figura 20 - Comparação de diferentes cenários para chuva com Tr = 20 anos.

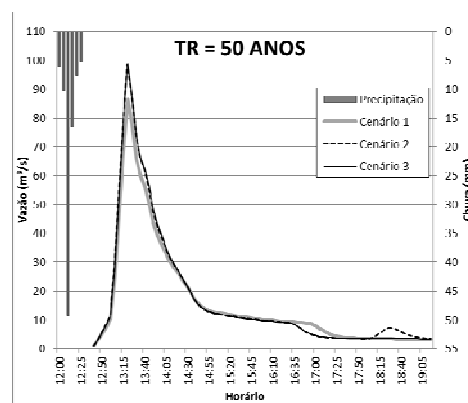


Figura 21 - Comparação de diferentes cenários para chuva com Tr = 50 anos.

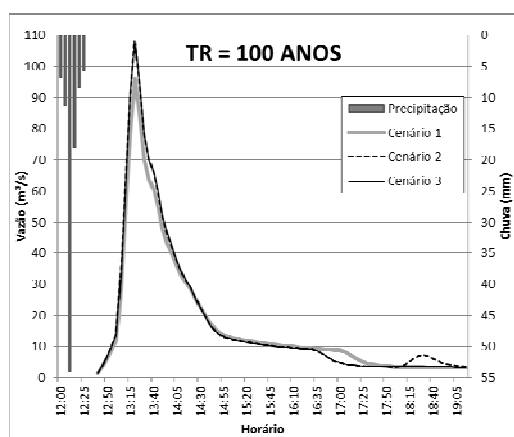


Figura 22 - Comparação de diferentes cenários para chuva com Tr = 100 anos.

O aumento dos períodos de retorno da precipitação de 2 para 10, de 10 para 20, de 20 para 50 e de 50 para 100 anos causaram aumentos de vazões de pico de cerca de 200%, 13%, 17% e 9% respectivamente, considerando todos os cenários.

Comparando-se os Cenário 2 e 3 constatou-se alterações muito semelhantes para precipitações com tempo de retorno de 50 e 100 anos, sendo registrado uma diferença maior para o evento com tempo de retorno de 2 anos. Indicam-se na Tabela 6 as diferenças verificadas para a vazão de pico dos Cenários 2 e 3 em relação ao Cenário 1 (de ocupação atual) para precipitação com diferentes tempo de retorno.

Tabela 6 - Diferenças na vazão de pico.

Tempo de Retorno	Cenário 2	Cenário 3
2	+ 16,9%	+ 22,0%
10	+ 14,9%	+ 18,2%
20	+ 14,7%	+ 17,9%
50	+ 13,8%	+ 14,0%
100	+ 12,6%	+ 11,7%

Em média houve um aumento na vazão de pico de 14,6% e 16,8% para os Cenários 2 e 3 respectivamente, comparados com o Cenário 1.

Na simulação dos cenários constatou-se a inundação de alguns pontos que variaram de acordo com o evento de precipitação simulado. Para o cenário 1, que representa a ocupação atual da bacia, foram inundados os pontos 1, 2 e 3 para os eventos

de precipitação com tempo de retorno de 20, 50 e 100 anos. Enquanto os eventos com tempo de retorno de 2 e 10 anos inundou apenas o ponto 2. A localização dos pontos de inundações é ilustrada pela Figura 23.

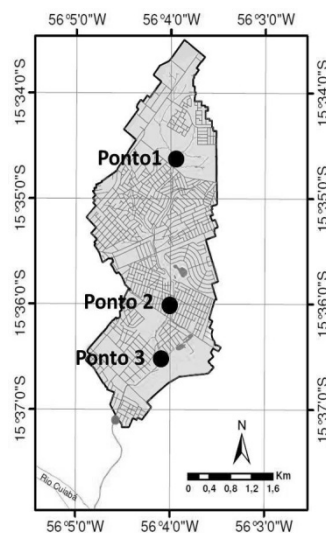


Figura 23 - Localização dos pontos de inundação observados nas simulações.

Na simulação do cenário 2 e do cenário 3, observou-se a inundação dos pontos 1, 2 e 3 para os eventos de precipitação com tempo de retorno de 10, 20, 50 e 100 anos. O evento com tempo de retorno de 2 anos inundou somente o ponto 2.

As regiões dos pontos 1 e 3, localizados pela Figura 23, inundaram em eventos com tempo de retorno de 10 anos quando foram simulados os cenários 2 e 3, fato este que não ocorreu na simulação do cenário 1. Portanto, comprovou-se através da simulação, que os cenários de ocupação 2 e 3 podem promover inundações durante eventos que não produziram inundações na situação de ocupação atual da bacia.

Ressalta-se, contudo que não foi considerada a variação dos níveis de água do rio Cuiabá que pode contribuir na ocorrência de inundações de pontos próximos a foz do córrego Barbado.

CONCLUSÕES

As características físicas da bacia de estudo, indicam baixa suscetibilidade à inundações. Contrapondo-se à esta indicação, a análise da impermeabilização da bacia, a litologia e o tipo de solo raso

verificado na região, apontam uma tendência para ocorrência de enchentes devido o aumento do escoamento superficial durante eventos de chuva. Portanto, as características físicas da bacia são apenas um dos fatores a serem analisados para definição da suscetibilidade de enchentes em bacias urbanizadas. A medição de vazão, devido o valor de Froude de 1,82, só foi possível pelo método do flutuador. Embora o flutuador seja um método simplificado, ele foi o único método possível devido às características do canal.

Na construção da curva-chave utilizou-se o método Logarítmico e o método de Stevens, sendo que para níveis até 0,80 m o método Logarítmico apresentou-se levemente melhor. Para valores extrapolados entre 0,8 e 2,60 as duas equações apresentaram resultados muito semelhantes.

Na análise de sensibilidade constatou-se que o parâmetro mais sensível é a porcentagem de área impermeabilizada, o que torna importante a obtenção de valores próximos do real. Os parâmetros menos sensíveis são armazenamento de áreas permeáveis (d_p), coeficiente de Manning para áreas impermeáveis (n_i) e armazenamento de áreas impermeáveis (d_i).

O modelo SWMM 5.0 apresentou altos valores dos parâmetros de ajustes para os eventos calibrados e validados, ou seja, representou muito bem a bacia.

O efeito da impermeabilização, quando se passa do cenário atual para outro em que os lotes vazios são ocupados e um terceiro em que se eleva a taxa de impermeabilização fizeram as vazões de pico elevarem 17 e 22% respectivamente, para período de 2 anos. Estes percentuais decrescem com o aumento do período de retorno, pois as perdas iniciais tornam-se relativamente menores que as alturas precipitadas. Embora os percentuais sejam expressivos, nota-se que a bacia já está muito impermeabilizada.

A diferença de cerca de 200% na vazão de pico entre período de retorno de 2 e 10 anos para todos os cenários, mostra a influência deste parâmetro nas inundações, ou seja, o problema principal da bacia são as grandes chuvas e secundariamente a impermeabilização.

Verificou-se que para o cenário atual e 2 anos de período de retorno houve apenas um ponto de inundação. Para os demais cenários e períodos de retorno houve três pontos de inundação. Exceto para o cenário atual e período de 10 anos. Deve ter ocorrido agravamento das enchentes não só pelo aumento no número de pontos inundados como, espera-se, pelo aumento das áreas inundadas.

Recomendam-se para trabalhos futuros na bacia do córrego Barbado:

- Continuidade do monitoramento da precipitação e vazão nos pontos atuais e na foz;
- Modelagem hidrodinâmica considerando variação do nível de água do rio Cuiabá;
- Delimitação das áreas de inundações e cálculo dos prejuízos causados;
- Avaliação da implantação de medidas de controle na bacia.

REFERÊNCIAS

BARBASSA, A. P. **Simulação do Efeito da Urbanização sobre a Drenagem Pluvial da Cidade de São Carlos**. 1991. 327 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

BARBASSA, A. P. ; PUGLIESE, P. B. ; MOREIRA, J. . Estudo de enchentes urbanas associando rede de monitoramento densa, sig e modelo distribuído. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 16., 2005, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2005. v. CD-ROM. p. 1-19.

BORDEST, S. M. L. **A bacia do córrego Barbado**, Cuiabá: Gráfica Print, 2003.

CASTRO, A. L. P.; PADILHA, C.; SILVEIRA, A. Curvas Intensidade-Duração-Frequência das precipitações extremas para o município de Cuiabá-MT. **Ambiência** (UNICENTRO), v. 7, p. 305-315, 2011.

CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Applied Hydrology**. New York: McGrawHill, 1988. 572p.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porte Alegre, 2001.

COLLODEL, M.G. **Aplicação do modelo hidrológico SWMM na avaliação de diferentes níveis de detalhamento da bacia hidrográfica submetida ao processo de transformação chuva-vazão**. 2009. 225 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

CUIABÁ. Instituto de Planejamento e Desenvolvimento Urbano. **Perfil Socioeconômico de Cuiabá**. Cuiabá: Central de Texto, 2009. Volume IV. 525 p.

EMBRAPA. **Comunicado Técnico 455**: Medição da Vazão em Rios pelo Método do Flutuador. Concórdia: Versão eletrônica, 2007.

EPA.Stream flow. In: Environmental Protection Agency. **Volunteer stream monitoring**: a methods manual. Washignton: EPA, 1997. p. 134-138.

FARIA, N.O.; SILVEIRA, A. MORUZZI, R.B. Consistência e análise dos dados pluviométricos da estação climatológica da UFMT. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, 5., 2006, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ASBEA, 2006.

FARIA, N. O. **Estudo da impermeabilização, monitoramento, modelagem e simulação de cenários para a bacia do barbado - Cuiabá/MT**. 2012. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

FONTES, A.R.M. ; BARBASSA, A. P. . Diagnóstico e Prognóstico da ocupação e impermeabilização do solo urbano. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 8, n. 2, p. 137-147, 2003.

GARCIA, J. I. B. **Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da Bacia Hidrográfica do Arroio Cancela**. 2005. 169 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

LEEHS – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento (Tradução). **Manual do Usuário EPA SWMM 5.0**. UFPB: 2012. Disponível em: <http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html_downloads/swmm/SWMM_2012.pdf>. Acesso em 05 mai. 2012.

PORTO, R. L. L.; ZAHED, K. F.; SILVA R. M. **Medição de vazão e curva chave**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidraulica e Sanitária / USP, 2001. Apostila da disciplina de Hidrologia Aplicada.

SEFIONE, A. L. **Estudo comparativo de métodos de extrapolação superior de curva-chave**. 2002. 240 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

SHINMA, T. A. **Calibração multiobjective do SWMM aplicada à transformação chuva-vazão**. 2011. 136 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

THOMÉ FILHO, J. J. (Org.) **Sistema de Informação Geoambiental de Cuiabá, Várzea Grande e Entorno– SIG CUIABÁ**. Goiânia: CPRM, 2004. (Convênio CPRM/SICME).

Monitoring, Modeling And Simulation Of Scenarios For The Barbado Stream Watershed – Cuiabá/MT

ABSTRACT

This paper aims to hydrologically simulate the Barbado Stream watershed, located in Cuiabá-MT using the SWMM model and to evaluate the responses to its different waterproofing scenarios. The data acquisition involved monitoring rainfall and flow rate which allowed the construction of a rating curve for the monitoring section up to the 80cm stage, extrapolated up to the 2.60 stage. In modeling the parameter calibration performed manually for two events, presented the average determination coefficient of 0.912, Nash-Sutcliffe coefficient of 0.842 and 0.025 % of mean error between the peak flows observed and estimated by the model, thus regarded as satisfactory. The model was validated for two othe events and adjustments were obtained close to those found in calibration. The simulation of scenarios for rainfall return periods of 2 to 100 years revealed an increase in the peak flow of 12.6% to 16.9% for Scenario 2 and an increase from 11.7% to 22.0% for Scenario 3, both compared to the current occupation of Scenario 1. Even for return periods of 2 years, floods occurred in scenario 1 at one point and in scenarios 2 and 3 at three points. Floods are caused mainly by the increase in Tr, as the watershed is almost completely urbanized.

Key-word: Urban drainage, calibration , SWMM model.