



Novos Cadernos NAEA

v. 26, n. 1 • jan-abr. 2023 • ISSN 1516-6481/2179-7536



ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DO RIACHO BACURI POR MEIO DA CURVA COTA-VOLUME

ANALYSIS OF BACURI STREAM BEHAVIOR THROUGH QUOTA-VOLUME CURVE

Alcenor Ferreira de Melo Junior  
Universidade de Taubaté (UNITAU)

Marcelo dos Santos Targa  
Universidade de Taubaté (UNITAU)

Celso de Souza Catelani  
Universidade de Taubaté (UNITAU)

Adriana Mascarette Labinas  
Universidade de Taubaté (UNITAU)

RESUMO

Durante o processo de urbanização, a população de Imperatriz-MA ocupou as áreas de margem do riacho Bacuri, que diariamente recebe lixo e esgoto doméstico em seu leito, o qual, também, por falta de manutenção, fica parcialmente obstruído, e sofre a redução no fluxo de água, o que, conseqüentemente, agrava as ocorrências de inundação. Diante disso, o presente estudo objetivou verificar o comportamento de cota e vazão do riacho Bacuri, por meio do cálculo das curvas cota-volume. O método adotado para a obtenção da vazão de cheia foi o I-PAI-WU. Os resultados indicam que o volume de inundação da bacia Bacuri equivale a 861.661,77 m³, e a cota de inundação da bacia foi determinada em 104,55 m.

Palavras-chave: Bacias hidrográficas. Escoamento superficial. Imperatriz-MA. Inundação.

ABSTRACT

During the urbanization process, the population of Imperatriz-MA occupied the margin areas of the Bacuri creek, which daily receives garbage and domestic sewage in its bed, which, also due to lack of maintenance, is partially obstructed, and suffers a reduction in flow. of water, which consequently aggravates the occurrence of flooding. In view of this, this study verified the behavior of the level and flow of the Bacuri creek, through the calculation of level-volume curves. The method adopted to obtain the flood flow was the I-PAI-WU. The results indicate that the flood volume of the Bacuri basin is equivalent to 861,661.77 m³, and the basin's flood quota was determined to be 104.55 m.

Keywords: Anthropic Watersheds. Runoff coefficient. Imperatriz-MA. Inundation.

1 INTRODUÇÃO

A ocupação das margens contribui para acelerar o processo erosivo e, conseqüentemente, o assoreamento do leito do riacho Bacuri, em Imperatriz-MA, resultando nas inundações, cujos efeitos devem ser minimizados por meio de práticas de conservação da água e do solo, o que inclui o monitoramento de trechos dos riachos (MENDES NETO; SOARES; LUCENA, 2018).

Tendo em vista o trabalho desenvolvido por Santos *et al.* (2020) que utilizaram a metodologia Cota-Volume Curve (DAEE, 2005) aplicada a pequenas bacias para determinar a cota de inundação a ser atingida, na Rodovia Presidente Eurico Gaspar Dutra (BR-116/SP), no cruzamento com o Rio Una em um município de Taubaté-SP, o presente estudo objetivou verificar o comportamento de cota e vazão do riacho Bacuri por meio do cálculo das curvas cota-volume, determinando a cota de enchente da bacia, bem como buscou-se especificamente: estimar o escoamento superficial por meio do método curva número e calcular a curva cota-volume para o riacho Bacuri.

2 ESTIMATIVA DA VAZÃO DE CHEIA PELO MÉTODO I-PAI-WU

Os métodos utilizados para estimar a vazão de cheia são diversificados, e os critérios para a adoção de um deles incluem a extensão da série histórica dos dados fluviométricos e o tamanho da área da bacia hidrográfica. Para séries inferiores a três anos, são recomendados o método racional, o método I-PAI-WU, o método prof. Kokei Uehara e o método do hidrograma unitário (DAEE, 2008).

O método racional baseia-se na determinação da relação entre a chuva e o escoamento superficial. Assim, considera-se a duração da precipitação intensa igual ao tempo de concentração, por isso se ajusta às bacias menores. O coeficiente de escoamento superficial, nesse método, é direto, de modo que se adota um valor único conforme o grau de impermeabilização e urbanização, independentemente do tipo de solo, por isso deve ser utilizado para bacias com área de até 2 km² (ELIAS, 2021; DAEE, 2005). Para bacias maiores, indica-se o método I-PAI-WU, que é um aprimoramento do método racional, indicado para bacias com área de até 200 km² (PATRICIO; CADORIN; BACK, 2021).

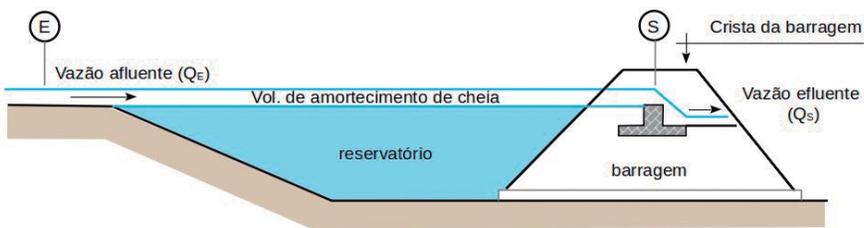
O aprimoramento se dá em razão de esse considerar fatores como as características físicas da bacia, a intensidade e a distribuição da chuva, o uso e a ocupação do solo, dentre outros (ELIAS, 2021). Portanto, diversamente do método racional, o coeficiente de escoamento superficial será diferente para cada tipo de uso e de ocupação de solo.

Desse modo, o método I-PAI-WU mostra-se o mais adequado para estimar a vazão de cheia da Bacia Bacuri, por se tratar de uma bacia com área menor que 200 km², e ainda considerando o uso e a ocupação do solo para determinar o volume de escoamento.

3 CURVA COTA-VOLUME

A curva cota-volume tem como princípio básico compreender o amortecimento de ondas de cheias em reservatórios, permitindo avaliar os riscos de enchentes e de secas, a partir dos volumes acumulados em cada nível (SANTOS *et al.*, 2001). Nesse sentido, o DAEE dispõe sobre o método para a obtenção da curva cota-área-volume por meio do levantamento das curvas de nível. O método baseia-se no conceito de volume de amortecimento, que é a diferença do volume acumulado entre o nível normal e o nível máximo da água, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Volume de amortecimento de cheia



Fonte: Adaptado de DAEE (2005).

A cada nível atingido, tem-se um volume de água acumulado, que pode ser obtido a partir do cálculo da área delimitada a cada cota, como no exemplo apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Exemplo de valores para determinação da curva cota-área-volume

Cota (m)	Área inundada (m ²)	Área média (m ²)	Desnível h(m ²)	Volume parcial (m ³)	Volume acumulado (m ³)
* 137,5	0	-	-	0	0
139,5	1.500	-	2,0	** 1.000	1.000
140,0	8.300	4.900	0,5	2.450	3.450
141,0	41.800	25.050	1,0	25.050	28.500
142,0	62.700	52.250	1,0	52.250	80.750
143,0	84.600	73.650	1,0	73.650	154.400

* 137,5 = cota do talvegue na seção do barramento

** Volume entre as cotas 137,5 e 139,5 = volume de um tetraedro = $1/3 \times 2,0\text{m} \times 1.500\text{m}^2 = 1.000\text{m}^3$

Fonte: DAEE (2005).

A partir desses dados, determina-se a curva cota-área-volume da bacia, possibilitando a estimativa da cota de inundação da bacia hidrográfica.

4 ATIVIDADES ANTRÓPICAS

Ao longo do tempo, as alterações ambientais físicas, químicas e biológicas modificam e comprometem os ecossistemas. As alterações ambientais podem ocorrer por inúmeros fatores, denominados de naturais e não naturais, oriundos de intervenções antropogênicas (FERNANDES, 2004). Essas ações antrópicas ocorrem, desde os primórdios da sociedade, e têm se acentuado com o crescimento acelerado das cidades, com o desenvolvimento tecnológico contemporâneo e com as culturas das comunidades ao longo dos anos (GIACOMETTI; DOMINSCHKE, 2018).

As atividades antrópicas que causam um impacto negativo ao ambiente afetam a bacia hidrográfica, a partir de alterações físicas e químicas como: ocupação do solo indevida, uso indiscriminado da água, desmatamento de matas ciliares, sedimentação, assoreamento, construção de barragens, desvios de cursos d'água, erosão, salinização, contaminação, impermeabilização, compactação, diminuição da matéria orgânica, dentre outras degradações, têm contribuído para o desaparecimento de rios e de lagos, afetando profundamente o ciclo da água e o clima (ARAÚJO *et al.*, 2009).

Na década de 1950, quando Imperatriz começou seu processo de ocupação, o riacho mantinha-se intacto, mas à medida que aumentava a população, as áreas naturais passaram a sofrer impactos significativos, com ocupação das regiões ribeirinhas e lançamentos de dejetos no leito do riacho (RIBEIRO, 2018).

Segundo Castro (2012), as margens do riacho foram sendo ocupadas por vários bairros sem nenhum tipo de planejamento urbano, o que resultou em habitações insalubres, sem rede de esgoto, sem pavimentação e, em muitos casos, sem água potável. Todos esses fatores favorecem a presença de efluentes domésticos, no leito do riacho, com possibilidade de eutrofização, contaminando o solo, e posteriormente o lençol freático.

Convém mencionar, ainda, que alguns pontos já encontram aterrados e sem nenhum tipo de vegetação ciliar, contribuindo para acelerar o processo de degradação da bacia e do assoreamento do leito do riacho, provocando alagamentos e transtornos aos moradores, no período de fevereiro a abril, em que as chuvas se intensificam na região (MENDES NETO; SOARES; LUCENA, 2018).

O riacho Bacuri, atualmente, transporta pelo seu leito uma vazão composta por lixos, dejetos e poluentes que acabam assoreando-o, reduzindo, assim, a velocidade do fluxo da água, e como consequência disso, têm-se as enchentes, principalmente no período de chuvas todos os anos (OLIVEIRA, 2005; RIBEIRO, 2018).

Em se tratando da bacia hidrográfica, Crestana *et al.* (2006) apontam como principais consequências das ações antrópicas a redução da qualidade da água, o escoamento superficial elevado, o risco de poluição de aquíferos, a degradação de mata ciliar, a compactação, a erosão do solo com sedimentação e a poluição de afluentes, além de processos erosivos e de assoreamento dos afluentes.

5 MATERIAL E MÉTODOS

O riacho Bacuri localiza-se na cidade de Imperatriz-MA e possui aproximadamente 14.979,61m de extensão e área de 1785,7 hectares (ha). Sua nascente fica, no Bairro Bebedouro, nas coordenadas 5° 29' 43,7"S e 47° 27' 5"W, e deságua, no rio Tocantins, nas coordenadas 05° 32' 29,9"S e 47° 29' 22,3"W (OLIVEIRA, 2005). Um dos pontos de alagamento, na cidade, ocorre, na passagem do canal pela Rodovia BR-010. Assim, a área

da Bacia Bacuri será considerada desde sua nascente até alcançar a BR-010, equivalente a uma área de 1.468,45 ha. Nesse percurso, o riacho Bacuri apresenta, em média, 5,0 metros de largura e 0,70 metros de profundidade.

O clima, na microrregião, é tropical superúmido com médias anuais pluviométricas de aproximadamente 1500 mm. A temperatura média oscila na maior parte do ano entre 24 °C e 29 °C. A vegetação divide-se entre cerrado, florestas ou matas e os campos (MENEZES, 2009).

A caracterização morfométrica e as curvas de nível do riacho Bacuri foram obtidas a partir das imagens de radar ALOS-PALSAR. Para estimar a vazão de cheia, foi adotado o método I-PAI-WU. Conforme Maria Filho *et al.* (2016), o escoamento superficial foi obtido pelas equações 1 (referente à precipitação efetiva) e 2 (que diz respeito à infiltração potencial).

$$Pe = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)} \quad (1)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (2)$$

Em que:

Pe = Precipitação efetiva (mm)

P = precipitação máxima em dado período de retorno (mm)

S = Infiltração Potencial (mm)

CN = Curva Número, adimensional

O valor da Curva Número deve ser ponderado de acordo com o tipo de uso e ocupação do solo, conforme Equação 3 (que diz respeito ao valor do Curva Número ponderado).

$$CN_{pond} = \frac{\sum(CN_c(A_c))}{Área_t} \quad (3)$$

Em que:

CN_{pond}: Valor do Curva Número ponderado, adimensional.

CN_c: Valor do Curva Número de cada classe de uso e cobertura do solo da bacia, adimensional.

A_c: Área de cada classe de uso e cobertura do solo da bacia em ha.

A_t: Área total da bacia, em ha.

A intensidade da chuva foi calculada pelo método Intensidade-Duração-Frequência, por meio da equação 4. Segundo Campos *et al.* (2015), nessa equação, o TR é o tempo de retorno da chuva em anos, o t é tempo de duração da chuva e os parâmetros K, a, b e c para o município de Imperatriz-MA são: $k = 1130,320$; $a = 0,150$; $b = 10,0$ e $c = 0,742$.

$$I = \frac{(1130 (TR)^{0,150})}{(0,742t+10)^{0,742}} \quad (4)$$

Em que:

I: Intensidade de chuva máxima em mm/h

t: Tempo de duração da chuva em minutos

K, a, b e c são parâmetros de ajuste da equação

O Coeficiente de escoamento volumétrico C_2 , dado pela razão entre a Precipitação efetiva (Pe) e a Precipitação total (P), foi obtido conforme equação 5.

$$C_2(adm) = \frac{Pe}{P} \quad (5)$$

Além disso, por meio da equação 6, calculou-se o Tempo de Concentração – Tc, que pode ser definido com o período em que a precipitação contribui para o escoamento (MARIA FILHO *et al.*, 2016).

$$Tc = 57 * \left(\frac{L^2}{S}\right)^{0,385} \quad (6)$$

Em que:

Tc: Tempo de concentração em minutos

L: comprimento do talvegue em KM

S: Declive equivalente (m/km)

A vazão de entrada (Qe) foi baseada na chuva-vazão, utilizando a Equação 7, que se refere à equação básica do método I-PAI-WU.

$$Qe = 0,278 * C * I * A^{0,9} K \quad (7)$$

Em que:

Qe: vazão de entrada em (m³/s)

C: coeficiente de escoamento superficial “run-off”, adimensional

I: intensidade da chuva em mm/h

A: área da bacia hidrográfica em km²

K: coeficiente de distribuição espacial da chuva

O coeficiente de escoamento superficial “run-off” C foi calculado por meio da equação 8.

$$C = \frac{\frac{2}{1+F} * C_2}{C_1} \quad (8)$$

Em que:

C = coeficiente de escoamento superficial “run-off”, adimensional

C₂ = coeficiente volumétrico de escoamento, adimensional

C₁ = coeficiente de forma, adimensional

F: fator de forma da bacia, adimensional

O coeficiente de forma foi obtido por meio das equações 9 (que diz respeito ao coeficiente de forma) e 10 (que diz respeito ao fator de forma da bacia).

$$C_1 = \frac{4}{2+F} \quad (9)$$

$$F = \frac{L}{2\left(\frac{A}{\pi}\right)^{0,5}} \quad (10)$$

Em que:

C₁ = coeficiente de forma, adimensional

F = fator de forma da bacia, adimensional

L = talvegue do rio em km

A = área da bacia em km²

Estimou-se a vazão de saída pelo método Chézy-Manning, conforme equação 11.

$$Q_s = \frac{1}{n} * A_m * R_h^{\frac{2}{3}} * I^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

Em que:

Q_s: vazão de saída em (m³/s)

n: coeficiente de rugosidade da parede da estrutura hidráulica, adimensional

A: área média da seção hidráulica do bueiro sob a estrada em m²

R_h: Raio hidráulico em m

I: declividade média em m/m

O ponto crítico adotado para medida da vazão de saída é o bueiro localizado entre a BR-010, apresentado na Figura 2.

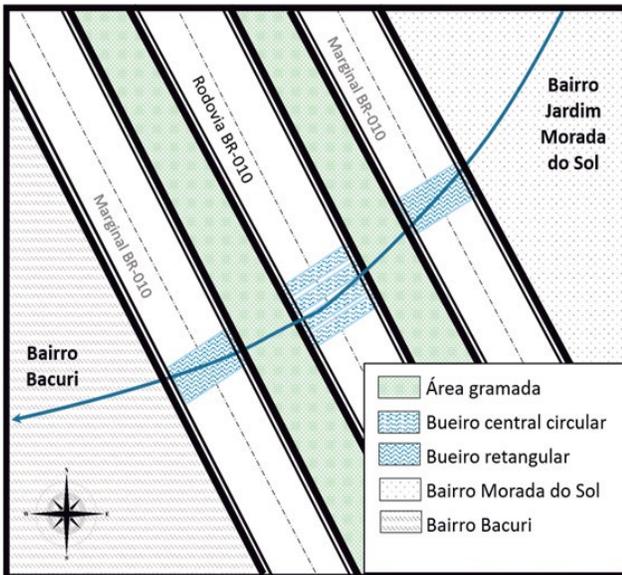
Figura 2 – Bueiro da Rod. BR-010 na bacia do riacho Bacuri em Imperatriz-MA



Fonte: Autor, 2022.

A área de drenagem da Bacia Bacuri é subdividida em duas, a primeira compreende desde a nascente no Bairro Bebedouro até a BR-010, e a segunda é compreendida da BR-010 até sua foz, no Rio Tocantins, passando pelo Bairro Bacuri (IMPERATRIZ, 2004).

Figura 3 – Planta baixa dos bueiros da rod. BR-010, na bacia hidrográfica do riacho Bacuri em Imperatriz-MA



Fonte: Autor, 2022.

Foram calculados os Volumes de entrada (V_e) e de saída (V_s), por meio da equação 12. A diferença foi o Volume resultante (V_r) que determinou a cota de inundação.

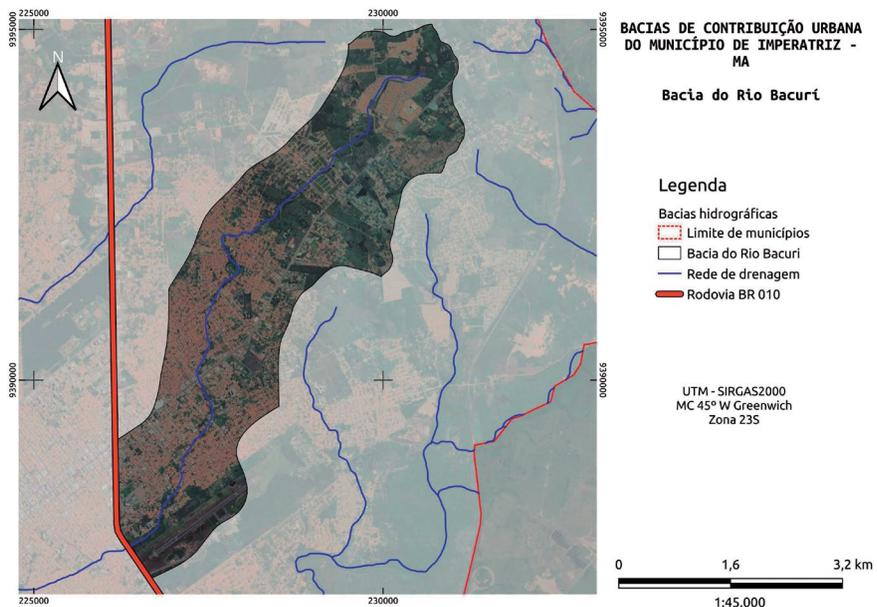
$$V = \frac{Q \cdot T \cdot b}{2} \quad (12)$$

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A bacia hidrográfica do Riacho Bacuri é um afluente da margem direita do rio Tocantins (MENDES NETO; SOARES; LUCENA, 2018). Sua área possui dois tipos de solos, o Neossolo Flúvico Ta Eutrófico e Luvisolo Háptico Órtico, cuja ocupação é predominantemente de infraestrutura urbana, que possui um CN alto, dificultando a infiltração do volume de precipitação no solo.

A Figura 4 apresenta a área abrangida pela bacia do Riacho Bacuri, enquanto a Tabela 3, por sua vez, sistematiza os dados de uso e ocupação e o correspondente Curva Número (CN).

Figura 4 – Bacia hidrográfica do riacho Bacuri, em Imperatriz-MA



Fonte: Autor, 2022.

Tabela 2 – Curva Número da bacia do riacho Bacuri em Imperatriz-MA

Classe de uso do solo	Área (ha)	Grupo-SOLO	CN	Área %	CN Ponderado
Tipo de solo: RYve - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico					
Infraestrutura Urbana	62,1864	C	94	0,04234832	3,98074215
Pastagem	3,5242	C	81	0,00239995	0,19439556
Tipo de solo: TXo - Luvisolo Háplico Órtico					
Água	1,3486	D	98	0,00091838	0,09000155
Formação Campestre	1,1688	D	71	0,00079594	0,05651182
Formação Florestal	29,7518	D	69	0,02026068	1,39798694
Formação Savânica	16,7242	D	77	0,01138901	0,87695408
Infraestrutura Urbana	1043,9381	D	94	0,71091148	66,8256788
Outras Áreas não Vegetadas	5,5315	D	94	0,0037669	0,35408828
Pastagem	304,2766	D	88	0,20720934	18,2344221
	1468,4502				92,0108

Fonte: Autor, 2022.

A Bacia Bacuri, apesar de não ser a maior do município, possui relevância para o estudo do comportamento hídrico de Imperatriz-MA, visto que sua extensão, dentro da área urbana, contribui para ocorrência de enchentes (SOUSA, 2016).

Imperatriz-MA passou por um processo de ocupação irregular, durante a primeira metade do século XX, teve sua população aumentada de 7.889 para 14.064 habitantes, e a partir da década de 1950 até os anos 2000, sua população aumentou para 230.566 habitantes (SANTOS; NUNES, 2020). Esse aumento expressivo, na segunda metade do século XX, demonstra como seu crescimento populacional ocorreu de forma exponencial, implicando a sua ocupação desordenada.

O código florestal determina que construções próximas a cursos d'água devem respeitar uma distância mínima, de acordo com a largura do curso d'água. No caso do Riacho Bacuri, que possui até 10 metros de largura, a distância mínima é de 30 m, porém, ao longo da margem do canal são verificadas diversas áreas onde se despreza essa limitação (BRASIL, 2012).

A ocorrência de inundações está relacionada à ocupação indevida das margens de rios e riachos, em que a urbanização, devido à impermeabilização do solo, reduz a infiltração e provoca sobrecarga no sistema de drenagem (SILVA, 2021). Assim, é possível relacionar a expansão das áreas urbanizadas com o registro de eventos de inundação em Imperatriz-MA. A Figura 5 apresenta o registro da enchente de 2021 na área da bacia Bacuri.

Figura 5 – Registro de enchentes na bacia do riacho Bacuri em Imperatriz-MA



Fonte: Autor, 2021.

A retirada da cobertura vegetal, a obstrução do escoamento e o aumento da impermeabilização do solo são fatores que reduzem a infiltração e consequentemente aumentam o escoamento pluvial (COSTA; SILVA, 2020). Dessa forma, a construção de obras e edificações, na margem do riacho bacuri, contribui para aumento do volume escoado, e pode ser um dos fatores que provocam as inundações registradas.

5.1 COTA-VOLUME DA BACIA BACURI

A partir do método apresentado, foram obtidos os parâmetros necessários para determinação da vazão de cheia. O coeficiente de escoamento 0,5455 calculado é compatível com o fato de a área da bacia Bacuri possuir cerca de 75% (Tabela 3) de sua área de drenagem com infraestrutura urbana. Os dados são apresentados na Tabela 4.

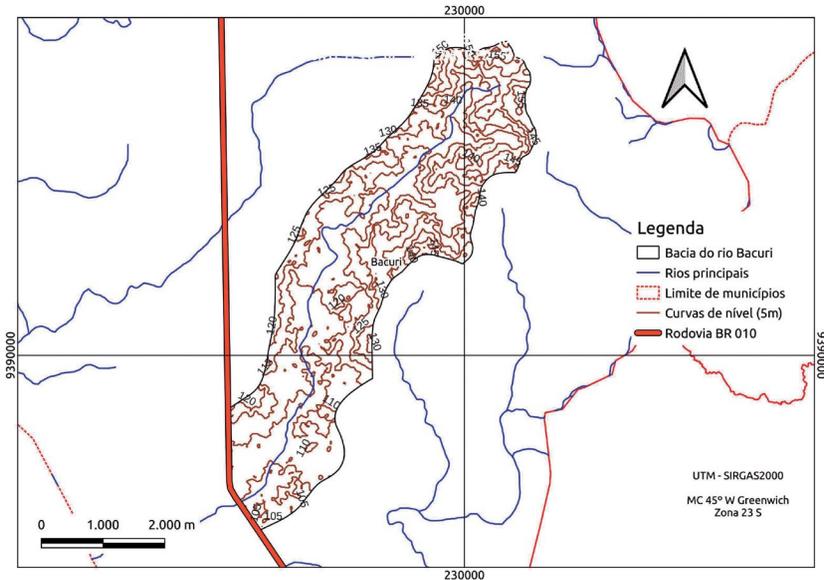
Tabela 3 – Parâmetros determinados para a bacia do riacho Bacuri

Parâmetro	Valor
Precipitação efetiva (mm)	113,98
Coefficiente de forma C_1	0,96
Coefficiente de escoamento volumétrico C_2 (adm)	0,830
Coefficiente de escoamento C	0,5455
Tempo de concentração (min)	177,5
Intensidade da chuva (mm/h)	46,41
Coefficiente de distribuição da chuva k	0,98

Fonte: Autor (2022).

A definição da curva cota-volume depende da definição das cotas e volumes de água acumulado, além da determinação dos volumes de entrada, saída e preservação da bacia. A Figura 6 apresenta as curvas de nível da bacia Bacuri, limitada até a BR-010, com intervalos de 5 m cada.

Figura 6 – Curvas de nível da bacia do riacho Bacuri em Imperatriz-MA



Fonte: Autor, 2022.

O processo de urbanização cria um novo ecossistema ao modificar elementos como o solo, a topografia e a cobertura vegetal, assim, a ocupação de áreas urbanas sem planejamento interfere nos processos naturais e pode ser relacionado ao aumento do escoamento superficial (COSTA; SILVA, 2020). Para reduzir o escoamento superficial, são necessárias medidas para maximizar a infiltração, no solo, com a adoção de técnicas mais sustentáveis na urbanização das cidades, como o uso de valas de infiltração (MELO *et al.*, 2016), no Brasil em Belo Horizonte, Pernambuco (CAPUTO, 2012) e São Paulo (SP), bem como os jardins de chuva, na capital de São Paulo e em cidades como São Carlos, Mogi-Mirim no interior do estado de São Paulo.

A partir de dados de curvas de nível da Bacia Bacuri, foi possível determinar a área entre as cotas, e conseqüentemente os volumes de água acumulado entre as cotas. Os dados estão na Tabela 4.

Tabela 4 – Cota, área inundada e volume acumulado

Cota (m)	Área inundada (m ²)	Área média (m ²)	Desnível (m)	Volume parcial (m ³)	Volume acumulado (m ³)
100	0,00	-	-	0,00	0,00
105	728.248,68	-	5,00	1.213.747,80	1.213.747,80
110	2.652.295,73	1.690.272,21	5,00	8.451.361,03	9.665.108,83
115	4.514.662,72	3.583.479,22	5,00	17.917.396,12	27.582.504,95
120	6.645.478,48	5.580.070,60	5,00	27.900.352,99	55.482.857,94
125	8.320.180,51	7.482.829,50	5,00	37.414.147,48	92.897.005,42
130	9.926.642,93	9.123.411,72	5,00	45.617.058,61	138.514.064,03
135	11.447.551,93	10.687.097,43	5,00	53.435.487,15	191.949.551,17
140	12.445.932,52	11.946.742,22	5,00	59.733.711,12	251.683.262,30
145	13.198.681,63	12.822.307,07	5,00	64.111.535,37	315.794.797,66

Fonte: Autor, 2022.

a - o volume parcial na segunda linha equivale ao volume de um tetraedro

b - a partir da terceira linha, o volume é dado pelo produto entre a área média e o desnível, conforme método do DAEE (2005)

Por meio da equação básica de I-PAI-WU (Equação 7), foi possível determinar as vazões de entrada no valor de 77,42 m³/s, utilizando os dados da Tabela 5.

Tabela 5 – Dados para cálculo das vazões pelo método I-PAI-WU

Parâmetro	Valor
Coefficiente de escoamento superficial C (adm)	0,5455
Intensidade da chuva <i>i</i> (mm/h)	46,41
Área da bacia (Km ²)	14,68
Coefficiente de distribuição espacial da chuva k	0,98

Fonte: Autor, 2022.

A vazão de saída foi estimada em 26,10 m³/s, por meio da fórmula Chézy-Manning (Equação 11), utilizando os dados da Tabela 6.

Tabela 6 – Dados para cálculo das vazões pelo método Chézy-Manning

Parâmetro	Valor
Número de bueiros de concreto	9
Diâmetro <i>D</i> (m)	0,80
Declividade média <i>I</i> (m/m)	0,07955
Perímetro molhado <i>Pm</i> (m)	2,117
Área molhada <i>Am</i> (m ²)	0,490
Raio hidráulico <i>Rh</i> (m)	0,2316
Coefficiente de rugosidade <i>n</i>	0,018

Fonte: Autor, 2022.

Com uso da Equação 12, foram determinados os volumes de entrada e saída. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

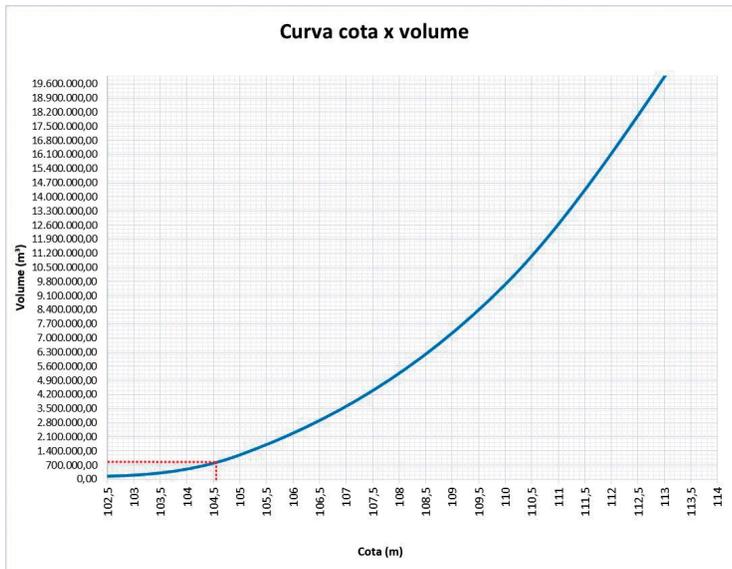
Tabela 7 – Volume e cota de inundação

Vazão de entrada - Qe (m ³ /s)	Vazão de saída – Qs (m ³ /s)	Volume de entrada – Ve (m ³)	Volume de saída – Vs (m ³)	Volume Resultante - Vr (m ³)
77,42	26,10	1.236.949,89	375.288,12	861.661,77

Fonte: Autor, 2022.

Assim, foi elaborada a curva cota-volume da bacia Bacuri para um período de retorno de 100 anos. Considerando os volumes calculados, o volume de inundação equivale a 861.661,77 m³, e atingiria a cota de inundação em 104,55 metros (Figura 7), situação em que a água não passaria por cima da rodovia BR-010, que fica, na cota 105, resultando numa folga de apenas 0,45 m.

Figura 7 – Cota de inundação x volume de inundação no riacho Bacuri em Imperatriz-MA



Fonte: Autor, 2022.

O resultado considera um coeficiente de escoamento calculado em 0,5455 (Equação 8). Assim, o volume de inundação atingiria a cota 105 caso o valor do coeficiente chegue a 0,7009, situação em que a água passaria pela BR-010.

Estudos semelhantes, como a pesquisa de Maria Filho *et al.* (2016), referentes à Bacia de Itaim, em Taubaté-SP, que possui um coeficiente de escoamento de 0,24, determinaram que, em um período de retorno de 100 anos, o volume de inundação alcançaria a ponte por cima do ribeirão Itaim.

Um outro estudo sobre o risco de inundação da bacia do Rio Una determinou que, para um período de retorno de 100 anos, somente com um coeficiente de escoamento de 0,50, o volume de inundação alcançaria a ponte na BR-116 (SANTOS *et al.*, 2020).

A partir dos estudos citados, infere-se que o dimensionamento da estrutura hidráulica da bacia Bacuri seria adequado para dar vazão às cheias, especialmente quando comparado a outras bacias, em que se verifica que eventos semelhantes podem ocasionar o alagamento de vias. Contudo, deve-se considerar toda a área atingida pela cota de inundação, como apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Área de inundação na bacia do riacho Bacuri em Imperatriz-MA



Fonte: Autor (2022).

Constata-se que, apesar de se ter uma folga de 0,45 m até a BR-010, a cota de inundação, em 104,55, já afeta áreas residenciais. Portanto, a inundação dessa área, no caso de uma precipitação máxima com tempo de retorno de 100 anos, deve ser evitada.

Entre as medidas preventivas que podem ser adotadas, cita-se a construção de bacias de retenção, as ações de preservação ambiental, a proibição do uso e a ocupação do solo, dentre outros (SANTOS *et al.*, 2020; MARIA FILHO *et al.*, 2016).

A Lei de Zoneamento, Parcelamento, Uso e Ocupação do Solo de Imperatriz estabelece uma zona de proteção ambiental na faixa de 25 metros a partir da margem do riacho Bacuri, além disso, as edificações são limitadas a dois pavimentos, e são proibidos os loteamentos, condomínios e conjuntos habitacionais nessas zonas, e pelo menos 50% da cobertura vegetal natural deve ser preservada na execução de qualquer obra ou edificação (IMPERATRIZ, 2004).

Apesar disso, a partir de 2012, foi construído um empreendimento residencial que retirou 100% da cobertura vegetal da margem do riacho Bacuri e ainda canalizou seus dejetos domésticos para dentro do canal (LEITE, 2020). Ademais, é autorizado o uso e a ocupação da área da Bacia Bacuri para diversas atividades de comércio e serviços (IMPERATRIZ, 2004).

Portanto, os resultados indicam que a causa das inundações já registradas está ligada ao uso e à ocupação desordenados. Embora a Lei municipal nº 003/2004 (Lei de Zoneamento) estabeleça uma área de preservação ambiental na faixa de 25 metros da margem do riacho Bacuri, alguns trechos são totalmente ocupados por residências, eliminando a margem existente (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Observa-se que a ocupação irregular de Imperatriz esteve presente no processo de formação do espaço urbano, e permanece nos dias atuais. Esse cenário indica que a modificação desse espaço pode elevar o risco de inundações. Corroborando um estudo realizado em Belém-PA, observou que um acréscimo de 215%, na área urbanizada da bacia do Tucunduba, provocou um aumento de 127% no escoamento superficial (TARGA *et al.*, 2012).

Dessa forma, infere-se que ainda que os resultados apontem que a rodovia ainda não é alcançada por eventos de precipitação máxima com tempo de retorno de 100 anos, a continuidade desse processo de urbanização desordenada pode mudar esse cenário nos próximos anos, visto que o ritmo de crescimento de Imperatriz vem aumentando.

Além disso, a área de inundação obtida por meio da curva cota-volume já afeta áreas residenciais, demandando ações imediatas para conter as cheias e evitar prejuízos à economia, ao meio ambiente e à saúde.

7 CONCLUSÃO

A Bacia Bacuri, no município de Imperatriz-MA, a partir de precipitação máxima com 100 anos de tempo de retorno, e do coeficiente de escoamento superficial ($C = 0,54$), em função do uso e da ocupação do solo, na bacia, apresentou vazão de entrada de $77,42 \text{ m}^3/\text{s}$, e de saída ($26,10 \text{ m}^3/\text{s}$) ao chegar à Rodovia BR-010, o que resulta um volume de inundação de $861.661,77 \text{ m}^3$, ao atingir a cota de inundação em $104,55 \text{ m}$, que embora não alcance a cota máxima da BR-010, causa inundação em áreas residenciais.

A capacidade de amortecimento de cheia, nesse ponto, é baixa, em relação ao volume de cheia da bacia Bacuri. Esse cenário explica as recorrentes inundações, no bairro Bacuri, e aponta a necessidade de mudanças estruturais para aumentar a vazão, nos bueiros do local, bem como ações de implantação de políticas de conservação e de congelamento de áreas, nessa e em outras bacias do município.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, L. E. *et al.* Bacias hidrográficas e impactos ambientais. **Qualitas Revista Eletrônica**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 1-18, 2009.
- BRASIL. **Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012.** Código Florestal. Brasília, DF: Presidência da República, [2012]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/L12651compilado.htm. Acesso em: 11 fev. 2022.
- CAMPOS, A. R. *et al.* Equações de intensidade de chuvas para o Estado do Maranhão. **Engenharia na agricultura**, Viçosa, MG, v. 23, n. 5, p. 435-447, set./out. 2015.
- CAPUTO, Ú. K. **Avaliação do potencial de utilização de trincheiras de infiltração em espaços com urbanização consolidada:** estudo de caso do município de Belo Horizonte - MG. 2012. 122 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- CASTRO, M. P. **Ações antrópicas na Bacia Hidrográfica do Riacho Bacuri em Imperatriz-MA.** 2012. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2012.

COSTA, A. M. M.; SILVA, O. G. Considerações teóricas sobre bacias hidrográficas urbanizadas e o processo de inundação. **Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS)**, Sobral, v. 22, n. 2, p. 219-238, 2020.

CRESTANA, M. S. M. *et al.* **Florestas-Sistemas de recuperação com essências nativas, produção de mudas e legislações**. 2. ed. Campinas: Cati, 2006.

DAEE. **Guia prático para projetos de pequenas obras hidráulicas**. São Paulo, DAEE, 2005. 116 p.

ELIAS, B. S. *et al.* Sistema de microdrenagem. In: COELHO, F. A. *et al.* **Engenharia moderna: soluções para problemas da sociedade e da indústria 2**. Ponta Grossa, PR: Atena, 2021. p. 174-186.

FERNANDES, B. M. Questão agrária: conflitualidade e desenvolvimento territorial. **Biblioteca Digital do Planejamento – Ministério da Economia**, Brasília, DF, 2004. Disponível em: <https://bibliotecadigital.seplan.planejamento.gov.br/bitstream/handle/iditem/564>. Acesso em: 20 dez. 2021.

GIACOMETTI, K.; DOMINSCHKEK, D. L. Ações antrópicas e impactos ambientais: industrialização e globalização. **Caderno Intersaberes**, [s. l.], v. 7, n. 10, p. 140-156, 2018. Disponível em: <https://www.cadernosuninter.com/index.php/intersaberes/article/view/1078>. Acesso em 09 abr. 2021.

IMPERATRIZ. **Lei nº 003/2004**. Lei de zoneamento, parcelamento, uso e ocupação do solo de Imperatriz. Imperatriz, MA: Governo do Estado, [2004]. Disponível em: http://novo.imperatriz.ma.gov.br/media/site/download/commam/leis-municipais-e-ambientais/Lei_de_Zoneamento_de_Imperatriz_Altera%C3%A7%C3%A3o1.pdf. Acesso em: 11 fev. 2022.

LEITE, G. C. **A mortificação do riacho Bacuri em Imperatriz-MA**. São Paulo: Editora Dialética, 2020.

MARIA FILHO, P. J. *et al.* Barragens de retenção em bacia hidrográfica com o uso de curvas cota - volume e hidrogramas triangulares sintéticos. **Ambiente & Água**, [s. l.], vol. 11, n. 5, p. 1-17, 2016. Disponível em: <http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/1900>. Acesso em: 20 dez. 2021.

MELO, T. A. T. *et al.* Trincheira de infiltração como técnica compensatória no manejo das águas pluviais urbanas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 53-72, jul./set. 2016.

- MENDES NETO, J. A.; SOARES, Z. T.; LUCENA, V. B. Identificação de pontos de degradação na trajetória do riacho Bacuri na cidade de Imperatriz-Maranhão. **Revista Educação Ambiental em ação**, [s. l.], v. 12, n. 45, set./nov. 2013. Disponível em: <http://www.revistaea.org/artigo.php?idartigo=1609>. Acesso em: 07 out. 2020.
- MENEZES, R. H. N. **Caracterização agroclimática e análise do rendimento agrícola do Estado do Maranhão, Brasil**. 2009. 188 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.
- OLIVEIRA, A. N. **Os custos socioeconômicos e ambientais dos impactos da urbanização de Imperatriz nos mananciais urbanos** – um estudo de caso na micro-bacia do riacho Bacuri. 2005. 146 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento do Desenvolvimento) – Núcleo de Altos Estudos Amazônicos Universidade Federal do Pará, Belém, 2005.
- OLIVEIRA, F. S. T. *et al.* Análise das ações antrópicas na bacia hidrográfica do Riacho Bacuri no município de Imperatriz-MA. **Revista Técnica Ciências Ambientais**, Taubaté, v. 5, n. 2, p. 1-9, 2021.
- PATRICIO, K. F.; CADORIN, S. B.; BACK, Á. J. Métodos de estimativa de vazão máxima para projetos de macrodrenagem urbana. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil Unesc-CIVILTEC**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 54-72, 2021.
- RIBEIRO, R. C. **Água vai, água vai, água vai: os transbordamentos dos Riachos na cidade de Imperatriz- MA**. 2018. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Sociais) – Centro de Ciências Sociais, Saúde e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão, Imperatriz, 2018.
- SANTOS, I. *et al.* **Hidrometria aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, 2001. 372 p.
- SANTOS, P. S. *et al.* Estimativa de curvas cota-volume em bacias hidrográficas. **Revista Técnica Ciências Ambientais**, Taubaté, v. 1, n. 1, p. 1-13, 2020.
- SANTOS, R. L.; NUNES, F. G. Mapeamento da expansão urbana e dos vetores de crescimento no município de Imperatriz-MA. **Revista Espaço e Geografia**, Brasília, DF, v. 23, n. 1, p. 209-234, 2020.
- SILVA, É. S. M. **Ocupação das margens de riachos e eventos de inundação: o caso de Aroeiras, Paraíba**. 2021. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Centro de Humanidades, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/22755>. Acesso em: 11 fev. 2022.

SOUSA, R. C. Efeitos da expansão urbana na microbacia do Riacho Capivara, Imperatriz-Maranhão. 2016. 120 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) – Faculdade Alves Farias, Programa de Pós Graduação Stricto Sensu em Desenvolvimento Regional, Centro Universitário Alves Farias, Goiânia, 2016. Disponível em: <http://tede.unialfa.com.br/jspui/handle/tede/67>. Acesso em: 16 dez. 2021.

TARGA, M. S. *et al.* Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 120-142, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.905>. Acesso em: 22 fev. 2022.

Submissão: 27/05/2022 • Aprovação: 29/03/2023