

**IX-105 – AVALIAÇÃO DO USO DE RESERVATÓRIOS INDIVIDUAIS DE
DETENÇÃO DE ÁGUAS PLUVIAIS PARA CONTROLE DE INUNDAÇÕES
URBANAS, COM AUXÍLIO DO MODELO DE CÉLULAS DE
ESCOAMENTO – MODCEL**

Antonio Krishnamurti Beleño de Oliveira⁽¹⁾

Engenheiro Civil com ênfase em Recursos Hídricos e Meio Ambiente formado pela Escola Politécnica da UFRJ. Cursa Mestrado em Engenharia Civil, área de Recursos Hídricos e Saneamento no Programa de Engenharia Civil, COPPE/UFRJ. É pesquisador no Laboratório de Hidráulica Computacional, que faz parte do LabH2O da COPPE/UFRJ. Atua na área de Engenharia Civil, com ênfase em Saneamento, Engenharia Hidráulica, Manejo de Águas Pluviais, Drenagem Urbana e Modelagem Hidráulica.

Oswaldo Moura Rezende⁽²⁾

M.Sc. Engenharia civil

Marcelo Gomes Miguez⁽³⁾

D.S. Engenharia civil

Cícero Matos Arrais⁽⁴⁾

Graduando de engenharia civil

Aline Pires Veról⁽⁵⁾

D.Sc. Engenharia civil

Endereço⁽¹⁾: Av. Athos da Silveira Ramos, 149, Sala I-206, Centro de Tecnologia – CT, Universidade Federal do Rio de Janeiro – Cidade Universitária – Rio de Janeiro - RJ - CEP: 21941-909 - Brasil - Tel: +55 (21) 3938-7830 - e-mail: krishnamurti@poli.ufrj.br.

RESUMO

O crescimento desordenado das cidades afeta diretamente o uso do solo, aumentando o volume de água escoado. Este crescimento sem planejamento, aliado a mudanças climáticas cada vez menos previsíveis, tem piorado o panorama mundial de desastres ocasionados por enchentes.

Os desastres recorrentes das inundações têm levado, cada vez mais, os projetistas a adotar soluções mais sustentáveis para mitigação das inundações. Por sua vez, o sistema de drenagem urbana sustentável busca retomar as características e condições naturais do ciclo hidrológico antes da urbanização. A abordagem sobre a drenagem urbana, a partir desta outra concepção de sistema, visa substituir as grandes estruturas dos projetos de controle de inundações convencionais por pequenas medidas espalhadas por toda a bacia hidrográfica, atuando na fonte da geração do escoamento.

Um exemplo destas medidas sustentáveis são os reservatórios de lote. Os reservatórios são dimensionados para atenuar o escoamento superficial gerado localmente, mantendo, o mais próximo possível, a vazão de cheia produzida pelo lote igual à vazão natural de pré-urbanização.

Assim sendo, o presente estudo visa avaliar a eficiência dos reservatórios individuais de retenção, os reservatórios de lote, considerando diferentes concepções de projeto, para o controle de cheias na escala da bacia hidrográfica. Foram elaboradas 4 condições para a rede de drenagem, uma considerando a sua situação atual e três concepções de projeto de reservatórios, além de uma condição de pré-urbanização, utilizada como referência para comparação dos resultados.

A avaliação dos reservatórios de lote foi realizada em um trecho de uma rua com ocupação urbana já consolidada, no bairro do Grajaú no município do Rio de Janeiro, que faz parte da bacia do Canal do Mangue.

PALAVRAS-CHAVE: Reservatórios de Lote, Drenagem Urbana Sustentável, Simulações Matemáticas, MODCEL, Técnicas Compensatórias.

INTRODUÇÃO

O problema de inundações está cada vez mais presente nos centros urbanos. O crescimento desordenado das cidades afeta diretamente o uso do solo, aumentando o volume de água escoado (LEOPOLD, 1968). Este crescimento sem planejamento, aliado a mudanças climáticas cada vez menos previsíveis, tem piorado o panorama mundial de desastres ocasionados por enchentes.

Os desastres recorrentes das inundações têm levado, cada vez mais, os projetistas a adotar soluções mais sustentáveis para mitigação das inundações. Por sua vez, o sistema de drenagem urbana sustentável busca retomar as características e condições naturais do ciclo hidrológico antes da urbanização (MIGUEZ, 2007). A abordagem sobre a drenagem urbana, a partir desta outra concepção de sistema, visa substituir as grandes estruturas dos projetos de controle de inundações convencionais por pequenas medidas espalhadas por toda a bacia hidrográfica, atuando na fonte da geração do escoamento.

Um exemplo destas medidas sustentáveis são os reservatórios de lote. Os reservatórios são dimensionados para atenuar o escoamento superficial gerado localmente, mantendo, o mais próximo possível, a vazão de cheia produzida pelo lote igual à vazão natural de pré-urbanização (MIGUEZ, 2015). Nesse contexto, é considerada uma chuva de projeto com duração crítica para a escala da rede local de microdrenagem, resultando em uma chuva com alta intensidade e curta duração, muitas vezes considerada como sendo de 1 hora. Ahammed (2017) cita alguns estudos sobre a capacidade de amortecimento de reservatórios de lote, os quais também podem ser usados para aproveitamento da água de chuva, com resultados de até 50% de redução no pico da vazão.

A hipótese de trabalho considera que a atual concepção dos projetos de reservatórios de lote é ineficiente quando considerado o efeito de atenuação de cheias em eventos hidrológicos críticos para a bacia hidrográfica do corpo d'água receptor do sistema de drenagem urbana.

Assim, este estudo tem como objetivo principal avaliar a eficiência dos reservatórios individuais de retenção, considerando diferentes concepções de projeto, para o controle de cheias na escala da bacia hidrográfica

METODOLOGIA UTILIZADA

O desenvolvimento da pesquisa foi realizado segundo os seguintes passos metodológico:

1. Definição da área para estudo de caso
2. Escolha da ferramenta de modelagem matemática para simulação hidrológico-hidrodinâmica
3. Definição dos cenários de modelagem
4. Análise e discussão dos resultados

Área de estudo

A avaliação das diferentes concepções de dimensionamento para os reservatórios individuais de retenção de águas pluviais, os reservatórios de lote, considerou um trecho de uma rua com ocupação urbana já consolidada, no bairro do Grajaú, que faz parte da bacia do Canal do Mangue, importante bacia urbana que abrange parte das zonas norte e central da cidade do Rio de Janeiro, com recorrentes problemas de inundações. A definição da área de estudo levou em consideração a escolha por uma região mais a montante da bacia, já em terreno relativamente plano, mas ainda longe dos problemas mais críticos de inundações, concentrados na região mais baixa da bacia, onde há significativo extravasamento dos rios e canais da rede de macrodrenagem, dificultando e até mesmo inviabilizando o uso de reservatórios de lote. A rua escolhida para estudo de caso é a Rua Itabaiana, no bairro do Grajaú, sendo considerado seu trecho mais a montante, entre a rua Canavieiras e a avenida Júlio Furtado. Este trecho possui aproximadamente 200m de extensão e rede de drenagem pluvial implantada. Sua localização é apresentada no mapa da Figura 1.

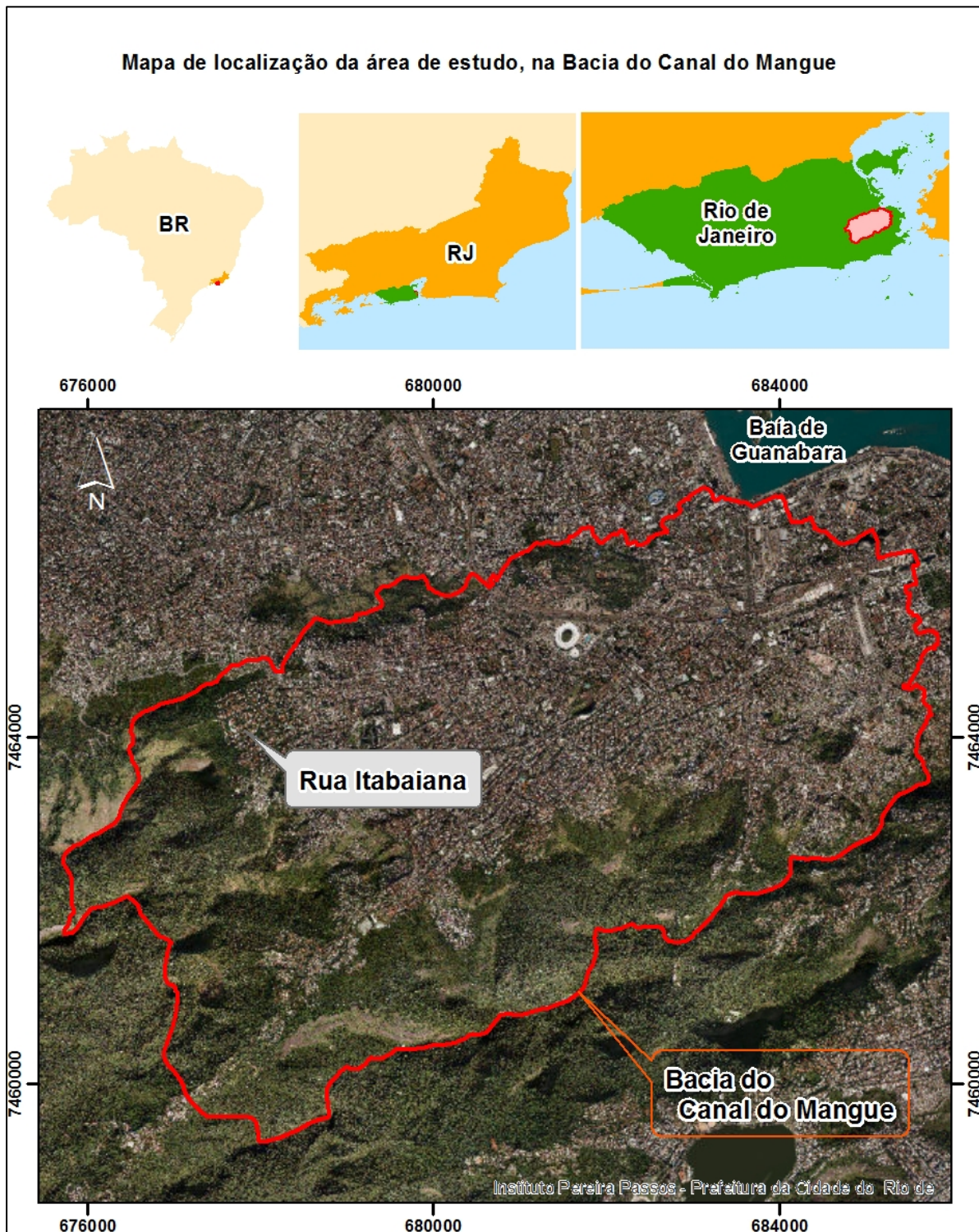


Figura 1: Mapa de localização da Rua Itabaiana.

O cadastro da rede de drenagem de águas pluviais foi obtido junto à Prefeitura Municipal do Rio de Janeiro, apresentado na Figura 2. A partir dos dados cadastrais foi desenhado o perfil longitudinal da rede de drenagem urbana do trecho da rua Itabaiana a ser estudado. Tal perfil está representado no gráfico da Figura 3.

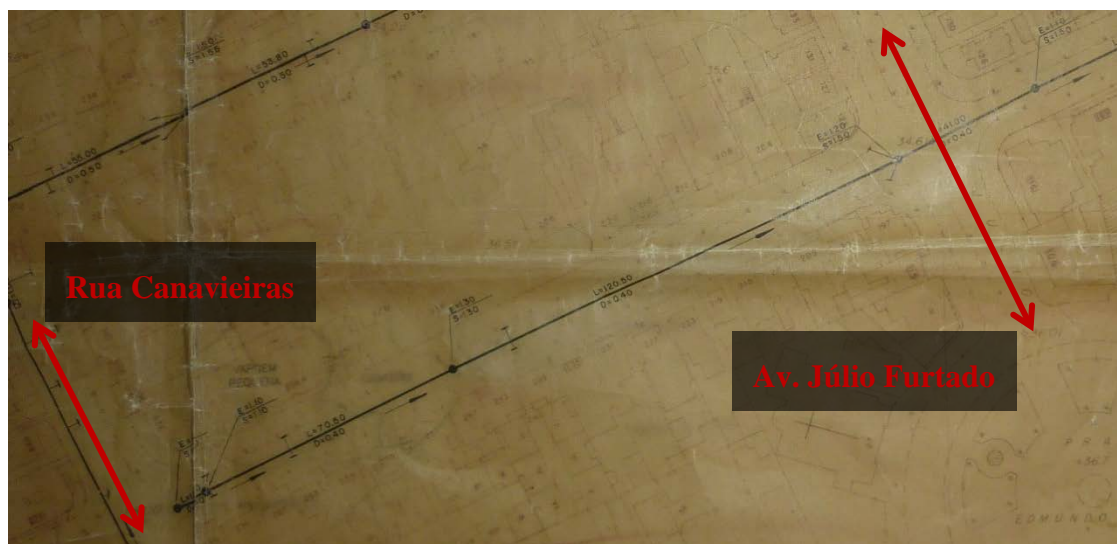


Figura 2: Detalhe do cadastro da rede de drenagem na rua Itabaiana (Rio-Águas).

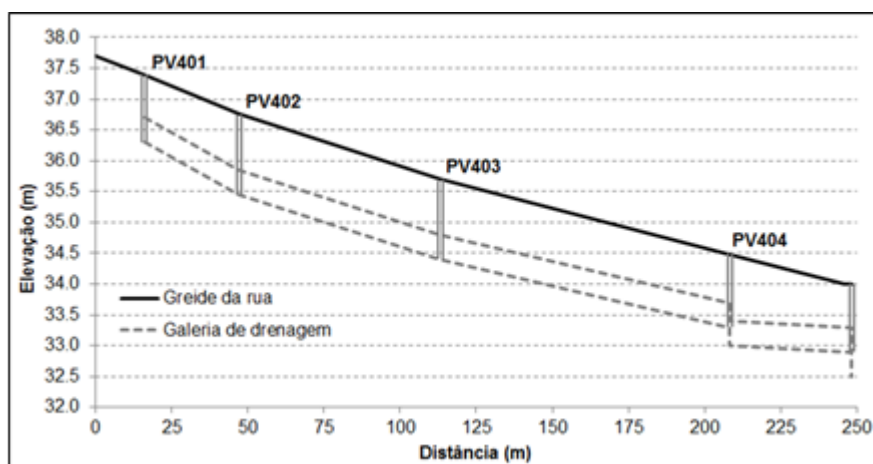


Figura 3: Perfil longitudinal da rede de drenagem da Rua Itabaiana.

Modelagem matemática

A ferramenta de modelagem escolhida para avaliar a eficiência dos reservatórios individuais de retenção foi o Modelo de Células de Escoamento - MODCEL, desenvolvido na UFRJ por Miguez (2001).

O MODCEL é um modelo Hidrodinâmico Quasi-2D e parte do princípio que a bacia pode ser representada por compartimentos interligados, formando uma rede bidimensional, representada por células que trocam água entre si, por uma rede no plano horizontal, com caminhos pré-definidos. Ou seja, esse modelo permite a visualização de um escoamento em uma área, modelado apenas por equações em 1D. Desta forma, a simulação funciona bem, não somente quando o escoamento está dentro das calhas do rio e das galerias, mas também quando o rio e galerias transbordam para as planícies e ruas. Para o uso de um modelo Quasi-2D, é necessário discretizar a área de análise em células de escoamento. Tais células são compartimentos homogêneos que funcionam de forma integrada, comunicando-se apenas por leis hidráulicas unidimensionais clássicas, *id est*, equações de vertedor, de orifício, de Saint-Venant, e outras. Essa representação da natureza pode ser feita através de células isoladas ou em conjunto, a fim de representar a complexidade dos possíveis caminhos das águas em uma inundação. Um conjunto resumido de tipos de células pode eventualmente fornecer grande capacidade de representação, ao se pensar em suas possíveis associações. Porém, a definição do conjunto de tipos de ligação, que são representativas de leis hidráulicas que traduzem determinados escoamentos, pode fazer grande diferença na tentativa de reproduzir a multiplicidade dos padrões de escoamento de um cenário urbano. Segundo Miguez (2001), as hipóteses de aplicação do modelo de células em bacias urbanas são:

1. A natureza pode ser representada por compartimentos homogêneos, interligados, chamados células de escoamento.
2. Na célula, o perfil da superfície livre é considerado horizontal, a área desta superfície depende da elevação do nível d'água no interior da mesma e o volume de água contido em cada célula é diretamente relacionado com o nível d'água no centro da célula.
3. Cada célula comunica-se com células vizinhas, que são arranjadas em um esquema topológico, constituído por grupos formais, onde uma célula de um dado grupo só pode se comunicar com células deste mesmo grupo, ou dos grupos imediatamente posterior ou anterior.
4. O escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas conhecidas como, por exemplo, a Equação Dinâmica de Saint-Venant.
5. A vazão entre duas células adjacentes, em qualquer tempo, é apenas função dos níveis d'água no centro dessas células.
6. As seções transversais de escoamento são tomadas como seções retangulares equivalentes, simples ou compostas.
7. O escoamento pode ocorrer simultaneamente em duas camadas, uma superficial e outra subterrânea, em galeria, podendo haver comunicação entre as células de superfície e de galeria.

O MODCEL pode ser descrito como:

(...) um modelo de células urbanas, que integra processos hidrológicos, observado em cada célula, a um modelo hidrodinâmico em loop, em uma representação espacial que interliga fluxo superficial, em canais e em galerias subterrâneas. Por exemplo, ruas podem agir como canais, calçadas como vertedores, edificações, estacionamentos e quarteirões podem funcionar como reservatórios de acumulação. (MIGUEZ, 2001)

Após o levantamento dos dados da região a ser modelada, como características urbanísticas, cotas de terreno dos lotes, da rua e da rede de drenagem, a área é então dividida em células. A divisão para modelagem do sistema de drenagem da Rua Itabaiana resultou em um total de 39 células, representativas dos lotes, da própria rua e da rede de drenagem. A Figura 4 apresenta a divisão em células da área de interesse.

Posteriormente, para entrada de dados no modelo, deve-se realizar a montagem de um esquema topológico que permita a leitura das possíveis interações entre células e suas posições relativas, por meio de uma matriz. Com a área dividida em células e o esquema topológico montado, é necessário determinar de que maneira as células irão interagir, definindo as leis hidráulicas que regerão os escoamentos entre cada par de células conectadas, através da escolha de tipo de ligações existentes no MODCEL.

No modelo do sistema de drenagem da Rua Itabaiana, foram utilizados os seguintes tipos de ligação:

- ✓ **Ligação tipo-orifício:** utilizada para representar a saída da drenagem do lote para a rede da rua

- Considera-se a equação clássica de escoamento em orifícios.

$$Q_{i,k} = -\varphi \cdot A_{i,k} \sqrt{2g(Z_i - Z_\theta)}$$

- φ = coeficiente do orifício
- $A_{i,k}$ = Área do orifício
- g = Aceleração da gravidade
- Z_i = Nível d'água na célula i
- Z_θ = Cota de fundo na saída do orifício

- ✓ **Ligação tipo-vertedor:** utilizada para representar possíveis trocas diretas entre o lote e a rua.

- Considera-se a equação clássica de vertedor de soleira espessa.

- Para escoamento livre:

$$\text{se } Z_k > Z_i \quad \rightarrow \quad Q_{i,k} = \phi_L \cdot L \cdot (Z_k - Z_c)^{3/2}$$

$$\text{se } Z_i > Z_k \quad \rightarrow \quad Q_{i,k} = \phi_L \cdot L \cdot (Z_i - Z_c)^{3/2}$$

- Para escoamento afogado:

- se $Z_k > Z_i \rightarrow Q_{i,k} = \phi_A \cdot L \cdot (Z_i - Z_c) \sqrt{Z_k - Z_i}$

- se $Z_i > Z_k \rightarrow Q_{i,k} = \phi_A \cdot L \cdot (Z_k - Z_c) \sqrt{Z_i - Z_k}$

- Z_k = Nível d'água na célula k

- Z_i = Nível d'água na célula i

- L = Largura do vertedor

- $\phi_L = \mu \cdot \sqrt{g}$

- μ = coeficiente de descarga sobre vertedor

- g = Aceleração da gravidade

- ✓ **Ligação tipo-saída de reservatório:** utilizada para representar a saída dos reservatórios de lote para a rede da rua.

- É uma associação das ligações tipo-orifício e tipo-vertedor. Utiliza as equações clássicas de escoamento em orifícios até o nível d'água no interior da célula alcançar a cota de crista definida para o vertedor, quando passa a ser considerada também a formulação para o escoamento em vertedor.

- ✓ **Ligação tipo-galeria:** utilizada para representar os trechos de galeria entre os poços de visita.

- No caso dessa ligação, que representa uma galeria circular, utiliza-se a equação dinâmica de Saint-Venant, desprezando-se os termos de inercia e utilizando a fórmula de Manning para a aproximação da declividade da linha de energia, obtendo:

- $Q_{i,k} = \frac{A_{i,k} R_{i,k}^{2/3}}{n \Delta x^{1/2}} (|Z_k - Z_i|)^{1/2} \frac{Z_k - Z_i}{|Z_k - Z_i|}$

- Os parâmetros n , $A_{i,k}$ e $R_{i,k}$, representativos da seção transversal de escoamento da galeria circular entre as células i e k , são calculados com o nível d'água obtido para esta seção, através de uma ponderação entre os níveis d'água das células i e k . Estes níveis são ponderados pela distância dos centros das células i e k até a seção que divide estas células. Estes valores de níveis ponderados na fronteira entre as células têm como limitador o diâmetro da galeria. Os parâmetros desta equação podem ser definidos como:

- $A_{i,k}$ = Área Molhada na seção da galeria que divide as células

- $R_{i,k}$ = Raio Hidráulico na seção da galeria que divide as células

- n = Coeficiente de Manning adotado para a galeria

- Z_k = Nível d'água na célula k

- Z_i = Nível d'água na célula i

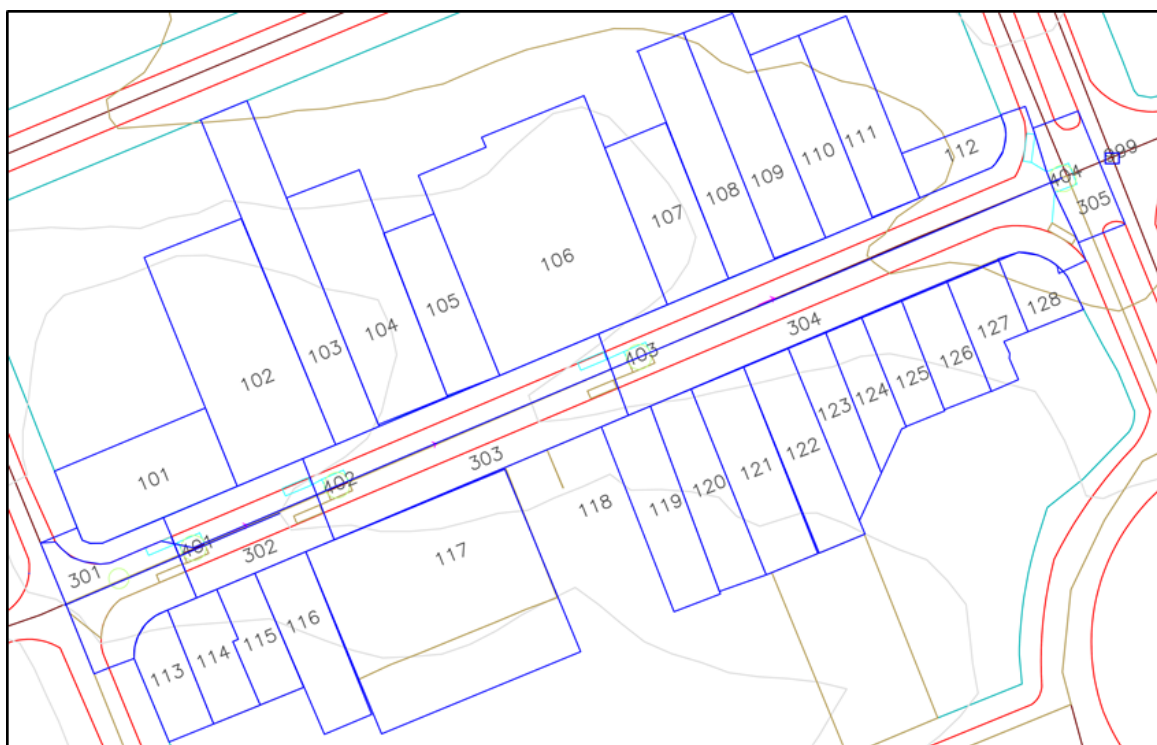


Figura 4: Divisão da área a ser modelada em células de escoamento.

Cenários de modelagem

A avaliação da eficiência de reservatórios individuais para amortecimento de cheias foi realizada pela comparação entre os resultados das simulações de cada concepção de projeto. Inicialmente, foram elaboradas 4 condições para a rede de drenagem, considerando a sua situação atual e três concepções de projeto de reservatórios, além de uma condição de pré-urbanização, utilizada como referência para comparação dos resultados. Seguem os cenários adotados:

✓ **Cenário M0** → Lotes sem reservatórios de detenção

Este cenário foi simulado com as condições atuais do sistema de drenagem da rua Itabaiana, com o lançamento das águas pluviais precipitadas sobre os lotes diretamente na rede de drenagem. Cabe ressaltar que na simulação da situação atual, a rede de drenagem não foi capaz de drenar os escoamentos resultantes da chuva de projeto.

✓ **Cenário M1** → Reservatórios individuais dimensionados para amortecer a chuva crítica da bacia

Essa concepção visa avaliar a situação de reservatórios individuais para controle de escoamentos superficiais, considerando a passagem da água de chuva captada dentro do lote por um pequeno reservatório.

Nesse caso, foram dimensionados reservatórios com volume suficiente para amortecer uma chuva de TR10 anos com duração de 3 horas, referente ao evento crítico para a bacia do Canal do Mangue. Os volumes dos reservatórios foram considerados como sendo numericamente igual a 3% da área total do lote. Esse valor resulta da indicação do *Urban Drainage and Flood Control District* (2008) de se reservar 2,0% da área total da bacia para medidas de detenção das águas pluviais. Porém, segundo a Lei de Parcelamento do Solo Urbano (Lei 6.766/79), no mínimo 35% da área loteada deverá ser doada para áreas públicas, restando 65% para implantação dos lotes. Assim, a consideração de 3% da área do lote para fins de detenção da água pluvial, significa uma parcela de 1,95% da área total da bacia urbana, aproximando-se bastante do valor indicado na literatura. As células de reservatórios receberam essa área e os orifícios de saída foram pré-dimensionados para que o nível d'água máximo dentro do reservatório não fosse superior a 1,0m. O pré-dimensionamento dos reservatórios foi realizado de forma simplificada, com uso de planilha eletrônica, definindo o orifício de descarga de forma que o pico de vazão amortecida fosse o mais próximo possível do pico da vazão de pré-urbanização, considerando a chuva crítica para a bacia do Canal do Mangue, com 180 minutos de duração.

A Tabela 1 apresenta os valores de volume e diâmetro do orifício de saída resultantes do pré-dimensionamento dos reservatórios de lote, assim como as vazões de pré-urbanização e amortecida pelo reservatório, comparando esses valores. Nota-se que não foi possível restabelecer os picos de vazão pré-urbanização para todos os lotes, resultando em um incremento de vazão total, considerando a soma de todos os lotes, de 53% após a urbanização, mesmo com o uso dos lotes.

Tabela 1: Pré-dimensionamento dos reservatórios, para o Cenário M1.

Lote	Volume do Reservatório (m³)	Orifício (cm)	Vazão pré-urbanização (L/s)	Vazão amortecida (L/s)	Incremento (%)
101	16,6	5,0	4,86	5,12	5%
102	31,15	7,0	5,43	9,93	83%
103	20,53	5,5	2,94	6,23	112%
104	22,32	6,0	3,78	7,26	92%
105	11,57	4,5	2,47	4,01	62%
106	48,6	8,5	8,86	14,85	68%
107	13,39	4,5	2,88	4,14	44%
108	14,55	5,0	2,5	4,97	99%
109	15,76	5,0	2,77	5,06	83%
110	12,24	4,5	2,39	4,06	70%
111	12,1	4,5	2,4	4,05	69%
112	5,53	3,0	1,88	1,81	-4%
113	6,72	3,5	1,71	2,41	41%
114	7,6	3,5	1,99	2,47	24%
115	6,62	3,5	1,64	2,40	46%
116	11,22	4,0	2,4	3,33	39%
117	51,06	8,5	12,12	15,05	24%
118	24,51	6,0	4,83	7,42	54%
119	12,31	4,5	2,45	4,07	66%
120	11,18	4,0	2,11	3,32	57%
121	14,22	4,5	2,86	4,21	47%
122	11,83	4,5	2,28	4,03	77%
123	8,01	3,5	1,75	2,50	43%
124	6,33	3,0	1,72	1,87	9%
125	6,08	3,0	1,58	1,85	17%
126	10,08	4,0	2,17	3,24	49%
127	6,72	3,5	1,87	2,41	29%
128	4,73	3,0	1,07	1,75	64%
Soma dos picos			87,71	133,80	53%

✓ **Cenário M2** → Reservatórios individuais calculados conforme Lei 23.940/2004, da Prefeitura do Rio de Janeiro

Para este cenário, foram dimensionados reservatórios para todos os lotes com área impermeável superior a 500m², conforme estabelecido pela metodologia apresentada na Lei 23.940/2004, adotada pela Prefeitura do Rio de Janeiro. Considerando apenas os lotes que se enquadram dentro desse critério, oito reservatórios seriam exigidos. O volume do reservatório foi calculado segundo a equação (1).

$$V = K \cdot A_i \cdot h \quad \text{equação (1)}$$

Com:

- V - Volume do reservatório (m³);
- K - Coeficiente de abatimento (0,15);
- Ai - Área impermeabilizada (m²) e;
- h - Altura da chuva (0,07m ou 0,06m).

Como o caso em estudo está localizado no bairro do Grajaú, dentro da Área de Planejamento 2 (AP2), a altura de chuva utilizada no dimensionamento é de 0,06 m. Foi verificado em campo que todos os lotes possuem área permeável muito pequena, sendo assim, os lotes foram considerados totalmente impermeabilizados. Os volumes dos reservatórios de lote e as áreas dos orifícios de descarga de fundo dimensionados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Volumes dos reservatórios de amortecimento para os lotes com área superior a 500m².

Lote	Área (m ²)	Volume do Reservatório (m ³)	Área do orifício (m ²)	Lote	Área (m ²)	Volume do Reservatório (m ³)	Área do orifício (m ²)
101	553,33	4,98	0,002452	106	1620,00	14,58	0,007179
102	1038,47	9,35	0,004602	109	525,33	4,73	0,002328
103	684,27	6,16	0,003032	117	1701,87	15,32	0,007542
104	744,02	6,70	0,003297	118	816,89	7,35	0,003620

✓ **Cenário M3** → Reservatórios individuais dimensionados para restabelecer as vazões de pico de pré-urbanização

Foram dimensionados reservatórios visando restabelecer a vazão natural gerada pelos lotes antes da urbanização. Este cenário busca retirar a responsabilidade dos lotes do incremento de vazões da rede de águas pluviais. Os lotes pré-dimensionados para este cenário, utilizando a mesma metodologia do cenário M1, apresentaram valores numéricos do seu volume (m³) entre 5% e 7% em relação ao valor numérico das áreas (m²) dos seus respectivos lotes. Tabela 3, é possível observar os volumes encontrados para cada reservatório de lote, no pré-dimensionamento.

Tabela 3: Pré-dimensionamento dos reservatórios, para o Cenário M3.

Lote	Volume do Reservatório (m ³)	Orifício (cm)	Vazão pré-urbanização (L/s)	Vazão amortecida (L/s)	Incremento (%)
101	22,13	5,0	4,86	4,86	0,06%
102	41,54	5,5	5,43	5,43	0,05%
103	27,37	4,0	2,94	2,94	0,02%
104	29,76	4,5	3,78	3,78	0,06%
105	15,42	3,5	2,47	2,47	0,03%
106	64,80	7,0	8,86	8,86	0,04%
107	17,85	4,0	2,88	2,88	0,02%
108	19,40	3,5	2,5	2,50	0,01%
109	21,01	4,0	2,77	2,77	0,02%
110	16,32	3,5	2,39	2,39	0,10%
111	16,14	3,5	2,4	2,40	0,06%
112	7,38	3,0	1,88	1,88	0,10%
113	8,96	3,0	1,71	1,71	0,04%
114	10,13	3,5	1,99	1,99	0,03%
115	8,83	3,0	1,64	1,64	0,01%
116	14,96	3,5	2,4	2,40	0,00%
117	68,07	8,0	12,12	12,12	0,02%
118	32,68	5,0	4,83	4,83	0,01%
119	16,42	3,5	2,45	2,45	-0,02%
120	14,91	3,5	2,11	2,11	0,01%
121	18,97	4,0	2,86	2,86	0,05%
122	15,77	3,5	2,28	2,28	0,01%
123	10,68	3,0	1,75	1,75	0,01%
124	8,44	3,0	1,72	1,72	0,07%
125	8,10	3,0	1,58	1,58	0,00%
126	13,45	3,5	2,17	2,17	0,04%
127	8,95	3,0	1,87	1,87	-0,07%
128	6,31	2,5	1,07	1,07	0,01%
Soma dos picos			87,71	87,74	0,03%

Considerando as condições da rede de drenagem, com e sem reservatórios de lote, foram montados os cenários de simulação, com duas chuvas de projeto (TR de 10 e 25 anos), resultando em um total de 7 cenários, como descrito na Tabela 4. Foi simulado também o evento hidrológico com tempo de recorrência de 25 anos para a condição de projeto M1, a qual apresentou boa resposta, como será abordado posteriormente, no intuito de se avaliar o impacto do uso dos reservatórios em chuvas críticas para a rede de macrodrenagem.

Tabela 4: Cenários de simulação do sistema de drenagem da Rua Itabaiana.

Condição da rede	Tempo de Recorrência do evento hidrológico	Reservatório de lote
Pré-urbanização	10 anos	--/--
	25 anos	
Rede existente	10 anos	M0 – sem reservatório
		M1 – amortecimento chuva crítica
		M2- amortecimento pela Lei 23.940/2004
	M3 – restabelecimento da vazão pré-urbanização	
25 anos	M1 – amortecimento chuva crítica	

Hidrologia

Para elaboração das chuvas de projeto, utilizadas nas simulações da rede de drenagem da Rua Itabaiana, foi considerado o documento “Instruções Técnicas para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamento Hidráulico de Sistemas de Drenagem Urbana”, da Subsecretaria de Gestão de Bacias Hidrográficas – RIO-ÁGUAS, Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, de dezembro de 2010.

Nessas instruções técnicas são definidos critérios, parâmetros e coeficientes a serem utilizados em projetos de drenagem na cidade do Rio de Janeiro. A partir dessas definições, foram elaboradas chuvas de projeto com três tempos de recorrência (TR), buscando representar eventos hidrológicos ordinários, que causam transtornos à cidade com mais frequência (TR5 anos), eventos indicados para dimensionamento de projetos de microdrenagem (TR10 anos) e eventos mais extremos considerados em estudos e projetos para dimensionamento da macrodrenagem e controle de inundações na escala da bacia (TR25 anos). A Tabela 5 apresenta os TRs recomendados pela RIO-ÁGUAS.

Tabela 5: Tempos de Recorrência recomendados para projetos de drenagem (RIO-ÁGUAS).

Tipo de drenagem	TR (anos)
Aproveitamento de rede existente – microdrenagem	5
Microdrenagem – drenagem superficial, galerias de águas pluviais.	10
Canais de macrodrenagem não revestidos	10
Canais de macrodrenagem revestidos	25

Definidos os tempos de recorrência, devem ser escolhidas as durações da chuva, de modo a representar eventos críticos de acordo com o projeto. A criticidade de um evento hidrológico está relacionada com o tempo de concentração da bacia ou sub-bacia, uma vez que uma chuva com duração igual ao tempo de concentração tende a resultar em vazões de pico máximas para um determinado tempo de recorrência (RAMOS, 1989). Para definir a duração das chuvas de projeto, são feitas as seguintes considerações:

- Chuva com duração de 12 minutos → representa a chuva crítica para o sistema de microdrenagem local da Rua Itabaiana, de acordo com os parâmetros indicados pela RIO-ÁGUAS, apresentados na Tabela 6 (áreas residenciais com declividade de sarjetas menor que 3%).
- Chuva com duração de 60 minutos → representa a chuva de projeto indicada para dimensionamento de reservatórios de detenção na maioria das leis municipais referentes ao uso de reservatórios de lote.
- Chuva com duração de 180 min → é o tempo de concentração estimado para a Bacia do Canal do Mangue, através da Equação de George Ribeiro, representando a chuva crítica quando considerada toda a bacia hidrográfica.

A Tabela 6 apresenta os tempos de concentração para áreas urbanizadas com diferentes tipologias de áreas a montante.

Tabela 6: Tempos de concentração para áreas urbanizadas (RIO-ÁGUAS).

Tipologia da área a montante	Declividade da sarjeta	
	< 3%	> 3%
Áreas de construções densas	10 min	7 min
Áreas residenciais	12 min	10 min
Parques, jardins, campos	15 min	12 min

Dessa forma, a definição da duração da chuva de projeto buscou representar um evento hidrológico que abrangesse todas essas características, optando-se por uma chuva de 180 minutos distribuída no tempo, em intervalos iguais de 12 minutos. Essa configuração garante a avaliação integrada de eventos com criticidade para diversas escalas, apresentando intensidades parciais críticas para as durações de 12 e 60 minutos, além do total de 180 minutos.

As intensidades e alturas de chuva foram estimadas utilizando as equações de chuvas intensas (IDF) indicadas pela RIO-ÁGUAS para o município do Rio de Janeiro, definida pela equação (2).

$$i = \frac{a \cdot TR^b}{(t+c)^d} \quad \text{equação (2)}$$

Com:

- i = intensidade pluviométrica em mm/h;
- TR = tempo de recorrência em anos;
- t = tempo de duração da precipitação em minutos.
- a, b, c e d são valores dos coeficientes definidos conforme área de influência.

O estudo de caso em questão, situado no bairro do Grajaú, está localizado dentro da área de influência do posto pluviométrico da estação Sabóia Lima, como ilustrado na Figura 5. Para esse posto, os coeficientes da equação IDF são:

$$a = 1.782 \quad b = 0,17 \quad c = 16,6 \quad d = 0,841$$

Aplicando-se a equação IDF, com os coeficientes do Posto Sabóia Lima, tem-se a forma apresentada na equação (3).

$$i = \frac{1.782 \cdot TR^{0,17}}{(t+16,6)^{0,841}} \quad \text{equação (3)}$$

A partir da equação (3), considerando os tempos de recorrência de 10 e 25 anos e utilizando o método dos blocos alternados para a distribuição temporal do evento, chega-se às chuvas de projeto utilizadas na modelagem do sistema, apresentadas na Figura 6.

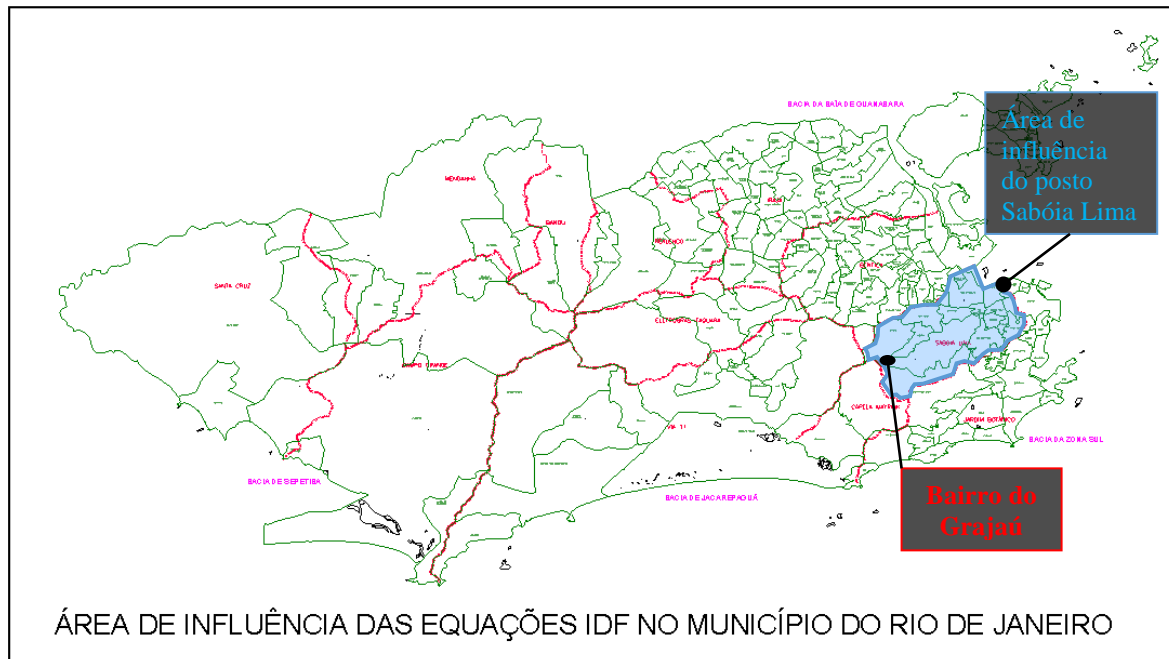


Figura 5: Localização do Bairro do Grajaú dentro da área de influência do Posto Sabóia Lima.

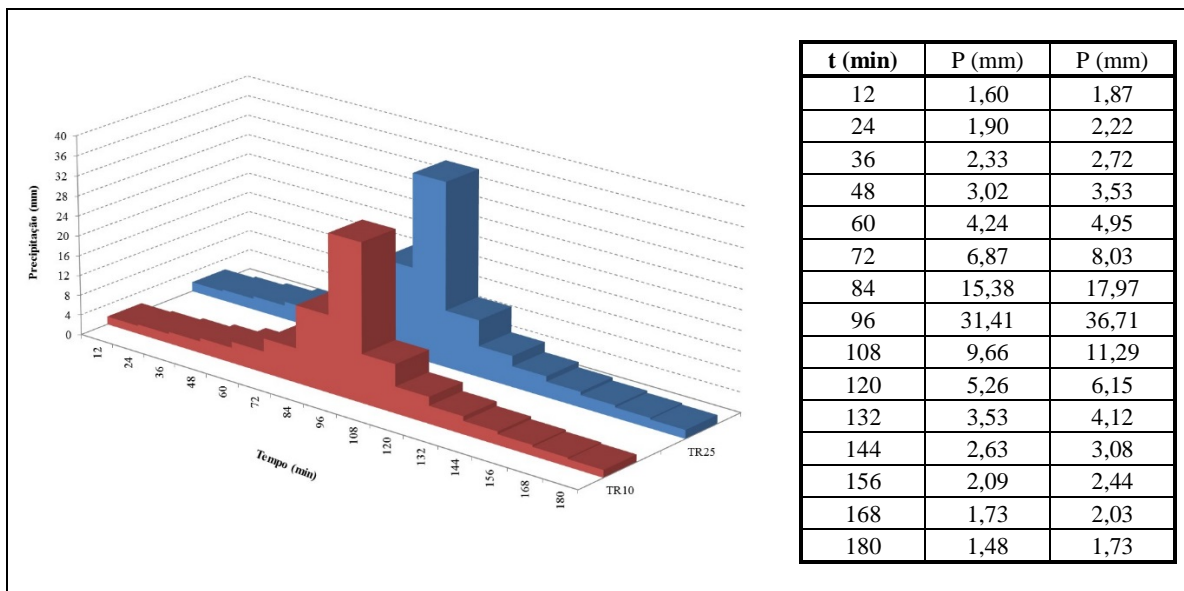


Figura 6: Chuvas de projeto utilizadas na modelagem hidrológico-hidrodinâmica.

RESULTADOS OBTIDOS

A primeira simulação, cenário M0, buscou diagnosticar o funcionamento da rede existente, considerando o evento hidrológico de projeto com tempo de recorrência de 10 anos. O resultado mostrou um subdimensionamento da rede, com extravasamento dos poços de vista PV403 e PV404, como pode ser visto no perfil longitudinal com níveis d'água máximos da rede, apresentado na Figura 7

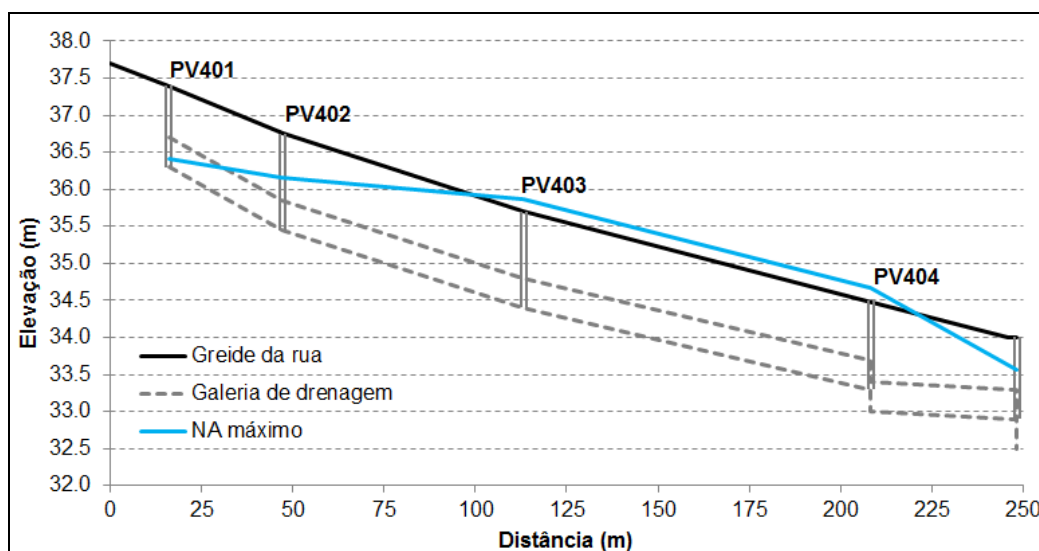


Figura 7: Perfil longitudinal da rede de drenagem existente e níveis d'água máximos para chuva com TR10 anos e duração de 180 minutos.

Para avaliar o aumento de vazões geradas após a urbanização da área, foi comparada a soma dos hidrogramas de saída da rede e sobre as ruas com o hidrograma de cheia do cenário de pré-urbanização. Por essa análise verifica-se um aumento no pico de cheia de 373%, passando de $0,121\text{m}^3/\text{s}$ para $0,573\text{m}^3/\text{s}$, como pode ser observado na Figura 8.

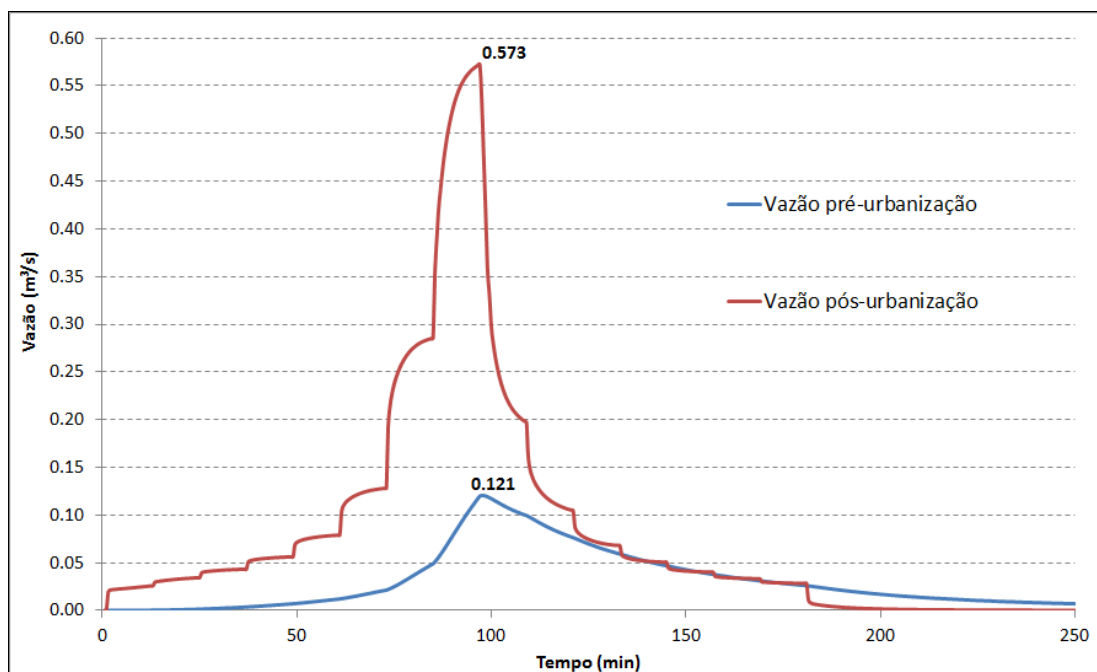


Figura 8: Hidrogramas de cheia para as condições de pré-urbanização e pós-urbanização, considerando a rede existente. Chuva com TR10 anos e duração de 180 minutos.

Após a constatação do subdimensionamento da rede de drenagem existente, foram simulados os cenários com uso de retenção nos lotes (M1, M2 e M3), de forma a se avaliar a eficiência de cada concepção de reservatório para readequar as vazões de cheia à capacidade hidráulica da rede.

Os resultados dessas simulações mostraram que apenas as concepções adotadas nos cenários M1 e M3 foram capazes de reduzir as vazões de pico de cheias geradas nos lotes suficientemente para adequá-las à rede existente. O perfil longitudinal da rede, apresentado na Figura 9, mostra os níveis d'água máximos para cada um desses cenários.

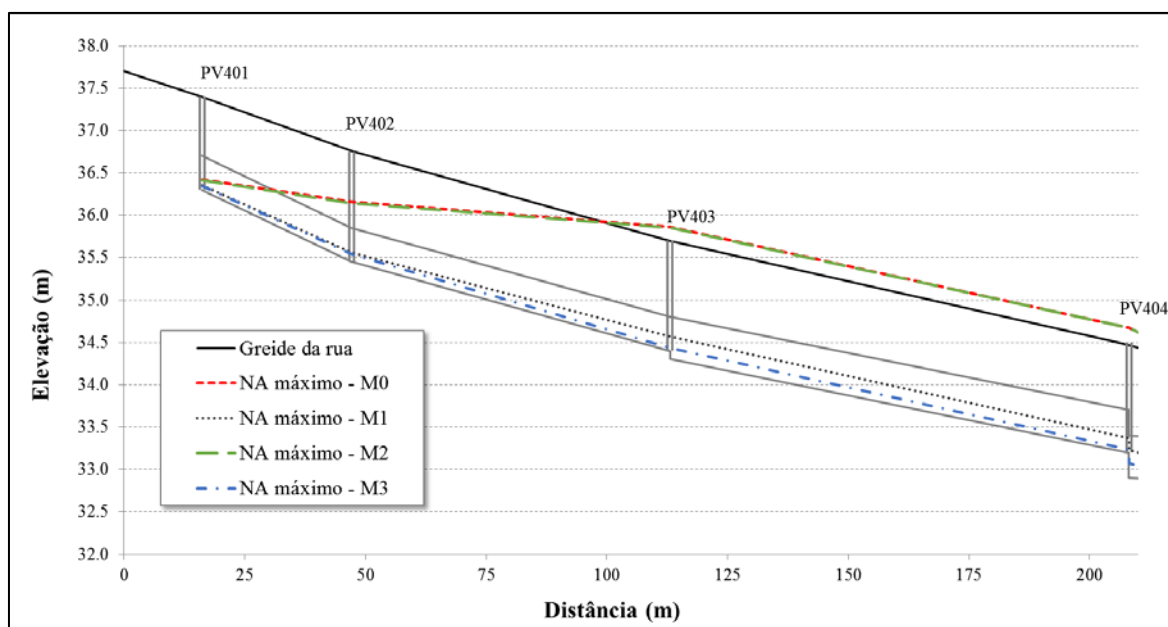


Figura 9: Perfil longitudinal da rede existente, com níveis d'água (NA) máximos para os cenários sem e com reservatórios. Chuva com TR10 anos e duração de 180 minutos.

Nota-se que o uso dos reservatórios adotados em M2 apresentaram efeito irrelevante para a situação atual da rede, com os poços de visita PV403 e PV404 ainda apresentando extravasamento para a rua. Observa-se, também, que apenas a concepção de projeto de reservatórios de retenção simulada no cenário M1 foi capaz de recondicionar os escoamentos pluviais para a chuva com TR de 10 anos de forma viável, uma vez que o cenário M3 apresenta reservatórios de lote com difícil implementação devido a suas dimensões. Dessa forma, foi simulado o cenário M1 considerando a chuva de TR25 anos. O efeito de amortecimento dos reservatórios também permite que a rede existente tenha um bom funcionamento durante a chuva de projeto de TR25 anos, apesar de haver uma sobrecarga no PV404, como apresentado no perfil da Figura 10.

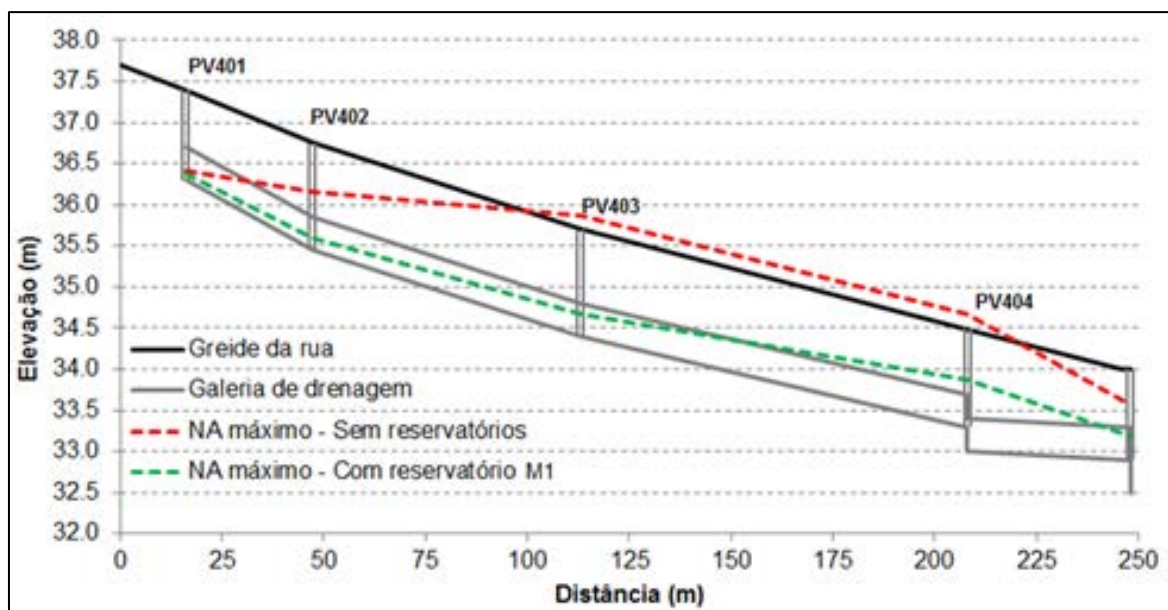


Figura 10: Perfil longitudinal da rede existente com níveis d'água (NA) máximos para os cenários sem e com reservatórios (M1). Chuva com TR25 anos e duração de 180 minutos.

A Tabela 7 apresenta o resumo dos resultados finais de vazão de pico, para todos os cenários simulados, com uma comparação com a vazão de pico de pré-urbanização.

Tabela 7: Aumento nas vazões totais de saída do sistema nos cenários de pré-urbanização para pós-urbanização, SEM e COM uso dos reservatórios de lote. Chuva com TR10 anos e duração de 180 minutos.

Pré-urbanização	Pós-urbanização							
	M0		M1		M2		M3	
Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	Δ	Q (m ³ /s)	Δ	Q (m ³ /s)	Δ	Q (m ³ /s)	Δ
0,121	0,576	376%	0,283	134%	0,564	366%	0,237	96%

Na Figura 11 estão apresentados os hidrogramas de vazão de saída da rede de drenagem em sua situação existente somados ao escoamento superficial sobre a rua, resultantes das chuvas de projeto, com TR's 10 e 25 anos, sem considerar o uso de reservatórios de lote e considerando o uso segundo dimensionamento do cenário M1. Observa-se, nesses hidrogramas, o efeito do extravasamento dos reservatórios, quando considerada a chuva com TR25 anos, resultando em um aumento acentuado do pico de cheia.

Quando observadas as vazões de saída do sistema, resultantes da simulação da chuva com TR10 anos no modelo com reservatórios do cenário M3, é possível notar que parte do amortecimento dos reservatórios se dilui no resultado final, que considera também os escoamentos superficiais sobre a rua.

Assim, mesmo com os reservatórios pré-dimensionados para que a vazão de pico se iguale à condição de pré-urbanização, o amortecimento final do sistema ainda apresenta uma intensificação do pico, de aproximadamente 97%, como pode ser visto na Figura 12, situação bem diferente quando observado o amortecimento alcançado pelo reservatório no próprio lote, apresentado no gráfico da Figura 13.

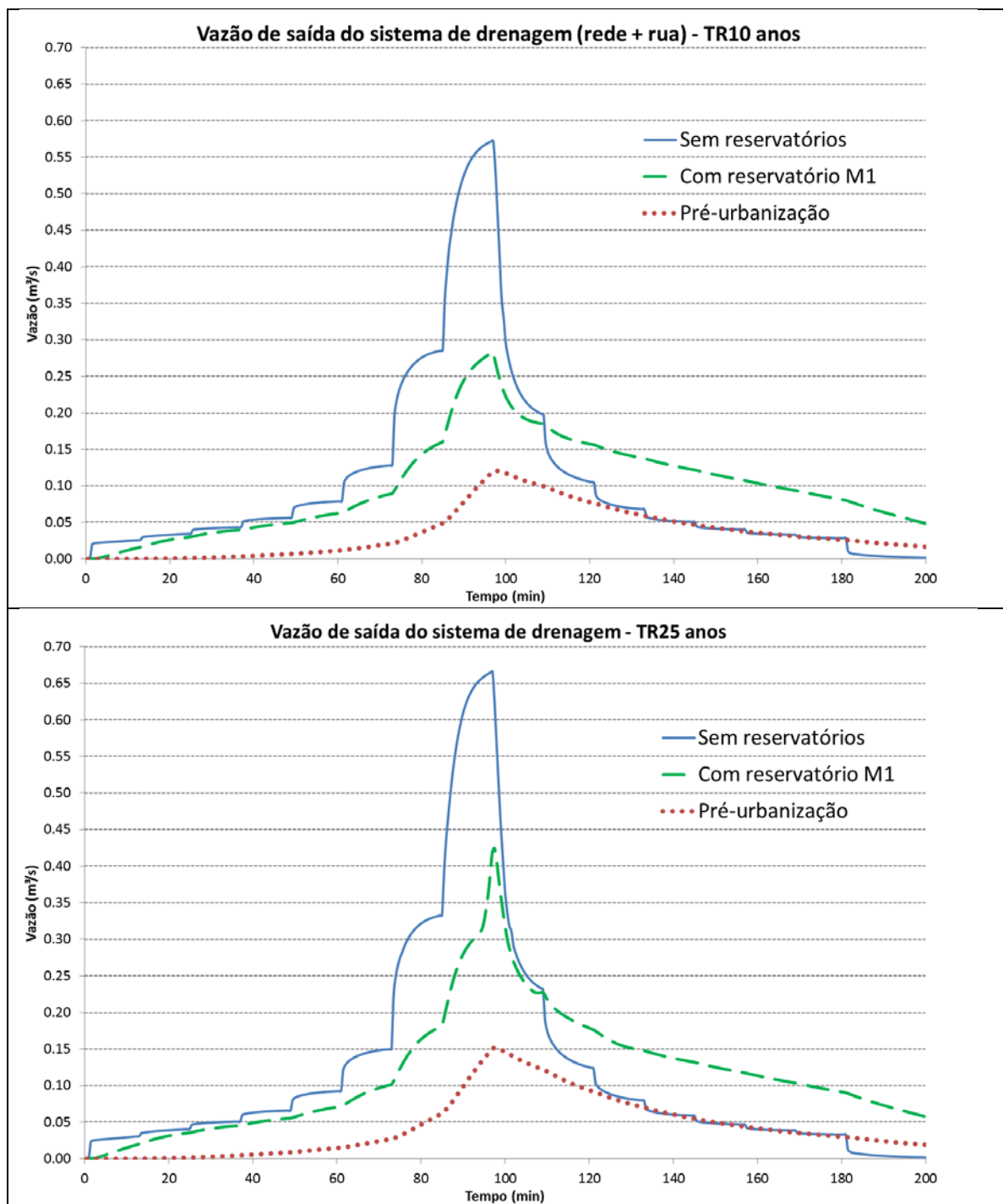


Figura 11: Hidrogramas de saída da rede de drenagem, em sua condição existente, mais o escoamento superficial sobre a rua, sem e com uso de reservatórios de lote do cenário M1. Chuvas com TR 10 e 25 anos e duração de 180 minutos.

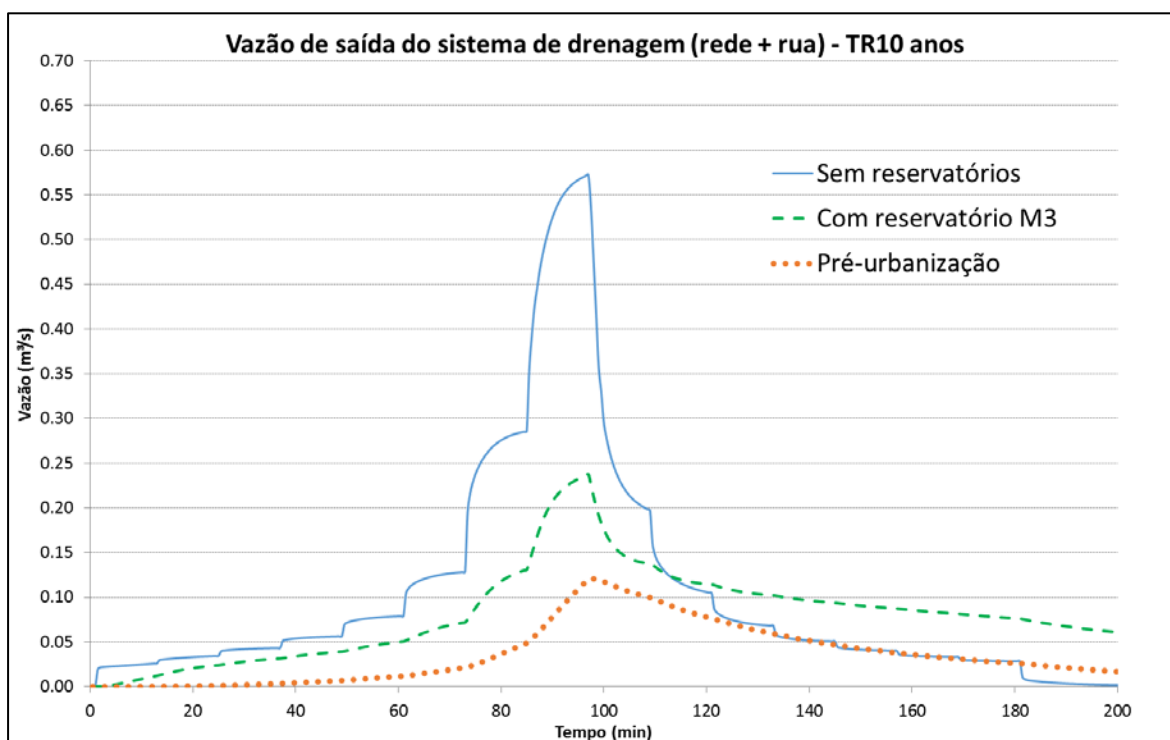


Figura 12: Hidrogramas de saída da rede de drenagem, em sua condição existente, mais o escoamento superficial sobre a rua, sem e com uso de reservatórios de lote do cenário M3. Chuva com TR 10 anos e duração de 180 minutos.

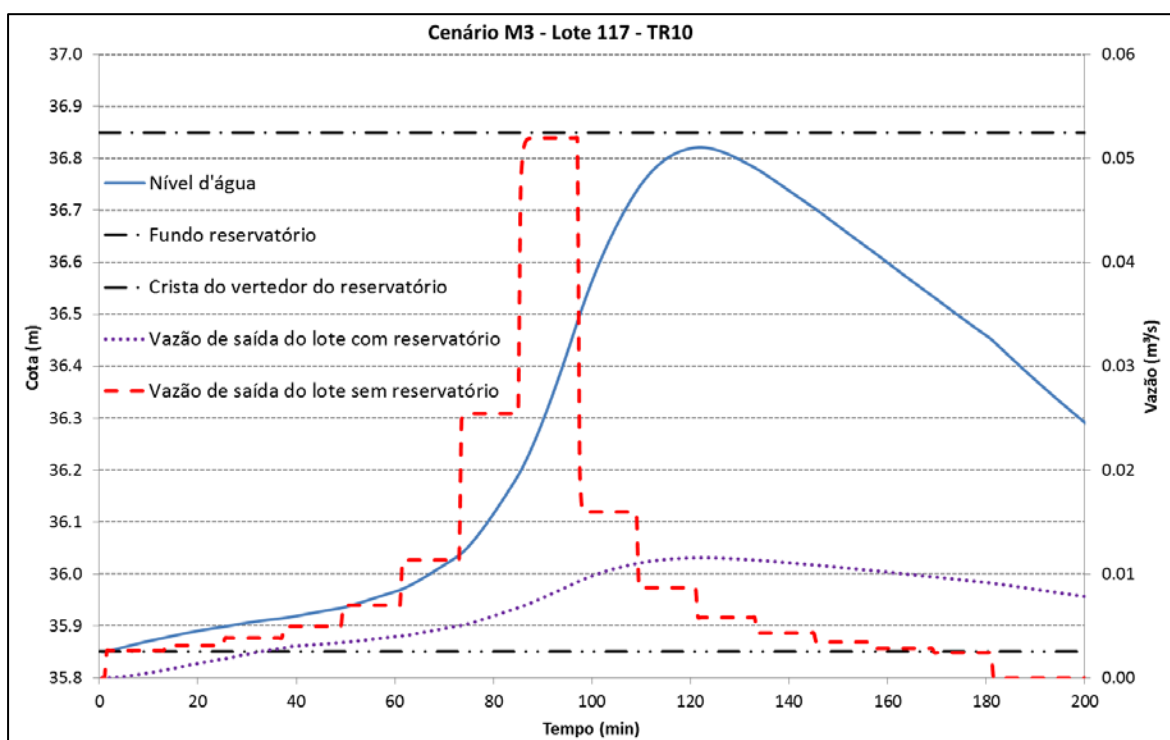


Figura 13: Funcionamento do lote representado pela célula 117, sem e com uso de reservatórios de lote do cenário M3. Chuva com TR 10 anos e duração de 180 minutos.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A avaliação dos resultados obtidos nesse estudo permite observar o efeito de diferentes técnicas de dimensionamento de reservatórios de lote no funcionamento de uma rede de drenagem. No presente estudo, a rede não apresenta capacidade hidráulica suficiente para condução dos escoamentos resultantes de uma chuva com 10 anos de tempo de recorrência, indicando um possível subdimensionamento da galeria.

Observando os resultados de nível d'água ao longo da galeria de drenagem, nota-se que os critérios de dimensionamento de reservatórios de lote adotados na Lei 23.940/2004, da Prefeitura do Rio de Janeiro, não garantem o restabelecimento dos escoamentos da galeria, uma vez que apenas construções que possuam 500m² ou mais de área impermeabilizada deverão adotar o reservatório de lote. Tal condição restringiu o uso de reservatórios apenas em oito lotes da rua, de um total de vinte e oito lotes. Isolando o resultado de um desses lotes com reservatório dimensionado segundo os critérios indicados na lei, é possível observar que há extravasamento do reservatório (Figura 14), anulando qualquer possível efeito de amortecimento. Esse resultado indica que o dimensionamento simplificado, de acordo com a lei, que considera um evento de 1 hora de duração, não garante proteção para um evento pluviométrico crítico para toda a bacia, com duração maior.

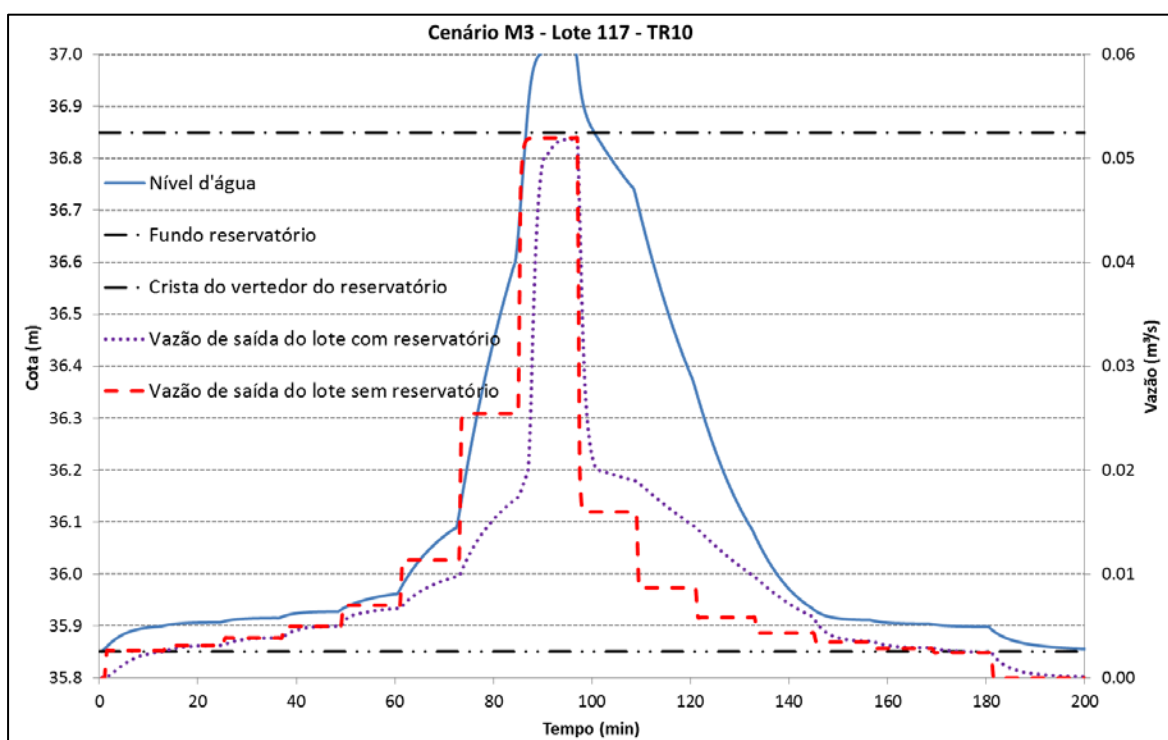


Figura 14: Funcionamento do lote representado pela célula 117, sem e com uso de reservatório de lote do cenário M2. Chuva com TR 10 anos e duração de 180 minutos.

Por outro lado, os dimensionamentos dos reservatórios considerados nos cenários M1 e M3 possibilitaram um excelente efeito de amortecimento nas vazões geradas nos lotes, alcançando resultados de 72% e 78%, respectivamente, como pode ser visto na Figura 15.

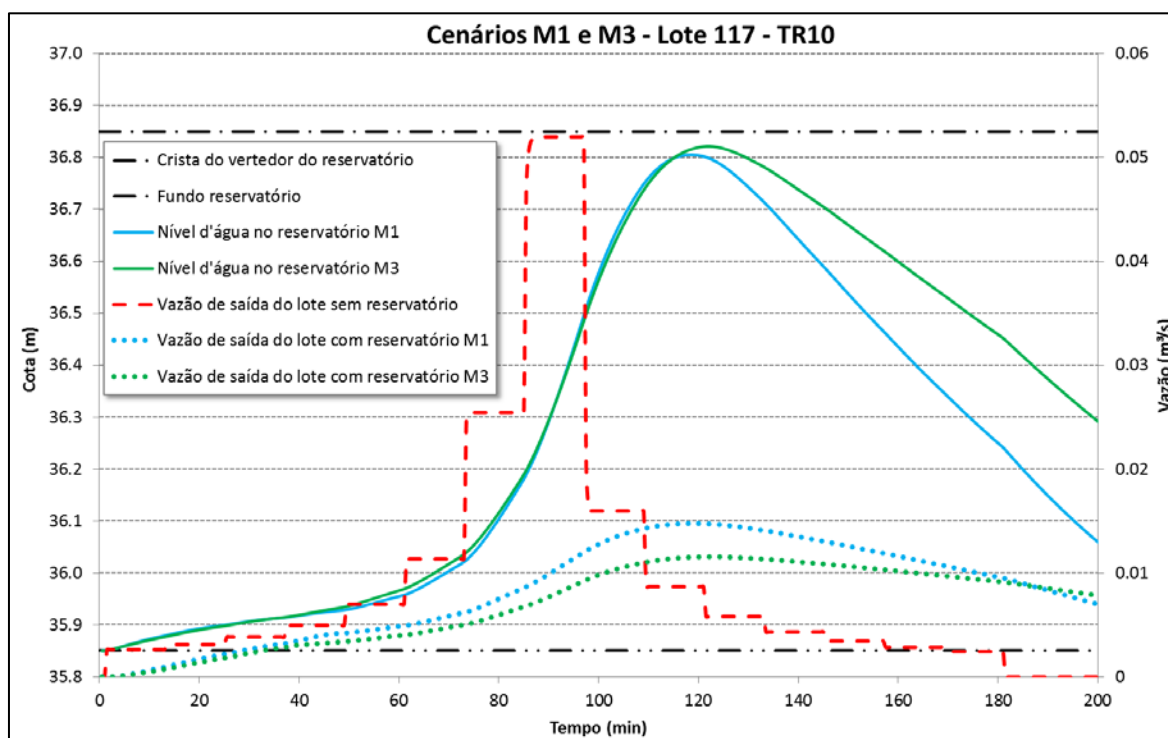


Figura 15: Funcionamento do lote representado pela célula 117, sem e com uso de reservatórios de lote dos cenários M1 e M3. Chuva com TR 10 anos e duração de 180 minutos.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

A recuperação dos padrões de escoamento pré-urbanização requer um investimento muito alto em técnicas compensatórias, porém, é clara a importância de que a recuperação das características originais da bacia hidrográfica deve nortear projetos de drenagem de águas pluviais. Vale ressaltar, também, que o controle total das inundações não é algo alcançável pelos projetistas e que os projetos de drenagem devem visar minimizar as consequências das inundações (TUCCI, 2004).

A modelagem hidrológico-hidrodinâmica do sistema de drenagem da rua Itabaiana, no Grajaú, permitiu observar que, para obtenção de efeitos significativos nos padrões de escoamento, resultantes de chuvas intensas, devem ser dimensionados reservatórios de detenção em lotes com grandes volumes, apresentando volume de armazenagem numericamente igual a cerca de 3% da área total do lote a ser controlado, demandando um alto investimento do proprietário para construção da estrutura. Caso seja desejável a anulação dos efeitos da urbanização do lote, com adoção de um reservatório de detenção capaz de amortecer as vazões com resultado de pico de afluência ao sistema de drenagem igual ao pico de vazão do escoamento superficial em uma condição pré-urbanização, os volumes chegam a representar valores numéricos de até 7% da área total do lote, tornado demasiadamente onerosa a sua construção.

Tomando como referência o lote representado pela célula 117, com área de 1.702m², os volumes de reservatório necessários são 51,26m³, 15,32m³ e 68,07m³, respectivamente para cada um dos cenários simulados, M1, M2 e M3. Apesar do menor volume requerido no cenário M2, calculado segundo a Lei 23.940/2004, da Prefeitura do Rio de Janeiro, o seu funcionamento não é capaz de amortecer a chuva de projeto crítica para a bacia, apresentando resultado nulo, quando considerado um programa de redução de inundações na escala da bacia. Ressalta-se que a lei existente para a cidade do Rio de Janeiro apresenta metodologia de dimensionamento de reservatórios de lote similar à outras leis existentes em municípios brasileiros.

Para maior viabilidade da implantação dos reservatórios de lote é recomendado que políticas de incentivo sejam aplicadas aos loteamentos que aderirem técnicas compensatórias para o sistema de manejo de águas pluviais, reduzindo parte de sua contribuição ao sistema de drenagem público.

Outro aspecto importante diz respeito ao efeito final da implantação dos reservatórios de lote no sistema como um todo. A análise dos resultados de vazão no final da rede modelada, considerando os escoamentos na galeria e sobre a rua, mostram que, mesmo para o cenário M3, com grandes reservatórios amortecendo as vazões geradas em cada lote chegando a picos de vazão similares à condição de pré-urbanização, indicam que há uma intensificação da vazão, com aumento de 97% no pico. Esse feito ocorre em decorrência da impermeabilização das áreas públicas, calçadas e ruas, que intensificam o escoamento superficial.

Tal resultado indica a necessidade de uma abordagem integrada dos programas de manejo das águas pluviais urbanas, com vistas a reduzir os riscos de inundações, considerando soluções que abranjam tanto as áreas públicas, quanto as privadas, distribuindo, assim, a responsabilidade pelos impactos causados pelo processo de urbanização. Esse equilíbrio de responsabilidades ajuda no próprio processo de educação social da população, que passa a enxergar sua parcela de impactos no sistema urbano, que poderá gerar danos a toda sociedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHAMMED, F. (2017). *A review of water-sensitive urban design technologies and practices for sustainable stormwater management*. *Sustainable Water Resources Management*, p. 1-14. doi:10.1007/s40899-017-0093-8
2. BRASIL. Lei no 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências.
3. LEOPOLD, L.B. (1968). *Hydrology for Urban Land Planning - A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use*, U.S. Geological Survey Circular 554, United States - Department of Interior, Washington, 18p.
4. MIGUEZ, M. G. (2001). *Modelo Matemático de Células de Escoamento para Bacias Urbanas*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro – RJ.
5. MIGUEZ, M. G.; MASCARENHAS, F. C. B.; MAGALHÃES, L. P. C. (2007). *Multifunctional Landscapes for Urban Flood Control in Developing Countries*. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, Volume 2, Issue 2.
6. MIGUEZ, M.G., VERÓL, A.P., REZENDE, O.M. (2015). *Drenagem Urbana: Do Projeto Tradicional à Sustentabilidade*. Rio de Janeiro: Elsevier.
7. RAMOS F.; Et al. (1989) “Engenharia Hidrológica” *Rio de Janeiro: Editora da ABRH*.
8. RIO DE JANEIRO. decreto nº 23.940 de 30 de Janeiro de 2004. Torna obrigatório, nos casos previstos, a adoção de reservatórios que permitam o retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem.
9. TUCCI, C. E. M. (2004). "Hidrologia: ciência e aplicação." *São Paulo: Editora da ABRH*.
10. *URBAN DRAINAGE AND FLOOD CONTROL DISTRICT*, (1999). *Urban Storm Drainage Criteria Manual*, Vol. 3 - *Best Management Practices*, Revisão 2008, *Urban Drainage and Flood Control District*, Denver