

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ANÁLISE DA GERAÇÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL E SOBRECARGA DO SISTEMA DE DRENAGEM DE UM LOTEAMENTO COM DIFERENTES DIVISÕES DE SUB-BACIAS

Gabriel Baia¹; Mariane Kempka²; Caroline Kozak³; Tomás Rodriguez⁴

Abstract: The advancement of urbanization, combined with climate change and soil impermeability, has exacerbated urban drainage problems, such as flooding and water pollution. In this context, hydrological and hydraulic simulation models, such as SWMM (*Storm Water Management Model*), have become essential tools for the planning and management of drainage systems. SWMM allows the representation of surface runoff in urban areas by dividing them in subbasins, considering factors such as land use, topography, and drainage infrastructure. The precise delineation of these subbasins is essential, as it directly impacts the reliability of the simulation results. This study analyzed three methods of subbasins delineation in a residential development construction in Paraná: Proposal 01, which separates parcels of lands and streets; Proposal 02, which integrates parcels of lands, sidewalks, and streets; and Proposal 03, which includes gutters and storm drains. The results indicated that the method of subdivision significantly influences both the timing and magnitude of peak flows. Proposal 01 produced higher flows and shorter peak times, resulting in overloaded stormwater galleries and flooding. In Proposal 02, flooding was reduced, although peak flows remained elevated. The more detailed model (Proposal 03), by incorporating additional elements of the actual system, produced a peak time similar to Proposal 02 but with substantially lower peak flows. These findings underscore the importance of refining input data in simulation models to support more accurate and effective taking of decisions by public managers.

Resumo: O avanço da urbanização, aliado às mudanças climáticas e à impermeabilização do solo, tem agravado os problemas de drenagem urbana, como alagamentos e poluição hídrica. Nesse cenário, modelos de simulação hidrológica e hidráulica, como o SWMM (*Storm Water Management Model*), tornam-se essenciais para o planejamento e gestão de sistemas de drenagem. O SWMM permite representar o escoamento superficial em áreas urbanas por meio da divisão em sub-bacias, considerando características como uso do solo, topografia e estrutura da drenagem. A correta definição dessas sub-bacias é fundamental, pois afeta diretamente a precisão dos resultados. O presente estudo analisou três formas de subdivisão de sub-bacias em um loteamento em implantação no Paraná: proposta 01 separando lotes e ruas; proposta 02 integrando lotes, calçadas e ruas; e proposta 03 incluindo sarjetas e bocas de lobo. Os resultados mostraram que a subdivisão influencia o tempo e o pico das vazões simuladas. A proposta 01 apresentou maior vazão e menor tempo de pico e, conseqüentemente, sobrecarga em galerias e alagamentos. Na proposta 02 os alagamentos foram reduzidos, mas os picos elevados se mantiveram. Já o modelo mais detalhado (03), por incluir mais elementos do sistema real, apresentou o tempo de pico semelhante à proposta 2, no entanto, as vazões máximas foram substancialmente menores. Dessa forma, fica evidente a importância do refinamento das informações de entrada nos modelos para uma tomada de decisão mais precisa para os gestores públicos.

Palavras-Chave – drenagem urbana; picos de cheia; lotes e ruas.

1) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Av. Guarapuava, nº 800, CEP 85053-525. Bairro Cidade dos Lagos, Guarapuava - PR. E-mail: gabrielbaia.2003@alunos.utfpr.edu.br.

2) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Av. Guarapuava, nº 800, CEP 85053-525. Bairro Cidade dos Lagos, Guarapuava - PR. E-mail: marianekempka@utfpr.edu.br.

3) Universidade Federal do Paraná. Av. Cel. Francisco H. dos Santos, 100 - Jardim das Américas, Curitiba - PR. carolkozak05@gmail.com

4) Universidad Nacional de Misiones, Argentina. Juan Manuel de Rosas, 325 - Oberá, Misiones, Argentina. Email: dario.rodriguez@fio.unam.edu.ar.

INTRODUÇÃO

Devido à rápida urbanização e industrialização, diversas mudanças ocorrem nos sistemas hidrológicos das bacias hidrográficas, principalmente associadas à impermeabilização do solo e a otimização hidráulica dos sistemas naturais de drenagem, como por exemplo retificações em canais. O resultado é um aumento no volume e na vazão do escoamento (Zoppou 2001), além de impulsionar processos erosivos e a poluição hídrica. Somadas às mudanças climáticas e a heterogeneidade dessas bacias, as vazões dos rios são diretamente impactadas (Devia, Ganasri e Dwarakish 2015). Ademais, a alteração da frequência e a intensidade das precipitações, que resultam em enchentes e alagamentos, tem se tornado cada vez mais recorrentes e devastadoras (Chan e Zhang, 2019; Zhai et al., 2020; Moustakis et al., 2021; Wang et al., 2023). Outro aspecto que agrava ainda mais os cenários reside na falha dos sistemas de drenagem devido a problemas de manutenção, acúmulo de sedimentos nos elementos do sistema, aumentos na rugosidade do canal e vários outros déficits estruturais e não estruturais.

Neste contexto, os modelos de simulação hidrológica e hidráulica têm desempenhado um papel importante no planejamento e na gestão de sistemas de drenagem urbana, no qual o modelo *Storm Water Management Model* (SWMM) se destaca devido à sua flexibilidade, confiabilidade e disponibilidade gratuita. Os modelos desenvolvidos para simular fluxos de águas pluviais de áreas urbanas diferem dos modelos desenvolvidos para estimar fluxos em áreas rurais, isso porque as bacias urbanas respondem consideravelmente mais rápido à precipitação do que as rurais e são mais complexas por incorporarem a infraestrutura e os acessórios urbanos que facilitam a coleta e transporte do volume excedente. A definição da composição das sub-bacias também é uma etapa crítica no processo de modelagem, pois influencia diretamente a acurácia dos resultados simulados. Assim, a forma como as áreas são distribuídas nas sub-bacias também influencia os resultados, sendo um aspecto importante a considerar na modelagem.

Frente a estas dificuldades, esse trabalho que compõe parte de um projeto de pesquisa e extensão, tem como objetivo desenvolver cenários de simulação de escoamento superficial capazes de identificar pontos críticos de alagamento em diferentes bairros e loteamentos do município de Guarapuava/PR, com foco na avaliação e no aprimoramento dos sistemas de Drenagem e Manejo das Águas Pluviais Urbanas (DMAPU) e para o planejamento de ações corretivas.

MATERIAIS E MÉTODOS

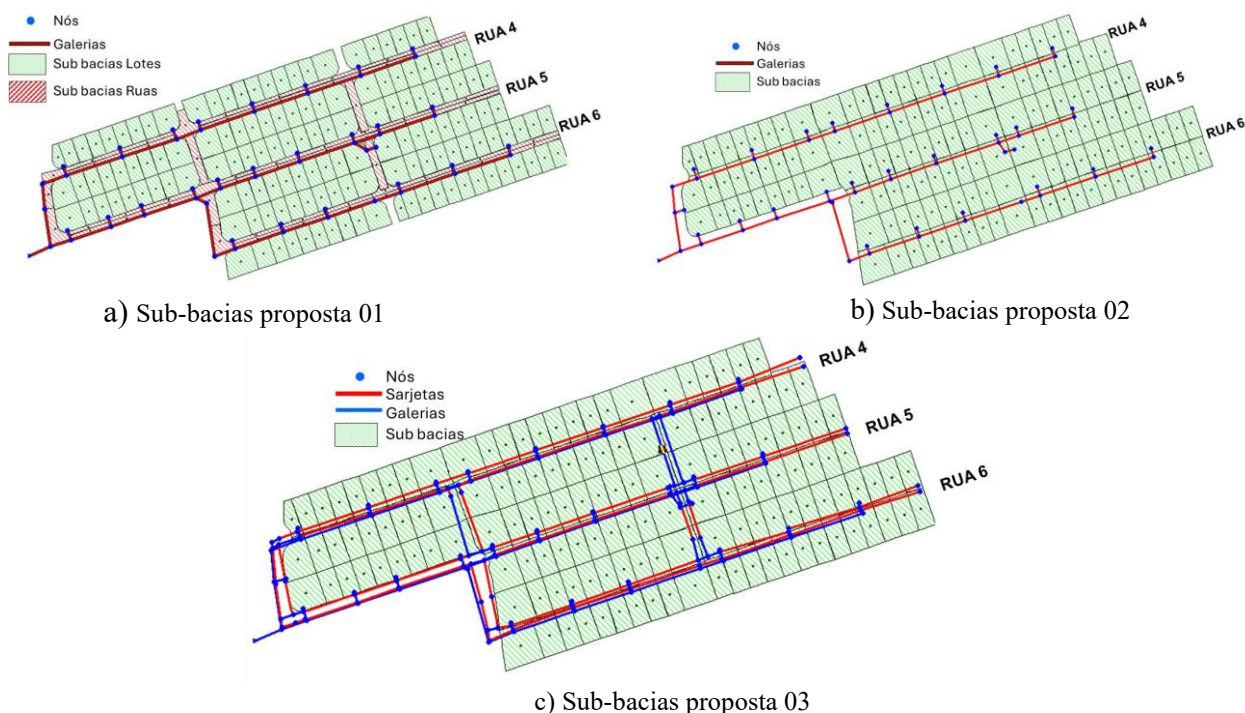
O loteamento objeto de estudo encontra-se em fase de implantação no município Guarapuava/PR, região centro-oeste do estado do Paraná, localizado a aproximadamente 250 km da capital Curitiba. Foi selecionada uma parcela do loteamento, com área total de, aproximadamente, 35 mil m², composto por 148 lotes, sendo 24 deles com área de 295,50 m² e os 124 restantes com área de 225,00 m², e um único exutório E₁. As declividades nessa porção de área variam entre 1% a 13%

Para a definição das áreas das sub bacias foram consideradas três propostas de discretização:

- Proposta 1 (E1_01): a subdivisão das áreas em sub-bacias considera as contribuições individuais dos Lotes e Ruas. Nessa situação, a sub-bacia de lote tem como exutório a sub-bacia da rua, que por sua vez direciona o escoamento aos nós que desaguam nas galerias de drenagem (Figura 1a). A sub bacia Ruas engloba a área de passeio público e a área de faixa gramada.

- Proposta 2 (E1_02): a subdivisão das áreas considera que cada sub-bacia é composta pelo lote em si, as áreas de passeio público e as ruas de seu entorno. Nessa situação, o escoamento é direcionado aos nós que desaguam nas galerias de drenagem (Figura 1b)
- Proposta 3 (E1_03): a subdivisão das áreas em sub-bacias é a mesma a proposta 2 com a inserção de sarjetas e bocas de lobo. Nessa situação, o escoamento é direcionado para sarjetas que direcionam o fluxo para as bocas de lobo e, então, o escoamento chega as galerias. (Figura 1c)

Figura 1 – Propostas de subdivisão das bacias.



a) Sub-bacias proposta 01

b) Sub-bacias proposta 02

c) Sub-bacias proposta 03

Para as propostas 01 e 02, o coeficiente de Manning (n) foi calculado pela média ponderada das áreas, bem como o estabelecimento da impermeabilização. Para o cenário 03, a capacidade das bocas de lobo foi calculada conforme metodologia apresentada por Rodriguez (2018). No quadro 1 estão apresentadas as características dos cenários para cada divisão de sub-bacia propostas.

Quadro 1 – Parâmetros e respectivos valores adotados para as diferentes propostas de simulação

Informação	Proposta_01	Proposta_02	Proposta_03
Precipitação (mm)*	51,9 TR 10 anos		
Modelo de Infiltração	CN Classe hidrológica do solo B		
CN	Lotes: 85 Ruas: 98	85	85
Coeficiente de Manning - $n_{\text{permeável}}$	0,15	0,15	0,15
Coeficiente de Manning - $n_{\text{impermeável}}$	0,028	0,0127	0,0127

continua

continuação

Informação	Proposta_01	Proposta_02	Proposta_03
%impermeabilização	Lotes: 75*** Ruas: 92,6	Lotes Padrão: 77,5 Lotes padrão esquina: 79,1	Lotes Padrão: 77,5 Lotes padrão esquina: 79,1
%Impermeabilização média	79,86	77,75	77,75
Área total (ha)	4,85	4,75	4,75
Profundidade de armazenamentos na área permeável (mm)**	2,54		
Profundidade de armazenamentos na área impermeável (mm)**	1,27		

NOTA: * Calculada a partir da IDF de Guarapuava/PR, utilizando tempo de retorno de 10 anos e tempo de duração da chuva de 60 minutos (GUARAPUAVA, 2023); ** Conforme a recomendação do Manual do SWMM.; ***Adotou-se 75% de impermeabilização dos lotes, taxa máxima permitida pelo Plano Diretor municipal. As demais porcentagens de infiltração foram adotadas conforme o percentual de impermeabilização em cada sub bacia considerando passeio e leito carroçável (impermeável) e faixa gramada (impermeável).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

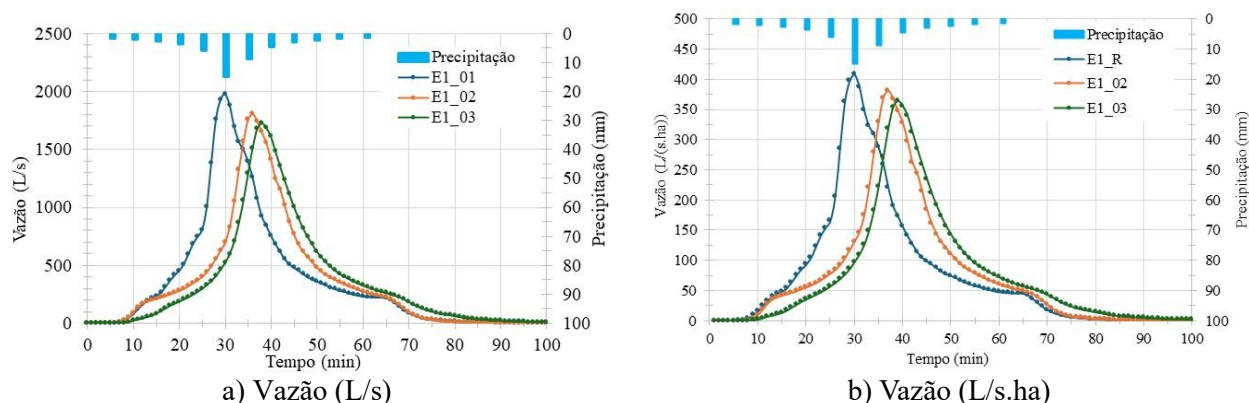
A discretização da área na proposta 01, com a subdivisão em lotes e ruas, resultou em uma área de 4,85 ha, para as propostas 02 e 03 a área total foi de 4,75 ha, isso representa cerca de 2% de diferença entre as áreas.

Para a proposta 01, impermeabilização média da área foi de 79,86%, enquanto nas propostas 02 e 03, o percentual foi de 77,75%, indicando uma diferença entre as áreas permeáveis e impermeáveis de 2,7%. Ambos os critérios de área e porcentagem de área impermeabilizada são parâmetros que influem fortemente na resposta das simulações.

A resposta da simulação para a proposta 01 resultou em uma vazão de pico de 2007,47 L/s e um volume total de 2229 m³. Na proposta 02, a simulação revelou uma vazão de pico de 1838,15 L/s e um volume de 2130 m³ e, para a proposta 03 a vazão de pico foi de 1740,86 L/s e um volume total de 2140 m³. A Figura 2 mostra os hidrogramas para as três propostas de subdivisão e detalhamento, considerando a vazão em L/s e a vazão por hectare

A partir da análise das figuras verifica-se que a diferença entre as vazões e os tempos de pico não sofreu grande interferência da área da bacia. A vazão de pico na área de drenagem E1_01 ocorreu aos 30 minutos e foi 15% maior que em E1_02 e 6% maior que em E1_03. As vazões de pico por hectare são 12,6% maior na proposta 01 e 5% na 02, considerando como base a proposta 03, mais detalhada. A antecipação de pico foi de 6 minutos (E1_01) e 3 minutos (E1_02), em comparação com a proposta mais detalhada. Os tempos de antecipação de pico estão próximos do obtido por Garcia (2005), que obteve uma antecipação média de pico de 5,8 minutos para menor discretização das bacias.

Figura 2 – Hidrogramas no exutório E1 considerando as três propostas a) Vazão (L/s); b) Vazão (L/s.ha).



Avaliação das sarjetas e galerias

A Figura 3 mostra o resultado da simulação no que concerne a capacidade das galerias (altura do escoamento / diâmetro da galeria (h/D)). Na proposta E1_01, o escoamento superficial das sub-bacias Lotes são conduzidos completamente às sub-bacias Ruas, que são descarregadas completamente nos nós, que direcionam o escoamento às galerias de drenagem. É possível observar que algumas galerias operam em sobrecarga ($h/D = 1$), especialmente aquelas mais a montante da Rua 6 e as galerias da Rua 4 (Figura 3). Há alagamento em P3, P4, P5, P6, P5, P6, P7 e P9 com lâminas de água de 0,16 m, 0,32 m, 0,32 m, 0,49 m e 0,39 m, respectivamente, acima do nível do terreno, como pode ser observado na Figura 4a. Há alagamento também em P41, P42, P44, P46, P49 e P50 com lâminas de água acima do terreno de 0,05 m, 0,22 m e 0,09 m e 0,13m, 0,32 m e 0,36 m, respectivamente, conforme evidenciado na Figura 4b.

Figura 3 – Capacidade máxima das galerias e profundidade máxima de água nos nós.

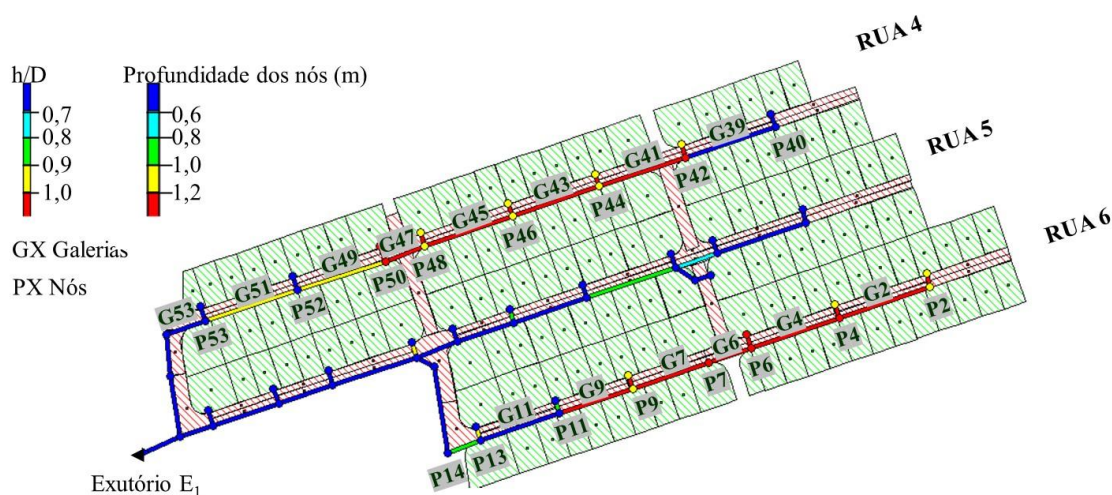
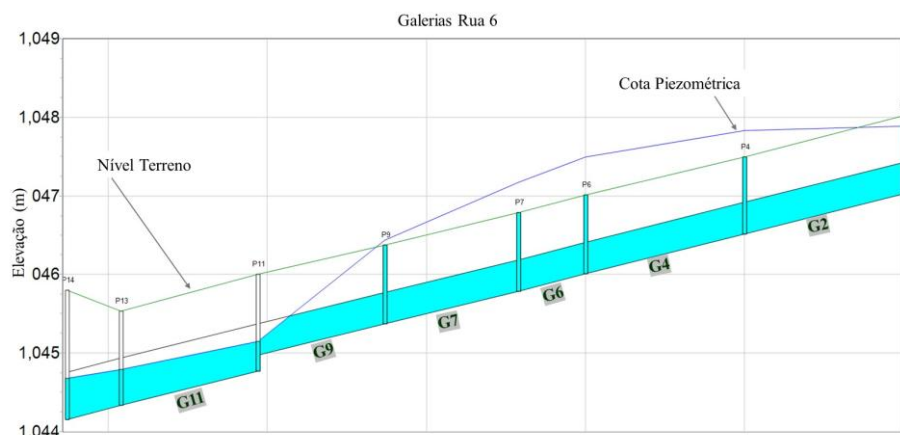
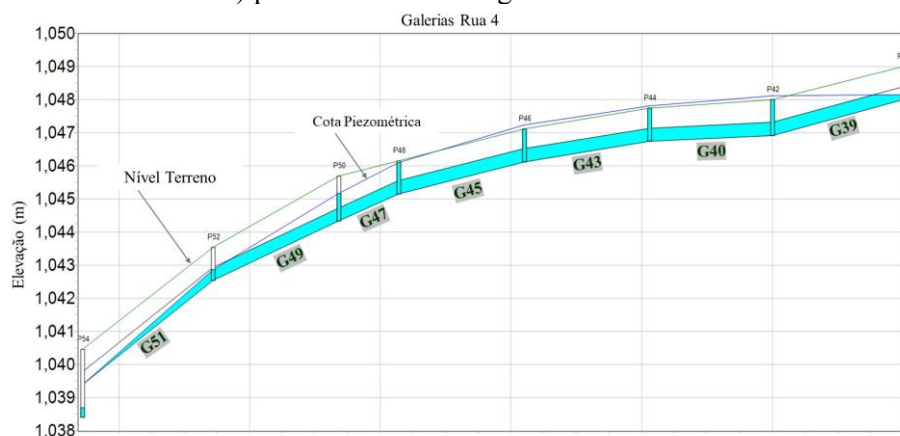


Figura 4 – Capacidade máxima das galerias e profundidade máxima de água nos nós da proposta E1_01, a) perfil hidráulico das galerias da rua 6; b) perfil hidráulico das galerias da rua 4.



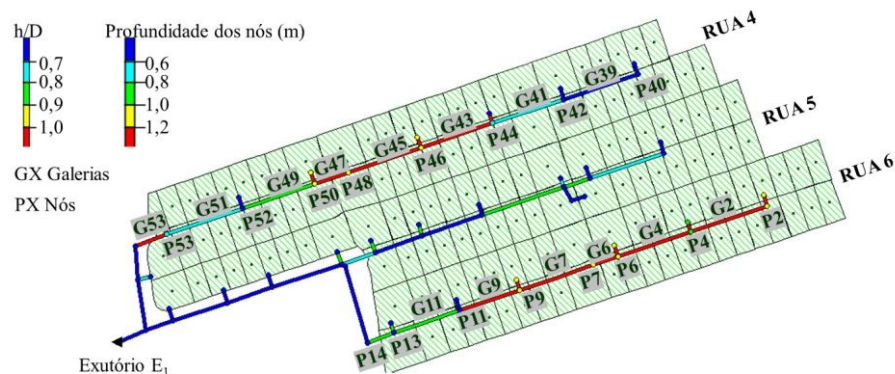
a) perfil hidráulico das galerias da rua 6



b) perfil hidráulico das galerias da rua 4.

A subdivisão realizada na Proposta E1_02 também revela a sobrecarga nas galerias da rua 6 e da rua 4, como pode ser observado na Figura 5. Na Figura 6 podem ser visualizados os perfis hidráulicos das galerias da rua 6 e 4. Verifica-se que nessa situação os níveis atingem a cota do terreno, mas não há alagamento, ou seja, as alturas de água não superam a altura dos PVs.

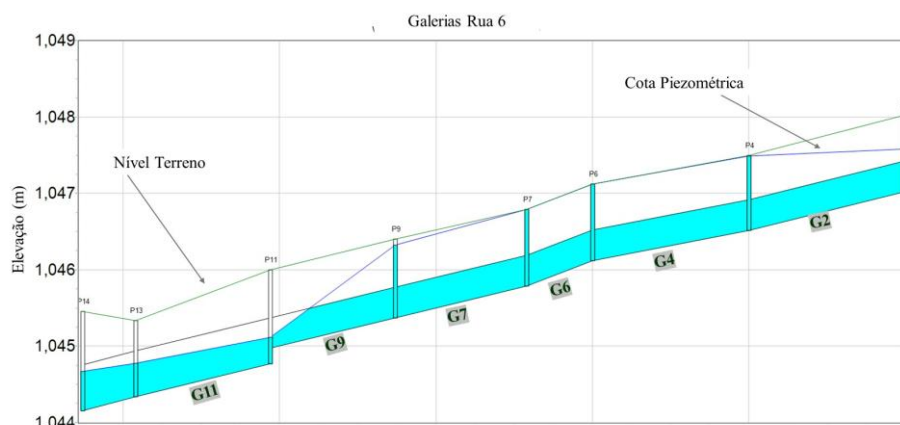
Figura 5 – Capacidade máxima das galerias na proposta E1 02.



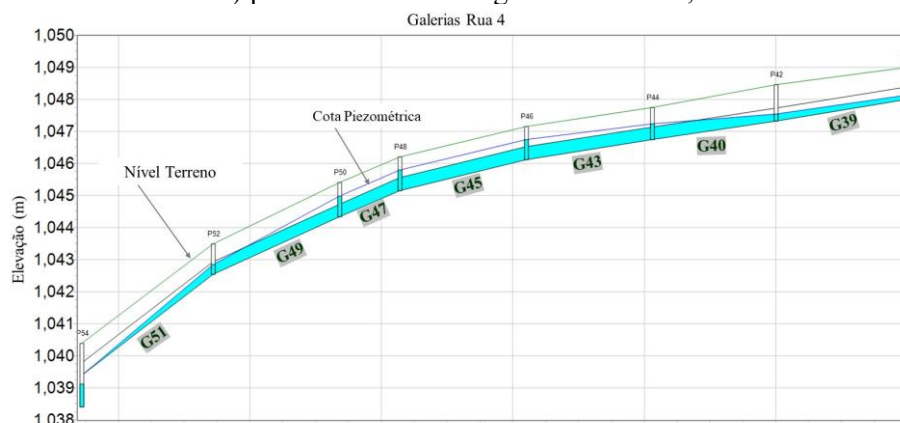
A simulação da proposta mais detalhada, E1_03, que contempla a integração das sarjetas e bocas de lobo, não revela galerias com sobrecarga. O destaque para a maior relação h/D é da galeria G9 que atinge 85% da capacidade da seção transversal.

No que concerne as vazões e tempo de pico, podem ser visualizados na Figura 7 os hidrogramas dos nós a montante na Rua 6. Verifica-se que a divisão das sub-bacias E1_01 implica em um tempo de pico menor que nas demais condições. Essa antecipação ocorre devido ao escoamento ser direcionado diretamente para o nó, corroborado pelo fato de que o pico de vazão ocorre simultaneamente ao pico de chuva, 30 minutos após o início da precipitação. Além disso, de acordo com Garcia (2005) “o aumento na vazão de pico, para bacias com um menor grau de discretização, pode ser explicado pela diminuição do armazenamento presente nos canais da simulação”.

Figura 6 – Capacidade máxima das galerias e profundidade máxima de água nos nós da proposta E1_02.



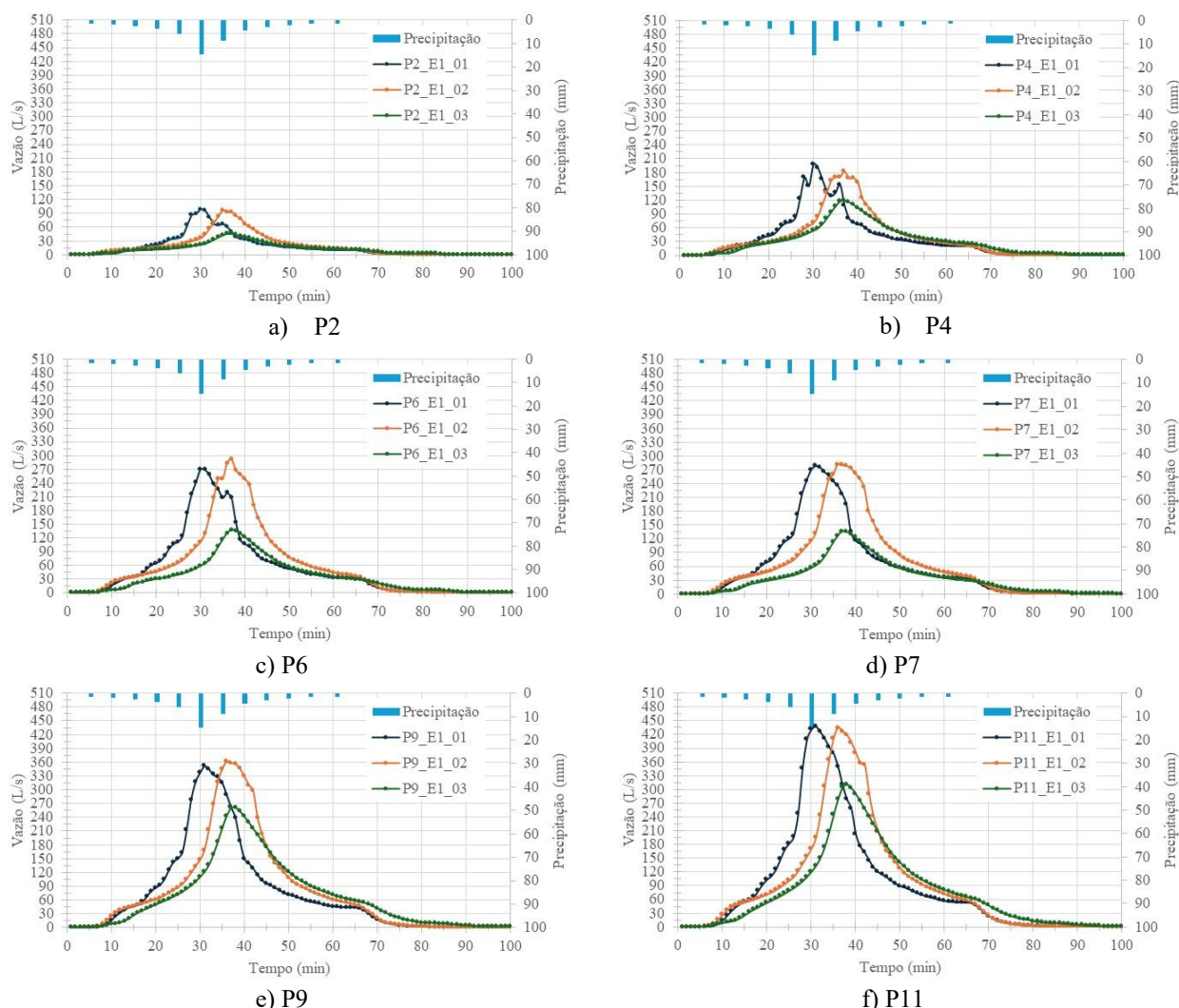
a) perfil hidráulico das galerias da rua 6;



b) perfil hidráulico das galerias da rua 4.

Considerando a divisão das sub bacias E1_02, pode-se visualizar que o tempo de pico ocorre em torno de 5 minutos após o pico de precipitação, e que coincide com o tempo de pico do E1_03. Embora o tempo de pico seja maior na situação E1_02, a vazão e volume não sofrem alterações significativas em relação à proposta 01. Os picos de vazão médios das propostas 01 e 02 são aproximadamente, 40% maiores que na proposta 03, mais detalhada, considerando os nós da rua 6.

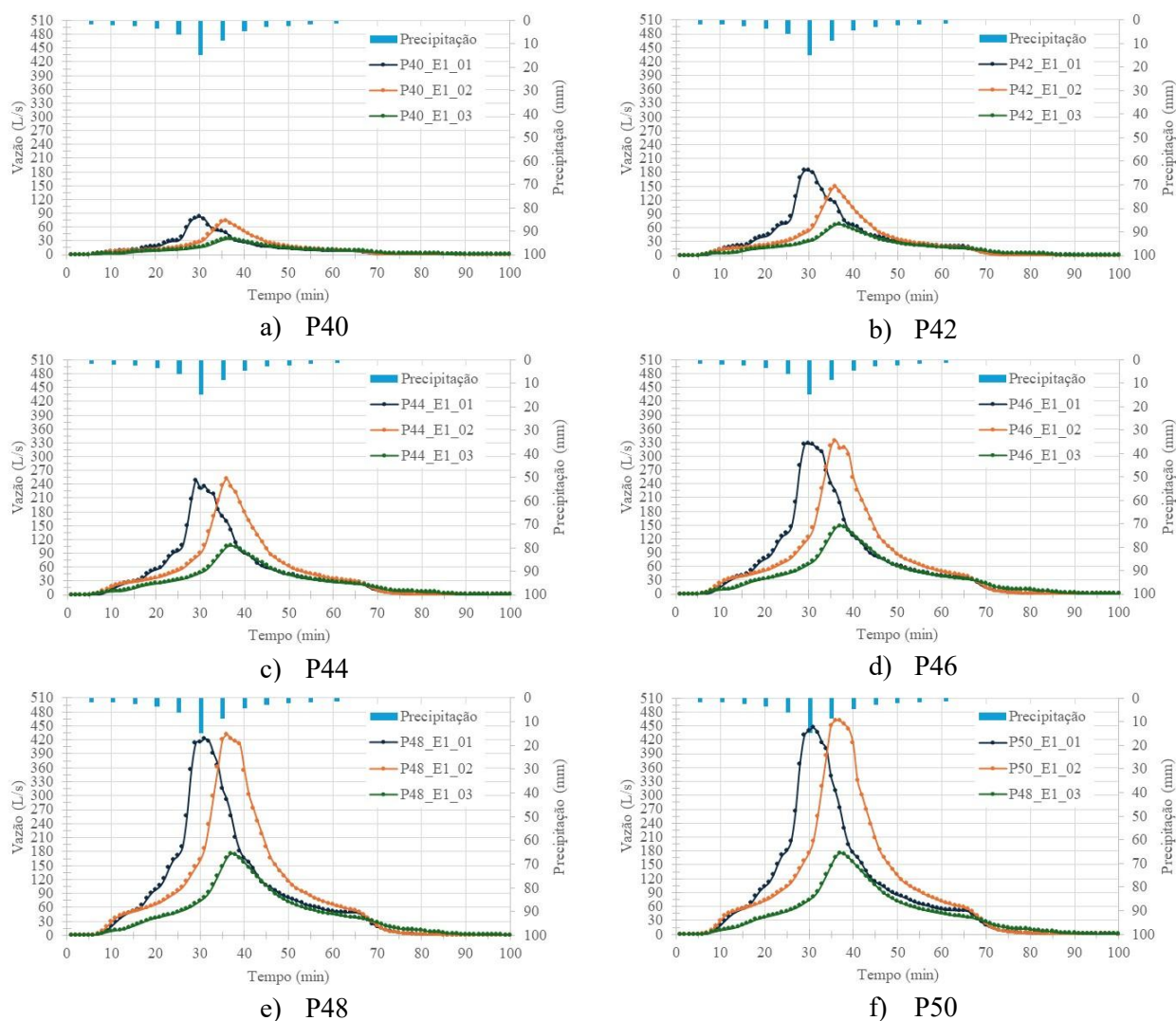
Figura 7 – Hidrogramas dos nós da rua 6, considerando as três propostas (E1_01, E1_02 e E1_03): a) P2; b) P4; c) P6; d) P7; e) P9 e f) P11.



Na Figura 8 são mostrados os hidrogramas dos nós da Rua 4. Em média, os nós P42, P44 e P46 apresentam vazão de pico cerca de 58% maior que na proposta 03 e 56% maior que na proposta 03. O tempo de pico também ocorre aos 30 e 35 minutos, considerando as propostas E1_01 e E1_02, respectivamente.

De acordo com Garcia (2005) subdivisões mais simplificadas ou menos também interferem no coeficiente de Manning, o autor expõe que, em seus estudos, o coeficiente de Manning para áreas impermeáveis em subdivisões detalhadas foi da ordem de 0,025 e para áreas permeáveis, em torno de 0,4. Esses valores diferem substancialmente dos valores adotados nesse trabalho, sendo necessário posteriormente avaliar o impacto da alteração do valor da rugosidade de Manning para a situação exposta neste trabalho. Outro parâmetro importante diz respeito ao tempo de percurso do escoamento quando consideradas as sarjetas e bocas de lobo. No que tange ao armazenamento em depressões, as simplificações podem eliminar tais efeitos.

Figura 8 – Hidrogramas dos nós da rua 4 a) P40; b) P42; c) P44; d) P46; e) P48 e f) P50.



CONCLUSÃO

Diante dos desafios impostos pela crescente urbanização, pelas mudanças climáticas e pelas limitações estruturais dos sistemas urbanos de drenagem, este estudo reafirma a importância da modelagem hidrológica e hidráulica como ferramenta para o planejamento urbano sustentável. A aplicação do SWMM permitiu avaliar o comportamento do escoamento superficial em diferentes configurações de subdivisão de sub-bacias, evidenciando que a definição da estrutura espacial do modelo tem impacto direto na acurácia e realismo dos resultados simulados.

Os testes realizados demonstraram que uma discretização mais simplificada podem superestimar as vazões de pico e antecipar os tempos de resposta, ao passo que configurações intermediárias, como a proposta 02, ainda que revelem volumes e vazões próximos aos do modelo mais detalhado (E1_03), podem apresentar limitações importantes ao não considerar elementos como sarjetas e bocas de lobo. A inclusão desses dispositivos na proposta 03 resultou em um amortecimento do escoamento e eliminação de sobrecargas simuladas nas galerias.

Assim, a escolha do nível de detalhamento na modelagem deve ser compatível com os objetivos do estudo e com os dados disponíveis, priorizando sempre uma representação realista dos elementos

do sistema de drenagem. Modelos excessivamente simplificados podem induzir a diagnósticos incorretos, comprometendo a eficácia das intervenções propostas.

Por outro lado, modelos mais detalhados, embora demandem maior esforço técnico e computacional, contribuem para a tomada de decisões mais precisas e eficazes, especialmente em contextos de planejamento urbano que visem a resiliência e sustentabilidade.

Por fim, é importante destacar que a calibração do modelo é imprescindível para reproduzir de forma confiável os valores e efeitos observados na área, por isso, à medida que o loteamento for avançando nas etapas construtivas deverá ser instalado um pluviógrafo e uma calha Parshall para monitoramento da área e calibração dos modelos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação Araucária pelo apoio financeiro e à prefeitura de Guarapuava.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHAN, J. K. H.; ZHANG, Y. *Urban resilience in the smart city*. In Anais 12th Conference of the international forum on urbanism: Beyond resilience. Jakarta, 24-26 june, 2019. https://www.researchgate.net/publication/334398312_Urban_Resilience_in_the_Smart_City.
- DEVIA, GAYATHRI K., B.P. GANASRI, and G.S. DWARAKISH. (2015). “A Review on Hydrological Models”. Aquatic Procedia 4:1001–7. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.126>.
- GUARAPUAVA. (2022). Plano de Drenagem Relatório Técnico.
- GARCIA, J. I. B. (2005). “Monitoramento Hidrológico e Modelagem Da Drenagem Urbana Da Bacia Hidrográfica Do Arroio Cancela”. Dissertação de Mestrado, Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria.
- MOUSTAKIS, Y.; PAPALEXIOU, S. M.; ONOF, C. J.; PASCHALIS, A. (2021). “Seasonality, Intensity, and Duration of Rainfall Extremes Change in a Warmer Climate”. Earth’s Future 9 (3). <https://doi.org/10.1029/2020EF001824>.
- RODRIGUEZ, D. T. (2018). “Estudio de Dinámica de Los Excedentes Hídricos Superficiales En Cuencas Urbanas de Alta Pendiente y Sus Implicancias En Los Procesos Erosivos. Caso de Estudio Región de La Ciudad de Oberá, Misiones” Tesis de Doctorado. Universidad Nacional de Rosario.
- WANG, P., LI, Y., FAN, J., KONG, F., ZHANG, D., HU, T. Future changes in urban drainage pressure caused by precipitation extremes in 285 cities across China based on CMIP6 models. Sustainable Cities and Society, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104404>
- ZHAI, R., TAO, F., LALL, U., FU, B., ELLIOTT, J., & JÄGERMEYR, J. (2020). Larger Drought and Flood Hazards and Adverse Impacts on Population and Economic Productivity Under 2.0 than 1.5°C Warming. Earth’s Future, 8(7). <https://doi.org/10.1029/2019EF001398>
- ZOPPOU, C. (2001). “Review of Urban Storm Water Models”. Environmental Modelling & Software. Vol. 16. www.elsevier.com/locate/envsoft.