

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ESTUDO DA CAPACIDADE HIDRÁULICA DOS CANAIS DE ESCOAMENTO DO RIO NOVO, VARGEM ALTA, ES

Jackson Quirino Falqueto¹ ; Edilson Sarter Braum² & Gabriel Adão Zechini da Silva³

Abstract: Extreme hydrological events, such as floods and inundations, have increased in frequency and intensity due to climate change, posing significant socio-environmental challenges, with threats to lives, property, infrastructure, and resulting in economic and social damages. In this context, Vargem Alta, located in the southern region of Espírito Santo, encompasses 414.72 km² within the Rio Novo Watershed, with an economy focused on coffee and eucalyptus cultivation. This study employed geoprocessing tools and mathematical modeling to evaluate peak surface runoff flows and the capacity of the Rio Novo channels. The analysis, crucial for designing hydraulic structures, is particularly relevant in light of the significant damages caused by the floods of 2020 and 2024, offering insights for sustainable planning and mitigation of hydrological impacts in the region. The maximum capacity of the Rio Novo channel, at 76.76 m³ s⁻¹, is insufficient to manage the peak flows simulated in the study, emphasizing the need for interventions in the channel and land management to ensure greater resilience to climate change.

Resumo: Eventos hidrológicos extremos, como cheias e inundações, têm aumentado em frequência e intensidade devido às mudanças climáticas, representando um grave desafio socioambiental, com ameaças a vidas, patrimônios e infraestrutura, além de danos econômicos e sociais. Nesse contexto, Vargem Alta, localizada no sul do Espírito Santo, possui 414,72 km² na Bacia Hidrográfica do Rio Novo, com economia voltada à cafeicultura e à eucaliptocultura. Este estudo utilizou ferramentas de geoprocessamento e modelagem matemática para avaliar as vazões máximas de escoamento superficial e a capacidade dos canais do Rio Novo. A análise, essencial para dimensionar obras hidráulicas, é especialmente relevante diante das enchentes de 2020 e 2024, que causaram prejuízos significativos, oferecendo subsídios para planejamento sustentável e mitigação de impactos hidrológicos na região. A capacidade máxima do canal do Rio Novo é de 76,76 m³ s⁻¹, insuficiente para conter vazões superiores simuladas no estudo, destacando a necessidade de intervenções no canal e no manejo do território para garantir maior resiliência frente às mudanças climáticas.

Palavras-Chave: Precipitação, Vazão máxima, Escoamento superficial, Velocidade de escoamento.

INTRODUÇÃO

O aumento da frequência e intensidade de eventos hidrológicos extremos, como cheias e inundações, configura um desafio socioambiental de proporções cada vez maiores. Impulsionados

1) Discente do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Faculdade Venda Nova do Imigrante. Av. Ângelo Altoé, 888, Santa Cruz, Venda Nova do Imigrante, ES. CEP: 29375-000, jacksonfalqueto029@gmail.com.

2) Discente do Curso de Doutorado em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Avenida Fernando Ferrari, 514, Campus Universitário de Goiabeiras, Vitória, ES. CEP 29.075.910. edilsonarter@gmail.com.

3) Discente do Curso de Doutorado em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Avenida Fernando Ferrari, 514, Campus Universitário de Goiabeiras, Vitória, ES. CEP 29.075.910. gabrielzechini0297@gmail.com.

pelas mudanças climáticas, esses eventos representam uma séria ameaça à vida humana, patrimônio e infraestrutura, causando danos econômicos e sociais incalculáveis (ANA, 2023).

A vazão máxima de escoamento superficial (Q_{\max}) representa o pico de vazão de água que flui sobre a superfície do solo em um determinado ponto da bacia hidrográfica, durante um evento de precipitação. Essa magnitude é crucial para o dimensionamento de obras hidráulicas, como pontes, canais e sistemas de drenagem urbana, assegurando sua capacidade de suportar os fluxos máximos de água. A determinação da vazão máxima de uma bacia é feita a partir da análise detalhada das vazões observadas ao longo de períodos prolongados, levando em consideração o comportamento da bacia. Além disso, a transformação da precipitação em vazão também é utilizada para calcular esse valor, já que permite entender como o volume de chuva captado pela bacia se converte em escoamento, influenciando diretamente a vazão máxima possível (Tucci, 2004).

Das etapas do ciclo hidrológico, o escoamento superficial corresponde a parcela de água que desloca sobre o solo, e é o estudo mais importante para obras de engenharia, pois transporta partículas de solo, nutrientes, matéria orgânica e defensivos agrícolas causando poluição dos cursos de água (Pruski *et al*, 2003).

No ano de 2024, ocorreu uma enchente na cidade de Vargem Alta, que causou certa de dez milhões de prejuízos (A GAZETA, 2024). Em 2020, ocorreu uma grande enchente e deslizamentos de terra devido a uma precipitação de cento e oitenta e cinco milímetros em vinte e quatro horas (G1, 2020).

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi utilizar ferramentas de geoprocessamento e modelagem matemática para estudar as vazões máximas de escoamento superficial e as vazões máximas suportadas pelos canais de escoamento do Rio Novo em Vargem Alta, ES.

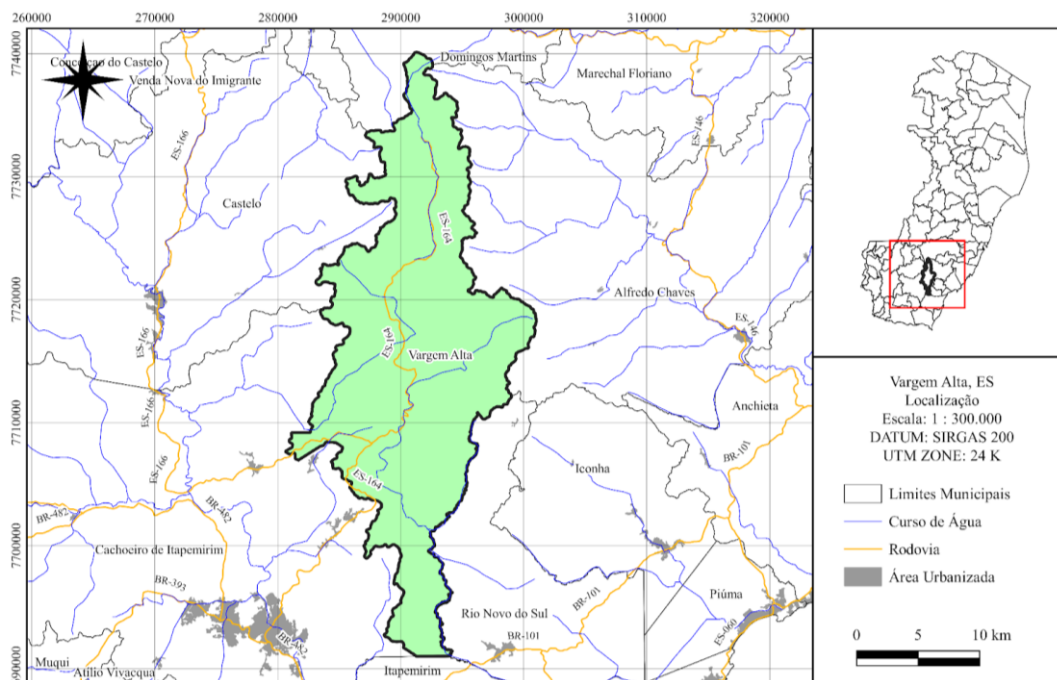
MATERIAIS E MÉTODOS

O município de Vargem Alta (Figura 01) está localizado na região sul do Estado do Espírito Santo, compreendido nas coordenadas geográficas Sul 20° 40' 15,60" e longitude Oeste de Greenwich 41° 00' 25,20". O município abrange uma área de 414,72 km² e limita-se com os municípios de Domingos Martins ao sul, Cachoeiro de Itapemirim a leste, e Alfredo Chaves, além de Cachoeiro de Itapemirim e Castelo a oeste. Vargem Alta está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Novo e apresenta um relevo variado, que vai de ondulado a montanhoso, com quedas d'água formando cachoeiras e corredeiras (INCAPER, 2020).

De acordo com a Classificação Climática de Köppen-Geiger, a cidade possui clima temperado quente do tipo "Cfb", caracterizado por não ter estação seca no inverno, com temperatura média do mês mais quente inferior a 22 °C e do mês mais frio abaixo de 18 °C (KÖPPEN; GEIGER, 1928). A precipitação média do mês mais seco é superior a 60 mm. O solo da região é predominantemente argiloso, e a Mata Nativa ocupa 33,7% do território, conforme a classificação de uso do solo realizada a partir de imagens de 2012 e 2013. A economia do município gira em torno do agronegócio, sendo a cafeicultura a principal atividade agrícola, ocupando 14,2% da área, seguida pela cultura de eucalipto, com 10,2% (INCAPER, 2020).

Para estudo do terreno, foi utilizado o software livre de geoprocessamento *Quantum Gis 3.8.2* e um Modelo Digital do Terreno (MDT) com resolução espacial de dois metros, contendo informações de elevação, obtido no Sistema Integrado de Bases Espaciais do Estado do Espírito Santo (GEOBASES, 2015). O MDT foi redimensionado para resolução de 5 metros para um melhor computacional.

Figura 1: Vargem Alta, ES.



Fonte: Dos autores.

O modelo digital do terreno foi recortado nas dimensões da área de estudo por meio do comando “*Recortar raster pela extensão*” e o preenchimento das depressões de superfície foi feito pelo comando “*Fill Sinks (Wang & Liu)*”.

Para delimitação da bacia hidrográfica de contribuição foi utilizado o comando “*Upslope area*” e os canais de escoamento superficial foram delimitados por meio do comando “*Channel network and drainage basins*”. Para medir a distância dos canais de escoamento desde a foz até o ponto mais distante da bacia hidrográfica utilizou-se o comando “*maximum flow path length*”.

Foi feita uma pesquisa de campo para mensurar as dimensões da canalização do Rio Novo, na sede de Vargem Alta, ES. Com o auxílio de uma trena foram obtidos os valores da largura e da altura máxima do canal ao nível da rua. E com o auxílio de um GPS de mão, foram obtidas as coordenadas geográficas dos pontos de estudo.

Para estimar o escoamento superficial máximo (Q_{max}) em pequenas bacias hidrográficas, o método racional é frequentemente utilizado, baseando-se em dados de precipitação para calcular a vazão. Visando aprimorar essa estimativa, Euclides (1987) introduziu um coeficiente conhecido como coeficiente de retardamento (ϕ) na equação original do método racional. Esse coeficiente ajusta a fórmula para levar em conta o atraso que ocorre entre o início da chuva e o escoamento superficial. Após ajustar a área de hectares para quilômetros quadrados, chega-se à Equação 01, que é corrigida pelo fator ϕ , calculado pela Equação 02 (Pruski *et al.* 2004).

$$Q_{max} = C I_m A \phi^{\frac{10}{36}} \quad (01)$$

$$\phi = 0.278 - 0.00034 A \quad (02)$$

em que ϕ representa o coeficiente de retardamento [adimensional]; Q_{\max} é a vazão máxima de escoamento superficial [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]; C é o coeficiente de escoamento superficial [adimensional]; I_m corresponde à intensidade média máxima de precipitação para um período igual ao tempo de concentração da bacia (mm h^{-1}) e A se refere à área da bacia de drenagem (km^2).

Conforme Pruski *et al.* (2004), parte da água da precipitação é interceptada pela vegetação antes de atingir o solo. A fração que chega ao solo pode se infiltrar, recarregando o lençol freático e preenchendo depressões, enquanto apenas uma parte chega à seção de deságue como escoamento superficial. O volume de água que esco superficialmente corresponde a uma fração do volume precipitado, e essa fração é conhecida como coeficiente de escoamento (C). De acordo com Barbosa Junior (2013), o valor de C é comumente obtido através de tabelas previamente elaboradas, que consideram as características da bacia hidrográfica ou da área de drenagem em análise, levando em conta o tipo de solo, seu uso e manejo (Tabela 01).

Tabela 01: Valores recomendados para C , pela Soil Conservation Service.

Floresta			
0 - 5	0,10	0,30	0,40
5 - 10	0,25	0,35	0,50
10 - 30	0,30	0,50	0,60
Pastagens			
0 - 5	0,10	0,30	0,40
5 - 10	0,15	0,35	0,55
10 - 30	0,20	0,40	0,60
Terras Cultivadas			
0 - 5	0,30	0,50	0,60
5 - 10	0,40	0,60	0,70
10 - 30	0,50	0,70	0,80

Fonte: Pruski *et al.* (2004).

Com o aumento na intensidade das precipitações, a quantidade de água retida pela interceptação da vegetação, infiltração no solo e armazenamento em depressões naturais tende a diminuir. Dessa forma, o coeficiente de escoamento superficial também deverá sofrer variações conforme a intensidade da precipitação e o volume da enchente. Como a intensidade das chuvas está relacionada

ao período de retorno, é possível expressar a dependência do coeficiente de escoamento superficial com base nesse período. A Tabela 02 apresenta os valores de um fator multiplicador (C) utilizado para ajustar o coeficiente de escoamento de acordo com a intensidade da precipitação ou o período de retorno (Barbosa Júnior, 2013).

Tabela 02: Variação coeficiente de runoff, com intensidade da chuva, com o período de retorno

Tr (anos)	Multiplicador de C	Tr (anos)	Multiplicador C
2 - 10	1.00	50	1.20
25	1.10	100	1.25

Fonte: Barbosa Júnior (2013).

A intensidade máxima média de precipitação é calculada através da Equação 03, que estabelece a relação entre intensidade, duração e frequência das chuvas para uma área específica, sendo conhecida como a equação de chuvas intensas (Matos *et al*, 2012).

$$i_m = \frac{K T^a}{(t+b)^c} \quad (03)$$

em que: i_m a intensidade máxima média de precipitação (mm h^{-1}); T representa o período de retorno (anos); t é a duração da precipitação (minutos); e K, a, b e c são parâmetros de ajuste específicos da estação pluviométrica estudada (adimensionais).

Segundo Tomaz (2010), quando os parâmetros K, a, b e c da equação de chuvas intensas não estão disponíveis, é possível fazer uma estimativa utilizando o software Pluvio 2.1, inserindo as coordenadas geográficas da área de interesse. O período de retorno T refere-se ao intervalo de tempo médio em que um evento hidrológico específico é igualado ou excedido pelo menos uma vez (Tomaz, 2010). Conforme Pruski *et al*. (2004), a chuva crítica utilizada em projetos de obras hidráulicas é selecionada com base em critérios econômicos.

Para determinar o tempo de concentração, utilizou-se a razão em que o tempo é a divisão da distância com a velocidade média. Para calcular a velocidade em que a água escoar no terreno utilizou-se um coeficiente de aptidão de escoamento da superfície “k” para cada uso do solo, junto com um modelo de declividade gerado por meio do comando “declive” utilizando o modelo de elevação da bacia de contribuição. Os arquivos vetoriais e uso e ocupação do solo foram convertidos para arquivos matriciais e, por meio do comando “calculadora raster” foi aplicada a Equação 04 para estimativa da velocidade de escoamento no terreno.

$$U_i = k S^{0.5} \quad (04)$$

em que: U_i = velocidade de escoamento no pixel [m/s]; k = coeficiente de aptidão de escoamento da superfície [relação entre o raio hidráulico e o coeficiente de rugosidade de Manning adimensional]; S = declividade [%].

Os valores do coeficiente de aptidão do escoamento da superfície “ k ”, são a relação entre o raio hidráulico e o coeficiente de rugosidade de Manning de acordo com cada uso do solo e tipo de terreno conforme Tabela 03.

Tabela 03: Valores de coeficiente de aptidão de escoamento da superfície K

Uso e tipo de cobertura do solo	k [adm]
Floresta ou mata natural com grande depósito vegetal na superfície do solo.	0,08
Solo não cultivado; Cultismo mínimo em faixas; Áreas reflorestadas.	0,08
Pastagens de baixo porte em touceiras.	0,15
Terreno cultivado.	0,21
Solo nu; Formações de aluviões em leque em direção ao vale.	0,30
Canais com vegetação; Terraços ou depressões naturais com vegetação; Talvegue.	0,45
Áreas pavimentadas; Sulcos de erosão.	0,60

Fonte: USP (1998).

Para determinar a vazão máxima que é suportada pela canalização do Rio Novo na sede do Município de Vargem Alta, ES, utilizou-se a fórmula de Chézy com coeficiente de Manning, conforme Equação 05.

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (05)$$

em que: Q = vazão [$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$]; A = área [m^2]; R_h = raio hidráulico [m]; n = coeficiente de rugosidade de Manning [adm] e I = Inclinação do fundo do canal [m m^{-1}].

O raio hidráulico para canalizações retangulares é a razão entre a área molhada e o perímetro molhado, conforme a Equação 06:

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{by}{b+(2y)} \quad (06)$$

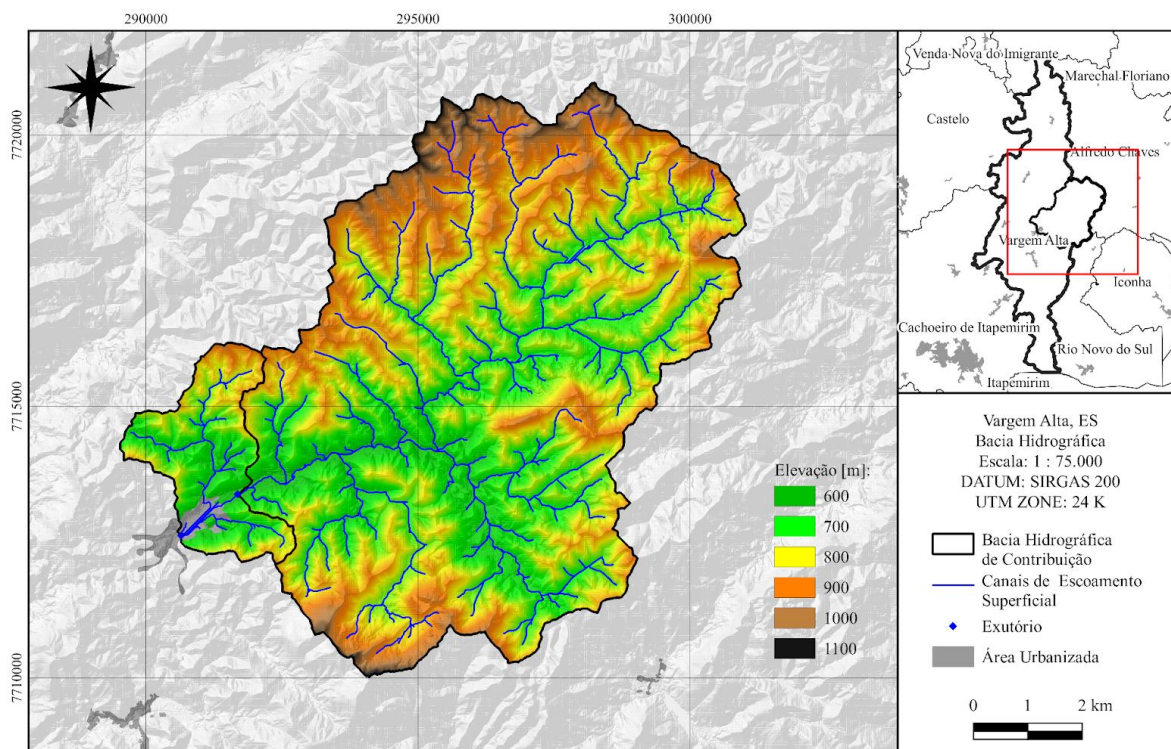
em que: R_h = raio hidráulico [m]; b = largura do fundo do canal [m]; y = altura da lâmina d' água [m].

Os valores das vazões máximas de escoamento superficial foram confrontadas com os valores das vazões máximas suportadas pela canalização utilizando de 1 a 100 anos de período de retorno.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para atender o objetivo deste trabalho, foram selecionados dois pontos de estudo localizados no início e no final do canal de escoamento do Rio Novo, no centro do município de Vargem Alta, ES. Esses dois pontos foram considerados os estuários das duas bacias hidrográficas de contribuição consideradas para obtenção das variáveis hidrológicas nesse trabalho, conforme Figura 02. A primeira bacia possui uma área de 71,6 km², com seu ponto mais remoto, situado a 1.068 metros de altitude e seu exutório a 608 metros. Possui o canal principal com extensão de 15,935 km e declividade média de 0,475 m m⁻¹. A segunda bacia possui uma área de 60,455 km², com o ponto mais remoto também a 1.068 metros de altitude, enquanto o exutório se encontra a 607 metros. Possui o canal principal com extensão de 14,65 km e declividade média de 0,475 m m⁻¹.

Figura 02: Bacia Hidrográfica de Contribuição.



Fonte: Dos autores.

Os valores do coeficiente de Runnoff (C) e de Manning (k) foram determinados por ponderação, levando em consideração tipo de solo, uso e ocupação do solo e declividade média, conforme Tabela 04, sendo $C = 0,48$ e $k = 0,12$. O tempo de concentração variou de 318,55 a 252,8 minutos, para períodos de retorno de 1 a 100 anos. O tempo de concentração tem um decréscimo quando aumenta

o tempo de recorrência, devido ao ajuste do coeficiente k , considerando que a bacia sofrerá degradações com o passar dos anos.

Tabela 04: Coeficientes de Runnoff e Manning.

<i>Variável:</i>	<i>Área [km²]:</i>	<i>C:</i>	<i>k:</i>
Afloramento Rochoso	0,16	0,95	0,60
Área Edificada	0,26	0,95	0,60
Brejo	0,11	0,95	0,60
Campo Rupestre	0,00	0,60	0,15
Cultivo Agrícola	6,19	0,60	0,21
Extração Mineração	0,06	0,80	0,30
Macega	6,72	0,50	0,15
Mangue	0,00	0,90	0,55
Massa D'água	0,06	1,00	0,60
Mata Nativa	33,93	0,40	0,08
Outros	2,98	0,50	0,30
Pastagem	10,38	0,65	0,15
Reflorestamento	10,17	0,45	0,08
Restinga	0,00	0,70	0,15
Solo Exposto	0,53	0,80	0,30

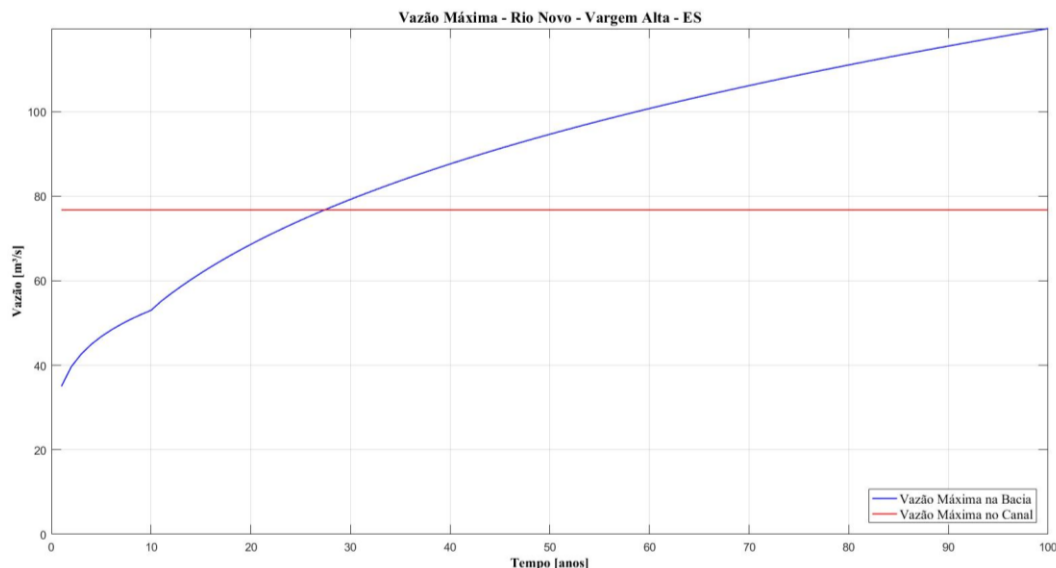
Fonte: Dos autores.

A intensidade máxima média de precipitação (I_p) é diretamente proporcional ao período de retorno, variando de $14,44 \text{ mm h}^{-1}$ para $39,16 \text{ mm h}^{-1}$ para períodos de retorno de 01 a 100 anos, respectivamente, enquanto a vazão máxima de escoamento superficial (Q_{\max}) variou de $35,02 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $119,67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, conforme Figura 03.

A largura do canal de escoamento do Rio Novo possui 10 metros, enquanto a altura máxima que a lâmina de água pode alcançar, sem que haja transbordamento, é de 3,5 metros. A declividade média do fundo do canal é de $0,002 \text{ m m}^{-1}$. O canal apresenta formato retangular, com fundo em terra e taludes empedrados.

O canal, considerando sua capacidade máxima, possui uma área molhada de 35 m^2 , com um perímetro molhado de 17 m e um raio hidráulico de 12,06 m. A vazão máxima que o canal é capaz de transportar é de $76,76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, sem que haja transbordamento. Estima-se que a cada 28 anos ocorrerá um evento de precipitação que gerará uma vazão igual ou superior a que pode ser suportada pelo canal de escoamento, indicando que o canal pode não ser suficiente para direcionar o escoamento superficial em períodos de chuvas intensas.

Figura 03: Vazões máximas.



Fonte: Dos autores.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foram estimadas as vazões máximas de escoamento superficial em dias de precipitação intensas para a canalização do Rio Novo em Vargem Alta, ES, bem como, a vazão máxima suportada pelo sistema de macrodrenagem para direcionar o excesso de água para fora da zona urbana.

Pode-se concluir que a canalização é capaz de atender uma vazão máxima de $76,76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, que corresponde a uma vazão que ocorre uma vez a cada vinte e cinco anos. Desse modo, espera-se que uma vez a cada vinte e oito anos, a canalização não tenha dimensões suficientes para escoar o excesso de água da chuva causando transbordamento do canal e inundação. Isso revela a importância de uma abordagem integrada no manejo das águas pluviais e no planejamento urbano, diante da crescente ocorrência de eventos hidrológicos extremos.

A utilização de ferramentas de geoprocessamento e de um modelo digital do terreno se mostrou eficiente para cumprimento do objetivo deste trabalho pois foi possível delimitar todas as variáveis físicas das bacias hidrográficas necessárias para aplicação das equações necessárias para as estimativas de vazão.

Além disso, a pesquisa evidenciou que o coeficiente de escoamento (C) sofre variações significativas em função das modificações do uso e ocupação do solo, conforme aumenta o tempo de recorrência. A comparação entre as vazões máximas estimadas e a capacidade dos canais de escoamento permitiu identificar os riscos e a necessidade de intervenções nas infraestruturas existentes. Essa análise reforça a necessidade de monitoramento contínuo e, possivelmente, de intervenções para garantir a eficiência do sistema de drenagem em longo prazo.

Diante disso, os resultados obtidos são fundamentais para subsidiar políticas públicas e ações de planejamento urbano, visando à melhoria da segurança hídrica e à redução dos impactos das inundações. A adoção de estratégias de manejo adequado e a implementação de obras hidráulicas

mais eficientes são essenciais para garantir a proteção da população e a preservação ambiental, especialmente em um contexto de mudanças climáticas que intensificam os eventos hidrológicos extremos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Página inicial. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Acesso em: 09 de outubro de 2024.

A GAZETA. Chuva no ES: Vargem Alta debaixo d'água e prejuízo de R\$10 milhões. Disponível em: <https://www.agazeta.com.br/clima/chuva-no-es-vargem-alta-debaixo-dagua-e-prejuizo-de-r-10-milhoes-0324>. Acesso em: 1 out. 2024.

AZEVEDO NETTO, J. M. Manual de Hidráulica. 9 ed. São Paulo, Bluncher, 2018.

BARBOSA JÚNIOR, A. Hidrologia aplicada. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. Hidrologia aplicada. Tradução de: José Carlos de Oliveira. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1988.

G1. Chuva causa alagamentos em Vargem Alta e ES segue sob alerta. Disponível em: <https://g1.globo.com/es/espírito-santo/noticia/2020/10/31/chuva-causa-alagamentos-em-vargem-alta-e-es-segue-sob-alerta.ghtml>. Acesso em: 1 out. 2024.

GEOBASES. Novas imagens MAP-ES 2012-2015 sem ECW. Disponível em: <https://geobases.es.gov.br/novas-imagens-map-es-2012-2015-sem-ecw>. Acesso em: 1 out. 2024.

GRUPO DE PESQUISA EM RECURSOS HÍDRICOS. Software Canal. Disponível em: <http://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>.

INCAPER. Proater: Vargem Alta. Vitória: Incaper, 2021. Disponível em: https://incaper.es.gov.br/media/incaper/proater/municipios/Vargem_Alta.pdf. Acesso em: 1 out. 2024.

INCAPER, Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. Programa de assistência técnica e extensão rural PROATER 2020-2023. Disponível em: https://incaper.es.gov.br/media/incaper/proater/municipios/Vargem_Alta.pdf.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. Klimate der Erde. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1928. Wall-map 150cmx200cm.

MATOS, A. T.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. Barragens de terra de pequeno porte. Viçosa: Ed. UFV, 2012.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. Escoamento superficial. Viçosa: UFV, 2003.

PRUSKI, F. F.; BRANDÃO, V. S.; SILVA, D. D. Escoamento superficial. Viçosa: UFV, 2004.

TOMAZ, PLÍNIO. Água pague menos: 4 atitudes básicas para economizar água. São Paulo: Plínio Tomaz, 2010. Acesso em: 15 setembro. 2024.

TUCCI, C. E. M. (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS: ABRH, 2004.