



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

NIVALDO LÚCIO DE OLIVEIRA NETO

**INVESTIGAÇÃO DE ALAGAMENTOS E CAPACIDADE DE ESCOAMENTO NO  
CANAL DERBY-TACARUNA**

Recife  
2023

NIVALDO LÚCIO DE OLIVEIRA NETO

**INVESTIGAÇÃO DE ALAGAMENTOS E CAPACIDADE DE ESCOAMENTO NO  
CANAL DERBY-TACARUNA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal  
de Pernambuco, como requisito parcial  
para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Orientador (a): Profa. D.Sc. Sylvana Melo dos Santos

Coorientador (a): Profa. D.Sc. Leidjane Maria Maciel de Oliveira.

Recife

2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

de Oliveira Neto, Nivaldo Lúcio.

Investigação de Alagamentos e Capacidade de Escoamento no Canal Derby - Tacaruna. / Nivaldo Lúcio de Oliveira Neto. - Recife, 2023.  
66p. : il., tab.

Orientador(a): Sylvana Melo dos Santos

Coorientador(a): Leidjane Maria Maciel de Oliveira

(Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, , 2023.

Inclui referências, apêndices.

1. Drenagem. 2. Canais. 3. Enchentes. 4. Geoprocessamento. 5. HEC - RAS. I. dos Santos, Sylvana Melo. (Orientação). II. Maciel de Oliveira, Leidjane Maria. (Coorientação). IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

NIVALDO LÚCIO DE OLIVEIRA NETO

**INVESTIGAÇÃO DE ALAGAMENTOS E CAPACIDADE DE ESCOAMENTO NO  
CANAL DERBY-TACARUNA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Graduação em  
Engenharia Civil da Universidade Federal  
de Pernambuco, como requisito parcial  
para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Aprovado em: 05/10/2023.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profa. D.Sc. Sylvana Melo dos Santos (Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. D.Sc. Leidjane Maria Maciel de Oliveira (Co-Orientadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. D.Sc. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Profa. M.Sc. Haylla Rebeka de Albuquerque Lins Leonardo (Examinadora Externa)  
Universidade Federal de Pernambuco

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, irmã e minha namorada pelo suporte ao longo da trajetória de graduação, aos professores e técnicos funcionários da ilustre instituição de ensino, a UFPE, em especial à minha orientadora Profa. D. Sc. Sylvana Santos e à minha coordenadora Prof. D. Sc. Leidjane Oliveira pelo suporte ao longo deste trabalho, Valdemiro da Costa Silva por contribuir com os arquivos *raster* elaborados pelo programa estadual PE3D e ao professor Pedro Oliveira por ter me recebido e repassado dados e informações importantes a cerca dos registros da EMLURB, sem os quais, este trabalho não poderia ter sido concluído e, por fim, à população brasileira que paga impostos que permitiu que eu fizesse um curso de qualidade de maneira gratuita.

## RESUMO

O trabalho foi realizado a partir da problemática em torno das enchentes que ocorrem no canal Derby - Tacaruna e adjacências posteriormente à ocorrência de eventos climatológicos intensos, mais especificamente os ocorridos no mês de maio de 2022, que certamente prejudicam a qualidade de vida e traz transtornos para a grande parte da população que transita diariamente nestas vias. Como objetivo, o trabalho desenvolveu a identificação das bacias hidrográficas contribuintes para a drenagem do canal, áreas mais susceptíveis às cheias ao longo do canal de drenagem bem como fatores que possam influenciar na capacidade de drenagem do mesmo e foram feitas observações acerca das condições de contorno de sua operação atualmente. Para tornar possível esta análise de situação complexa, fez-se necessário o levantamento de informações e dados relevantes para a caracterização da área estudada e sobre utilização de ferramentas de geoprocessamento com o fim de identificar as bacias e sub-bacias hidrográficas contribuintes na destinação final das águas captadas pelo canal. Através da análise de Modelos Digitais de Terreno (MDT) e Modelos Digitais de Elevação (MDE) com os programas HEC – RAS e HEC – HMS, os quais forneceram a base para análise de escoamento superficial. Os dados resultantes das análises foram identificados e comparados com os registros atuais da microdrenagem da região, utilizados como calibração do modelo, bem como registros fotográficos que ilustram a situação do canal e adjacências após a ocorrência de fortes chuvas na área de estudo. O modelo final, realizado plotando-se a malha gerada pelas bacias hidrográficas identificadas como área de captação de um evento pluviométrico extremo, o qual utilizou dados pluviométricos de eventos reais mostrou-se fidedigno ao modelo de calibração, permitindo, com boa margem de precisão, aferir qual o nível de solicitação do canal o torna mais suscetível às cheias, bem como conjecturar possíveis alternativas para contornar e controlar a recorrência destes transtornos perigos para a população da cidade do Recife.

Palavras-chave: Drenagem; Canais; Enchentes; Geoprocessamento; HEC – RAS.

## ABSTRACT

The work was carried out based on the problem surrounding the floods that occur in the Derby - Tacaruna channel and surrounding areas after the occurrence of intense climatological events, more specifically those that occurred in the month of May 2022, which certainly harm the quality of life and bring disruption. for the large part of the population that travels these roads daily. The objective of the work was to identify the river basins that contribute to the drainage of the canal, areas more susceptible to flooding along the drainage canal, as well as factors that may influence its drainage capacity and observations were made about the boundary conditions. of its current operation. To make this analysis of a complex situation possible, it was necessary to collect relevant information and data for the characterization of the studied area and the use of geoprocessing tools in order to identify the river basins and sub-basins contributing to the final destination of the water captured by the canal. Through the analysis of Digital Terrain Models (DTM) and Digital Elevation Models (DEM), which provided the basis for surface runoff analysis. The data resulting from the analyzes were identified and compared with current microdrainage records in the region, used as model calibration, as well as photographic records that illustrate the situation of the channel and surrounding areas after the occurrence of heavy rains in the study area. The final model, created by plotting the mesh generated by the river basins identified as the catchment area of an extreme rainfall event, which used rainfall data from real events, proved to be reliable to the calibration model, allowing, with a good margin of precision, assess the level of demand on the channel that makes it more susceptible to floods, as well as conjecture possible alternatives to overcome and control the recurrence of these dangerous disturbances for the population of the city of Recife.

Keywords: Drainage; Channels; Floods; Geoprocessing; HEC – RAS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vlores máximos diários registrados por ano no período entre 1961 e 2016, na estação meteorológica do Curado/Recife – PE	14
Figura 2 - Valores Climatológicos mensais para a cidade do Recife	14
Figura 3 - Modelo estrutural de um plano de águas pluviais	18
Figura 4 - Área de estudo, canal da Av. Agamenon Magalhães, circundado pelas pistas (em azul)	28
Figura 5 - Raster MDT da região norte da cidade do Recife	29
Figura 6 - Detalhamento do MDT em trechos ao longo do eixo do canal da Av. Agamenon Magalhães	30
Figura 7 - Erros de interpretação do MDT no HEC-RAS, visíveis em um trecho do canal da Av. Agamenon Magalhães	31
Figura 8 - Planta de locação das seções do canal da Av. Agamenon Magalhães	32
Figura 9 - Mapa de cotas de nível e bases de micro drenagem em trecho do canal Derby-Tacaruna	34
Figura 10 - Ampliação de detalhe das cotas de nível em trecho do canal Derby-Tacaruna	34
Figura 11 - Recorte da projeção do HEC-HMS nas coordenadas da Figura 8	35
Figura 12 - Sobreposição das Figuras 8 e 10	36
Figura 13 - Sub-bacias e escoamento superficial no trecho da Av. Conde da Boa Vista	37
Figura 14 - Trecho destacado da drenagem da Av. Conde da Boa Vista	37
Figura 15 - Elevação da cota de fundo do canal Derby-Tacaruna, no sentido longitudinal	38
Figura 16 - Bacia de captação extraída através da análise de fluxo superficial HEC-HMS	39
Figura 17 - Precipitação, (eixo Y) em mm vs tempo (intervalos de 10 min)	40
Figura 18 - Plano de análise de escoamento não uniforme no HEC-RAS	41
Figura 19 - Áreas de retenção em lotes e edificações, problema na interpretação pelo HEC-RAS	42
Figura 20 - Rede de conectividade hidráulica da superfície	43
Figura 21 - Trecho selecionado para análise quantitativa de nível d'água e fluxo para a Av. Conde da Boa Vista	44

Figura 22 - Batimetria vs Elevação de Superfície de Água (ESA)	45
Figura 23 - Fluxo ao longo da seção transversal no trecho da Av. Conde da Boa Vista, para a simulação do evento no dia 25/05/2022	46
Figura 24 - Perfil do leito do canal vs nível d'água, para o canal Derby-Tacaruna, simulação do evento no dia 25/05/2022 às 15:00.	47
Figura 25 - Sobreposição do mapa de inundação à camada do sistema Google Maps, para a simulação do evento de 25/05/2022	48
Figura 26 - Registro da situação no dia 25/05/2022 - Rua Amélia com Av. Agamenon Magalhães.	48
Figura 27 - Registro da situação no dia 25/05/2022 - Rua Venezuela e trecho da seção de 2050m na Av. Agamenon Magalhães.	49
Figura 28 - Nível d'água em relação à batimetria da seção de referência 2.050 m do canal	50
Figura 29 - Curva-chave da seção transversal traçada na referência de 2.050 m do canal	51
Figura 30 - Curva-chave do canal da Avenida Agamenon Magalhães	52
Figura 31 - Seção transversal na saída do canal para o rio Capibaribe	52
Figura 32 - Volume escoado na seção transversal.	53
Figura 33 - Fluxo através da Rua Nicarágua	59
Figura 34 - Fluxo através da Rua Venezuela	59
Figura 35 - Fluxo através da Rua Buenos Aires	60
Figura 36 - Fluxo através da Rua do Paissandú	60
Figura 37 - Fluxo através da Rua Dom Bôsco	61
Figura 38 - Fluxo através da Praça do Derby	61
Figura 39 - Fuxo Através Rua Dona Benvinda	62

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
1.1 OBJETIVOS	11
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	11
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	11
1.2 JUSTIFICATIVAS	11
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	12
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>13</b>
2.1 A CIDADE DO RECIFE	13
2.2 IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL.	15
2.3 ASPECTOS GERAIS DOS SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA.	15
2.4 CONSIDERAÇÕES QUANTO AO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA.	17
2.5 GEOPROCESSAMENTO E DRENAGEM URBANA.	19
<b>3 GEOPROCESSAMENTO E DRENAGEM URBANA.</b>	<b>22</b>
2.6.1 <i>Método de infiltração: SCS Curve Number (CN).</i>	22
2.6.2 <i>Método de conversão do fluxo superficial: onda cinemática.</i>	25
2.6.3 <i>Fluxo de base e método de difusão do fluxo na superfície:</i>	27
2.6.4 <i>Análise para calibração:</i>	28
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>28</b>
3.1 TRATAMENTO DOS RASTERS NA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS	31
3.2 PARÂMETROS ADOTADOS NA SIMULAÇÃO	35
3.3. DADOS DE ENTRADA NA SIMULAÇÃO	41
3.3.1 <i>Terreno</i>	41
3.3.2 <i>Precipitação</i>	43
3.3.3 <i>Distribuição do acúmulo de água na superfície</i>	44
<b>5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS</b>	<b>47</b>
4.1 IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS PONTOS DE ALAGAMENTO	47
<b>6 CONCLUSÕES</b>	<b>56</b>
APÊNDICE A - TABELAS COMPLEMENTARES	61
APÊNDICE B – FIGURAS COMPLEMENTARES	62

## 1 INTRODUÇÃO

A cidade do Recife enfrenta, há muitos anos, problemas relacionados à ocorrência de alagamentos e de enchentes que trazem danos e insalubridade aos cidadãos. Nesse tocante, Souza, Corrêa e Silva (2017) afirmam que a planície do Recife é uma área com características morfológicas e processuais bastante complexas e, por conta desse fato, existem algumas dificuldades técnicas para elaboração de projetos ligados ao meio ambiente, à infraestrutura e ao saneamento. Desta forma, faz-se necessária a investigação mais aprofundada de causa e do efeito, para que se possa, de maneira mais otimizada, realizar o planejamento e a execução de obras de drenagem e de contenção de cheias, segundo o Plano Diretor. Assim sendo, é imprescindível que as obras tenham caráter resolutório e preventivo, em oposição às intervenções emergenciais cuja execução em si, também causam transtornos e agravamentos dos problemas relacionados ao deslocamento de transeuntes na cidade.

Apesar de ser muito difícil eliminar completamente o risco de alagamentos, em termos práticos, a redução deste volume e da duração da enchente e do alagamento pode ser atenuada de maneira considerável através do planejamento das redes de drenagem. De maneira geral, o enfrentamento desses problemas necessita da criação/adaptação de estudos preexistentes e seus modelos de cálculo para que possam ser aplicados de maneira consistente com as variáveis locais da área estudada. Tendo garantida a consistência dessas informações, simulações podem ser realizadas com softwares de geoprocessamento como o Hydrologic Engineer Center's – River Analysis System em conjunto com o Hydrologic Engineer Center's – Hydrologic Modeling System.

De toda a rede de drenagem da cidade do Recife, foi escolhido como foco do estudo deste trabalho, o estudo dos fatores agravantes do alagamento de um ponto crítico, situado na avenida Agamenon Magalhães, nas adjacências das interseções da Rua Amélia e Rua Venezuela com a Avenida Agamenon Magalhães, utilizando como base um evento extremo na cidade do Recife, que ocorreu em 25/05/2022.

## 1.1 OBJETIVOS

Uma vez que o tema de drenagem urbana é amplo, este trabalho teve como foco os seguintes pontos:

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é realizar um levantamento de informações das bacias hidrográficas do canal e através da análise da situação atual do comportamento da drenagem de águas pluviais realizada pelo Canal Derby-Tacaruna quando submetido a eventos pluviométricos de grande intensidade afim de direcionar e identificar os principais pontos críticos de alagamento quando do transbordo do mesmo.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

No tocante aos objetivos específicos, tem-se:

- a) Identificar a bacia hidrográfica contribuinte para o canal.
- b) Avaliar se a capacidade de escoamento atual é suficiente durante eventos pluviométricos de maior intensidade.
- c) Identificar os pontos com maior risco de alagamento ao longo do Canal da Avenida Agamenon Magalhães;

## 1.2 JUSTIFICATIVAS

A Av. Agamenon Magalhães é uma via arterial de fundamental importância no trânsito da população da cidade do Recife e de sua região metropolitana. Sendo esta via construída às margens do principal canal de drenagem da região cortada pela mesma, é de fundamental importância que seja estudado o comportamento atual da drenagem.

Tendo em vista as recorrentes enchentes nas vias, este estudo visa além dos aspectos quantitativos, elencar a problemática quanto ao acontecimento de eventos pluviométricos intensos, os quais trazem transtornos expressivos à população da

região. Portanto, este estudo inicial tem como intenção proporcionar o pontapé inicial para que se possa analisar e buscar entender este problema complexo e, eventualmente, serem propostas formas de melhoria ou mitigação deste problema em trabalhos e obras futuras.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado à partir do levantamento da problemática e das informações acerca da área de estudo afim de caracterizá-la, demonstrar como o contexto geomorfológico e climático, bem como o impacto da urbanização influenciam o objeto de estudo.

Além disso, como referencial teórico conta com a descrição de considerações e etapas na deliberação e elaboração de um projeto de drenagem e sua importância perante a sua área de abrangência e como as ferramentas de geoprocessamento, através da descrição das mesmas, podem influenciar e contribuir de maneira significativa tanto para as análises comportamental de projetos de drenagem urbana já existentes, como para a elaboração de novos projetos.

Em continuidade, foram levantados os postos-chave das considerações teóricas a respeito dos métodos de cálculo e funcionamento dos programas de geoprocessamento, como o HEC-RAS e HEC-HMS, estes, escolhidos para a análise, de maneira que o funcionamento dos mesmos seja adequado às tarefas propostas.

A metodologia tratou de detalhar os procedimentos realizados para a elaboração dos planos de simulação do modelo, bem como uma análise e justificativa mais aprofundada acerca das considerações feitas e, por fim, a análise destes resultados obtidos para que se possam traçar as conclusões conforme os objetivos e escopo deste trabalho.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

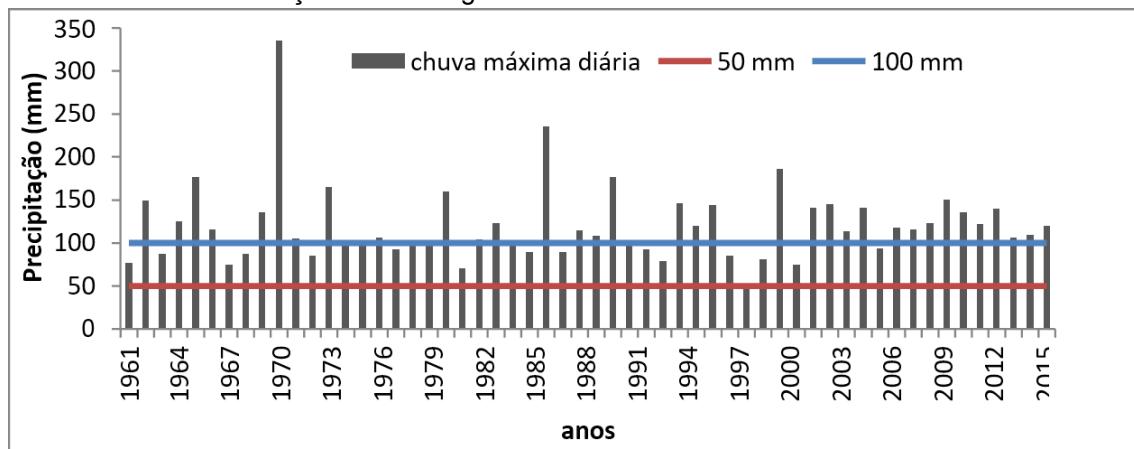
### 2.1 A CIDADE DO RECIFE

De acordo com Corrêa (2006), a cidade do Recife é formada por diversas paisagens, conforme Tabela A (Apêndice A). Segundo Souza, Corrêa e Silva (2017), classificam por Planície Fluviolagunar as áreas baixas sujeitas a inundações periódicas, compostas pelos sedimentos Fluviolagunares (Qdfl), resultantes da deposição fluvial. Localiza-se nas proximidades dos corpos hídricos de considerável dimensão e principalmente nos cursos dos rios Capibaribe e Beberibe, se estendendo como uma franja ao longo dos seus cursos em direção ao interior da planície. Ocupa uma área de 23,4 km<sup>2</sup>, abrangendo os bairros das áreas central do Recife (Boa Vista, Joana Bezerra, São José, Afogados, Paissandu, Ilha do Leite, Santo Amaro, Derby e Ilha do Retiro). Nesse sentido, a área de estudo enquadra-se como parte de transição do terraço marinho da unidade estuarina, que consiste de áreas baixas com elevação de, no máximo, 4 m, com a influência direta das marés, através da elevação direta do nível do canal principal da via arterial, em combinação com sua situação descrita como Planície Fluviolagunar devido à influência do curso do Rio Capibaribe.

No tocante ao clima da área de estudo, pode-se afirmar que a cidade do Recife está inserida em um contexto climático tropical úmido, com chuvas concentradas durante o outono e o inverno. Nesta perspectiva, de acordo com Mendonça e Dani-Oliveira (2007), o clima da área de estudo é classificado como Clima Tropical Litorâneo do Nordeste Oriental, o qual se diferencia dos demais climas mais secos do interior da região Nordeste (Wanderley *et al.*, 2018, p. 154).

Ainda segundo Wanderley *et al.* (2018), em um compilado de dados obtidos do INMET, observa-se que a média pluviométrica anual é de 2292,9 mm, com desvio padrão de 482,5 mm, tendo a maior concentração de chuvas entre os meses de abril e agosto. Em relação aos eventos extremos diários, constituídos por chuvas com volume superior a 50 mm ocorrem em todos os anos da série histórica de precipitação (1961-2016), conforme observado na Figura 1, sendo também comum a ocorrência de volumes diários superiores a 100 mm.

Figura 1 - Valores máximos diários registrados por ano no período entre 1961 e 2016, na estação meteorológica do Curado/Recife – PE



Fonte: Wanderley *et al.* (2018).

Os dados obtidos por Wanderley *et al.* (2018) são corroborados pela normal climatológica disponibilizada no website da Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), conforme a Figura 2, donde pôde-se extrair o acúmulo de precipitação no valor de 2417,7mm, valor dentro do desvio padrão esperado de 482,5mm.

Figura 2 - Valores Climatológicos mensais para a cidade do Recife



	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Chuva (mm)	108.2	148.2	256.9	337.6	318.5	377.9	388.1	204.8	122.0	63.0	35.7	56.8
Tmax (°C)	30.2	30.2	30.0	29.7	28.9	27.9	27.3	27.5	28.1	29.0	30.1	30.2
Tmin (°C)	22.4	22.6	22.7	22.6	21.9	21.6	21.1	20.6	20.7	21.4	21.9	22.2
Vento (Km/h)	10.7	9.9	8.2	8.1	8.1	9.3	10.3	11.2	11.7	11.4	11.8	11.2
Vento (m/s)	3.0	2.8	2.3	2.3	2.3	2.6	2.9	3.1	3.3	3.2	3.3	3.1

Fonte: Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), (2023).

A metropolização da área, gerada pela conurbação das cidades componentes da RMR, segundo Corrêa (2006), há forte relação entre as superfícies artificializadas que compõem a malha urbana. Nesse sentido, pode-se afirmar ainda que as superfícies impermeabilizadas por construções podem exercer um papel

fundamental sobre o comportamento dos elementos climáticos, transformando-os em variáveis atreladas ao uso e ocupação do espaço urbano.

## 2.2 IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NO ESCOAMENTO SUPERFICIAL.

Tucci (2002) afirma que no Brasil, assim como em outros países emergentes, na maioria das cidades, a drenagem urbana não foi considerada como um fator preponderante em seu planejamento de urbanização. Nesse contexto, destaca-se a ocorrência (ou não) de áreas verdes. As áreas verdes constituem elementos importantes na redução da poluição, na proteção de nascentes e mananciais, e ajudam na manutenção da biodiversidade.

A vegetação age, ainda, no microclima urbano, contribuindo no controle da radiação solar, evapotranspiração, umidade, temperatura do ar, ação dos ventos e das chuvas, filtragem da poluição do ar e sombreamento (Lima; Lopes; Façanha, 2021).

Yannopoulos *et al.* (2013) destacam que o processo de urbanização, cujos principais agentes na transformação da paisagem se dão através da remoção de áreas verdes para a pavimentação de ruas, construções com grandes áreas de estacionamento, calçadas e residências. A remoção dessas áreas naturais traz como consequência, o aumento da impermeabilização do solo, que gera aumento e aceleração do escoamento superficial das águas pluviais, além de diminuir a capacidade de infiltração da água no solo causando alagamentos.

A respeito do planejamento da urbanização, Canholi (2014) afirma que nos países mais desenvolvidos, a abordagem da drenagem urbana já está voltada à qualidade da água coletada, entretanto, no Brasil, a maior preocupação ainda está ligada ao controle quantitativo das enchentes.

## 2.3 ASPECTOS GERAIS DOS SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA.

O desenvolvimento das primeiras obras relacionadas à Engenharia Hidráulica possibilitou a condução de água aos locais onde esse recurso era desejado,

permitindo a ocupação de diferentes espaços. Entretanto, a intensificação dessa ocupação a partir do século XIX não foi acompanhada por uma infraestrutura adequada de controle das águas nas cidades, relacionadas tanto aos corpos hídricos naturais, como as águas de origem pluvial e as águas servidas (Baptista; Nascimento; Barraud, 2011).

A modificação dos processos de drenagem natural através da execução da impermeabilização de superfícies, de acordo com Cordeiro, Silva e Campera (2020), além de afetar o ciclo natural hidrológico das bacias hidrográficas, de modo a agravar o risco de inundações, existe a grande possibilidade de poluição dos corpos hídricos através do transporte de detritos e substâncias, além da disseminação de doenças transmitidas por veiculação hídrica.

Na maioria dos manuais de drenagem urbana, essa é definida como conjunto de elementos destinados a recolher as águas pluviais precipitadas sobre uma determinada região e que escorrem sobre sua superfície, conduzindo-as a um destino que por vezes possuem diversos problemas como poluição, áreas contaminadas, assim, não sendo locais seguros para destinação final (Souza; Morais; Borja, 2013).

Hafner (2007) define um sistema de drenagem clássico como aquele que começa em uma edificação. Em Diretrizes Básicas para projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo (FCTH, 1999), a água da chuva é coletada de áreas de cobertas como telhados e pátios, que são as áreas de contribuição, segue através de calhas, tubulações e condutores, pelo interior da edificação, e finalmente através das caixas de areia dos edifícios. A água coletada é então liberada em galerias pluviais, através das quais é transportada para um corpo d' água próximo, que pode ser um córrego, canal, rio ou lago.

A microdrenagem é definida como o sistema de drenagem que recolhe e afasta as águas pluviais do meio urbano, por meio de estruturas hidráulicas como sarjetas, sarjetões, bocas de lobo, rede de conduto e galerias, poços de visita e drenos (Tucci, 2015). Kamura (2005) diz que, além de ajudar no escoamento das calçadas das vias públicas, a microdrenagem também capta as águas pluviais e as direciona para a macrodrenagem minimizando o risco de alagamentos e inundações, e minimizando os danos.

Para que sejam efetivos, Fuchs (2011) afirma que os projetos de microdrenagem devem basear-se na ideia de escoamento lento das águas,

objetivando aumentar o tempo de permanência do fluxo no sistema de drenagem, aliviando pontos de concentração das águas a jusante, fonte de problemas devido ao acréscimo dos picos de vazão.

De acordo com as Diretrizes Básicas para projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo (FCTH, 1999), devem ser dimensionados para o escoamento de vazões com período de retorno de 2 a 10 anos, de maneira a contemplar a drenagem de precipitações classificadas como nível moderado. Nesse tocante, é importante para o desenvolvimento das respectivas soluções, que seja considerado o tipo e a disposição do sistema de esgoto e de drenagem de águas pluviais que a cidade utiliza. Para Cordeiro, Silva e Campera (2020), nos sistemas separadores absolutos são utilizadas tubulações separadas nas redes de esgoto e drenagem pluvial com o objetivo de separar 100% da vazão dessas fontes.

Nos sistemas combinados (unitários), entretanto, ocorrem duas contribuições usando o mesmo canal. Um sistema híbrido é o que combina esses dois conceitos. Embora o sistema separador absoluto corresponda à solução considerada ideal, em relação ao saneamento, de acordo com especialistas, o sucesso depende de uma triagem e controle eficazes para evitar que conexões ilegais direcionem a água da chuva, proveniente principalmente de telhados e pátios à uma rede de esgoto e o contrário, para águas residuais domésticas em tubagens e galerias pluviais.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES QUANTO AO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE DRENAGEM URBANA.

Instrumentos organizacionais, como os de gestão das águas pluviais de uma cidade, são fundamentais afim de garantir seu funcionamento e eficiência ao longo do tempo. Assim, o Plano Diretor de Drenagem Urbana é desenvolvido em paralelo aos planos de saneamento e Diretor Urbano. A elaboração desse planejamento é realizada com base na Lei de Saneamento, a Lei Federal No 11.445 (Brasil, 2007), cuja estrutura organizacional principal é elucidada por Tucci (2012), na Figura 3.

Quando a macrodrenagem não está adequadamente dimensionada, as águas geradas dos escoamentos vindas da microdrenagem acabam retidas na superfície, gerando alagamento e represamento nas ruas por falha de captação do corpo receptor. Dessa forma, o conhecimento dos métodos de estimativa de vazão máxima

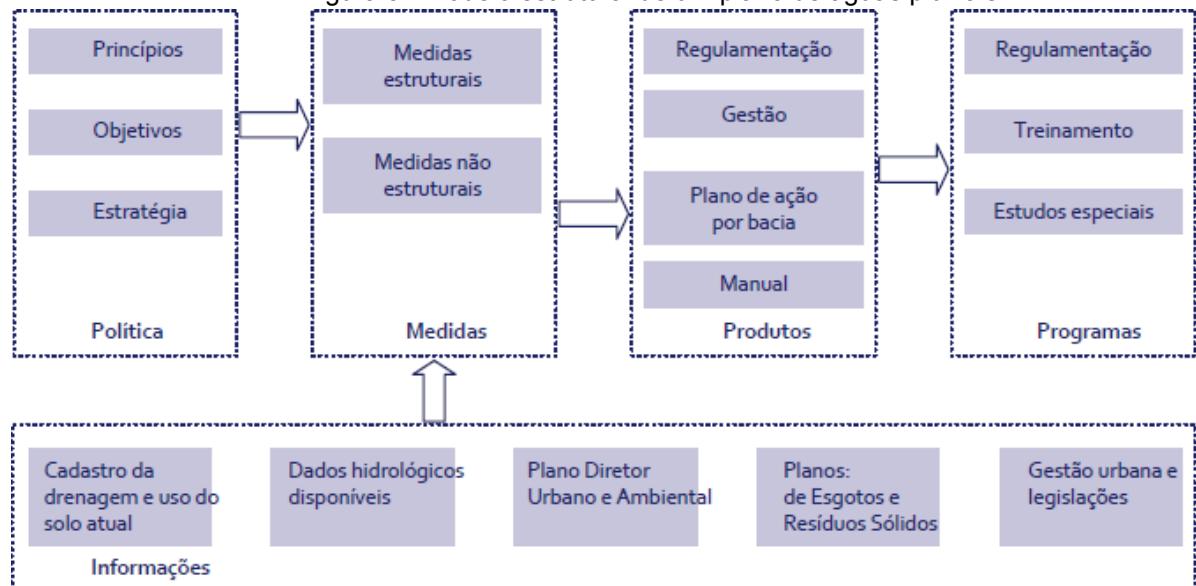
para a macrodrenagem é importante para a prevenção de desastres hidrológicos (Patrício; Cadorin; Back, 2020).

Portanto, para estimar grandezas como a vazão máxima, existem diferentes métodos de cálculo possíveis, que segundo proposto por Patrício, Cadorin e Back (2020), destacam-se: (i) Racional; (ii) I-Pai-Wu; (iii) Te Chow; (iv) Hidrograma SCS; (v) McMath.

O método Racional estabelece uma relação entre a precipitação e o escoamento superficial, sendo empregado para calcular o pico de vazão em uma bacia específica, considerando uma área de estudo delimitada, esta, que segundo Tomaz (2002), é mais adequado para bacias de menores proporções. A abordagem racional baseia-se no princípio básico de que a vazão máxima devida às chuvas de intensidade uniforme e constante ocorre quando todas as partes da bacia contribuem simultaneamente para o escoamento da parte de saída.

De acordo com São Paulo (1999), o método de I-Pai-Wu, por sua vez, é considerado como um aprimoramento do Método Racional de modo a adequá-lo para a abrangência de áreas de drenagem maiores, garantindo sua eficiência até 200km<sup>2</sup>. A relação entre estes métodos avaliados no estudo foi inferior a 10% nos valores resultantes do tempo de concentração.

Figura 3 - Modelo estrutural de um plano de águas pluviais



Fonte: Tucci (2012).

O método desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS), por sua vez, é uma abordagem de distribuição temporal estabelecida pelo Departamento de

Agricultura dos Estados Unidos em 1986, no qual segundo Hoepfner (2007), estabelece um hidrograma unitário adimensional.

Por fim, destaca-se que Patrício, Cadorin e Back (2020) apud Batista, Novaes e Santos (2002), o método de McMath possui um fator de redução de área que evita um aumento linear e irreal das vazões em função das áreas de contribuição.

Enquanto o método Racional apresentou valores superiores a todos os métodos em todos os tempos de retorno, com tendência a estarem superestimados. Esses mesmos autores tiveram como objetivo aplicar e discutir os diferentes métodos de estimativas de vazão máxima para projetos de macrodrenagem urbana, avaliando os aspectos de tempo de concentração e vazão, fundamentais a este trabalho. Ainda neste tocante, o método do Hidrograma (SCS) é destacado pelos autores como o método mais adequado a ser utilizado no estudo, por usar diversos parâmetros para análise da vazão da bacia.

## 2.5 GEOPROCESSAMENTO E DRENAGEM URBANA.

Para a elaboração de relatórios, planejamento e dimensionamento de sistemas de drenagem urbana, é importante o mapeamento de zonas e áreas, com suas respectivas taxas de impermeabilização e características do uso e ocupação do solo, a fim de obter-se com fidelidade, a grandeza das variáveis de cálculo para o dimensionamento de calhas, sarjetas tubulações e canais.

Destarte, o mapeamento das superfícies impermeáveis é justificado em sua relevância socioeconômica e ambiental, sendo necessário que se faça uma avaliação adequada dos procedimentos metodológicos para a análise. Nesse sentido, a literatura disponível indica que é possível mapear as superfícies impermeáveis utilizando-se técnicas de sensoriamento remoto (Weng, 2007; Sakuno *et al.*, 2017).

Para estimar o percentual da área de solo impermeabilizada pela urbanização, utiliza-se imagens com detalhamento suficiente para a interpretação, permitindo classificar os diferentes usos do solo e da cobertura vegetal, relacionando-os com a distribuição dos materiais impermeáveis encontrados.

Os sensores do Landsat-8 (satélite estadunidense), mais especificamente o OLI (sensor espectral) e o TIRS (sensor termal), que pela interpretação de Martins,

Morato, Kawakubo (2018), são capazes de capturar com fidelidade, informações relevantes acerca de diversas áreas do globo com significativa resolução espacial (maior fidelidade de detalhes visíveis), temporal, espectral (por bandas) e de radiometria. Assim, trata-se de uma ferramenta valiosa e de baixo custo para elaboração das análises necessárias para trabalhos como este.

Dentre os demais *softwares* capazes de tratar este tipo de dados, os *softwares* de livre acesso QGIS, *Hydrologic Engineering Center's – River Analysis System* (HEC-RAS), e *Hydrologic Engineering Center's – Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) podem automatizar o processamento das imagens através dos índices espectrais, advindos das bandas espectrais B1 a B11, obtidos pelos sensores OLI e TIRS, que permitem a locação exatas de pontos do terreno e seu relevo, em conjunto com a análise da proporção entre o fluxo de radiação eletromagnética incidente numa superfície e o fluxo que é refletido, denominada reflectância. Essa última, pode ser utilizada para identificar a variabilidade e sua distribuição espacial, através de modelos de cálculo que relacionam a energia eletromagnética, (refletida, absorvida e/ou transmitida) com o tipo de material componente da superfície, determinando, com base na reflectância, os índices que são associados aos materiais de constituição da superfície.

O geoprocessamento, portanto, realizado com as ferramentas adequadas de cálculo e, por conseguinte, interpretação das variáveis, permite que sejam compilados os dados e os associá-los de maneira que seja possível caracterizar todo o espectro de informações e componentes da área de estudo, em um conjunto de dados denominado *raster*.

Os dados *raster*, de acordo com o manual do *software* QGIS, são compostos por linhas (horizontais) e colunas (verticais) de *pixel/s* (também conhecidas como células). Cada *pixel* representa uma região geográfica, e o valor associado ao mesmo representa uma característica dessa região, nos permitindo dimensionar de maneira mais precisa e adaptada à realidade, os sistemas de drenagem urbana.

Adicionalmente, é imprescindível o uso de cartas topográficas para que se possa agregar as variações de declividade e altimetria do terreno, pela geração de um Modelo Digital de Elevação (MDE), o qual será interpolado de maneira a formar uma superfície contínua, também componente do *raster* da área de estudo. O geoprocessamento dos dados topográficos permite criar curvas de nível,

fundamentais para que o *software* identifique por onde se dará o escoamento superficial.

### 3 GEOPROCESSAMENTO E DRENAGEM URBANA.

#### 2.6.1 Método de infiltração: SCS Curve Number (CN).

Segundo a documentação do HEC - RAS, o método de perda inicial adotado para a camada de computação para infiltração e escoamento superficial foi o SCS Curve Number (CN), este, um modelo empírico desenvolvido pelo serviço de conservação de recursos naturais do departamento de agricultura dos Estados Unidos (NRCS). Segundo DAVIS *et al.* (2023) *apud* SOULIS e V VALANTZAS (2013), este modelo estima o excesso de precipitação em função da capacidade de acumulação da mesma, considerando-se o uso e ocupação do solo e umidade.

Como parâmetros de entrada no HEC-RAS para o modelo desenvolvido pelo NRCS são:

- Curve Number: um valor escalar para cada célula.
- Initial abstraction ratio: valor escalar para cada célula.
- Duração do período de recuperação, parâmetro opcional para quando se deseja incluir o método de recuperação/recarga do solo em horas.
- Minimum infiltration rate: valor opcional para cada célula em cm/hr referente a uma taxa de infiltração mínima definida pelo usuário.

De acordo com o Serviço de Conservação do Solo (SCS), os valores do CN variam de aproximadamente 30 (para solos permeáveis com altas taxas de infiltração) a 100 (para corpos d'água, superfícies impermeáveis e solos com taxas de infiltração próximas de zero). A absorção inicial pode ser estimada em função da retenção máxima potencial, Equação 1.

$$I_a = r \cdot S \quad (1)$$

O valor adimensional  $r$  da taxa de absorção inicial é introduzida pelo usuário, variando tipicamente entre 0,05 e 0,2. O potencial máximo de retenção do solo ( $S$ ), em mm, é computado pelo escoamento superficial do CN, Equação 2.

$$S = 1000 \cdot CN - 10 \quad (2)$$

Qualitativamente, é importante observar que apesar do método CN ter sido adaptado para eventos pontuais, as computações levarão em conta apenas os valores de entrada inseridos no modelo independentemente de sua duração. Conforme mencionado anteriormente, o CN é atrelado ao uso e ocupação do solo e à profundidade do lençol freático. Nesse tocante, o NRCS divide os solos em quatro grupos, baseados na capacidade de infiltração, sendo eles:

- Grupo A: Solos com altas taxas de infiltração (baixo potencial de escoamento superficial) mesmo quando completamente molhados. Consistem principalmente em areias e cascalhos profundos e bem drenados. Esses solos têm taxas de infiltração finais superiores a 7,6 mm/hora.
- Grupo B: Solos com taxas de infiltração moderadas quando completamente umedecidos. Estes consistem principalmente em solos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bem drenados a bem drenados, com texturas de solo moderadamente finas a moderadamente grossas. Esses solos têm taxas de infiltração finais de 3,8–7,6 mm/h.
- Grupo C: Solos com taxas de infiltração lentas quando completamente umedecidos. Estes consistem principalmente em solos com uma camada que impede o movimento descendente da água ou solos com texturas moderadamente finas a finas. Esses solos têm taxas de infiltração finais de 1,3 – 3,8 mm/h.
- Grupo D: Solos com taxas de infiltração muito lentas (alto potencial de escoamento) quando completamente molhados. Estes consistem principalmente em solos argilosos com alto potencial de expansão, solos com lençol freático alto permanente, solos com argila ou camada de argila na superfície ou próximo a ela, e solos rasos sobre materiais quase impermeáveis. Esses solos têm taxas de infiltração finais inferiores a 1,3 mm/hora.

A seleção de um grupo hidrológico de solos deve ser feita com base nas taxas de infiltração medidas, no levantamento do solo ou no julgamento de um cientista de solos ou profissional geotécnico qualificado. Neste sentido, algumas simplificações foram feitas em relação à definição dos diferentes tipos de ocupação do solo no terreno alvo deste estudo, Tabela 1 definida pelo NRCS.

Tabela 1 - Parâmetro Curve Number em função do grupo hidrológico do solo

Cobertura			Grupo de solo hidrológico			
			A	B	C	D
Uso da terra	Descrição da capa	Condição hidrológica				
Espaço aberto	(gramados, parques, campos de golfe, cemitérios, etc.)	Pobre (<50% grama) Justo (50% a 75% de grama) Bom (> 75% grama)	68 49 39	79 69 61	86 79 74	89 84 80
Áreas impermeáveis	Pavimentado	Estacionamentos, telhados, calçadas, etc	98	98	98	98
	Ruas e estradas	Pavimentou; meio -fio e esgoto Valas abertas	98 83	98 89	98 92	98 93
	Ruas e estradas	Cascalho Sujeira	76 72	85 82	89 87	91 89
Áreas urbanas do deserto ocidental	Deserto natural Deserto artificial	Apenas áreas perversas Barreira impermeável de ervas daninhas	63 96	77 96	85 96	88 96
Distritos urbanos	Negócios comerciais Industrial	85 % impermeável 72 % impermeável	89 81	92 88	94 91	95 93
Distritos residenciais por tamanho médio do lote	0,05 hectare (casa da cidade) 0,1 hectare 0,13 hectare 0,20 hectare 0,4 hectare 0,80 hectare	65 % impermeável 38 % impermeável 30 % impermeável 25 % impermeável 20 % impermeável 12 % impermeável	77 61 57 54 51 46	85 75 72 70 68 65	90 83 81 80 79 77	92 87 86 85 84 82
Desenvolvimento de áreas urbanas	Áreas recém -classificadas Apenas áreas perversas Sem vegetação		77	86	91	94

Fonte: USACE, 2021.

Finalmente, é possível determinar a proporção da sub-bacia que está diretamente interligada com as áreas e suas respectivas ocupações do solo. Neste trabalho para áreas verdes, foi considerado o grupo Hidrológico D, com CN 0,80 e para as áreas urbanizadas em geral, CN 0,94 correspondendo aos distritos urbanos.

As malhas consideradas impermeáveis interligadas são aquelas onde o escoamento é conduzido diretamente para um curso de água ou um sistema de coleta de águas pluviais. Essa característica pode ser identificada e quantificada por meio das representações visuais apresentadas neste estudo.

Tais superfícies se contrastam com as áreas impermeáveis não interligadas, onde o escoamento encontra regiões permeáveis que podem absorver parte (ou a totalidade) do fluxo antes que alcance um curso de água ou sistema de coleta de águas pluviais. Nesse caso, nenhum cálculo de perda é aplicado à porcentagem específica da sub-bacia; toda a precipitação que incide nessa parcela da sub-bacia transforma-se em precipitação excedente e está sujeita, portanto, a um escoamento direto.

#### **2.6.2 Método de conversão do fluxo superficial: onda cinemática.**

Enquanto um componente de sub-bacia conceitualmente engloba a interação entre infiltração, escoamento superficial e processos subsuperficiais, os cálculos concretos relacionados ao escoamento superficial são executados por meio de um Método de Conversão presente dentro da sub-bacia. Esse método foi originalmente concebido para representar predominantemente áreas urbanas.

Tipicamente, um cenário é dedicado a superfícies impermeáveis, enquanto o outro diz respeito a superfícies permeáveis. Ilustrações de superfícies impermeáveis abrangem telhados de edifícios, estacionamentos e vias urbanas, enquanto as permeáveis são gramados, parques e espaços não urbanizados. A distinção principal entre superfícies permeáveis e impermeáveis no contexto desse método é sua capacidade de permitir infiltração.

As mesmas condições meteorológicas de contorno são aplicadas a ambos os cenários. Entretanto, informações distintas referentes à rugosidade, cobertura da superfície e taxa de perda são requeridas para cada cenário e são inseridas individualmente. Equações derivadas do conceito da onda cinemática são empregadas para calcular o fluxo em cada cenário e, em sequência, um fluxo combinado ponderado é calculado com base na representatividade percentual de cada cenário (Bartles *et al.*, 2023).

O escoamento superficial é direcionado para um subcoletor, que é empregado para simbolizar a fase inicial na gestão das águas pluviais. Um sistema de captação comum são as sarjetas ao longo das vias. Em áreas sem sarjetas, valas naturais nas proximidades das vias podem desempenhar uma função equivalente na coleta de águas pluviais. O escoamento é aplicado ao subcoletor como uma condição lateral uniforme, ajustado com base na área típica representativa do mesmo.

A água é conduzida por meio deste subcoletor usando as fórmulas da onda cinemática, não contabilizando infiltração no mesmo, o que pode dificultar a representação de valas com vegetação e outras práticas mais avançadas de manejo das águas.

A vazão do subcoletor é canalizada para um coletor que, por sua vez, é empregado para denotar a próxima etapa no sistema de gestão de águas pluviais. Em outras palavras, o coletor recebe o fluxo de várias sarjetas ou valas. Esta transição é aproximada fazendo com que a saída do subcoletor seja amplificada utilizando a área representativa típica de um coletor e de maneira análoga aos subcoletores em relação ao escoamento superficial, aplicada ao coletor as vazões dos subcoletores como uma condição lateral uniforme.

Por fim, a saída do coletor é conduzida para um canal, este, que representa a fase final no sistema de gestão de águas pluviais ou, alternativamente, para simbolizar o rio que percorre a sub-bacia. O canal recebe o fluxo proveniente dos coletores e é, por sua vez, ampliado usando as áreas dos típicos e a área da sub-bacia.

O fluxo escalado mais uma vez é aplicado ao canal como uma condição lateral uniforme. A água é encaminhada pelo canal para se tornar o escoamento da sub-bacia. O método da onda cinemática constitui um conceito-modelo referente à resposta de uma bacia hidrográfica. Nessa abordagem, uma bacia hidrográfica é ilustrada como um canal aberto (de grandes proporções), no qual a contribuição para o canal equivale ao excesso de precipitação.

Subsequentemente, são resolvidas equações que emulam o fluxo de água rasa e instável em um canal aberto, com o intuito de calcular o hidrograma de escoamento da bacia, conforme a aproximação de momento unidimensional da Equação 3.

$$S_f = S_0 - \frac{\partial y}{\partial x} - \frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t} \quad (3)$$

Onde:  $S_f$  = gradiente de energia (ou inclinação de atrito) (m/m);  $S_0$  = inclinação do canal (m/m);  $V$  = velocidade (m/s);  $y$  = profundidade hidráulica (m);  $x$  = distância ao longo do caminho do fluxo (m);  $t$  = tempo (s);  $g$  = aceleração devida à gravidade

(m/s<sup>2</sup>);  $\frac{\partial V}{\partial x}$  = gradiente de pressão (m/m);  $\frac{V}{g} \frac{\partial V}{\partial x}$  = aceleração convectiva (m/s<sup>2</sup>);  $\frac{1}{g} \frac{\partial V}{\partial t}$  = aceleração local (m/sec<sup>2</sup>).

Daí,  $S_f$  pode ser aproximado usando a equação de Manning (Equação 4).

$$Q = \frac{K}{N} R^{\frac{2}{3}} A \sqrt{S_f} \quad (4)$$

Onde: K = 1,0; Q = fluxo (m<sup>3</sup>/s); N = numero de Manning; R = raio hidráulico (m); A = seção transversal área (m<sup>2</sup>).  $S_f$  pode ser definido como igual a  $S_0$  quando os efeitos de aceleração são desprezíveis (isto é, fluxo constante e invariável). Assim, a Equação 4 pode ser simplificada para a Equação 5.

$$Q = \alpha A^m \quad (5)$$

As particularidades do modelo de onda cinemática adotado no programa são expostas no documento de capacitação número 10 da HEC (USACE, 1979).

#### 2.6.3 Fluxo de base e método de difusão do fluxo na superfície:

À medida que a água é infiltrada no subsolo, algum volume pode ser perdido para armazenamento em aquíferos profundos. No entanto, determinado volume é armazenado apenas temporariamente e retornará com relativa rapidez à superfície, através do fluxo de base. A combinação deste fluxo de base e o escoamento direto resulta em um hidrograma de escoamento total.

Segundo o manual do usuário, o HEC-RAS possui três conjuntos de equações que podem ser usados para determinar o comportamento do fluxo que se move sobre e entre as células da malha computacional. As equações de difusão de onda; *Shallow Water Equations* (SWE-ELM, que significa Equações de Águas Rasas, Método Euleriano-Lagrangiano); eu um modelo de equações para fluxo superficial que é mais conservadora em termos de conservação da energia (SWE-EM), que significa.

Equações para águas rasas, método Euleriano. Para a maior parte dos casos, o manual indica que o modelo equacional SWE-ELM deve ter acurácia suficientemente adequada nas respostas, exceto se já se saiba que as equações de Saint Venant são necessárias para o conjunto de dados que está sendo modelado. Nesse sentido, foi adotado método indicado pelo manual, que, de maneira sucinta, parte da premissa de capturar toda a precipitação que chega à superfície do solo e armazenar até que a capacidade de armazenamento da mesma seja preenchida. Para isso, foram adotados os parâmetros de infiltração de água em superfícies urbanizadas conforme disposto no item 2.6.1.

A água se infiltrará enquanto a capacidade de armazenamento não estiver cheia. O escoamento superficial, por sua vez, será gerado quando a capacidade de armazenamento for preenchida e a taxa de precipitação exceder a taxa de infiltração, adicionando uma contribuição ao tempo de concentração do modelo.

#### **2.6.4 Análise para calibração:**

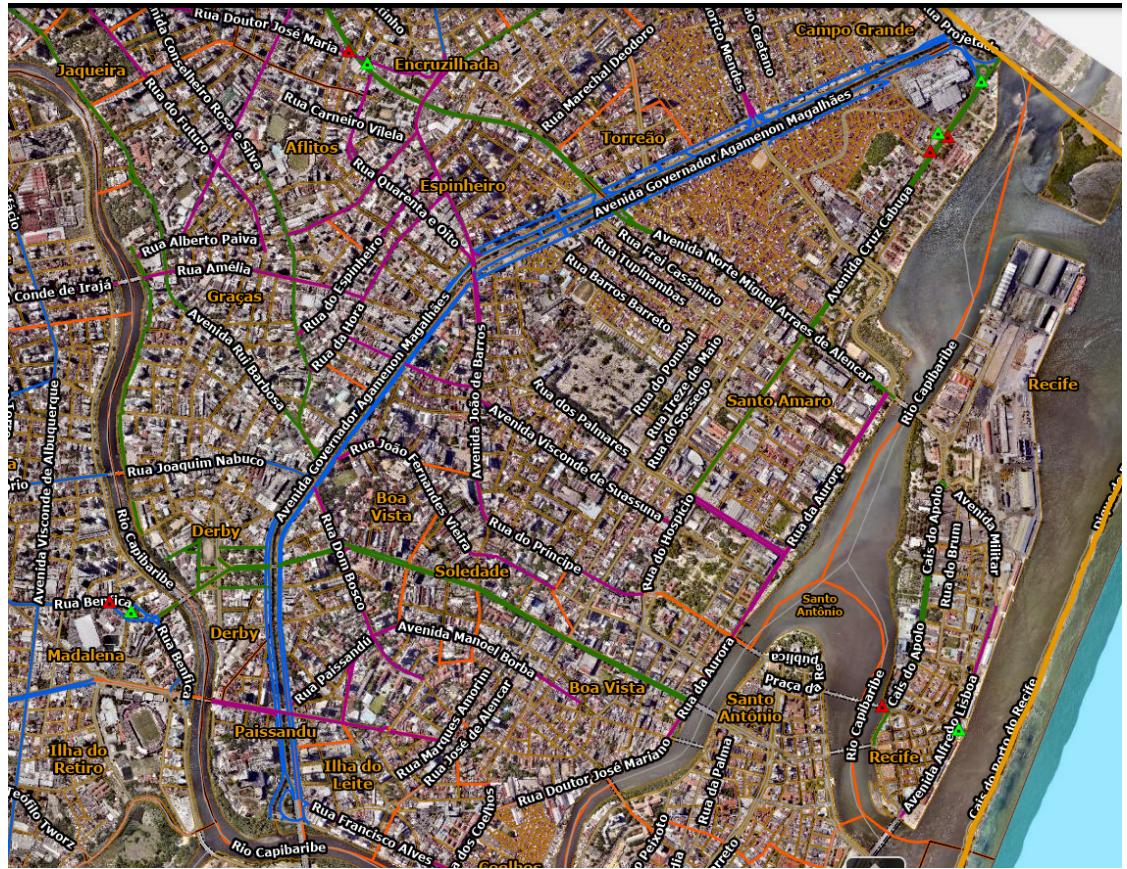
As sub-bacias geraram trechos de escoamento superficial, os quais tiveram sua captação realizada pelos subcoletores e, por fim, destinadas ao Canal. Esse modelo gerado é corroborado através da realidade da distribuição de drenagem pluvial instalada na área de estudo, mostrada pelas imagens de locação no cadastro de microdrenagem do ESIG, disponibilizado pela Prefeitura do Recife. Além disso, registros fotográficos e filmagens dos ocorridos durante o período em que o houve o transbordo do canal e subsequente alagamento das vias, encontradas em anexo a este documento, foram utilizadas como base para verificação da correta identificação quantitativa dos fluxos captados pelas bacias de maior capacidade e vazão identificadas no programa, uma vez que estas devem coincidir com as áreas mais afetadas pelas enchentes.

## **4 METODOLOGIA**

A área estudada compreende o trecho da Avenida Agamenon Magalhães e seus componentes de drenagem, incluindo o canal principal, exultório das bacias contribuintes de bairros e ruas à montante de seu curso, exibidos na Figura 4.



Figura 4 - Área de estudo, canal da Av. Agamenon Magalhães, circundado pelas pistas (em azul)



Fonte: ESIG Informações Geográficas do Recife.

Os parâmetros utilizados e as formas de avaliação para a identificação da área susceptível às cheias, alvo do estudo estão definidos no quadro 2.

Quadro 1 - Parâmetros e métodos utilizados para avaliação de área susceptível às cheias.

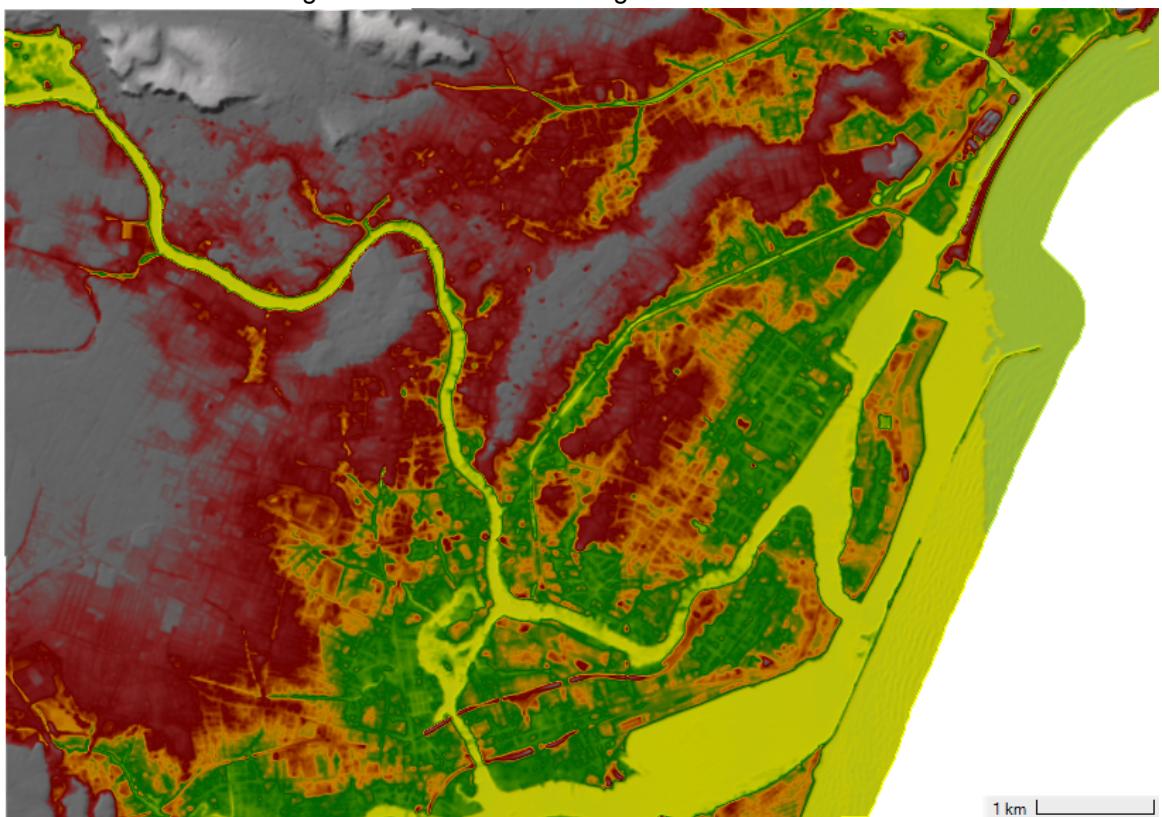
Parâmetro avaliado	Método de avaliação
Relevo	RASTER – MDE e MDT (processamento de imagens pelo software HEC – RAS)
Proximidade da foz do Rio Capibaribe	Medição – <i>Google Earth Pro</i> (distância do exutório do canal ao Rio Capibaribe).

Fonte: Autor, 2023.

### 3.1 TRATAMENTO DOS RASTERS NA SIMULAÇÃO DO HEC-RAS

De posse dos *rasters* do terreno que abrange toda a bacia do canal da Av. Agamenon Magalhães, do programa Pernambuco 3D, os mesmos foram unificados com o programa HEC-RAS, para criar uma imagem única do Modelo Digital de Terreno (MDT), conforme ilustrado na Figura 5.

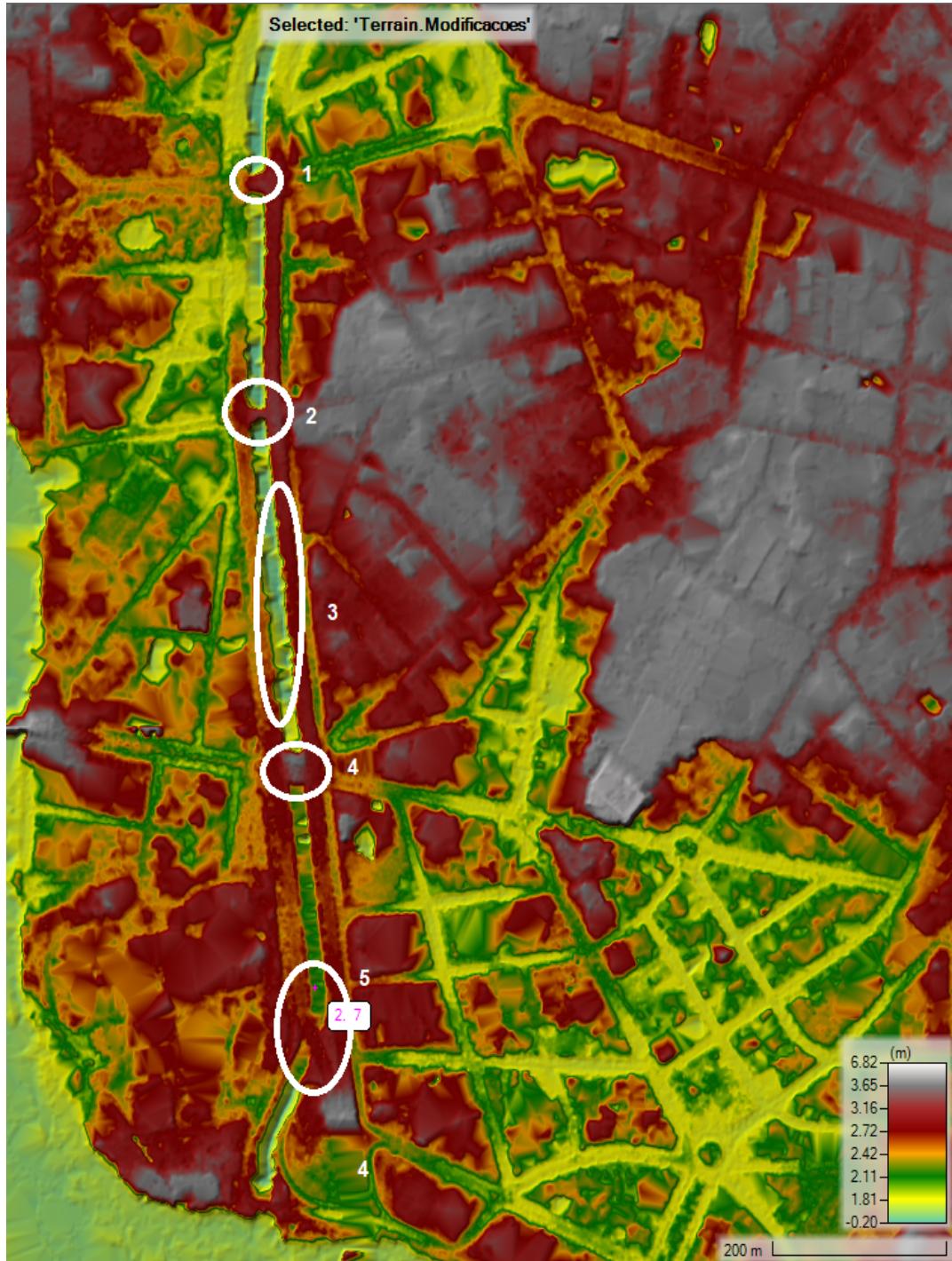
Figura 5 - Raster MDT da região norte da cidade do Recife



Fonte: Autor.

Com a imagem ampliada, Figura 6, pode-se interpretar a mesma com base na escala de cor, sendo a amarela a que representa as cotas mais baixas e cinza as cotas mais elevadas, são visíveis, nas áreas destacadas em branco, interrupções no traçado contínuo da elevação do terreno pertencente ao fundo do canal, enumeradas de 1 a 5.

Figura 6 - Detalhamento do MDT em trechos ao longo do eixo do canal da Av. Agamenon Magalhães



Fonte: Autor.

Ao projetar as imagens de satélites e dados do *Google Maps* sobre a mesma região, georreferenciadas através de uma projeção SIRGAS 2000 da Coordenada UTM 25s, conforme Figura 6, observa-se que os trechos do terreno identificados como mais elevados pelo sistema ao longo das margens e transversais ao canal,

trata-se de interferências causadas por pontes que cruzam os canais e árvores ao longo de suas margens.

Para que as simulações sejam bem sucedidas, o programa HEC-RAS necessita que os dados, tanto do MDT como do modelo digital de elevação (MDE) sejam condizentes com a realidade. Para isso, modificações virtuais no terreno serão necessárias para que as irregularidades causadas pela vegetação e as construções ao longo do objeto de estudo, cujas distorções são mais facilmente percebidas com a sobreposição de imagens de satélite no MDT, Figura 7, destacados na elipse azul o exemplo de deformidade causada por pontos onde os dados não são corretamente interpretados pelo programa, aparecendo como barramentos e/ou assoreamentos ao longo do canal.

Figura 7 - Erros de interpretação do MDT no HEC-RAS, visíveis em um trecho do canal da Av. Agamenon Magalhães



Fonte: Autor.

Usando o HEC-RAS, com a imagem do satélite sobreposta à camada do terreno, o canal foi delineado manualmente utilizando-se o recurso de modificação de terrenos com a ferramenta de criação de canais, que ao fim do traçado, conforme a linha preta, central ao canal e as linhas de margens exibidas na Figura 6, pode-se remover as interferências virtuais criadas pelas representações das pontes.

O recurso de definição das seções no HEC-RAS, por sua vez, permite a definição dos parâmetros geométricos, conforme as medidas reais foram obtidas através dos registros da EMLURB, encontradas no Anexo A, e as seções foram locadas conforme a planta de locação do canal Derby-Tacaruna, gentilmente também cedida do banco de dados de projetos da EMLURB, pelo prof. Pedro Olivera, exibida na Figura 8.

Figura 8 - Planta de locação das seções do canal da Av. Agamenon Magalhães



Fonte: EMLURB (2023).

Através da análise da planta de locação, as distâncias entre cada seção transversal foram obtidas e referenciadas no MDT, permitindo o traçado com aproximação aceitável entre as seções reais fornecidas pelo projeto e suas equivalentes na geometria virtual.

É importante evidenciar que o software HEC-RAS, pode interpolar os trechos de superfície e das 15 seções transversais do canal que foram fornecidas, bem como a batimetria, conformando o modelo executado manualmente. Desta maneira, o modelo digital é fidedigno também em relação às elevações do terreno extraídas

pela EMLURB em campo para serem utilizadas como cota de fundo, conservando a declividade original do canal e por fim contornando os erros gerados pelos pontos capturados no MDT pelo PE3D.

### 3.2 PARÂMETROS ADOTADOS NA SIMULAÇÃO

Para as simulações com o HEC-RAS, o Número de Manning (n) foi adotado seguindo a tabela do manual de referências hidráulicas do HEC-RAS, adaptada, Tabela 2, adotando-se para toda a extensão do canal, as condições descritas.

Tabela 2 - Descrição da superfície do canal e respectivos números de Manning

Tipo de superfície	Baixo (n)	Normal (n)	Máximo (n)
Fundo de concreto e laterais de pedra revestida em argamassa	0,0115	0,017	0,020

Fonte: adaptado de USACE, 2023.

Apesar de se realizar manutenções periódicas na forma de dragagens, como a liberação repentina de fluxo por barreiras artificiais ao longo do trajeto do canal para eliminar objetos, dejetos e sedimentos depositados em seu leito, pelo julgamento a favor de um coeficiente mais conservador, atribuiu-se para as margens e para o fundo do canal, o valor de  $n = 0,020$ . Para proporcionar melhor calibração para o modelo de escoamento superficial 2D do HEC-RAS, faz-se necessário a identificação das bacias e sub-bacias contribuintes para a onda de cheia do canal, bem como a delimitação do escoamento superficial preferencial com base nos aspectos físicos do terreno urbano.

Para análise, foram realizadas simulações utilizando a plotagem do mesmo MDT e MDE, exportados do HEC-RAS para o HEC-HMS, o qual é mais adequado para a tarefa de interpretação e cálculo de escoamento superficial, uma vez que o mesmo permite um aprofundamento da análise hidráulica, ao levar em conta também parâmetros de escoamento subterrâneo, interferência da impermeabilização do terreno, copas de árvores, evaporação, evapotranspiração, sistemas de drenagem, entre outros parâmetros que podem contribuir para o atraso e/ou mitigação da onda de cheia.

Na Figura 9, e em sua ampliação (Figura 10), observa-se as cotas de nível do canal Derby - Tacaruna projetadas no sistema de Informações Geográficas do Recife (ESIG), em que a cota de perímetro do canal é de 0,0 m para a lâmina d'água.



Figura 9 - Mapa de cotas de nível e bases de micro drenagem em trecho do canal Derby-Tacaruna



Fonte: Sistema de Informações Geográficas do Recife (SIG), adaptada pelo autor, 2023.

Figura 10 - Ampliação de detalhe das cotas de nível em trecho do canal Derby-Tacaruna



Fonte: Sistema de Informações Geográficas do Recife (ESIG), adaptada pelo autor, 2023.

De posse das informações das curvas de nível em conjunto com o comprimento e posicionamento da rede de microdrenagem cadastrada pela EMLURB, foi possível realizar um comparativo das tubulações de drenagem, com os fluxos identificados e gerados pelo HEC - HMS. Na análise do modelo de elevação superficial (Figura 11), que leva em consideração toda a geometria do terreno para a delimitação das bacias hidrográficas e seus respectivos fluxos e vetores de escoamento, esses, que são sempre gerados nas regiões de acúmulo de fluxo e com mais facilidade de escoamento superficial.

Figura 11 - Recorte da projeção do HEC-HMS nas coordenadas da Figura 8



Fonte: Autor.

Sobrepondo-se a camada de escoamento superficial gerada pelo programa com o cadastro da rede de microdrenagem da EMLURB (Figura 12), pode-se ilustrar o cálculo realizado pelo programa pela coincidência do posicionamento e sentido das instalações da rede ao longo das vias e logradouros responsáveis pelo conduto dos fluxos superficiais ao canal, com pequenas variações de direção, devido às idiossincrasias construtivas da mesma.

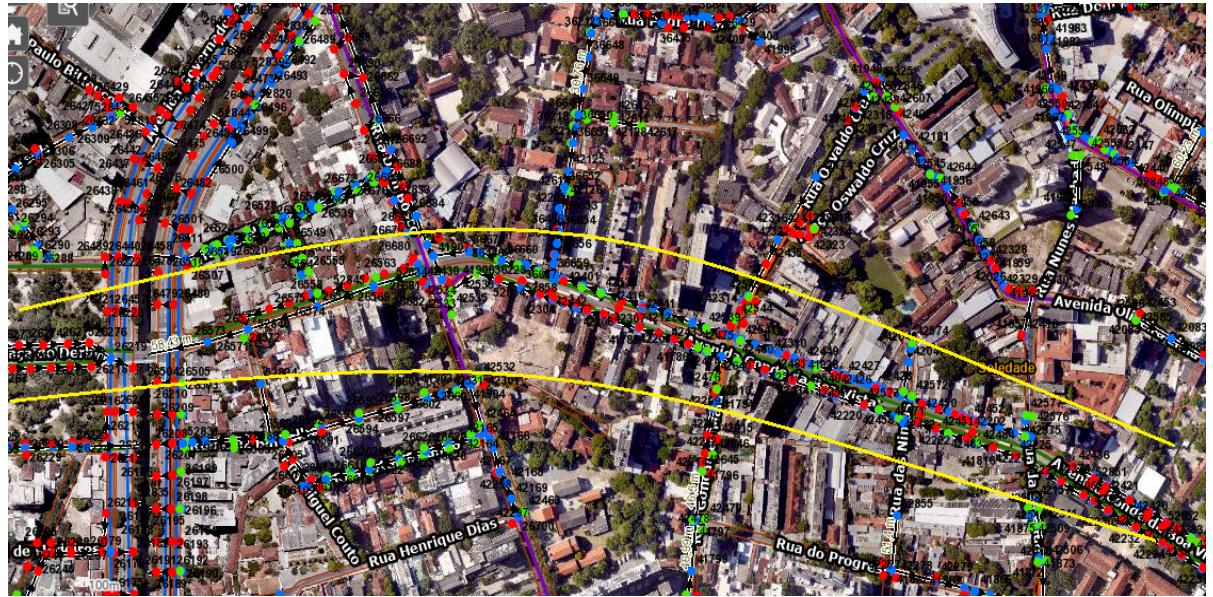
Figura 12 - Sobreposição das Figuras 8 e 10



Fonte: Autor.

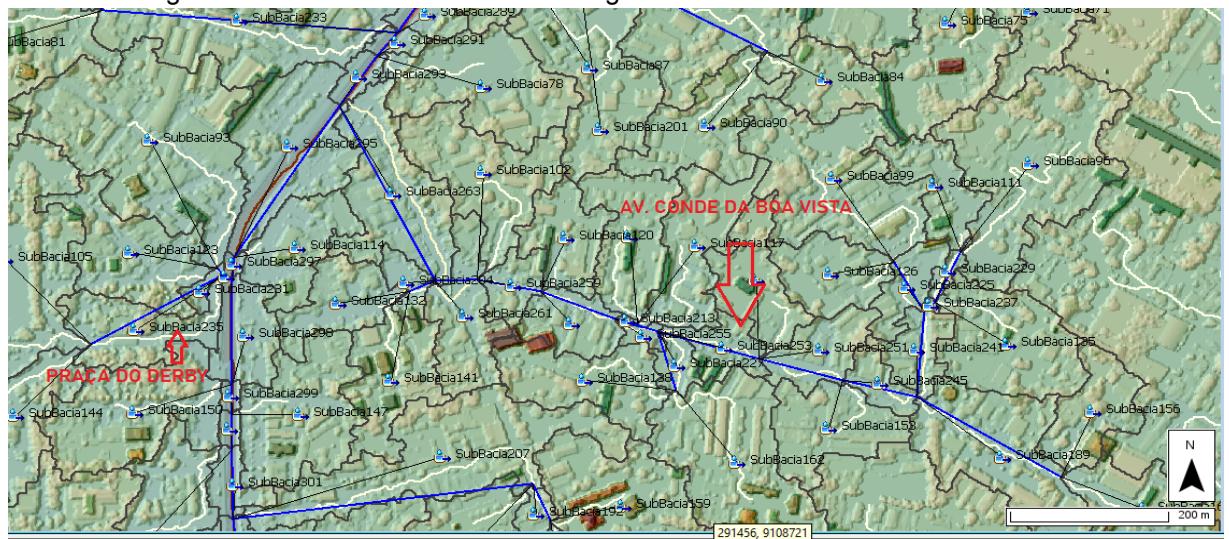
De maneira análoga ao que foi elaborado anteriormente, a imagem de cadastro de drenagem da Av. Conde da Boa Vista, coincide com a imagem gerada no HEC – HMS. A mesma comparação pode ser feita, entre as Figuras 13 e 14, o que permite visualizar a grande contribuição desses lotes e quadras para com o canal como bacia de captação e por sua vez corroboram para a calibração do modelo, além dos registros de ocorrências reais de transbordo do canal Derby - Tacaruna no trecho, conforme imagens, vídeos e reportagens feitas no período de 22 a 25 de maio de 2022.

Figura 13 - Sub-bacias e escoamento superficial no trecho da Av. Conde da Boa Vista



Fonte: Autor.

Figura 14 - Trecho destacado da drenagem da Av. Conde da Boa Vista



Fonte: Autor.

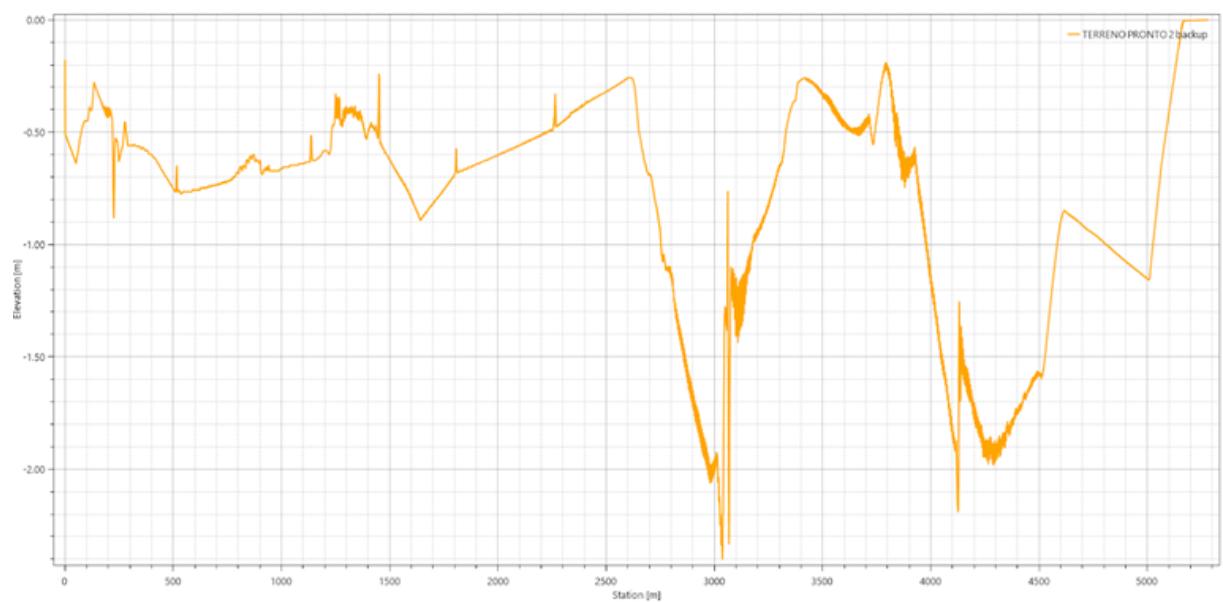
A Av. Conde da Boa vista corresponde ao trecho mais longo contribuinte direto da bacia do canal da Av. Agamenon Magalhães e, ao longo da mesma, capta as contribuições de ruas perpendiculares, como as ruas Dom Bôsco, Padre Inglês, Gonçalves Maia, Oswaldo Cruz e Soledade, cujos gráficos de fluxo ao longo do tempo estão contemplados no anexo B.

### 3.3. DADOS DE ENTRADA NA SIMULAÇÃO

#### 3.3.1 Terreno

O terreno pós processado gerado através das interpolações entre seções transversais registradas no MDE, resultou na curva de elevação plotada na Figura 15.

Figura 15 - Elevação da cota de fundo do canal Derby-Tacaruna, no sentido longitudinal



Fonte: Autor.

Além do fato das cotas variarem de 30 cm a 2 m, e 40 cm abaixo do nível do mar, observa-se que os trechos com maior declividade tratam-se de interferências e distorções causadas por imperfeições remanescentes no MDE. No entanto, é possível verificar que nos trechos com maior uniformidade nos desníveis, sendo o trecho mais significativo deles entre a marca de 3.790,70 m na cota de -0,19 m e o subsequente vale em 4.125,15 m e cota de -2,19 m em relação ao nível do mar, havendo entre os dois pontos, uma declividade de 0,000597 m/m.

Além desse, outro ponto notável, e que se pode considerar um divisor de águas, ocorre em 2.620,68 m com elevação de -0,26 m e o segundo ponto em 3.036,68 m com elevação de -2,40 m em relação ao nível do mar, tendo-se uma declividade de 0,000514 m/m.

Para que seja possível calcular fluxo e vazões no canal, faz-se necessário a plotagem da área de captação das bacias hidrográficas mencionadas e exibida em detalhes anteriormente e abaixo, uma visão geral, na Figura 16, a área hachurada em azul, trata-se do perímetro de análise de fluxo 2D resultante.

Figura 16 - Bacia de captação extraída através da análise de fluxo superficial HEC-HMS



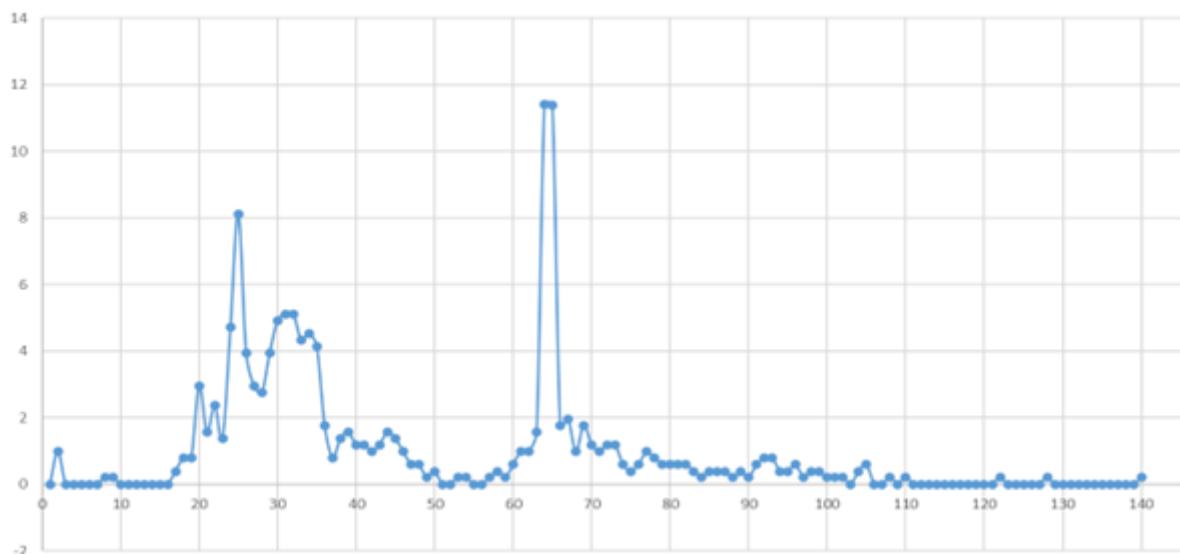
Fonte: Autor.

Os dados do *shapefile* exportado pelo HEC-HMS foram transformados em um perímetro de análise de fluxo 2D, no qual foram adotadas células de 5 m, gerados os pontos computacionais e adotado o número de Manning de 0,020, uma vez que se trata de área altamente urbanizada, com exceção do canal, cujo coeficiente mencionado anteriormente para a superfície interna foi de 0,013.

### 3.3.2 Precipitação

Para a simulação de precipitação em uma rede de fluxo 2D, cuja bacia de captação é ilustrada na Figura 16, foram inseridos os dados do dia 25/05/2022, obtidos através do website do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN, 2023), onde ocorreu um volume acumulado de precipitação de 136,36 mm no período de 00:00 às 22:00, com medidas registradas em intervalos de 10 min, ilustrados na Figura 17, e condizentes com as reportagens sobre o grande volume de chuvas e suas consequências nesta data.

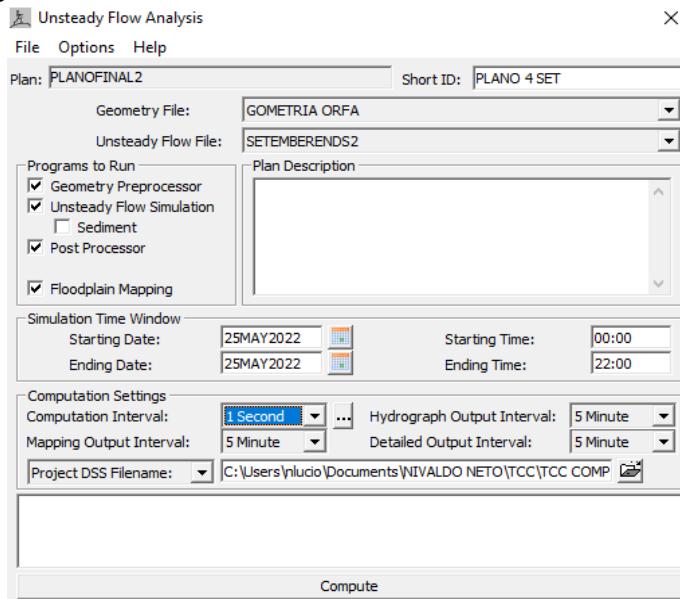
Figura 17 - Precipitação, (eixo Y) em mm vs tempo (intervalos de 10 min)



Fonte dos dados: CEMADEN (2023). Fonte: Autor.

No plano da análise de fluxo não uniforme do HEC-RAS, conforme Figura 18, com mapeamento de planícies de inundação, os parâmetros para a simulação foram: o intervalo de computação adotado de 1 s, com o mapeamento de resultados em intervalos de 5 min, assim como os resultados do hidrograma e detalhamento.

Figura 18 - Plano de análise de escoamento não uniforme no HEC-RAS



Fonte: Autor.

### 3.3.3 Distribuição do acúmulo de água na superfície

O escoamento superficial, como esperado, devido à batimetria do terreno, tem área preferencial ao longo da geometria do terreno de menor cota, sendo estas áreas correspondentes às ruas na situação geométrica real. Neste tocante, existem algumas ressalvas a serem observadas e analisadas, no que se diz respeito à geometria do terreno e as limitações impostas ao programa devido ao não detalhamento do escoamento que ocorre, por exemplo, dentro das áreas dos lotes e construções.

O terreno gerado pelo MDE representa os locais reais de maneira digital através da diferença de elevação das cotas. Portanto, para o programa, o que diferencia uma rua do telhado de uma edificação, por exemplo, trata-se apenas da elevação do terreno naquele local específico. Neste exemplo, a rua é plotada com características gerais longitudinais com sua devida declividade e aspecto plano sob a perspectiva da vista superior e por outro lado, a edificação é representada por uma elevação conforme seu perfil visto de cima, com valor correspondente à cota do telhado.

Sendo assim, a comunicação do fluxo que escoa na superfície de telhados e do terreno interno de edificações, bem como nas calhas e tubulações de direcionamento da água pluvial não estão representadas com exatidão. Para que

isso fosse possível, é necessário que seja levantado um cadastramento junto às bacias e microdrenagem, as contribuições individuais de cada edificação presente no modelo para simulação, o que se torna impraticável dentro do escopo deste trabalho. A Figura 18 ilustra a consequência desse problema: as formas geométricas acabam causando barramentos e armazenamento artificial da água nas áreas de algumas edificações, pois o programa as interpreta como meras elevações, e por sua vez, barreiras para o escoamento de superfície, de maneira que certos pontos se comportem como reservatórios. Identificados na Figura 19, estão os lotes 1, 2 e 3, que tratam de um terreno com quadra descoberta e piscina identificados como áreas cercadas por representações virtuais de elevação do terreno correspondentes aos edifícios que circundam as mesmas, sendo o destaque o lote 1 com quadra descoberta e piscina, o lote 2 um terreno baldio e o lote 3 uma quadra composta por um complexo de edifícios de múltiplos pavimentos.

Em compensação, para contornar o traçado inexistente de microdrenagem interno às edificações, *breaklines* foram traçadas sobre as áreas identificadas como ruas, estas, com o formato exato do cadastro de microdrenagem que estão sob as vias, de maneira a indicar ao *software* as áreas a refinar o processamento dos resultados do escoamento.

Figura 19 - Áreas de retenção em lotes e edificações, problema na interpretação pelo HEC-RAS



Fonte: Autor.

Conforme exibido na Figura 20, uma rede de conexão hidráulica virtual foi forçada pelo programa a fim de interligar as áreas identificadas como regiões de acúmulo isolado, como uma grande rede, com regiões nas quais são computadas e consideradas áreas de escoamento preferencial do fluxo, uma vez que visando elaborar um modelo tão acurado quanto possível e prático, foram realizadas generalizações a respeito da divisão da área de estudo do fluxo 2D, a fim de que o atraso na onda de cheia seja representado de maneira equivalente em termos quantitativos.

Figura 20 - Rede de conectividade hidráulica da superfície



Fonte: Autor.

As zonas edificadas receberam coeficientes de rugosidade diferentes das ruas, estas que por sua vez foram atribuídas de um limiar de capacidade de armazenamento, cuja precipitação transformada em escoamento excedente ao mesmo seja considerada como escoamento encaminhado para as tubulações de microdrenagem. Por fim, a microdrenagem foi considerada como meio condutor de todo o fluxo excedente da superfície pavimentada, captado e direcionado para o canal Derby-Tacaruna.

A consideração do direcionamento total da água excedente ao escoamento superficial é respaldada pelo fato de que todo o modelo de bacias gerado foi realizado de maneira que as entradas de dados foram respectivas à bacia hidrográfica contribuinte total do canal, sendo as demais áreas, fora da área de captação, descartadas nestes cálculos.

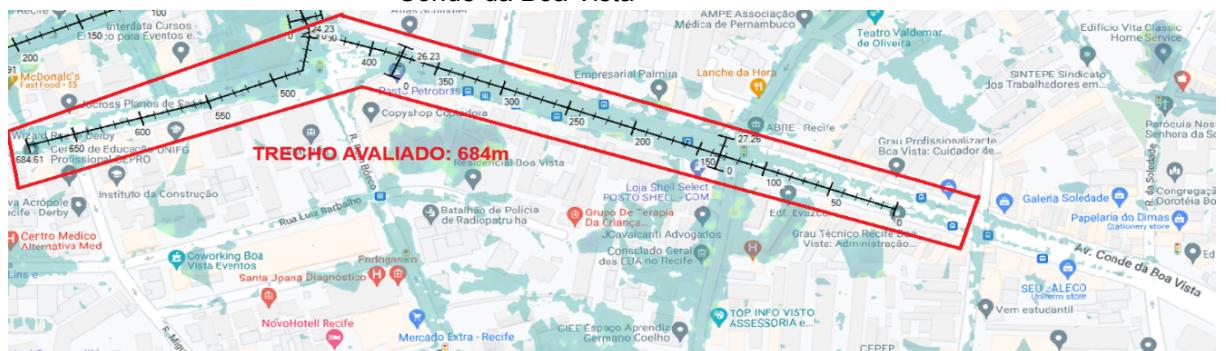
## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

### 4.1 IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS PONTOS DE ALAGAMENTO

Uma vez que este estudo visa entender o comportamento da drenagem geral que tem influência no canal, é imperativo que se realize o traçado dos perfis de microdrenagem existentes. Para isso, a partir das observações gráficas representadas pelo mapeamento de superfície de água gerada no terreno, aproveitando-se das *breaklines* que representam o georreferenciamento das tubulações de microdrenagem, foram traçadas linhas colineares com os registros da EMLURB, de modo que o HEC-RAS pudesse gerar a visualização dos perfis batimétricos da superfície ao longo das vias, como destacado na figura 12, exibindo o trecho com mais continuidade na superfície d'água na Av. Conde da Boa vista.

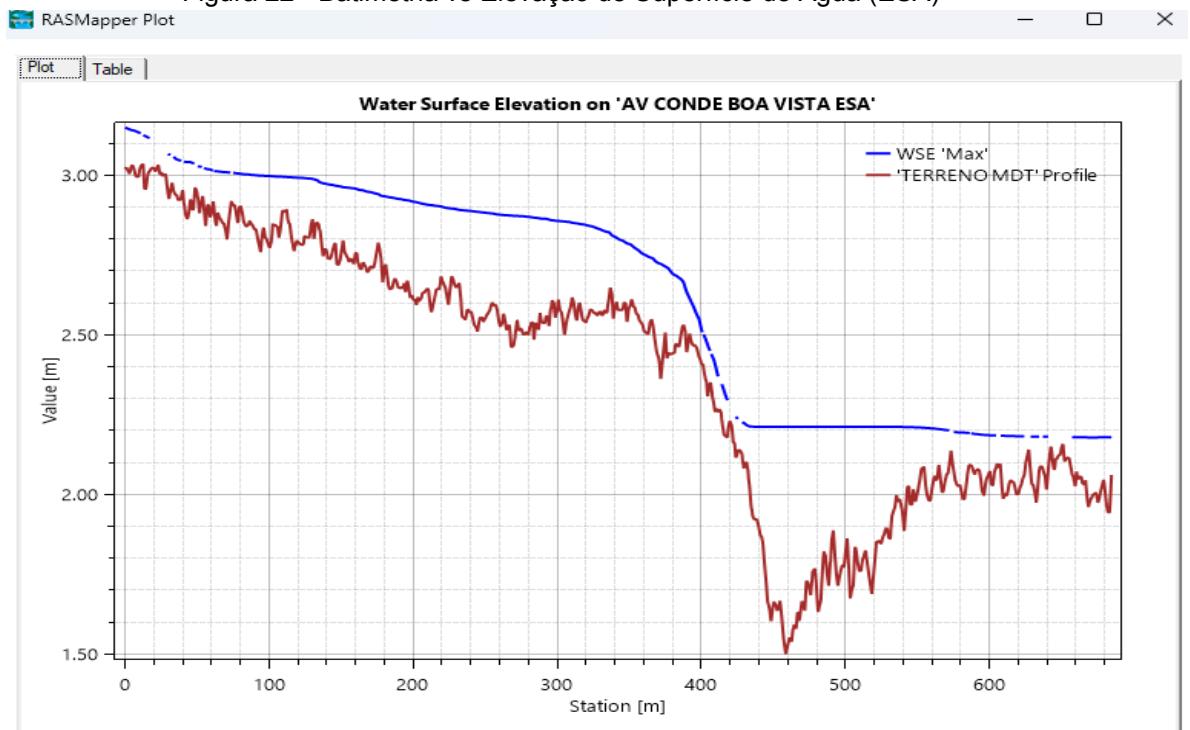
A Figura 21, como exemplo, tem-se o perfil traçado na Av. Conde da Boa Vista, inicialmente identificada por visualização como uma das maiores contribuintes no volume drenado para o canal, está exposto em comparação entre o nível da superfície d'água acima da linha de superfície do terreno (Figura 22).

Figura 21 - Trecho selecionado para análise quantitativa de nível d'água e fluxo para a Av. Conde da Boa Vista



Fonte: Autor.

Figura 22 - Batimetria vs Elevação de Superfície de Água (ESA)

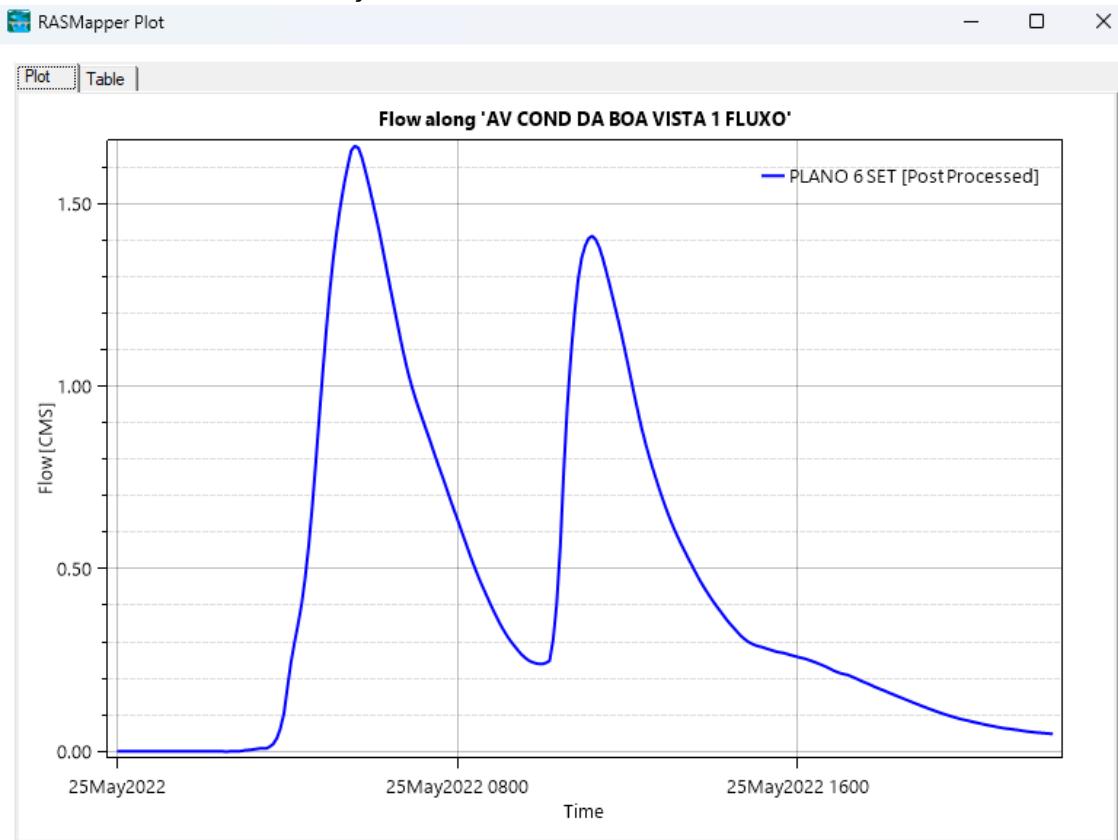


Fonte: Autor.

As pequenas descontinuidades exibidas na linha d'água em azul, correspondem a erros gráficos gerados por inconsistências na superfície devido ao nível de precisão dos dados embutidos no modelo, advindos do *raster* gerado pelo PE3D. Não obstante, a qualidade geral do gráfico gerado mostra-se de maneira geral, adequada para a análise do comportamento das zonas de acúmulo através do perfil traçado. O padrão de superfície de água com cota maior em trechos de baixa declividade geral e proporcionalmente menor em trechos em que há maiores declividades, devido ao aumento de velocidade, significa que o comportamento do fluxo está de acordo com o esperado no estudo de fenômenos dos transportes, o que atesta para um bom funcionamento da modelagem.

Além do nível da superfície d'água para as simulações do evento do dia 25/05/2022, foram criadas seções transversais ao longo desses fluxos, de maneira que podemos ter uma boa aproximação do fluxo, esquematizado pela Figura 23, que escoa sobre a superfície da Av. Conde da Boa Vista no trecho analisado, que consequentemente é drenado, admitindo-se o bom funcionamento do sistema.

Figura 23 - Fluxo ao longo da seção transversal no trecho da Av. Conde da Boa Vista, para a simulação do evento no dia 25/05/2022

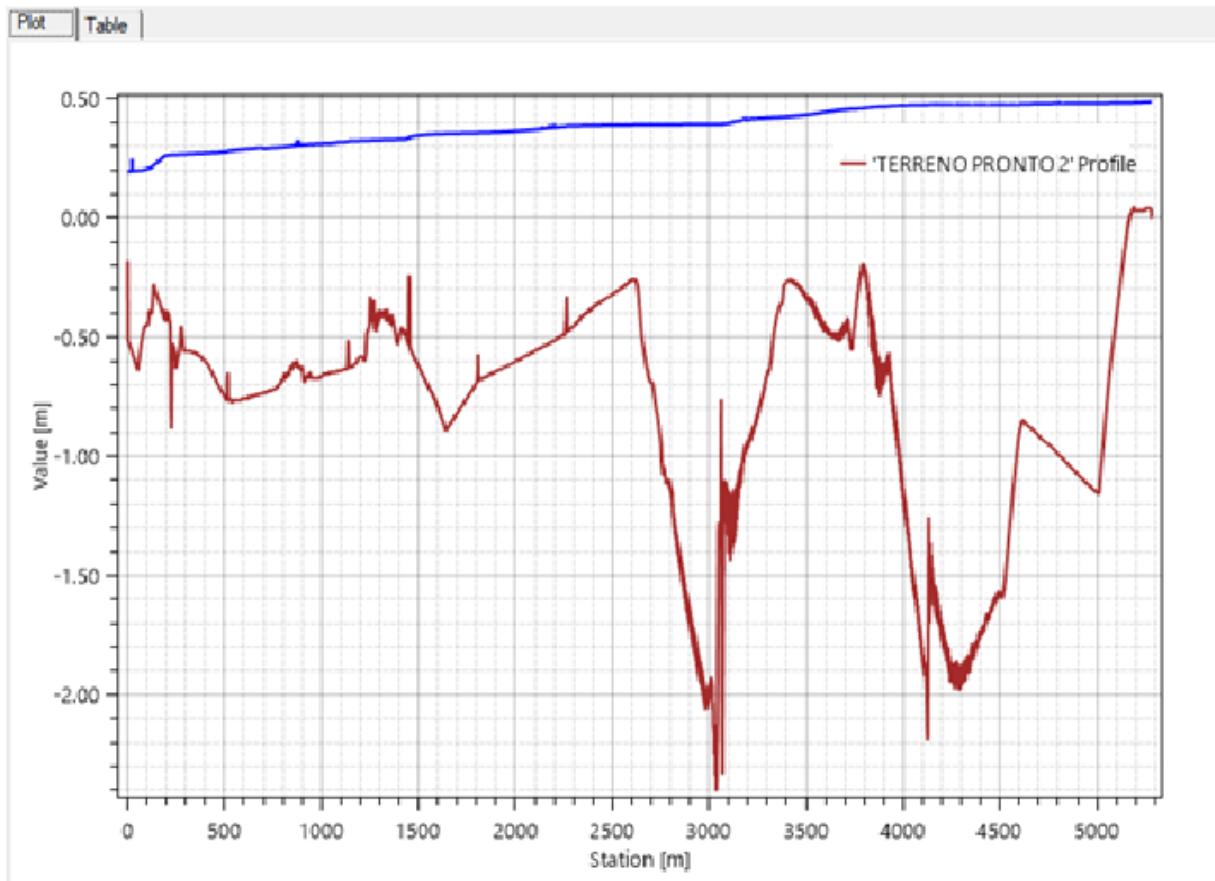


Fonte: Autor.

De maneira análoga ao exposto, foram realizados os traçados das demais vias que possuem ligação com a Av. Agamenon Magalhães, que incluem: Rua Senador José Henrique Asfora; Rua Dr. João Asfora; Av. Conde da Boa Vista; Rua Dom Bosco; Rua Carlos Porto Carneiro; Rua Nicarágua; Rua Buenos Aires; Rua Venezuela; Rua José Henrique; Praça do Derby; e Rua do Paissandu. As quais os dados de fluxo em suas respectivas séries temporais foram transformados em gráficos dispostos no Anexo B.

Para a drenagem principal, objeto de estudo deste trabalho, o canal Derby-Tacaruna, utilizando-se o MDE como *raster* de base para a simulação, os dados de nível d'água ao longo da superfície do terreno são exibidos na Figura 24.

Figura 24 - Perfil do leito do canal vs nível d'água, para o canal Derby-Tacaruna, simulação do evento no dia 25/05/2022 às 15:00.

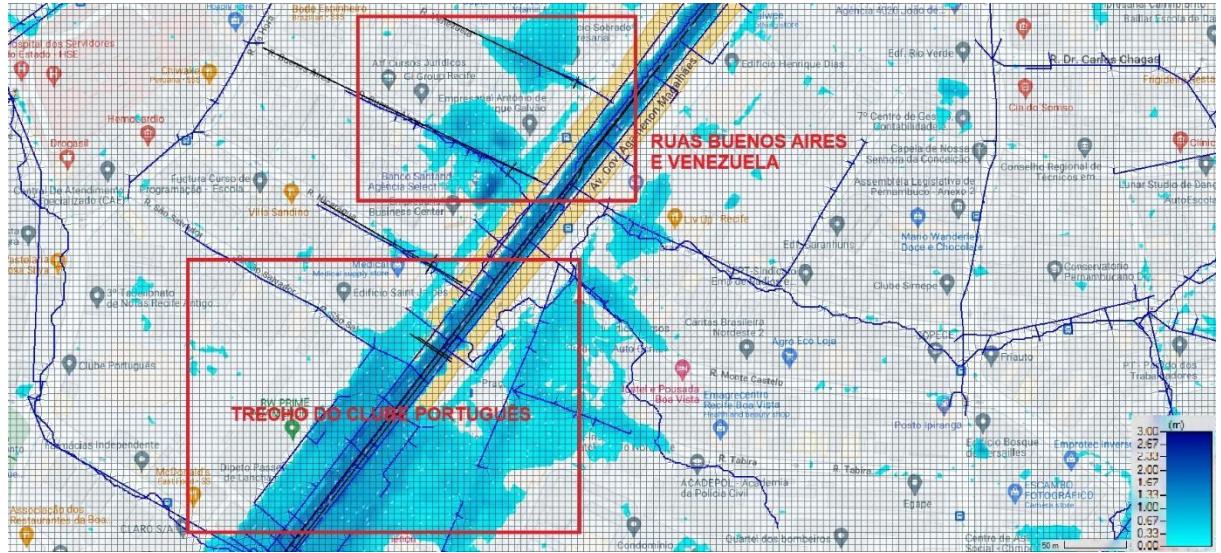


Fonte: Autor.

Pode-se verificar, dentre os demais aspectos do canal, trechos divisores de água, sendo o maior e mais significativo deles na marca de referência 3.000 a 4.000 m, tendo-se como ponto inicial, a desembocadura no Rio Capibaribe e comprimento máximo na saída para o Rio Beberibe, próximo ao Shopping Tacaruna. Para referência, este trecho da Av. Agamenon Magalhães situa-se entre a interseção com a Rua Quarenta e Oito e o 13º Batalhão da Polícia Militar sendo esses, os pontos de menor elevação e o pico da batimetria coincidente com a localização da interseção do trecho com a Av. Norte.

Na Figura 25, ao sobrepor o mapa de inundação com a referência do *Google Maps* embutida na análise, devidamente georreferenciada pela projeção geográfica da zona UTM 25S, é demarcado o acúmulo de água na região que compreende a depressão entre a estação 2500 e 3500 da Figura 23, sendo ilustrado no modelo, a elevação de água sobre as pistas da Avenida Agamenon Magalhães.

Figura 25 - Sobreposição do mapa de inundação à camada do sistema Google Maps, para a simulação do evento de 25/05/2022



Fonte: Autor.

O caso real desta situação simulada é exibido nas Figuras 26 e 27, adquiridas através de divulgação nas redes sociais do Jornal Folha de Pernambuco, de vídeos e imagens publicadas no dia 25/05/2022.

Figura 26 - Registro da situação no dia 25/05/2022 - Rua Amélia com Av. Agamenon Magalhães.



Fonte: Folha de Pernambuco, 2023.

Ainda nas proximidades, fazendo parte do conjunto de dados de fluxo extraídos temos as Figura 27, que exibem o trecho da Av. Agamenon Magalhães,

que intercepta as ruas Venezuela, Nicarágua e Buenos Aires, nas marcas de ruas Venezuela, Nicarágua e Buenos Aires, nas marcas de 2.050 a 2.350 m.

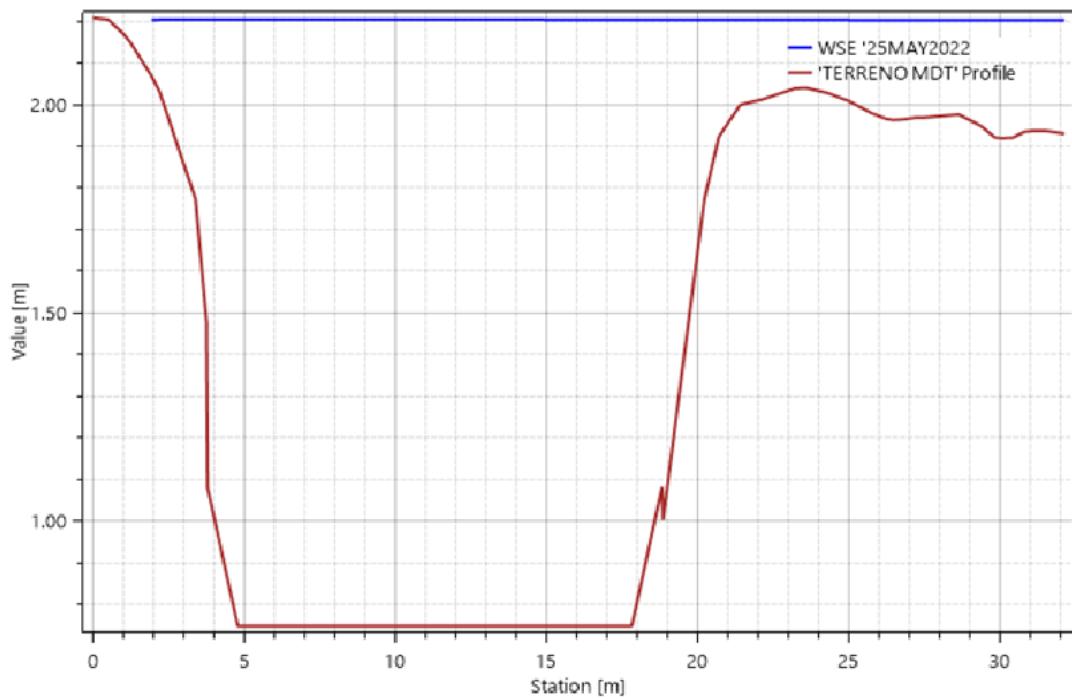
Figura 27 - Registro da situação no dia 25/05/2022 - Rua Venezuela e trecho da seção de 2050m na Av. Agamenon Magalhães.



Fonte: Folha de Pernambuco, 2023.

Para mais uma referência de calibração, nas proximidades da localização do ponto em que foi realizada a Figura 28, cerca de 50 m antes do Clube Português situado na margem direita da avenida, o perfil do nível d'água traçado no terreno, conforme a Figura 28, onde é possível observar a elevação de, em média, dadas as imperfeições do terreno *raster*, 45 cm de lâmina d'água, sendo a cota de transbordo os 2,00 m de nível d'água, condizente com as fotografias do dia em que ocorreu a chuva de projeto.

Figura 28 - Nível d'água em relação à batimetria da seção de referência 2.050 m do canal

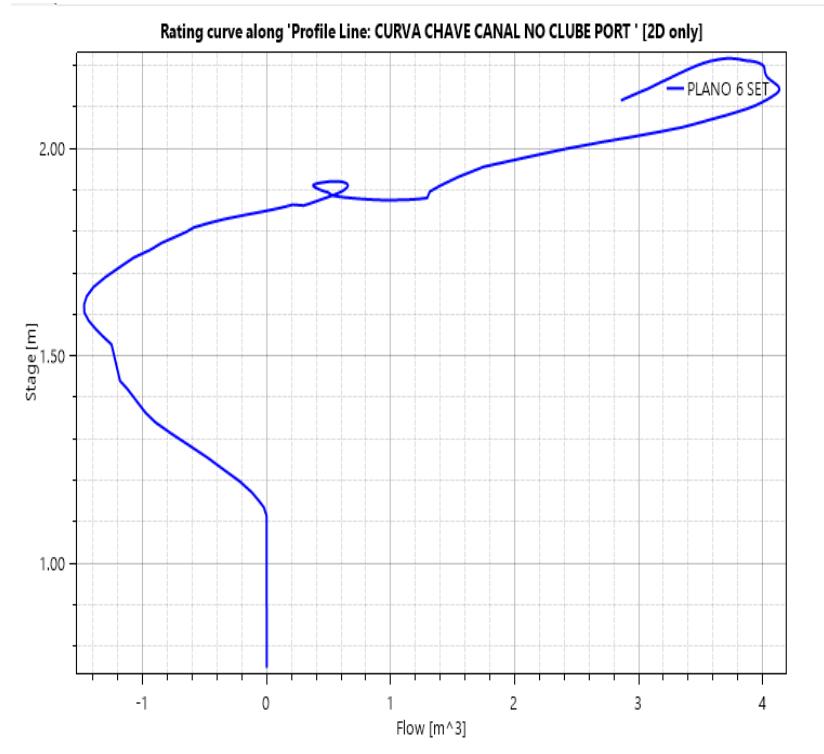


Fonte: Autor.

Ainda sobre este ponto, a curva-chave da seção transversal do canal é exibida na Figura 29. No programa HEC-RAS, segundo sua documentação, existe a convenção de que o fluxo é identificado de acordo com a direção em que se traça a linha de definição da seção transversal. Por exemplo, traçando-se a linha transversal ao eixo do canal a partir da margem esquerda para a direita, no sentido oeste-leste, indica que o sentido de montante à jusante da análise será de sul-norte, segundo esta perspectiva.

Deste modo, a Figura 29 explicita numericamente através da curva-chave do trecho analisado, que a hipótese levantada pelas observações acerca das depressões que ocorrem na batimetria do canal ao longo do mesmo, de fato, coincidem com a realidade, nas áreas inundadas mapeadas pelo modelo de cálculo do HEC-RAS e evidenciado pelas fotografias.

Figura 29 - Curva-chave da seção transversal traçada na referência de 2.050 m do canal



Fonte: Autor.

Nota-se, portanto, a inversão do fluxo que estava negativo em  $1,3 \text{ m}^3/\text{s}$  até que se atingiu a cota de transbordo do trecho, e somente então o fluxo é invertido, uma vez que a superfície da água consegue vencer a depressão localizada no trecho do terreno.

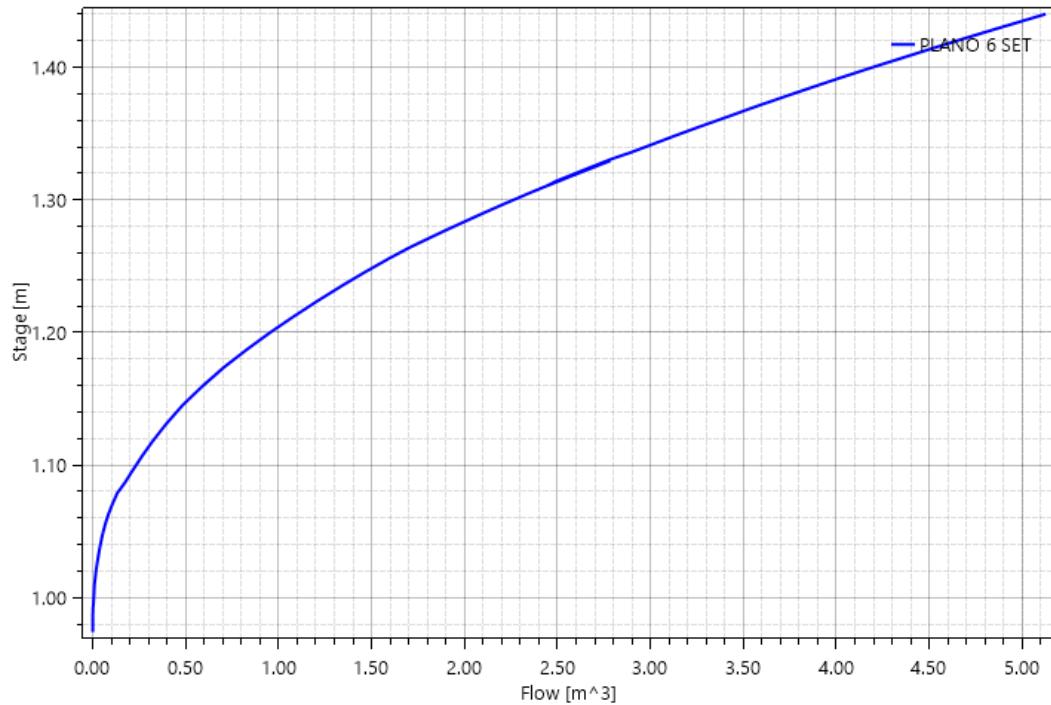
Dados os argumentos acerca da calibração do canal, observando-se as seções tratadas anteriormente, pode-se, por fim, analisar com segurança à respeito da qualidade dos dados, a curva-chave do canal na saída para o rio Capibaribe, exibida na Figura 30, como adequada representação da vazão do mesmo em função da cota de lâmina d'água.

Os dados do volume acumulado decorrente da vazão na seção de saída (Figura 31) para o Rio Capibaribe ao longo de toda a duração do evento, por sua vez, foram quantificados em  $253.000 \text{ m}^3$ , cuja distribuição ao longo do período foi plotada em gráfico na Figura 32. A partir desses dados, é possível quantificar a vazão média despejada pelo canal Derby – Tacaruna com uma vazão média de  $3,03 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Apesar do grande volume drenado, o nível d'água máximo atingido na saída para o rio Capibaribe, de  $1,95 \text{ m}$  é inferior à profundidade do canal, conforme o

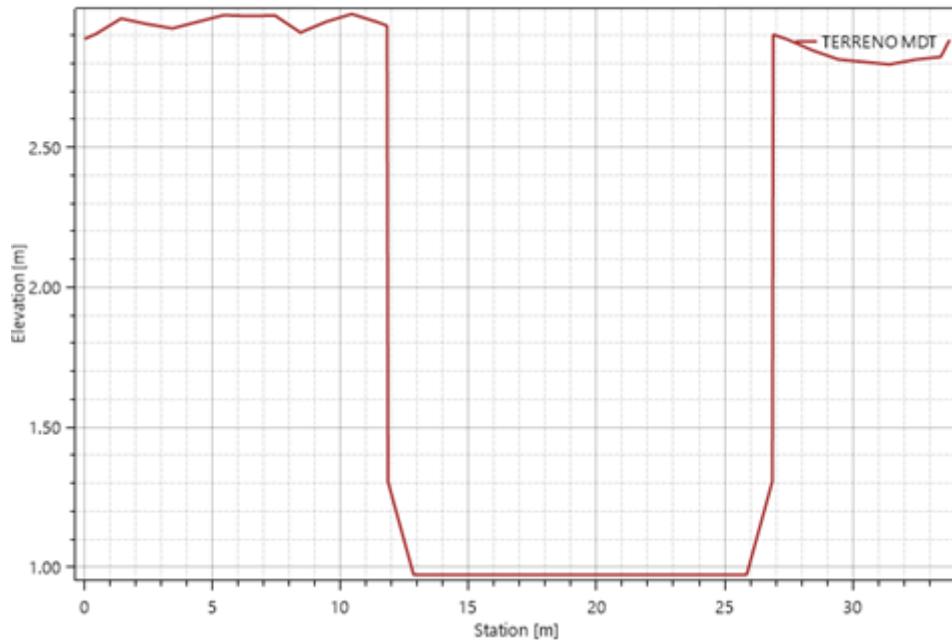
Figura 30, de nível d'água sobre terreno que retrata o nível máximo da água na seção transversal.

Figura 30 - Curva-chave do canal da Avenida Agamenon Magalhães



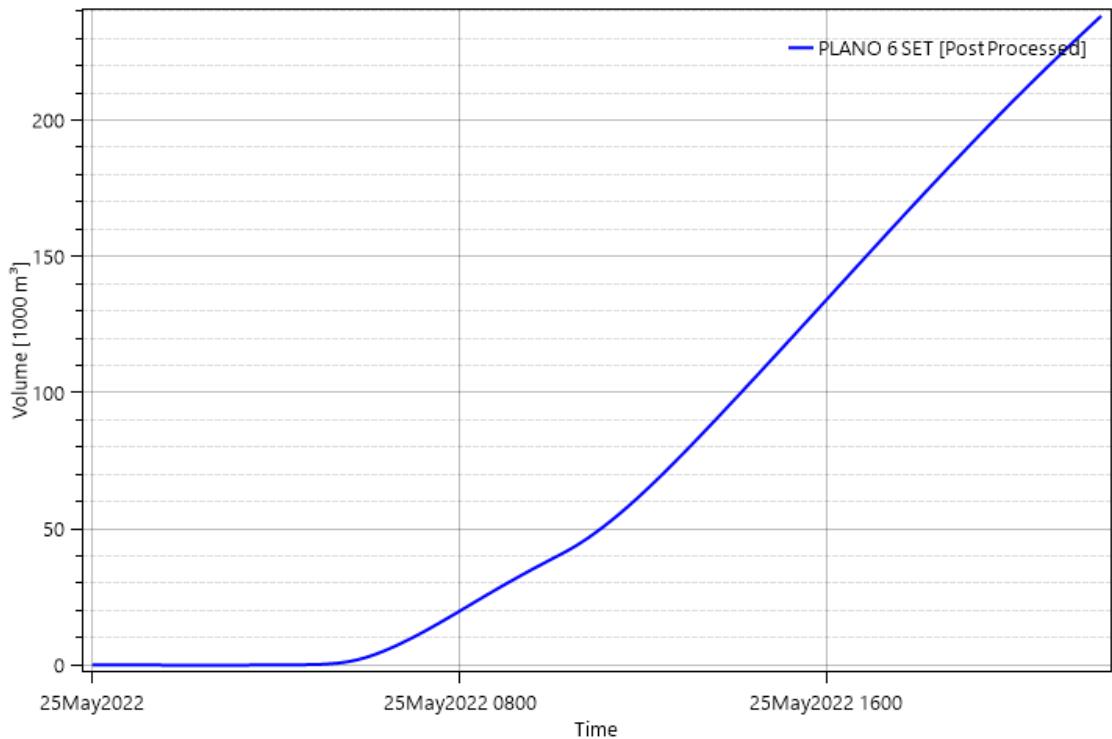
Fonte: Autor.

Figura 31 - Seção transversal na saída do canal para o rio Capibaribe



Fonte: Autor.

Figura 32 – Volume escoado na seção transversal.



Fonte: Autor.

## 6 CONCLUSÕES

Os dados observados levam à conclusão de que o canal de fato em seu estado atual não tem capacidade de drenagem suficiente para o volume acumulado das chuvas ocorridas. Apesar da profundidade ser suficiente para comportar o nível d'água máximo exigido na saída, os desniveis existentes ao longo do mesmo acabam por suprimir os trechos cuja geometria encontra-se adequada, pois justamente nestes pontos, por tratarem-se de vales, acabam por tornar-se regiões de acúmulo de água em meio ao trajeto do canal, de modo a permitir o transbordo do mesmo nestes trechos.

Ademais, a oscilação da maré, que por consequência eleva o nível d'água no Rio Capibaribe e por sua vez passa da cota de fundo do canal na desembocadura. Esta situação restringe mais ainda a capacidade de drenagem do canal, uma vez que a elevação do nível d'água necessário para que o fluxo de montante a jusante dentro do canal seja continuado é, também, elevada. Este fato acaba por exacerbar mais ainda os alagamentos nos pontos críticos citados neste trabalho.

Verifica-se que o canal, por sua vez, é dotado de comportas nas duas desembocaduras, na foz do Rio Beberibe e no Rio Capibaribe, com a função de

conter o contrafluxo causado pelas oscilações de maré. Como sugestão para a continuação deste estudo de caso, faz-se necessário verificar o atual funcionamento das comportas, bem como a verificação das de drenagem existentes que são acionadas para forçar a drenagem do canal em direção à jusante no momento em que as comportas encontrarem-se fechadas, nas altas de maré, de modo a verificar se a vazão desenvolvida pelas mesmas, é suficiente para drenar o volume excessivo que identificado no estudo quando a cota máxima de transbordo observado neste trabalho ocorre.

Além disso, é possível realizar uma melhoria no levantamento acerca do cadastro de uso e ocupação do solo com mais precisão, para que as generalizações de fatores como o número de Manning sejam mais acuradas, bem como o mapeamento da superfície do canal e adjacências, através do uso drones com capacidade geração de superfícies e mapas por nuvem de pontos e/ou tecnologias afins, para obtenção do modelo digital do canal sem necessidade de interpolação entre suas seções. Concomitantemente com estes recursos, as considerações à respeito do bombeamento em conjunto com acionamento das comportas, é possível modelar em um recorte da área de estudo.

Uma simulação com maior precisão pode ser feita como um trabalho complementar, utilizando-se da geometria do canal para criar um modelo digital detalhado no HEC-RAS com a inserção do barramento das comportas, programação de abertura e fechamento das mesmas levando em conta o acionamento das bombas sobre as vazões e elevações de nível d'água levantadas neste trabalho, como parâmetros de entrada.

## REFERÊNCIAS

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S.. **Técnicas compensatórias em drenagem urbana.** (2a ed.), Porto Alegre: ABRH, 318 p., 2011.

BARTLES, M.; BRAUER, T.; HO, D.; FEMING, M.; KARLOVITS, G.; PAK, J.; NICK, V.; WILLIS, J.. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS User's Manual.** In: Hydrologic Engineering Center, Davis, CA., 2023.

BRASIL. **Lei Federal de Saneamento nº 11.445.** Institui o Código Civil. Diário Oficial da União - Seção 1, Página 3, Brasília - DF, 5 de janeiro de 2007, ano 186 - art 2º p. 1-12, 2007.

CANHOLI, A.P.. **Drenagem urbana e controle de enchentes / Aluísio Pardo Canholi.** -- 2. ed. -- São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

CORDEIRO, J.; SILVA H. F.; CAMPERA, F. A.. N. Sistemas de drenagem urbana e o saneamento: uma análise cienciométrica. **Research, Society and Development**, 9 (11), e1239119616, 2020.

CORRÊA, A.C.B.. Contribuição à análise do recife como um geossistema urbano. Dissertação (Trabalho de Conclusão de curso). **Revista de Geografia – Programa de Pós- Graduação em Geografia da UFPE**, 23 (3), 2006.

FUCHS, B.E.. **Desenvolvimento de um sistema de Cálculo automatizado para projetos em drenagem urbana.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 75, 2011.

HAFNER, A.V.. **Conservação e reúso de água em edificações – experiências nacionais e internacionais.** Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia). UFRJ - Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

KAMURA, D.T.. **Microdrenagem nas grandes cidades: problemas e soluções** (Dissertação de Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - EPUSP/SP, São Paulo, 2005.

LIMA, S.M.S.A.; LOPES, W.G.R.; FAÇANHA, A.C.. Changes in Land Coverage in Teresina, Piauí, Brasil. **Sociedade & Natureza**, 33, 2021.

MARTINS, M.H.; MORATO, R.G.; KAWAKUBO, F.S.. Mapeamento de superfícies impermeáveis utilizando ortofotos, imagens de satélite e regressão linear. **Revista do Departamento de Geografia**, 35, 91-101, 2018.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I.M.. Climatologia: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Texto, 2007. 206 pp.

FCTH - Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. **Diretrizes Básicas Para Projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo.** São Paulo, abril de 1999.

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**, 4: 54-72, 2021.

PORTO, R.; ZAHED, K.; TUCCI, C.; BIDONE, F.. **Hidrologia- Ciência e Aplicação**. 3. ed. Coleção ABRH de recursos hídricos, 4, Porto Alegre: ABRH, 2004.

SAKUNO, N.R.R.; KAWAKUBO, F.S.; SPALEVIC, V.; MINCATO, R.L.. Mapeamento de superfícies impermeáveis em áreas urbanas utilizando imagens índices geradas pelo sistema Landsat-5 Thematic Mapper. **Revista do Departamento de Geografia da USP**, São Paulo, Volume Especial, Eixo 9, 190-198, 2017.

SANTOS, L.C.C.. **Estimativa de vazões máximas de projeto por métodos determinísticos e probabilísticos**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Vitória - ES, 2010.

SOULIS, K.X.; VALIANTZAS, J.D.. Identification of the SCS-CN parameter spatial distribution using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds. **Water Resources Management**, 27, 1737–1749, 2013.

SOUZA, J.L.; CORRÊA, A.C.B.; SILVA, O.G.. Compartimentação geomorfológica da Planície do Recife, Pernambuco, Brasil. **Revista de Geografia**, 34 (1): 147-168, 2017.

SOUZA, V.C.B; MORAES L.R.S.; BORJA, P.C.. Déficit na drenagem urbana: buscando o entendimento e contribuindo para a definição. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**, 1 (2): 162-175, 2013.

TOMAZ, P.. **Cálculos hidrológicos e hidráulicos para obras municipais**. Guarulhos: Navegar, 452 p., 2002.

TUCCI, C.E.M.. Parâmetros do hidrograma unitário para bacias urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**, 9 (2): 195-199, 2003.

TUCCI, C.E.M.. **Gestão da drenagem urbana**. Brasília, DF: CEPAL. Escritório no Brasil/IPEA, Textos para Discussão CEPAL-IPEA, 48, 2012.

TUCCI, C.E.M.. **Hidrologia: Ciencia e Aplicação**. 4a edição. Porto Alegre, editora da UFRGS/ABRH, 2015.

USACE - United States Army Corps of Engineers. **Manning's Roughness Coefficient**. Table 6-1 Manning's "n" for Closed Conduits Flowing Partly Full, 2023. Disponível em: [Manning's Roughness Coefficient \(army.mil\)](https://www.manningroughness.usace.army.mil/)

USACE - United States Army Corps of Engineers. **Introduction and application of kinematic wave routing techniques using HEC-1, Training Document 10**. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA (1979) - Disponível em <https://www.hec.usace.army.mil/>

WANDERLEY, L.S.A.; NÓBREGA, R.S.; MOREIRA, A.B.; ANJOS, R.S.; ALMEIDA,

C.A.P.. As chuvas na Cidade do Recife: uma climatologia de extremos. **Revista Brasileira de Climatologia**, 22: 149-164, 2018.

WENG, Q.. **Remote Sensing of Impervious Surfaces**. Boca Raton: Editora CRC Press, 2007.

YANNOPOULOS, S.I.; GRIVAKI, G.; GIANNOPPOULOU, Io.; BASBAS, S.; OIKONOMOU, E. K.. Environmental impacts and best management of urban stormwater runoff: measures and legislative framework. **Global NEST Journal**, 20 (10): 1 - 9, 2013.

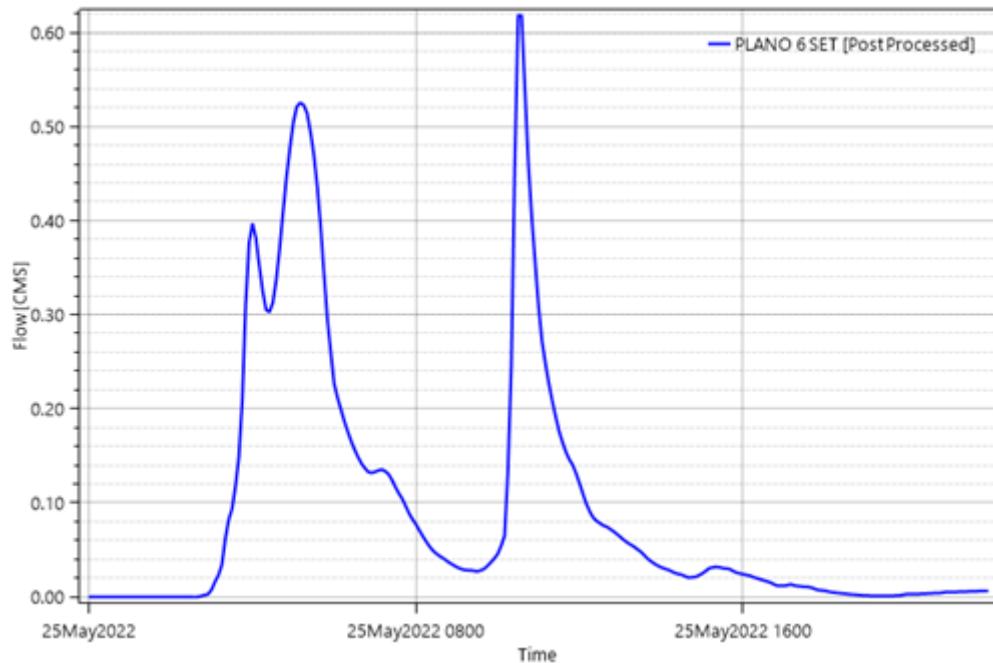
## APÊNDICE A - TABELAS COMPLEMENTARES

Paisagem	Tabuleiros	Colinas	Estuarina	Planície	Corpos d'água	Faixa Litorânea
<b>Relevo</b>	Tabuleiros e chás com topos planos do extremo NW do município, com cotas de até 150 m. Sedimentos da Formação Barreiras	Colinas dissecadas –morros – do, W e S do município. Geralmente associadas à Formação Barreiras em cotas entre 40 e 80 m.	Áreas baixas de até 4 m, sob influência das marés, separando o terraço marinho holocênico da planície fluvial, ocorre também ao longo do Capibaribe como uma franja.	Áreas baixas e médias de até 10 m de altitude fora do alcance direto das marés. Ao sul é formada pelo terraço pleistocênico onde fica o aeroporto dos Guararapes	Áreas baixas ao alcance das marés salinas ao longo dos principais rios. A área principal ocorre no Pina atrás do terraço holocênico da praia de Boa Viagem	Áreas que estão na fachada oceânica. Incluem o terraço holocênico de Boa Viagem e a Ilha istmo do Recife, fruto do retrabalhamento fluvial.
<b>Cobertura Vegetal</b>	Restos de mata secundária e capoeira.	Restos de mata secundária e capoeira	Algumas franjas de manguezais reconstituídas.	Área com vegetação escassa.	Manguezais nativos e reconstituídos.	Formações litorâneas ao longo da praia – gramíneas.
<b>Uso do Solo</b>	Zona semi-rural (chácaras) e expansão urbana (bairros populares)	Zona urbana com bairros populares não planejados	Zona urbana comercial e residencial. Impermeabilização total do terreno.	Zona urbana predominantemente residencial (classe média), impermeabilizada	Áreas de preservação mas com alguma ocupação por palafitas	Área residencial e comercial de alto valor especulativo. Forte impermeabilização.
<b>Processos Superficiais</b>	Erosão linear intensa e forte voçorocamento decorrente da erosão de subsuperfície	Deslizes sob precipitação intensa e voçorocamento forte.	Pouca infiltração devido à impermeabilização do terreno.	Pouca infiltração devido à impermeabilização do terreno.	Área sob a influência das marés e da deposição fluvial de argilas.	Pouca infiltração devido à impermeabilização do terreno, erosão eólica na praia.
<b>Riscos Ambientais</b>	Voçorocas.	Deslizamentos sob forte precipitação.	Inundação periódica.	Inundação periódica.	Poção por esgotos e outros eflúvios.	Inundação periódica.

Fonte: Corrêa (2006).

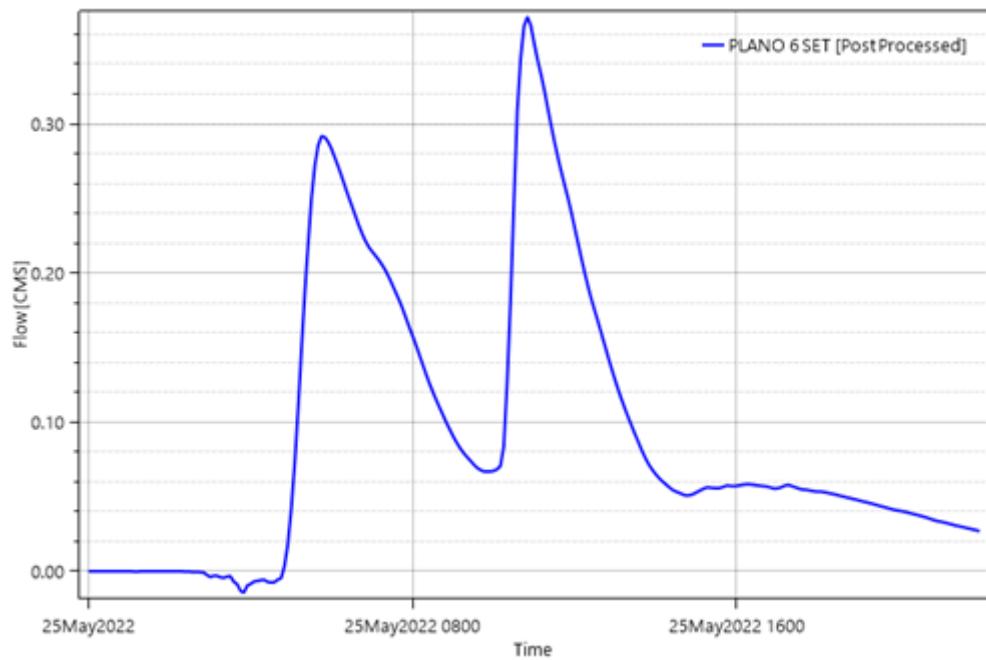
**APÊNDICE B – FIGURAS COMPLEMENTARES**

Figura 33 - Fluxo através da Rua Nicarágua



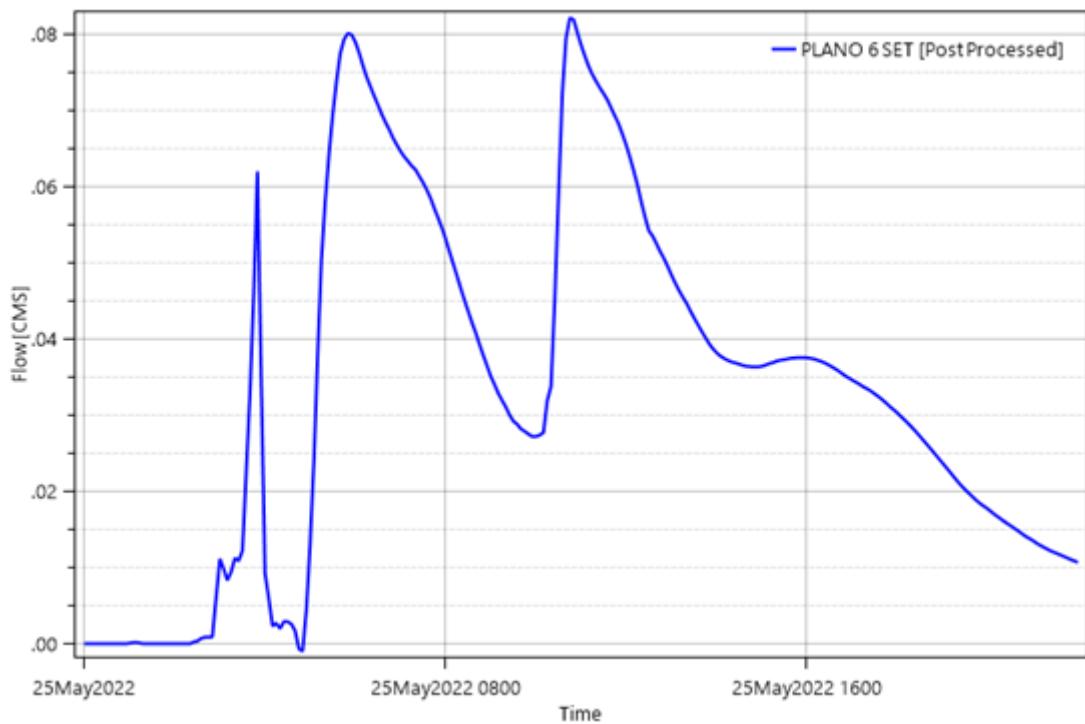
Fonte: Autor.

Figura 34 - Fluxo através da Rua Venezuela



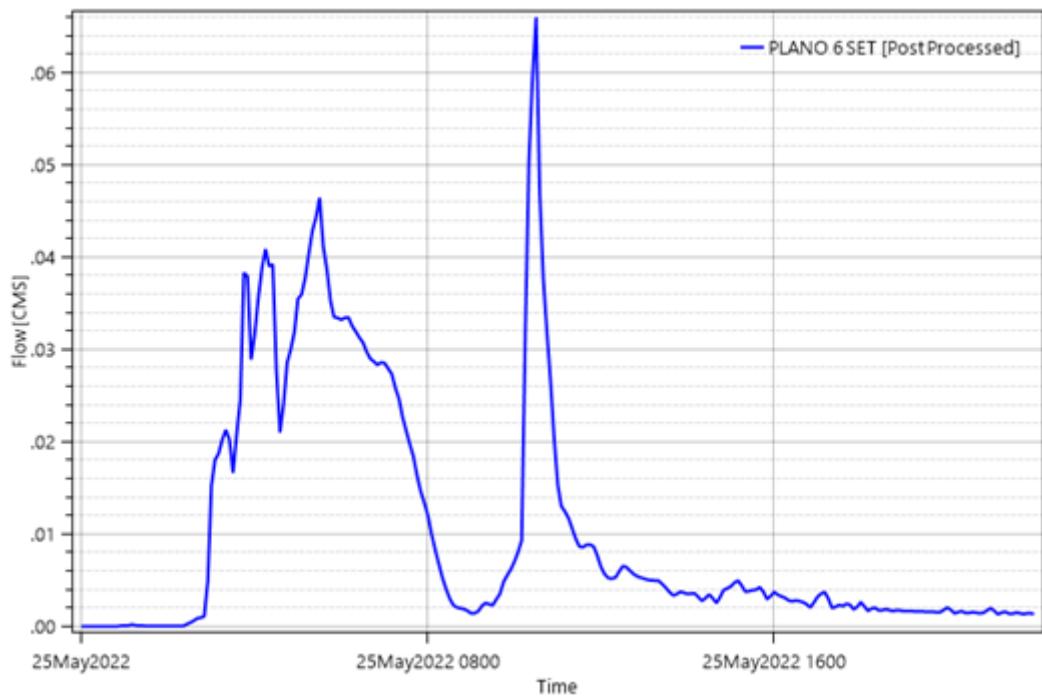
Fonte: Autor.

Figura 35 - Fluxo através da Rua Buenos Aires



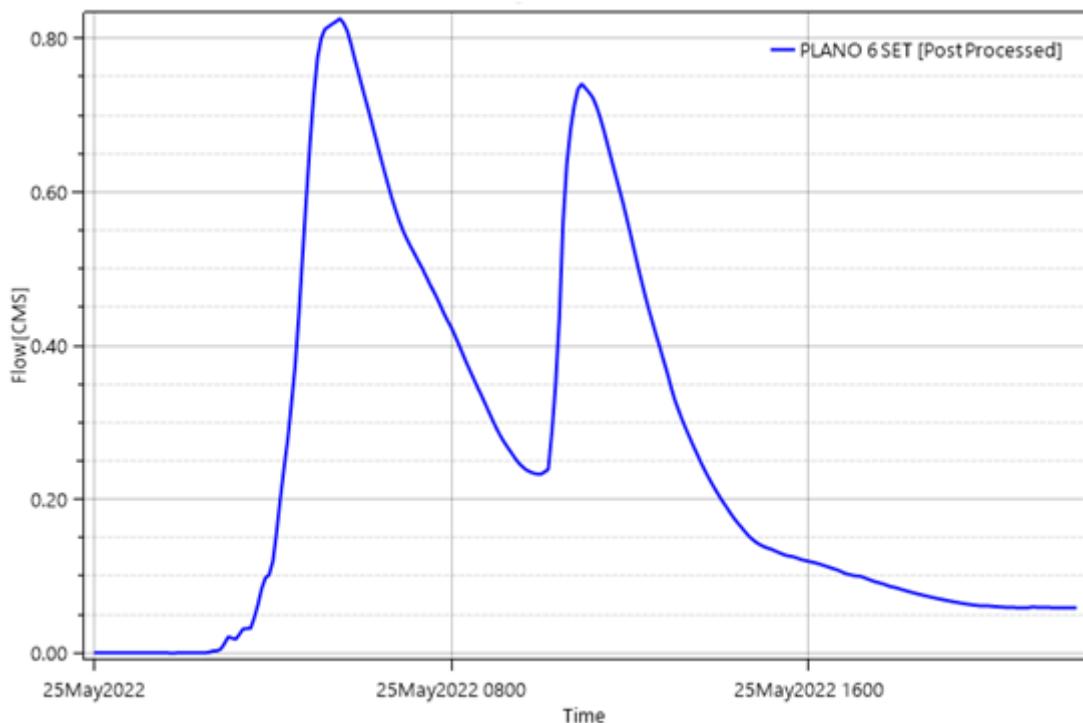
Fonte: Autor.

Figura 36 - Fluxo através da Rua do Paissandú



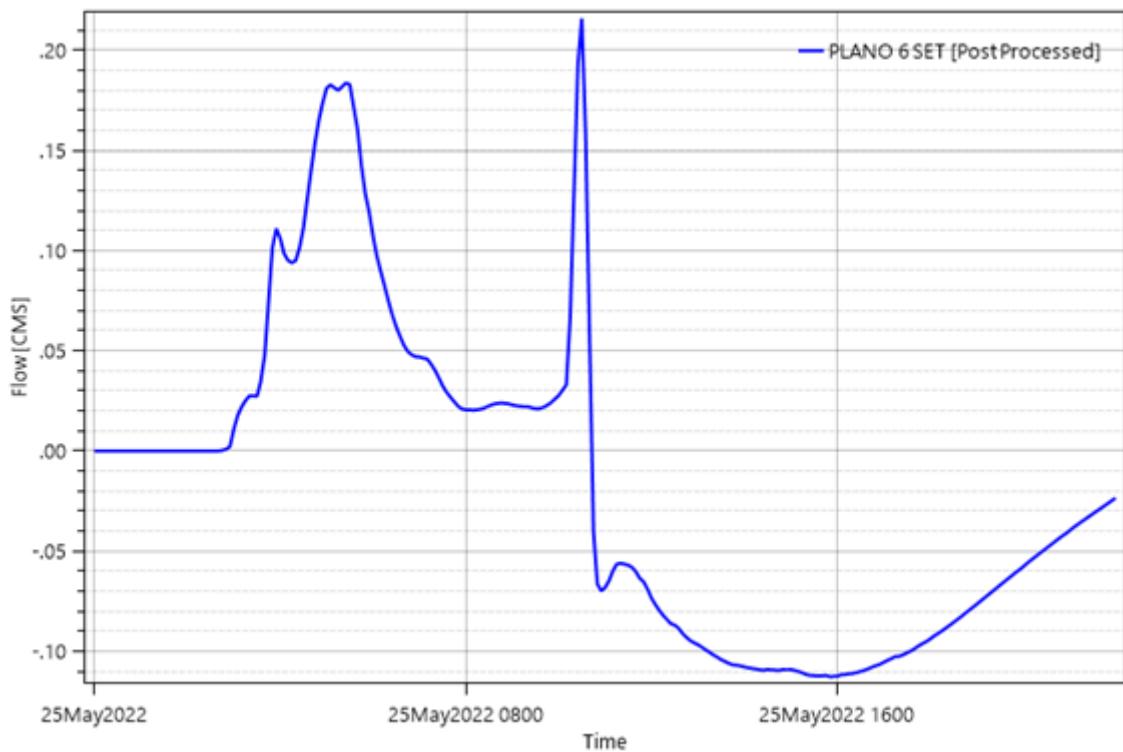
Fonte: Autor.

Figura 37 - Fluxo através da Rua Dom Bôsco



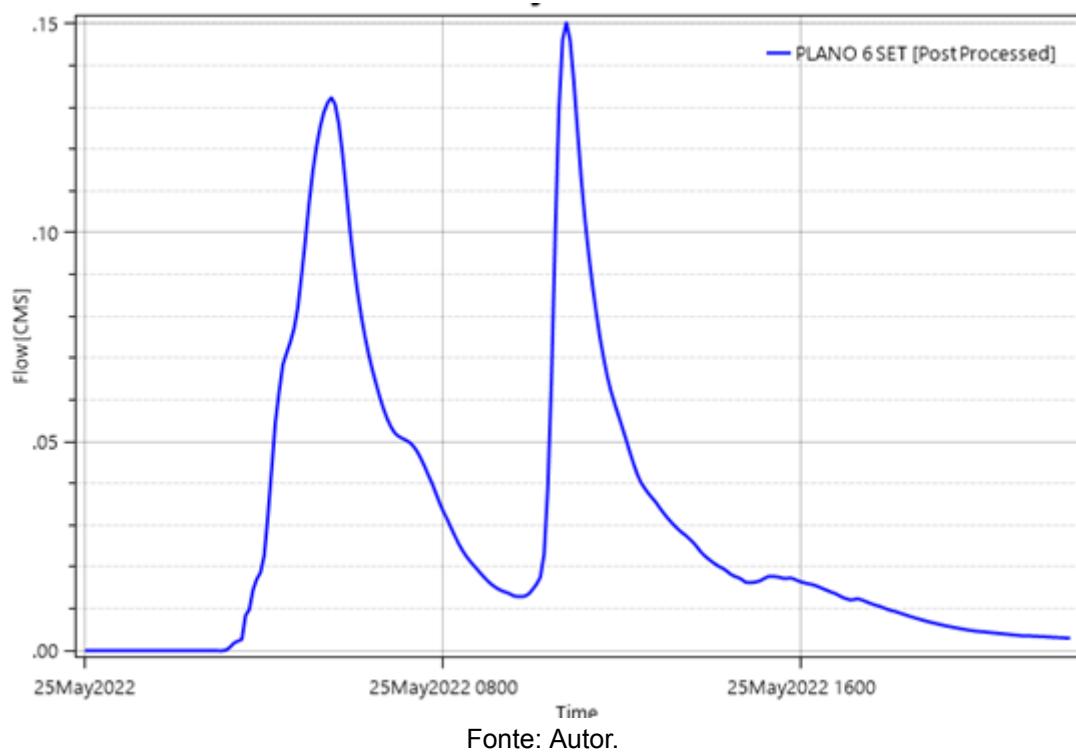
Fonte: Autor.

Figura 38 - Fluxo através da Praça do Derby



Fonte: Autor.

Figura 39 - Fluxo através Rua Dona Benvinda



Fonte: Autor.