UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará

Vânia Carla Dias Martins

Desenvolvimento de Sistema Computacional Integrado de Dimensionamento e Representação Gráfica de Canais de Macrodrenagem

TESE DE DOUTORADO

Instituto de Tecnologia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Tese orientada pelo Professor Dr. José Almir Rodrigues Pereira

Belém – Pará – Brasil

2022

VÂNIA CARLA DIAS MARTINS

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL INTEGRADO DE DIMENSIONAMENTO E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE CANAIS DE MACRODRENAGEM

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil, da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutora em Engenharia Civil.
Área de concentração: Engenharia Hídrica.

Orientador: Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira.

Belém-Pará-Brasil
2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M379d Martins, Vânia Carla Dias.
Desenvolvimento de Sistema Computacional Integrado de Dimensionamento e Representação Gráfica de Canais de Macrodrenagem / Vânia Carla Dias Martins. — 2022.
202 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2022.

1. sistema computacional integrado; canais; modelagem matemática; projeto de dimensionamento; peças gráficas. I. Título.

CDD 627

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DESENVOLVIMENTO DE SISTEMA COMPUTACIONAL INTEGRADO DE DIMENSIONAMENTO E REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE CANAIS DE MACRODRENAGEM

AUTORA:

VÂNIA CARLA DIAS MARTINS

TESE SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTORA EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO AMBIENTAL.

APROVADO EM: 23 / 05 / 2022.

BANCA EXAMINADORA:

gov.br Documento assinado digitalmente
JOSE ALMIR RODRIGUES PEREIRA
Data: 23/05/2022 18:03:40-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira
Orientador (UFPA)

Prof. Dr. Daniel Costa Santos
Membro Externo (UFPR)

Profa. Dra. Aline Christian Pimentel Almeida
Membro Externo (UFPA)

Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picança
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

Dedico este trabalho a Deus, que sempre esteve à frente de tudo, aos meus pais, minha irmã, meu esposo e ao meu amado filho, Bernardo Antônio.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, que me confortou e amparou em todos as dificuldades e que, em meio a uma pandemia (COVID-19), me proporcionou saúde para desenvolver esta tese.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Almir Rodrigues Pereira, que esteve ao meu lado nesses dez anos, desde a graduação até o doutorado, me auxiliando na construção do conhecimento e mostrando o tipo de profissional que almejo ser.

À UFPA, juntamente com o Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, por ter me proporcionado formação profissional e pessoal.

À CAPES, pela concessão da bolsa.

Ao engenheiro da computação Bruno Nazareno, que me apoiou no desenvolvimento do modelo, seu auxílio foi determinante.

Ao meu esposo, Tiago Oliveira, pelo incentivo, paciência, companheirismo e amor.

À minha família, em especial meus pais, Antônio e Regina, e minha irmã Valéria, por todo ensinamento e suporte que tornaram-me a pessoa que sou hoje.

Às minhas amigas Cássia, Larissa e Jéssica pela compreensão nos momentos de ausência e por todo o incentivo no decorrer desta caminhada.

Ao meu filho Bernardo, amor da minha vida, por todos os momentos de ausência e saudade. Te amo!

A todos o meu MUITO OBRIGADA!!!

RESUMO

Concepção, desenvolvimento e aplicação de sistema computacional integrado de dimensionamento e representação gráfica de canais de macrodrenagem, denominado de SIDCAM e composto por modelo central em Java integrado a três softwares externos: Google Earth, HEC-RAS e AutoCAD. A pesquisa foi realizada em três etapas: (1) identificação de métodos e softwares necessários ao desenvolvimento de projeto de macrodrenagem; (2) desenvolvimento do SIDCAM com a confecção do software MACRO 1.0 em Java, para o dimensionamento hidrológico e hidráulico, , integração de ferramentas de importação e exportação de dado, entre o MACRO 1.0 e os softwares Google Earth, HEC-RAS e AutoCAD; e (3) avaliação da funcionalidade e confiabilidade do SIDCAM, por meio da sua aplicação no estudo de caso do projeto de macrodrenagem do Tucunduba, Belém/PA. Foi verificado que no módulo inicial é possível reproduzir o diagrama unifilar da rede hidrológica da bacia; no módulo hidrológico são gerados os hietogramas e hidrogramas de projeto, utilizando os métodos do *Curver Number* (SCS), blocos alternados e hidrograma triangular (SCS); o módulo hidráulico promove o projeto geométrico do canal; no módulo hidrodinâmico é validado o projeto geométrico do SIDCAM, observando a coincidência dos picos de vazão com pico de maré alta; e no módulo gráfico são geradas peças gráficas editáveis dos perfis longitudinal e transversais. Também foram construídos diretórios de importação de curvas IDF e maregráficas, alimentados por dois bancos de dados, para coeficientes IDF de 165 municípios brasileiros e de curvas marégraficas de 334 estações da marinha do Brasil. Os resultados da análise de confiabilidade do SIDCAM foram classificados como “Bom” e “Muito Bom”, com coeficientes Nash-Sutcliffe superiores a 0,97, erro percentual mínimo de 1,19% e máximo de 3,19%. Isso permite concluir que, ao concentrar diversas atividades em uma única estrutura integrada, a ferramenta desenvolvida é uma contribuição importante para os responsáveis pela elaboração do projeto de macrodrenagem.

Palavras-chave: sistema computacional integrado; canais; modelagem matemática; projeto de dimensionamento; peças gráficas.

ABSTRACT

Develops an integrated computer system for the design and graphic representation of macrodrainage channels, including the hydrological, hydraulic, hydrodynamic design steps and graphic design elements. The system conceived and named SIDCAM was developed with a central model built in Java (MACRO 1.0), which is integrated with three external software, Google Earth, HEC-RAS and AutoCAD. For this, the research was carried out in three stages: (1) identification of methods and software, necessary for the development of a macrodrainage project; (2) development of the software in Java, for the hydrological and hydraulic design stages (phase 1), and, development of tools for integration, import and export of data, between the hydraulic module and the HEC-RAS and AutoCAD software (3) evaluation of the functionality and reliability of SIDCAM, through its application in the case study of the macrodrainage project of Tucunduba, Belém/PA. SIDCAM is composed of four modules: the hydrological module, for the generation of hyetograms and project hydrographs, using the alternating blocks and triangular hydrograph (SCS) methods; the hydraulic module, for making the geometric design of the channel and the coincidence of flow peaks with high tide peaks; the hydrodynamic module, to validate the SIDCAM geometric design; and the graphic module, for the automatic production of editable graphic pieces, of longitudinal and transverse profiles. In addition to the modules, import directories of IDF and tide gauge curves were built, fed by two databases, for IDF coefficients of 165 Brazilian municipalities and tide gauge curves of 334 stations of the Brazilian Navy. In the analysis of the water levels in the channel, simulated by the developed system, most of the results were classified as “Good” and “Very Good”, with Nash-Sutcliffe coefficients greater than 0.97, a minimum percentage error of 1.19% and a maximum of 14.72%. In view of these results, the proposed tool is promising, especially because it is a model that concentrates a good part of the processes necessary for a macrodrainage project, in a single integrated structure, thus filling gaps left by current models, which have a dissociative approach to the different stages of the project.

Keywords: integrated computer system; mathematical model; channels project; hydrodynamic project; Graphic project.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Componentes de um projeto de macrodrenagem. 26
Figura 2 – Fator de redução das precipitações máximas pontuais. 35
Figura 3 – Hidrograma triangular SCS. 40
Figura 4 – Solução numérica das equações de escoamento, greide x-t. 50
Figura 5 – Principais pacotes padrão para dimensionamento de sistemas de drenagem urbana 55
Figura 6 – Evolução das metodologias de projeto gráfico 68
Figura 7 – Etapas de desenvolvimento do sistema computacional SIDCAM. 71
Figura 8 – Resumo dos processos de integração entre os módulos de MACRO 1.0 e os *softwares* externos. 84
Figura 9 – Diagrama de classes do SIDCAM. 88
Figura 10 – Etapas da modelagem do módulo inicial do SIDCAM. 91
Figura 11 – Composição de um Diagrama unifilar no MACRO 1.0. 93
Figura 12 – Tabela vazões de pico do módulo inicial. 93
Figura 13 – Tabela comprimento dos trechos (m) do módulo inicial. 94
Figura 14 – Tabela cotas do canal do módulo inicial. 95
Figura 15 – Etapas de modelagem do módulo hidrológico do SIDCAM. 96
Figura 16 – Tela do módulo hidrológico de MACRO 1.0. 106
Figura 17 – Seleção de estaca na aba inicial. 106
Figura 18 – Seleção da sub-bacia na aba inicial. 107
Figura 19 – Variáveis de entrada do módulo hidrológico, aba inicial. 108
Figura 20 – Aba tempo de concentração do módulo hidrológico. 108
Figura 21 – Janela rugosidade de retardo da aba tempo de concentração. 109
Figura 22 – Janela rugosidade de Manning da aba tempo de concentração. 110
Figura 23 – Janela do diretório curvas IDF. 110
Figura 24 – Intensidade de precipitação gerada pela curva IDF. 111
Figura 25 – Janela número de curva (CN) da aba tempo de concentração. 112
Figura 26 – Equações para o cálculo de tempo de concentração. 112
Figura 27 – Hietograma da chuva de projeto para a sub-bacia modelada. 113
Figura 28 – Hidrograma de projeto da sub-bacia modelada. 114
Figura 29 – Tabela resumo, com os dados de saída do módulo hidrológico. 114
Figura 30 – Exportação da vazão de pico do hidrograma. 115

Figura 31 – Etapas de modelagem do módulo hidráulico do SIDCAM. 116
Figura 32 – Variáveis da aba inicial do módulo hidráulico. 118
Figura 33 – Janela para seleção do revestimento e inclinação dos taludes. 119
Figura 34 – Janela para seleção da rugosidade de Manning..... 119
Figura 35 – Variáveis da aba seção do módulo hidráulico..... 120
Figura 36 – Tela da aba dados geométricos do módulo hidráulico..... 121
Figura 37 – Exportação do arquivo “geométrico.csv”..... 121
Figura 38 – Arquivo exportado “geométrico.csv”. 122
Figura 39 – Aba Vazão x Maré do módulo hidráulico. 123
Figura 40 – Janela do diretório de importação marégrafico..... 123
Figura 41 – Distribuição espacial das estações marégraficas do diretório de importação marégrafico..... 124
Figura 42 – Seleção de uma das estações do banco de dados de curvas marégraficas. 124
Figura 43 – Janelas para o carregamento da curva marégráfica..... 125
Figura 44 – Coincidência dos picos dos hidrogramas com o pico do marégrafo. 126
Figura 45 – Gráfico de coincidência de picos. 126
Figura 46 – Exportação do arquivo “hidrologico.csv”..... 127
Figura 47 – Arquivo exportado “hidrológico.csv”..... 127
Figura 48 – Etapas de modelagem hidrodinâmica do SIDCAM. 128
Figura 49 – Tela inicial do HEC_RAS. 128
Figura 50 – Janela Geometric Data do HEC-RAS. 129
Figura 51 – Janela de Importação arquivo “*.csv”..... 129
Figura 52 – Janela “CSV Import”. 130
Figura 53 – Janela de importação, passo 1. 130
Figura 54 – Janela de importação, passo 2. 131
Figura 55 – Janela de importação, passo 3. 131
Figura 56 – Croqui do canal importado..... 132
Figura 57 – Importação dos dados hidrológicos. 132
Figura 58 – Janela de *unsteady flow data*..... 133
Figura 59 – Etapas de modelagem gráfica do SIDCAM..... 134
Figura 60 – Exportação dos resultados dos perfis transversais..... 134
Figura 61 – Janela para exportar as seções transversais..... 135

Figura 62 – Seleção das seções transversais que serão exportadas. 135
Figura 63 – Salvar em .dxf os perfis transversais exportados..... 136
Figura 64 – Janela para exportar o perfil longitudinal. 137
Figura 65 – Salvar em .dxf o perfil longitudinal exportado. 137
Figura 66 – Exemplo de perfil transversal importado para o AutoCAD. 138
Figura 67 – Exemplo de perfil longitudinal importado para o AutoCAD. 138
Figura 68 – Bacia hidrográfica do Tucunduba. 139
Figura 69 – Croqui para desenvolvimento do diagrama unifilar da bacia hidrográfica do Tucunduba..... 142
Figura 70 – Tela do menu inicial com dados de entrada para a modelagem da bacia do Tucunduba..... 144
Figura 71 – Tela do menu inicial com as vazões de picos geradas para cada sub-bacia. 145
Figura 72 – Aba inicial das sub-bacia modeladas no MACRO 1.0..... 147
Figura 73 – Aba tempo de concentração das sub-bacias modeladas por MACRO 1.0. 149
Figura 74 – Hietograma do projeto Tucunduba..... 150
Figura 75 – Hietograma de projeto Tucunduba por MACRO 1.0. 150
Figura 76 – Hidrogramas do projeto Tucunduba..... 153
Figura 77 – Comparação entre os picos dos hidrogramas de SIDCAM e Leme Engenharia (2012). 154
Figura 78 – Aba resultados hidrológicos das sub-bacias modeladas por MACRO 1.0. 156
Figura 79 – Aba inicial do módulo hidráulico do SIDCAM..... 157
Figura 80 – Janela Talude e Manning do módulo hidráulico..... 158
Figura 81 – Aba seções do canal modelado por MACRO 1.0..... 159
Figura 82 – Janela dados geométricos do módulo hidráulico do SIDCAM. 161
Figura 83 – Arquivo “geometrico.csv”, gerado por modelagem hidráulica no SIDCAM. 162
Figura 84 – Janela “Vazão x Maré” do módulo hidráulico..... 162
Figura 85 – Estação marégrafica utilizada no MACRO 1.0..... 163
Figura 86 – Gráfico de coincidência dos picos de vazão e maré do MACRO 1.0..... 163

Figura 87 – Arquivo “hidrologico.csv”, gerado por modelagem hidrológica no SIDCAM. 164
Figura 88 – Resultados da simulação hidrodinâmica de C1 e C2 nos perfis transversais e longitudinal do Tucunduba. 167
Figura 89 – Perfis tranversais do canal projetado em “*.dwg”. 170
Figura 90 – Perfil longitudinal do canal projetado em “*.dwg”. 171
Figura 91 – Níveis d’água observados e calculados para os cenário C1 e C2 e os erros em função do tempo e dos valores observados. 175

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempo de retorno (Tr), em anos. 33
Tabela 2 – Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas (Resumido). 39
Tabela 3 – Valores das relações t/tp e q/qp. 41
Tabela 4 – Inclinações admissíveis em taludes de canais. 44
Tabela 5 – Velocidades admissíveis em canais. 45
Tabela 6 – Valores de alfa e beta segundo Pfafstetter (1982). 98
Tabela 7 – Valores de CN adotados no projeto Tucunduba. 143
Tabela 8 – Variáveis hidráulicas do projeto Tucunduba. 143
Tabela 9 – Coeficientes de contração e expansão do HEC-RAS adotados no projeto. 144
Tabela 10 – Intensidades de precipitação de projeto. 151
Tabela 11 – Vazões de pico de projeto por sub-bacia de contribuição. 153
Tabela 12 – Comparativo entre vazões escoadas nos trechos do canal Tucunduba. 160
Tabela 13 – Níveis máximos de água para os cenários C1 e C2. 166
Tabela 14 – Resumo dos valores das funções objetivo e erros médios e máximos para N.A. 173

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Equações empíricas para cálculo do tempo de concentração. 30
Quadro 2 – Tipos de Solo segundo a classificação do SCS. 38
Quadro 3 – Tipos de solo de acordo com sua capacidade infiltração. 39
Quadro 4 – Condições representadas pelas simplificações das equações de onda. 49
Quadro 5 – Aplicabilidade dos pacotes computacionais para modelagem de projeto de canais.....64
Quadro 6 – Classificação do desempenho segundo o método estatístico. 86
Quadro 7 – Ferramentas de inovação do sistema proposto.....177

LISTA DE SIGLAS

AD	Área de Drenagem
BDS	*Building Description System*
BIM	*Building Information Modeling*
CAD	Desenho Auxiliado por Computador
CN	*Curver Number*
CSV	*Comma Seperated Value*
HEC	*Hydrologic Engineering Center*
HEC-FDA	*Flood Damage Reduction Analysis*
HEC-HMS	*Hydrologic Modeling System*
HEC-RAS	*River Analysis System*
HEC-ResSim	*Reservoir System Simulation*
Hexc	Chuva Excedente
IDF	Intensidade-Duração-Frequência
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MOUSE	*Modelling of Urban Sewers*
NSE	*Nash-Sutecliffe*
PBIAS	*Percent Bias*
PMP	Precipitação Máxima Provável
RIZA	*Institute of Inland Water Management and Wastewater Treatment*
RSR	Razão Sinal-Ruído
SCS	*Soil Conservation Service*
SEIDURB	Secretaria de Estado de Integração Regional, Desenvolvimento Urbano e Metropolitano
SESAN	Secretaria de Saneamento de Belém
SIDCAM	Sistema Computacional Integrado de Dimensionamento e Representação Gráfica de Canais de Macrodrenagem
SSD ABC	Sistema de Suporte a Decisões para Análise de Ondas de Cheia em Bacias Complexas
SWMM	*Storm Water Management Model*
Tr	Tempo de Retorno
UFC	Universidade Federal do Ceará
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
US EPA	*U.S. Environmental Protection Agency*
USACE	*U.S. Army Corps of Engineers*
USP	Universidade de São Paulo
Vesd	Volume de Escoamento Superficial Direto

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 18
1.1 Justificativa da pesquisa 22
1. 2 Hipótese 23
1.3 Objetivos 23
1.3.1 Objetivo geral 23
1.3.2 Objetivos específicos 23
1.4 Estrutura do trabalho 24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 25
2.1 Projeto de canais de macrodrenagem 25
2.2 Memorial de cálculo (dimensionamento) 26
2.2.1 Dimensionamento Hidrológico 29
2.2.2 Dimensionamento Hidráulico 42
2.2.3 Modelagem Hidrodinâmica 47
2.3 Modelos computacionais para projetos de canais 54
2.3.1 SWMM (EUA - USEPA) 56
2.3.2 HEC-RAS (EUA - USACE) 57
2.3.3 InfoWorks (Reino Unido-WSI) 58
2.3.4 SOBEK (Holanda-WL/Delft) 58
2.3.5 MOUSE (Dinamarca-DHI) 59
2.3.6 ABC 6 (Brasil - USP) 59
2.3.7 IPH (Brasil - UFRGS) 60
2.3.8 MODCEL (Brasil - UFRJ) 60
2.3.9 UFC 8 (Brasil- UFC) 61
2.4 Comparação das principais aplicações dos modelos 62
2.5 Geotecnologias 65
3 MATERIAIS E MÉTODOS 70
3.1 Etapa 1: Levantamento de dados para projetos de canais de macrodrenagem 72
3.1.1 Grupo (1): Projetos de dimensionamento de canais 72
3.1.2 Grupo (2): Representação Gráfica 75
3.2 Etapa 2: Elaboração do sistema computacional - SIDCAM 76
3.2.1 Grupo (3): Desenvolvimento dos diretórios de importação 76
3.2.2 Grupo (4): Desenvolvimento do MACRO 1.0 79
3.2.3 Grupo (5): Desenvolvimento das integrações 82
3.3 Etapa 3: Aplicação do SIDCAM em estudo de caso 85

3.3.1 Validação de dados e critérios de desempenho 85
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 87
4.1 Etapa 2: Sistema Computacional Integrado de Dimensionamento e Canais e Macrodrenagem – SIDCAM 89
4.1.1 Produto 3: Módulo Inicial 90
4.1.2 Produto 4: Módulo Hidrológico 95
4.1.3 Produto 5: Módulo Hidráulico 115
4.1.4 Fase 5: Módulo Hidrodinâmico 128
4.1.5 Produto 6: Módulo Gráfico 133
4.2 Etapa 3: Resultados da aplicação em estudo de caso 139
4.2.1 Fase 1: Dados e métodos utilizados 140
4.2.2 Fase 2: Resultados da aplicação do MACRO 1.0 144
4.2.2.1 Módulo Hidrológico 145
4.2.2.2 Módulo Hidráulico 157
4.2.3 Fase 3: Resultados da aplicação do SIDCAM 164
4.2.3.1 Módulo Hidrodinâmico 164
4.2.3.2 Módulo Gráfico 169
4.2.4 Fase 4: Análise de inovação e confiabilidade do sistema computacional SIDCAM 172
4.2.4.1 Análise de confiabilidade do sistema 172
4.2.4.2 Análise de inovação do sistema 176
5 CONCLUSÕES 179
6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 181
REFERÊNCIAS 182
APÊNDICE A – BANCO DE DADOS DO DIRETÓRIO IDF 190
APÊNDICE B – BANCO DE DADOS DO DIRETÓRIO MARÉGRAFO 195

1 INTRODUÇÃO

A presença de água no meio urbano é benéfica e necessária à manutenção da vida e à permanência do assentamento humano, porém a falta de planejamento e o crescimento das ocupações irregulares têm afetado a eficácia dos sistemas de drenagem urbana e, consequentemente, gerado impactos prejudiciais à boa qualidade de vida da população.

Problemas, como enchentes urbanas, enxurradas ou inundações bruscas, nada mais são que escoamento superficial de alta velocidade e energia, provocado por chuvas intensas e concentradas, normalmente observados em pequenas bacias com área predominantemente impermeabilizada (áreas urbanas) e/ou com relevo acidentado. Isso ocorre devido à elevação súbita das vazões de determinada drenagem e o consequente transbordamento da calha fluvial (OLIVEIRA *et al*., 2012). Já os alagamentos caracterizam-se pelas águas acumuladas no leito das ruas dos perímetros urbanos, em decorrência das fortes precipitações pluviométricas, podendo ter ou não relação com processos de natureza fluvial (IPT, 2007).

Com o avanço da impermeabilização dos espaços urbanos, a redução da capacidade de infiltração e a urbanização desordenada, as inundações e alagamentos têm sido cada vez mais frequentes nas cidades. As falhas dos sistemas de drenagem pluvial se tornaram sinônimos de catástrofe. No Brasil, em 2020, 66,1% do território não possuía mapeamento de áreas de risco de inundação, 3,5% dos domicílios estavam sujeitos a inundações e 105,1 mil pessoas foram desabrigadas ou desalojadas devido a eventos hidrológicos impactantes (SNIS, 2019).

A proteção contra esse tipo de evento é considerada um dos principais desafios da gestão urbana para o próximo século. Em um paradigma mais recente, se reconhece que o planejamento dos sistemas de drenagem urbana deve ser fundado em ações mitigadoras de impactos, em planos de manejo que equilibrem o desenvolvimento urbano e na preservação das condições ambientais das cidades (KAUR; GARG, 2019; OGIE *et al.*, 2018; ZOPPOU, 2001).

Um exemplo disso é a redução de casos dos eventos de inundações em cidades que passaram a contar com projetos de drenagem aperfeiçoados para lidar com chuvas extremas e condições adversas (OGIE *et al*., 2018; ZOPPOU, 2001).

O aperfeiçoamento dos sistemas de drenagem urbana requer, em cada etapa do seu desenvolvimento, a quantificação apurada das respostas hidrológicas e

hidráulicas da bacia hidrográfica. Para tanto, é necessário aplicar equações complexas, que trabalhem de forma integrada e sejam capazes de revelar quais conexões, entre as diversas variáveis envolvidas em um projeto, são responsáveis pelas “falhas” dos sistemas de drenagem que acabam proporcionado as inundações.

Sob essa perspectiva, pesquisadores ao redor do mundo têm investido cada vez mais na sofisticação de modelos hidrológicos (chuva-vazão) e de modelos hidrodinâmicos (propagação de cheias), para simular o real cenário das inundações em canais de macrodrenagem e elencar os fatores de maior influência para tais eventos (HORRITT; BATES, 2002).

Lançando mão desses artifícios, é possível prever a ocorrência de “falhas” em sistemas de macrodrenagem ainda na fase de projeto, inclusive a frequência e a magnitude destas. Ou seja, é possível determinar quais alturas pluviométricas e níveis fluviais ocasionaram o transbordo da calha fluvial, quais os volumes transbordados e a população que será atingida (ASHLEY *et al*., 2007).

Apesar de amplamente conhecidas, as célebres ferramentas computacionais para prevenção das inundações em meio urbano apresentam, em alguns casos, dificuldades na sistematização dos dados utilizados como *inputs* aos modelos e tal fator é considerado um entrave no sucesso das simulações. A carência de ferramentas computacionais para sistematizar esses *inputs* adequadamente dificulta a validação e a representatividade dos resultados modelados.

Ocorre que a aplicação de modelos matemáticos computacionais é apenas uma parte do processo de dimensionamento de sistemas de macrodrenagem, sendo a maioria desses modelos importantes ferramentas de cálculo pontuais, ou seja, são capazes de simular uma etapa do projeto por vez, cabendo ao operador a integração dos resultados. Acontece que o comportamento hidrológico/hidráulico de uma bacia hidrográfica é função de sua heterogeneidade, sendo assim, é necessário englobar, nas simulações, as diversas variáveis que representam essa heterogeneidade.

Teng *et al.* (2017), Pontes *et al*. (2017) e Ochoa *et al.* (2015) concordam que, embora muito promissores, o uso de modelos hidrológicos/hidrodinâmicos para previsões de transbordo de calha fluvial, por vezes, pode ser considerado incipiente. Os resultados mostram que as aplicações de tais produtos, sem o ajuste adequado das variáveis de entrada (*inputs*), que caracterizam a bacia hidrográfica, superestimam ou subestimam significativamente as vazões de saída (*outputs*),

concluindo que é necessário validar os dados entrada antes de sua aplicação em modelos.

Berne *et al*. (2005) enfatizam que as previsões de deflúvio produzidas por modelos hidrológicos tendem a ser altamente influenciadas pelo volume, duração e condições do solo, especialmente para pequenas bacias urbanas, onde a modelagem hidrodinâmica de diferentes cenários de precipitação pode gerar resultados com grande disparidade de vazões.

De acordo com Emmanuel *et al.* (2015) e Holbach *et al.* (2015), as simulações de modelos hidrodinâmicos de ondas de cheia fluvial, em pequenas bacias urbanas, são principalmente sensíveis quanto à variabilidade da intensidade pluviométrica e à influência do remanso. Quando essas bacias estão sujeitas à entrada de águas de maré alta, a situação é ainda mais crítica, atingindo seu ápice nos casos em que há a coincidência dos maiores deflúvios com os níveis mais altos de maré. Portanto, para representar com precisão as ondas de cheia fluvial no canal, é necessário fornecer *inputs* concisos aos modelos (FAURÈS *et al.,* 1995; SHAH; O'CONNELL; HOSKING, 1996; ARONICA; CANNAROZZO, 2000; SEGOND *et al.,* 2007; SCHELLART; SHEPHERD; SAUL*,* 2012).

Consequentemente, a dificuldade de acesso a dados representativos e o uso desses como *inputs* de modelos matemáticos de dimensionamento de canais, dificultam a execução de projetos de drenagem aperfeiçoados. Para solucionar esse entrave, alguns autores propõem o desenvolvimento de sistemas integrados, que possibilitem a agregação de softwares já consagradas com diretórios de importação de dados locais e/ou banco de dados, para auxiliar o projetista na geração e sistematização de *inputs* fidedignos, consistentes e ordenados (BACH *et al*., 2014; BABEI; GHAZAVI; ERFANIAN, 2018; BEN KHALFALLAH; SAIDI, 2018; CASTRO; BARBOSA; BEZERRA, 2018).

A importância da promoção e desenvolvimento de futuros sistemas aperfeiçoados se justifica pela instabilidade das estruturas projetadas utilizando os atuais métodos de dimensionamento. Além disso, se espera que a dinâmica dos "sistemas futuros" influencie diretamente na redução do tempo para elaboração dos projetos, na redução dos custos e prazos e, principalmente, na melhoria da qualidade e confiabilidade dos produtos gerados.

Assim, os sistemas integrados para o dimensionamento de estruturas de drenagem urbana são considerados importantes ferramentas de planejamento, que

possibilitam simular diferentes cenários, a depender das características atuais e futuras da área do projeto. Para tanto, eles devem ser capazes de gerar diversas variáveis envolvidas nos projetos, tais como: curvas locais de Intensidade-Duração-Frequência (IDF), hietogramas de projeto, hidrogramas de projeto, seções geométricas dos condutos, curva de remanso, roteamento dos níveis d'água e vazões nos condutos, visualização gráfica da estrutura projetada, entre outras. Reconhecendo tal importância, diversas pesquisas e plataformas vêm sendo desenvolvidas desde a década de 1980 (KUMAR; PICKLES, 2013; BACH *et al.,* 2014; TENG *et al.,* 2017; AFSHARI *et al.,* 2018). No Brasil, ainda são poucos os trabalhos desenvolvidos com o mesmo intuito, entre os mais notáveis, estão: os modelos ABC 6 (OLIVEIRA *et al.,* 2016), IPH (CAMPANA; TUCCI, 2001), MODCEL (MASCARENHAS; MIGUEZ, 2002) e UFC 8 (CASTRO; BARBOSA; BEZERRA, 2018).

Ainda em menor número, tem-se o desenvolvimento de plataformas computacionais para projetos de canais de macrodrenagem (BABEI; GHAZAVI; ERFANIAN, 2018; BEN KHALFALLAH; SAIDI, 2018), as iniciativas voltadas ao desenvolvimento desse tipo de plataforma ainda são consideradas modestas, especialmente as relacionadas à elaboração de modelos integrados, unificados, que concentre em apenas um sistema, as conexões entre os processos envolvidos em um projeto de canal. Assim, esse processo de integração, compatibilização e sistematização de dados gerados por softwares desassociados, tem ficado a cargo do profissional de engenharia (ZISCHG *et al*., 2019). Portanto, em face da relevante necessidade de ferramentas de integração em modelos computacionais, o objetivo desta tese foi elaborar um sistema computacional que integre os processos envolvidos no dimensionamento de canais de macrodrenagem, sistematizando dados de entrada e tendo como resultado o projeto com o dimensionamento e os perfis gráficos do canal projetado.

1.1 Justificativa da pesquisa

Atualmente, a drenagem urbana pode contar com uma diversidade de *softwares*, ferramentas e pacotes computacionais com diferentes objetivos, que podem ser de código aberto ou fechado. Alguns concentram-se em projetar novos sistemas de drenagem, como o UFC8 (CASTRO; BARBOSA; BEZERRA, 2018), outros somente em modelagem hidrológica ou hidrodinâmica como o IPH (CAMPANA; TUCCI, 2001) e o HEC-RAS (USACE, 2010), há os que agregam ambas as funcionalidades, como o SWMM (COSTA; MITSUKO; KOIDE, 2021); ainda existe o seguimento voltado ao controle e automação dos sistemas, como o caso do SOBEK (DELTARES SYSTEMS, 2019). Em todos os casos, os recursos computacionais são utilizados com o intuito de simular e promover uma perspectiva mais abrangente nos diversos campos de um sistema de drenagem.

Mesmo com a grande evolução dos modelos, ainda são modestas as iniciativas de integração em uma única estrutura computacional, das diversas etapas envolvidas em um projeto de drenagem, ficando a cargo do profissional projetista a tarefa de compatibilização e sistematização de dados gerados por softwares distintos (ZISCHG *et al*., 2019).

Assim, com base na pesquisa bibliográfica realizada, e feita a análise das funcionalidades dos principais aplicativos computacionais, chegou-se à conclusão de que existem lacunas a serem preenchidas quanto à melhoria e desenvolvimento de novas funções que se somem às funcionalidades já existentes, principalmente no que diz respeito à aquisição e acesso a dados de entrada com representatividade local, os chamados *inputs* dos modelos.

Em face da importância do surgimento de ferramentas computacionais cada vez mais completas, a presente tese foi motivada na proposição de um sistema computacional integrado para o desenvolvimento de projetos de canais de drenagem. O sistema desenvolvido teve como foco a integração de modelos e softwares consagrados entre os profissionais projetistas de drenagem urbana, ou seja, reuniu-se, em uma única plataforma, os diversos processos envolvidos na elaboração de um projeto de canal no que diz respeito às etapas de dimensionamento e produção de peças gráficas, passíveis de edição. Além da faceta de integração, o sistema proposto visou preencher as lacunas deixadas pelos atuais softwares quanto ao fornecimento e compatibilização dos *inputs* dos modelos.

1. 2 Hipótese

A integração dos dados de modelos e softwares aumenta a produtividade, torna mais preciso, garante confiabilidade, melhora a qualidade e reduz o tempo na realização das atividades de dimensionamento e de representação gráfica de perfis no projeto de engenharia de canal de macrodrenagem.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver sistema informatizado com ferramentas que possibilitem a integração de softwares e a disponibilidade de informações para o desenvolvimento otimizado dos cálculos hidráulicos e hidrológicos e, simultaneamente, a representação dos perfis na elaboração de projetos de engenharia de canais de macrodrenagem.

1.3.2 Objetivos específicos

a) Elaborar Sistema Integrado para o Dimensionamento de Canais de Macrodrenagem (SIDCAM), unificando os dados e informações dos módulos hidrológico, hidráulico, hidrodinâmico e de representação gráfica;
b) Desenvolver as ferramentas computacionais do sistema para integração dos módulos construídos em Java com as informações de níveis de marés especializadas no Google Earth, com a modelagem hidrodinâmica do HEC-RAS e com a representação gráfica no *software* AutoCAD, para a elaboração de projetos de canal de drenagem de áreas urbanas;
c) Avaliar a funcionalidade do sistema integrado desenvolvido com base nos dados de projeto executivo de canal de drenagem urbana, para verificação e avaliação da confiabilidade dos resultados com base em três diferentes modelos estatísticos.

1.4 Estrutura do trabalho

A presente tese está organizada em 5 capítulos, além das referências bibliográficas e apêndices. O capítulo 1 contempla a introdução e é composto pelo panorama hídrico pluvial em meio urbano, explorando as falhas dos atuais sistemas de drenagem urbana e a necessidade de ferramentas para dimensionamento de sistemas de drenagem urbana, bem como a justificativa da pesquisa, a hipótese e os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica da pesquisa, tendo como propósito descrever os principais conceitos envolvidos com a temática da tese, como a abordagem em relação às etapas de elaboração de projetos de canais, sobre dimensionamento, modelagem matemática e desenvolvimento da representação gráfica; outro tema abordado se volta às aplicações dos modelos computacionais mais utilizados em projetos de canais de drenagem, as limitações desses modelos e a escassez de dados sistematizados para serem utilizados como *inputs* dos programas.

O capítulo 3 é composto pelos materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do sistema computacional integrado de dimensionamento e representação gráfica de canais de macrodrenagem.

No capítulo 4 são apresentados os resultados do sistema desenvolvido, assim como sua aplicação em estudo de caso em uma bacia hidrográfica em escala real e análise de confiabilidade quanto aos resultados gerados.

O capítulo 5 é constituído pelas conclusões e considerações finais, dando ênfase ao cumprimento dos objetivos geral e específicos, bem como à confirmação e/ou refutação da hipótese. Após o último capítulo, são relacionadas as referências bibliográficas consultadas e utilizadas ao longo do texto, assim como o Apêndice A – Banco de dados do diretório IDF, no qual são relacionados os coeficientes das equações IDF de Porto *et al*. (2005) e Pfafstetter (1982) para 165 municípios brasileiros; e o Apêndice B – Banco de dados do diretório marégrafo, composto pela lista de 334 estações maregráficas que integram o banco de dados de marégrafos do sistema desenvolvido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente revisão bibliográfica está estruturada de maneira a apresentar, primeiramente, os principais componentes de um projeto de canal de drenagem, assim como os conceitos básicos da modelagem para o dimensionamento de canais, nos temas hidrológico, hidráulico e hidrodinâmico, sendo apresentado histórico dos métodos adotados no desenvolvimento do sistema proposto. Para tanto, aborda-se os temas: determinação da chuva de projeto, hidrogramas de projeto e projeto geométrico de canais. Por fim, é discutida a importância das peças gráficas e apresentada revisão dos principais *software*s utilizados para projetar sistemas de drenagem urbana e suas funcionalidades.

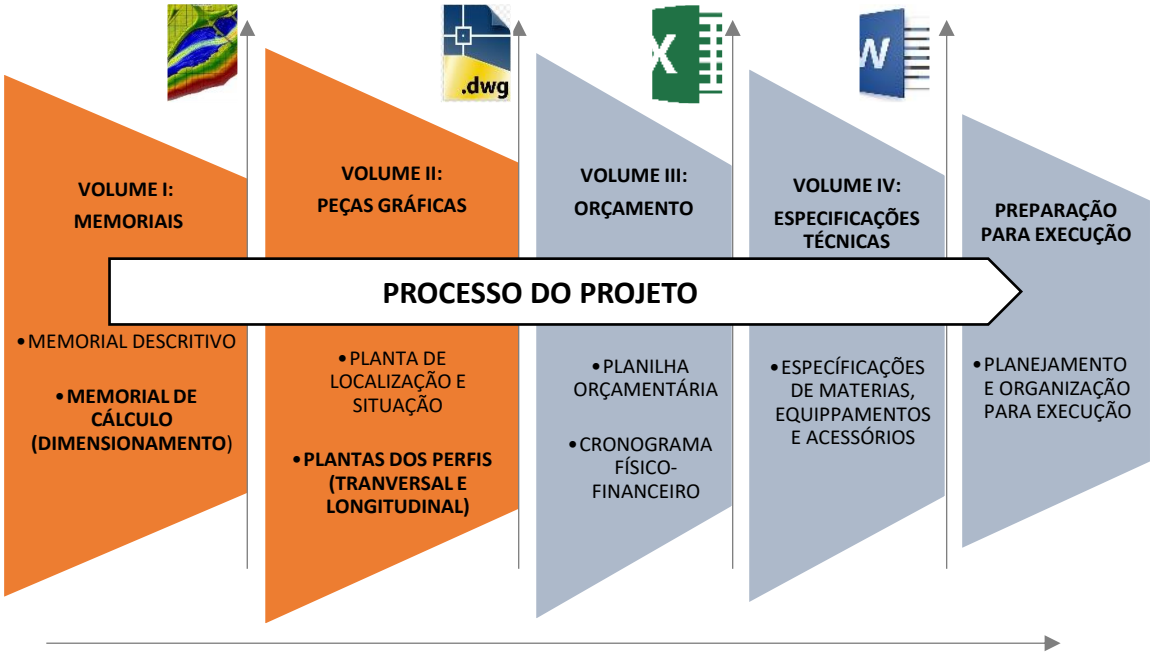
2.1 Projeto de canais de macrodrenagem

> O projeto de um canal de macrodrenagem pode ser definido como a retificação e ampliação das seções naturais de um curso d'água, ou seja, é a construção de canais artificiais destinados à condução das águas captadas pela drenagem primária (TUCCI; PORTO; BARROS, 1995, p. 142).

Em um projeto de macrodrenagem devem ser encontradas informações técnicas necessárias e suficientes para a execução da intervenção proposta. Nos volumes que compõem o projeto são documentados todos os estudos, indicações e detalhamentos construtivos utilizados em seu desenvolvimento.

De acordo com Pereira e Soares (2006), um projeto de engenharia, incluindo o projeto de canais, é organizado em no mínimo quatro volumes (Figura 1), são eles: volume I: memoriais (Memorial Descritivo e Memorial de Cálculo); volume II: peças gráficas; volume III: orçamento (Planilha Orçamentária e Cronograma físico-financeiro); e volume IV: especificações técnicas.

Figura 1 – Componentes de um projeto de macrodrenagem.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

A seguir são abordados os conteúdos dos cálculos de dimensionamento de canais (memorial de cálculo) e dos desenhos técnicos (plantas dos perfis), que integram os componentes de projeto a ser entregue pelo sistema proposto.

2.2 Memorial de cálculo (dimensionamento)

Normalmente, os canais de macrodrenagem são projetados para lidar com os volumes de água pluvial advindos dos sistemas de microdrenagem, do escoamento superficial direto, do escoamento de base e em alguns casos, do lançamento de águas residuárias. Se tratando de dimensionamento, ou seja, do volume de água que escoará e/ou será armazenado no canal, a parcela contribuinte mais significativa é proveniente do volume d'água do escoamento superficial (TUCCI, 2000).

A determinação da tormenta de projeto é de fundamental importância em drenagem urbana, através dela serão definidos os hidrogramas de projetos e o risco de falha na estrutura (TUCCI; CRUZ, 2000). Assim, é crucial a definição acertada do método de representação da precipitação máxima que, por sua vez, dará origem à chuva de projeto. A precipitação máxima pode ser caracterizada através das relações Intensidade-Duração-Frequência (IDF), sendo um dos trabalhos mais representativo

das relações IDF o apresentado por Pfafstetter (1982) para 98 postos pluviográficos brasileiros.

A estimativa da vazão de projeto pode ser realizada pela análise da probabilidade das enchentes ou por modelagem hidrológica (ARONICA; CANNAROSSO, 2000). No primeiro caso, é necessário dispor da série de vazões representativas e estacionárias da área urbana, praticamente inexistente na maioria das cidades brasileiras (ANA; CPRM, 2017). Já os modelos hidrológicos procuram descrever o processo de transformação de precipitação em vazão, dentro de uma visão de macro análise das perdas por depressão, impermeabilização, infiltração, do escoamento superficial e do escoamento nos canais (TUCCI, 1998).

Sendo a estimativa das vazões para projetos definida majoritariamente por modelagem hidrológica, é importante reconhecer que os valores obtidos nessas análises serão sempre aproximados, devido às incertezas hidrológicas, às simplificações das equações dos modelos chuva-vazão e aos critérios adotados no projeto. Tal fato corrobora para a meticulosidade e sistematização dos procedimentos de cálculo utilizados para, assim, reduzir a probabilidade de ocorrência de erros comprometedores no projeto (BACH *et al*., 2014).

Uma vez definidas as vazões que incidirão sobre o canal do projeto, se torna necessário determinar a sua capacidade hidráulica de condução, para tanto, deve-se considerar as hipóteses do dimensionamento hidráulico, são exemplos: o tipo de percurso, a declividade longitudinal, os limites de velocidade, o tipo de seção e o tipo de revestimento do canal (BUTLER; DAVIES, 2011).

Tradicionalmente, o escoamento em canais é classificado como permanente ou não-permanente (CHOW; MAIDMENT, 1988). A maioria dos modelos utilizados para propagação de vazão em condutos adota a simplificação do regime permanente, introduzindo, ocasionalmente, correções baseadas na equação da continuidade que levam em conta o efeito do armazenamento. No entanto, os modelos que utilizam as equações completas de fluxo não-permanente, em geral, contemplam todos os efeitos do remanso e de estruturas especiais, sendo as equações de fluxo resolvidas por esquemas implícitos de diferenças finitas (MONTEIRO *et al*., 2015).

Apesar de ser possível realizar a modelagem hidrodinâmica em canais tanto para o regime permanente como para o não-permanente, French (1986 *apud* YEN, 2002) ressaltam que, após estimar os hidrogramas de projeto, deve ser considerada a redução do pico da descarga em função do amortecimento hidrodinâmico ao longo

do canal. Essa consideração permite reafirmar que o escoamento em canais tem natureza essencialmente hidrodinâmica, isto é, varia no tempo e no espaço, em função do evento hidrológico e das peculiaridades do traçado.

No entanto, no atual momento, no Brasil existem diversos manuais oficiais de entidades reguladoras, assim como bibliografias que ainda recomendam a aplicação dos conceitos do escoamento permanente e uniforme como apropriado para o dimensionamento de sistemas de macrodrenagem (MACEDO, 2020).

Nesse sentido, Hicks e Peacock (2005) afirmam que a maior parte das previsões de transbordo em canais é realizada em duas etapas. Primeiramente, são determinadas as rotas de inundação e os respectivos hidrogramas de projeto, utilizando modelos hidrológicos. Em seguida, usando modelagem hidráulica e hidrodinâmica, os picos de vazões dos hidrogramas são convertidos em previsões de nível ao longo do canal, sendo estas previsões relacionadas ao alcance da onda de remanso que, ao se mover ao longo do canal, atenua a vazão de pico. Em suma, a relação entre vazão, nível d'água e tempo não pode ser prevista com precisão sem considerar o efeito do remanso.

Por esse motivo, a utilização conjunta de modelos hidrológicos, hidráulicos e hidrodinâmicos é metodologia complementar e inequívoca, que permite estimar com maior precisão possíveis falhas nas estruturas projetadas.

A prática convencional tem sido modelar as etapas (hidrológica, hidráulica e hidrodinâmica) de forma isolada, com poucas referências cruzadas entre os componentes. Embora na área da pesquisa a importância das interações tenha sido percebida há algum tempo, até recentemente os meios necessários para quantificá-las não estavam disponíveis ou eram escassos. Esses meios são poderosos *softwares* nos quais devem ser acoplados modelos determinísticos de cada uma das etapas de dimensionamento de canais.

A utilização de um único sistema integrado contendo todos os modelos utilizados no dimensionamento é semelhante à necessidade de um modelo de qualquer um dos elementos individuais.

Portanto, a promoção de sistemas de dimensionamento integrados abrange a otimização das etapas de modelagem hidrológica, hidráulica e hidrodinâmica, desde seus aspectos individuais até as interações necessárias para quantificação das vazões, níveis d'água ao longo do canal e influência de curva de remanso da rede hídrica. Com isso, para o dimensionamento de canais de macrodrenagem por meio

de sistemas integrados, é fundamental o entendimento dos principais conceitos de modelagem hidrológica, hidráulica e hidrodinâmica e, consequentemente, de curva de remanso ocasionadas pelo regime de marés da rede hídrica. Tais conceitos são apresentados nos subitens desta seção.

2.2.1 Dimensionamento Hidrológico

O dimensionamento hidrológico de uma bacia deve representar as entradas de águas de chuva e convertê-las em informações de vazões escoadas dentro da bacia e no exutório. Por meio da modelagem é possível realizar essa conversão com a representação matemática dos principais processos físicos que ocorrem no sistema da bacia até a geração do escoamento superficial. Os modelos chuva-vazão podem ser classificados como contínuo ou por evento (CHU; STEINMAN, 2009). Para o estudo desenvolvido nesta tese o segundo caso foi considerado, em razão do interesse de prever as vazões de eventos isolados de precipitação. Para tanto, foram levantadas as principais variáveis envolvidas no processo, são elas:

a) Discretização da bacia

A discretização da bacia de projeto nada mais é que a divisão desta em unidades menores, denominadas sub-bacias. O critério de divisão das sub-bacias leva em conta a uniformidade espacial da precipitação, a homogeneidade da cobertura vegetal, o tipo de solo, o relevo, o local de interesse e as obras hidráulicas que poderão interferir no escoamento. A homogeneidade dessas condições é difícil de ser encontrada, mesmo em poucos quilômetros quadrados, assim, a discretização deve considerar, principalmente, as macro diferenças encontradas na bacia (GARUMA, 2018).

Quando a bacia hidrográfica é suficientemente pequena para que a distribuição espacial e temporal da precipitação não crie tendenciosidades no escoamento, pode-se determinar o hidrograma de projeto sem discretizá-la (SALVAN *et al*., 2016).

b) Tempo de concentração

O tempo de concentração é um dos parâmetros cruciais na determinação dos hidrogramas de projeto. Diversas fórmulas têm sido propostas para determiná-lo, estando estas em função das características físicas da bacia, da sua ocupação e da intensidade da chuva. A maioria das expressões é empírica e, portanto, garante boas respostas sob condições muito semelhantes às do seu desenvolvimento. As equações utilizadas neste estudo são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Equações empíricas para cálculo do tempo de concentração.

Dooge – 1956
$$t_c = 70,8 * A^{0,41} * S^{-0,17}$$
Determinada com dados de 10 bacias rurais com áreas entre 140 e 930 Km². Seus parâmetros refletem melhor o comportamento de bacias médias com escoamento predominante em canais.
Kerby – 1959
$$t_c = 7,23 * (L * C)^{0,467} * S^{-0,5}$$
Desenvolvida com base em dados de bacias < 4 ha, com escoamento superficial predominante.
Kirpich – 1940
$$t_c = 0,0196 * L^{0,3} * S^{-0,385}$$
Obtida em pequenas bacias rurais com canais bem definidos e declividades altas. Fornece bons resultados em condições de canais bem definidos, com escoamento predominante ao superficial. Indicada para bacias com A > 2,5 Km².
Onda cinemática – 1963
$$t_c = 55 * (n * L)^{0,6} * S^{-0,3} * I^{-0,4}$$
Foi deduzida a partir das equações de onda cinemática aplicada a superfícies, baseando-se na hipótese de a precipitação constante ser igual ao tempo de concentração e na equação de Manning. É a solução teórica das equações que regem o escoamento turbulento em um plano e funciona bem em pequenas bacias. A tendência é que o valor do tempo de concentração seja superestimado, à medida que a área da bacia aumenta.
SCS – "Lag Fórmula" – 1975
$$t_c = 0,43 * L^{0,8} * \left[\left(\frac{1000}{CN}\right) - 9\right]^{0,7} * S^{-0,5}$$
A fórmula do SCS foi desenvolvida em bacias rurais com áreas de drenagem de até 8 Km². Verifica-se que o tempo de concentração é muito sensível ao valor de CN, aplica-se a situações em que o escoamento em superfície é predominante. Essa fórmula só apresenta resultados compatíveis com as outras para CN próximos de 100 e para valores de L menores do que 10 Km, o que geralmente corresponde a bacias com área de drenagem inferior a 15 Km².

Fonte: Adaptado de Tucci, Porto e Barros (1995).

c) Chuva

Para a construção do hidrograma de projeto, deve-se considerar a chuva máxima observada na bacia, que é entendida como a ocorrência extrema, com duração e distribuição temporal/espacial críticas (TUCCI, 1995). Assim, a determinação da chuva máxima é o primeiro caminho para conhecer a vazão de cheia

da bacia e, por sua vez, a capacidade de escoamento/armazenamento do canal projetado.

A chuva máxima ou chuva de projeto é caracterizada quanto (TUCCI, 1995):

- a precipitação máxima média total sobre a bacia;
- a distribuição temporal, que é a precipitação máxima média sobre a bacia para cada intervalo de tempo;
- a distribuição espacial da chuva sobre a área da bacia.

Segundo Fadhel, Rico-Ramirez e Han (2017), as chuvas de projeto são comumente estimadas com base nos métodos de Precipitação Máxima Provável (PMP) ou curvas de Intensidade-Duração-Frequência (curvas IDF).

As curvas IDF são largamente utilizadas no dimensionamento de canais, pois relacionam a duração e a intensidade da chuva com o risco do evento ser igualado ou superado (tempo de retorno), ou seja, com o risco de a estrutura ser exposta a um evento que ocasione falha (HELLMERS *et al.*, 2018)

As curvas IDF são expressas pela seguinte equação genérica:

$$i = \frac{a \,.\, Tr^{b}}{(t + c)^{d}} \qquad (1)$$

Onde:

i - Intensidade (mm/h);

Tr - Tempo de retorno (anos);

t - Duração da chuva (min)

a, b, c e d - Parâmetros relacionados à localidade (-)

Com a equação (1) é permitido sintetizar o feixe de curvas IDF ao longo dos anos. Diversos autores, como Mero *et al.* (1979), Silva *et al.* (1999), Pinto *et al.* (1999), Mello *et al.* (2003), Silva *et al.* (2003), Oliveira *et al*. (2005) e Souza *et al*. (2012) vêm apresentando trabalhos sobre a determinação e atualização dos parâmetros a, b, c e d da equação (1) para municípios brasileiros. Entre eles, destaca-se o trabalho de

Porto *et al*. (2005), como um dos mais atuais e robustos, pois determinou os parâmetros a, b, c e d para 67 municípios do território nacional.

Embora muito válida, o uso da equação genérica nem sempre é viável, podendo apresentar erros em casos de incertezas ou falta de dados da localidade. Nesses casos, o trabalho Pfafstetter (1982) pode ser considerado, ainda que seja um dos primeiros levantamentos realizados Brasil, mais conveniente para ser aceito, especialmente por se tratar da maior cobertura de dados por localidade, já que o autor realizou ajustes nos dados de 98 postos pluviométricos brasileiros, resultando na seguinte equação empírica:

$$P = R\,[a.t + b.\log(1 + c.t)] \qquad (2)$$

Onde:

P – Precipitação máxima (mm);

t – Duração da chuva (h);

a, b e c – Constantes de cada posto;

R – Fator de probabilidade (-).

Onde, R é definido por:

$$R = Tr^{(\alpha + \beta/Tr^{\gamma})} \qquad (3)$$

Onde:

Tr – Tempo de retorno (anos);

α e β – Fatores que dependem da duração da chuva (-)

γ – Constante (0,25).

Para determinar a variável duração (t) das equações (1) e (2), é necessário ajustar a distribuição estatística dos maiores valores anuais de precipitação para cada duração considerada na construção da curva IDF. A escolha das durações da curva dependerá do intervalo de tempo entre as medições do posto pluviométrico e da

representatividade desejada para a curva IDF, observando que a duração da chuva de projeto deve ser maior ou igual ao tempo de concentração da bacia. Em termos gerais, em projetos de sistemas de drenagem são utilizadas as seguintes durações de chuvas: 5,10, 15, 30 e 60 min, 1, 2, ,4, 6, 12, 18, e 24 horas (TUCCI; PORTO; BARROS, 1995).

A determinação do tempo de retorno (Tr) está atrelada ao bom senso do projetista, aos custos envolvidos na obra, à natureza da estrutura e aos prejuízos ocasionados em caso de falha, uma vez que quanto maior o Tr, maior a magnitude do projeto. Zahed e Marcellin (1995) observaram que nem sempre a escolha de um período de retorno maior resultará na elevação do custo da obra. Suderhsa (2002) sugere a adoção do tempo de retorno considerando o tipo de estrutura e o padrão de ocupação da bacia, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Tempo de retorno (Tr), em anos.

Tipo de obra	Padrões de ocupação	Tr (anos)
Microdrenagem	Residencial	2
	Comercial	5
	Aeroportos	2-5
	Comercial densa –vias principais	5-10
Macrodrenagem	Comerciais e residenciais	50-100
	Específicas	500

Fonte: Suderhsa (2002)

Em relação à distribuição temporal das precipitações, ou seja, à construção do gráfico de hietograma da chuva de projeto, é importante que se tenham dados de postos pluviométricos ou de radar meteorológico ou se disponha de relações IDF para local de interesse (OCHOA-RODRIGUEZ, 2015).

Entre os métodos mais simples para construção de um hietograma de precipitação máxima estão os de Yen e Chow (1980) e o método dos blocos alternados (ZAHED; MARCELLINI, 1995). No método dos blocos alternados, a distribuição temporal é conseguida utilizando dados das relações IDF, sendo que esse método não é relacionado com fenômenos físicos. É uma solução simples, que caracteriza uma condição crítica de precipitação com o método baseado na distribuição dos valores totais de chuva em intervalos de tempo contidos na duração total da chuva.

Uma vez discretizada a distribuição temporal do hietograma de projeto, é necessário considerar a influência da distribuição espacial da precipitação (TUCCI; PORTO; BARROS, 1995).

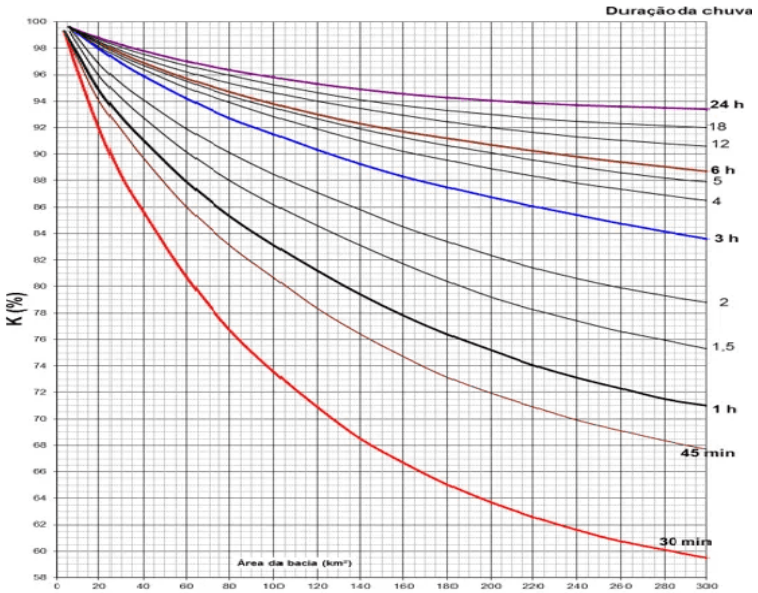
Os hietogramas de projeto construídos com base na relação IDF traduzem a precipitação máxima ocorrida sobre uma pequena área (precipitação pontual) onde está localizada a estação pluviométrica, tendo em vista que, para estimar a precipitação média sobre a área de uma bacia, em função da precipitação máxima pontual, deve-se ajustar a relação IDF, esse ajuste permite transferir o resultado pontual para o espacial (FADHEL; RICO-RAMIREZ; HAN, 2017).

No entanto, dependendo das características climáticas e topográficas da área de drenagem, valores pontuais de intensidade máxima podem ser considerados representativos, como no caso de bacias com área entre 2,5 e 25 Km^2; mesmo nessas pequenas bacias, se o comportamento pluviométrico na região for heterogêneo, é preciso levar em conta que a precipitação média máxima pode ser menor que a pontual (WESTPHAL, 2001).

Portanto, o valor pontual obtido por um ou mais postos pluviométricos deve ser reduzido de acordo com a duração da chuva e a área da bacia (OCHOA-RODRIGUEZ *et al.*, 2015). Em face da escassez de estudos regionais sobre a distribuição espacial da precipitação (TUCCI, 1995; SCHILLING, 1991), o fator de redução proposto por *U.S. Weather Bureau* (WEISS, 1964) é largamente utilizado na determinação de chuvas de projeto (Figura 2).

O fator de redução obtido nessas curvas apresenta características análogas para diferentes durações, os gradientes decrescem e as razões assintóticas crescem com o aumento da duração da tormenta (TUCCI; PORTO; BARROS., 1995).

Figura 2 – Fator de redução das precipitações máximas pontuais.



Fonte: Tucci, Porto e Barros (1995)

d) Chuva - Vazão

De posse do hietograma de projeto, o próximo passo da modelagem hidrológica é a transformação da chuva de projeto no hidrograma de projeto.

A elaboração do hidrograma de projeto envolve, essencialmente, duas etapas. A primeira consiste na dedução no volume total precipitado em relação ao volume de chuva perdido, por interceptação, armazenamento em depressões, infiltração e evapotranspiração; dessa dedução, resultará a precipitação efetiva. Na segunda etapa há a transformação da precipitação efetiva em escoamento superficial direto, por sua vez, este será roteado pela superfície do solo da bacia, em um hidrograma de fluxo terrestre (GHOSH; PEKKAT, 2019).

Convencionalmente, pouca atenção foi dada à descrição da fase de fluxo terrestre, no entanto, para a maioria das aplicações de drenagem urbana, os processos envolvidos no escoamento superficial são tão importantes quanto os processos que descrevem o escoamento em condutos, e de igual importância aos processos de precipitação (TENG *et al*., 2017).

As perdas ocorridas no volume total precipitado são classificadas como perdas “iniciais” e “contínuas”. Os processos que caracterizam as perdas inicias são a interceptação e o armazenamento em depressões, já as perdas continuas se dão por evapotranspiração e infiltração (ZOPPOU, 2001).

Os valores atribuídos às perdas iniciais são geralmente subtraídos da precipitação no início da tempestade, uma vez que representam uma pequena parcela do total precipitado, assim, o efeito da evapotranspiração em eventos de chuva de curta duração é considerado insignificante, consequentemente, muitos métodos de cálculo de precipitação efetiva não contabilizam as perdas por evapotranspiração (OGIE *et al.*, 2018; BUTLER; DAVIES, 2011).

O processo de perda por infiltração no solo é o de maior influência na formação da precipitação efetiva. A taxa de infiltração do solo depende de fatores, como: tipo de solo, estrutura e compactação, teor de umidade inicial, cobertura da superfície e profundidade do lençol. Essa taxa tende a ser inicialmente alta, mas diminui exponencialmente para uma taxa quase constante, à medida que a zona superior do solo é saturada (HELLMERS *et al*., 2018).

Em síntese, as perdas “iniciais” e “contínuas” são traduzidas por conceituados métodos numéricos construídos com base em relações empíricas, que buscam representar o efeito das perdas na formação da precipitação efetiva. Entre os métodos mais conceituados estão: o método de Horton (1940), de Green e Ampt (1911) e do *Soil Conservation Service - SCS* (1982).

Desse modo, para a obtenção dos hidrogramas e dos volumes de escoamento superficial, o método proposto pelo *Soil Conservation Service* (SCS) considera o cálculo da precipitação efetiva a partir da quantificação da capacidade de infiltração do solo, considerando a separação do escoamento superficial do escoamento de base (TUCCI; PORTO; BARROS, 1995).

O algoritmo utilizado pelo método do SCS, para determinação da precipitação efetiva, é o seguinte:

$$\frac{(P-Q)}{S} = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{P}} \qquad (4)$$

Onde:

P - Precipitação acumulada (mm);

Q - Escoamento direta (mm);

S - Perda potencial máxima ao início da tormenta (mm).

A perda inicial (I_a) é tida como igual a quantidade de precipitação que não produz escoamento no início da tormenta, restando as perdas iniciais (I_a) da precipitação acumulada (P) encontrada na equação (4). Isolando Q, tem-se:

$$\mathrm{Q} = \frac{(\mathrm{P} - \mathrm{I_a})^2}{(\mathrm{P} - 0{,}8\mathrm{S})} \tag{5}$$

Adotando-se I_a como 20% das perdas potenciais máximas:

$$I_a = 0{,}2 * S \tag{6}$$

Introduzindo a equação acima na equação (5), obtém-se:

$$Q = 0 \quad ; \quad P < I_a \tag{7}$$

$$\mathrm{Q} = \frac{(\mathrm{P} - 0{,}2\mathrm{S})^2}{(\mathrm{P} - 0{,}8\mathrm{S})} \quad ; \quad P > I_a \tag{8}$$

Para o cálculo do valor de S da equação (8), é preciso determinar a variável *Curve Number* (CN), que corresponde à capacidade máxima de infiltração do solo. O CN varia de 1 a 100, normalmente, para as condições urbanas, o CN situa-se entre 35 e 98, sendo o limite inferior para condições de solo com alta taxa de infiltração e o limite superior para condições de solo com baixa taxa de infiltração (TUCCI; PORTO; BARROS, 1995).

Para o cálculo do CN, é utilizada a equação (9), posta em função de S, que é a máxima capacidade de retenção de água do solo após o início do escoamento superficial (TUCCI; PORTO; BARROS, 1995; CAMPANA; TUCCI, 2001).

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{9}$$

No método indicado pelo SCS, os tipos de solo são divididos em quatro grupos hidrológicos, conforme classificação apresentada no Quadro 2 (TUCCI, 2000).

Quadro 2 – Tipos de Solo segundo a classificação do SCS.

Tipo de Solo	Descrição
A	Solos de baixo escoamento superficial e alta infiltração; solos arenosos com baixo teor de argila total, inferior a 8%; não há rochas, nem camadas argilosas, nem densificadas, até a profundidade de 1,5 m; o teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%.
B	Solos menos permeáveis do que o anterior; solos arenosos menos profundos do que o tipo A e com menor teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, esse limite pode subir a 20% graças a maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2% e 1,5%. Não pode haver pedras, nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial.
C	Solos barrentos com teor total de argila de 20% a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,2 m. No caso de terras roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5 m. Nota-se, a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no tipo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade.
D	Solos argilosos (30-40% de argila total) e ainda com camada densificada a uns 50 cm de profundidade. Ou solos arenosos como os do tipo B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizontal de seixos rolados.

Fonte: Tucci (2000).

Com base nos valores apresentados na Tabela 2, é possível determinar a condição média de umidade antecedente do solo.

Tabela 2 – Valores de CN para bacias urbanas e suburbanas (Resumido).

Utilização ou cobertura do solo		**A**	**B**	**C**	**D**
Pastagens ou terrenos em más condições		68	79	86	89
Baldios em boas condições		39	61	74	80
Prado em boas condições		30	61	74	80
Bosques ou zonas com cobertura ruim		45	66	77	83
Florestais: cobertura boa		25	55	70	77
Espaços abertos, relvados, parques, campos de golfe, cemitérios, boas condições:		39	61	74	80
Com relva em mais de 75% da área		49	69	79	84
Com relva em 50% a 75% da área					
Zonas comerciais e de escritório		89	92	94	95
Zonas residenciais:					
Lotes de (m²)	% média impermeável				
≤ 500	65	77	85	90	92
1.000	38	61	75	83	87
1.300	30	57	72	81	86
2.000	25	54	70	80	85
4.000	20	51	68	79	84
Parques de estacionamentos, telhados, viadutos		98	98	98	98
Arruamento e estradas:					
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais		98	98	98	98
Paralelepípedos		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89

Fonte: Tucci (2000).

Segundo Tucci (2000), são estabelecidas três condições de umidade antecedente do solo da bacia, conforme exposto no Quadro 3:

Quadro 3 – Tipos de solo de acordo com sua capacidade infiltração.

Condição	**Descrição**
I	Solos secos: chuvas nos últimos 5 dias não ultrapassam 15 mm.
II	Situação média na época de cheias: chuvas nos últimos 5 dias totalizam entre 15 mm e 40 mm.
III	Solo úmido (próximo da saturação): chuvas dos últimos 5 dias superiores a 40 mm e condições meteorológicas desfavoráveis a altas taxas de evaporação.

Fonte: Tucci (1998).

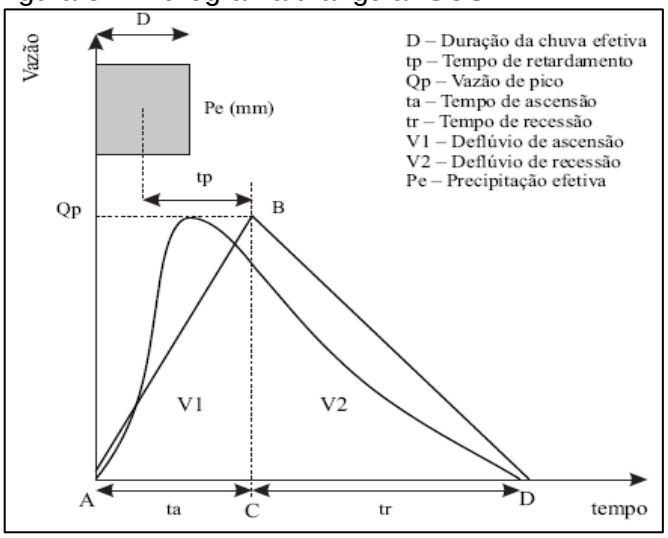
Na prática, para obter o hidrograma de projeto é necessário analisar as precipitações e as vazões da bacia em questão. Como, usualmente, não se dispõe desses tipos de dados, são utilizadas fórmulas empíricas para a determinação de hidrogramas unitários sintéticos de escoamento (TUCCI, 2000).

Assim, modelos matemáticos para transformação da chuva (precipitação efetiva) em vazão (escoamento superficial) são amplamente difundidos na literatura especializada (MIGNOT; DEWALS, 2019). Entre os mais conhecidos, estão: o método racional, o hidrograma triangular (SCS), o método Clark e o método Santa Barbara (BUTLER; DAVIES, 2011; TUCCI; PORTO; BARROS, 1995; WESTPHAL, 2001).

O método do hidrograma unitário, no qual foi fundamentado o hidrograma triangular (SCS), está entre os mais aplicados na engenharia de drenagem urbana. Esse método é baseado no conceito do hidrograma unitário, proposto por Sherman (1932), sendo o termo unitário usado pelo autor para denominar a unicidade de tempo. Ao longo dos anos, o hidrograma unitário foi interpretado como a unidade da chuva excedente de 1 cm; logo, Snyder (1938) desenvolveu o hidrograma unitário sintético (MCCUEN, 1998).

Segundo Porto (2006), no hidrograma unitário a vazão de pico e a forma do hidrograma são determinadas em uma base triangular, logo, o hidrograma unitário proposto pelo SCS é constituído graficamente por um triângulo, onde a área do triângulo e o volume precipitado são os elementos que compõem a vazão de pico e o tempo de pico, respectivamente (Figura 3).

Figura 3 – Hidrograma triangular SCS.



Fonte: Mello *et al*. (2007).

O cálculo das ordenadas (q) do hidrograma unitário corresponde às ordenadas que compõem o hidrograma triangular (qp) obtidas através da interpolação dados (Tabela 3).

Tabela 3 – Valores das relações t/tp e q/qp.

t/tp	q/qp	t/tp	q/qp	t/tp	q/qp	t/tp	q/qp
0,000	0,000	0,700	0,770	1,400	0,750	2,600	0,130
0,100	0,015	0,800	0,890	1,500	0,660	2,800	0,098
0,200	0,075	0,900	0,970	1,600	0,560	3	0,075
0,300	0,160	1	1	1,800	0,420	3,500	0,036
0,400	0,280	1,100	0,980	2	0,320	4	0,018
0,500	0,430	1,200	0,920	2,200	0,240	4,500	0,009
0,600	0,600	1,300	0,840	2,400	0,180	5	0,004

Fonte: Tucci (1998).

Assim, o hidrograma triangular é obtido através da determinação de um intervalo de tempo discreto, conforme equação (10).

$$Q_t = \sum_{i=j}^{t} P_i \, h_{t-i+1} \tag{10}$$

Onde:

Q_t - Vazão de escoamento superficial em um intervalo de tempo t (m³/s);

P_i - Precipitação efetiva (mm);

h - Vazão por unidade de chuva efetiva do HU ou ordenadas do hidrograma.

Até aqui, foram apresentados os principais métodos relacionados ao dimensionamento hidrológico da bacia, com os quais serão determinadas as intensidades de chuva e, consequentemente, o volume de escoamento superficial que entrará no sistema de drenagem. Por sua vez, o dimensionamento hidráulico proporciona a resposta hidráulica do canal em termos de vazão e profundidade, quando submetido à entrada dos volumes pluviais estabelecidos no dimensionamento hidrológico.

Em suma, as etapas de dimensionamento hidrológico e hidráulico estão intrinsicamente ligadas, como passos dependentes e ordenados do projeto e dimensionamento de canais. Portanto, quando a modelagem hidráulica de canais é incorporada à modelagem hidrológica, é possível utilizar o artifício de simulação de cenários para observar os prováveis efeitos de diferentes intensidades de chuva sobre o escoamento do canal. Isso permite o dimensionamento de sistemas mais eficientes, da seção geométrica de máxima eficiência hidráulica. No tópico a seguir, explana-se sobre o método de cálculo para o dimensionamento hidráulico de canais, que pode ser incorporado ao método de dimensionamento hidrológico apresentado na seção anterior.

2.2.2 Dimensionamento Hidráulico

Apesar de usual, o projeto de canais de drenagem apresenta diferentes aspectos daqueles destinados a outras estruturas de macrodrenagem. O escoamento em canais é essencialmente hidrodinâmico, isto é, varia com o tempo e espaço, em função do evento hidrológico e das peculiaridades do traçado (FRENCH, 1986 *apud* YEN, 2002).

Em termos hidráulicos, os condutos livres ou canais são condutos com escoamento caracterizado como livre, por apresentar sua superfície sob pressão atmosférica (ZISCHG *et al*., 2019). O estudo do comportamento do escoamento em canais concentra-se em representar o movimento das partículas no fluído. Segundo o movimento das partículas, os escoamentos podem ser classificados como permanentes ou não-permanentes (CHOW; MAIDMENT, 1988).

O movimento permanente e uniforme é aquele cujas grandezas força, velocidade e pressão são função exclusiva do ponto e independem do tempo, ou seja, a vazão permanece constante em um determinado ponto da corrente. Já o movimento não-permanente ou transitório é caracterizado pela mudança de ponto para ponto, com intensidade e vazão variando de instante em instante, isto é, em função do tempo, constituindo-se, assim, a forma de representação mais próxima da realidade (BUTLER; DAVIES, 2011).

Na prática, apenas em alguns casos interpreta-se o escoamento como transitório devido à complexidade de sua representação matemática (PORTO, 2006). Os escoamentos são fenômenos tridimensionais, transitórios e complexos; em muitos

projetos de canais é normal utilizar hipóteses simplificadoras, como considerar o escoamento permanente ao longo de todo canal (TENG *et al*., 2017). A seguir, são apresentados os métodos utilizados no dimensionamento de canais, considerando as equações do escoamento permanente e uniforme:

a) Escoamento permanente uniforme

O dimensionamento hidráulico de canais é usualmente baseado na hipótese de regime de escoamento uniforme, com a utilização da fórmula de Manning (11), que permite determinar a velocidade média de escoamento:

$$V = \frac{1}{n} \cdot Rh^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (11)$$

Onde:

V - Velocidade do escoamento (m/s);

n - coeficiente de rugosidade de Manning;

Rh - raio hidráulico (m);

I - Declividade (m/m)

Com a combinação da fórmula de Manning e a equação da continuidade, é possível obter o valor da vazão de determinado trecho do canal, conforme equação (12):

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot Rh^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (12)$$

Onde:

Q - Vazão (m^3/s);

n - Coeficiente de rugosidade de Manning;

A - Área da seção transversal (m^2);

Rh - Raio hidráulico (m) e I é a declividade (m/m).

Após realizar os cálculos de dimensionamento do canal, é importante a determinação da variabilidade do perfil da linha d'água, a fim de estabelecer condições mais realistas para o projeto. Para tanto, é possível manipular algumas variáveis, a fim de que o escoamento no canal passe a ser gradualmente variado. Recomenda-se que esse procedimento seja efetuado nos seguintes casos: antes do dimensionamento definitivo, sempre que houver elevação do custo e risco de grandes estruturas hidráulicas (canais, barragens etc.) ou no caso de estruturas com situações hidráulicas particulares, tais como canais com influência de remanso (BUTLER; DAVIES, 2011).

O canal projetado deve ser revestido com material que assegure a integridade e estabilidade das paredes e do fundo do canal, assim, a questão central do dimensionamento se volta para a determinação da seção de máxima eficiência hidráulica. Em contrapartida, no dimensionamento de canais revestidos com materiais erodíveis, a questão central diz respeito à própria estabilidade do canal, que é função da geometria, das características geotécnicas e das características do material eventualmente transportado pela água (MAGALHÃES; DANILEVICZ; SAURIN, 2017).

Comumente, pode-se efetuar o dimensionamento hidráulico de canais não revestidos segundo o método da velocidade permissível. Esse método consiste em efetuar o dimensionamento respeitando as limitações de velocidade, para que não ocorra erosão no canal (CIRILO *et al.*, 2003).

Na Tabela 4 são apresentados os valores máximos de inclinação de taludes, de acordo com o tipo de revestimento.

Tabela 4 – Inclinações admissíveis em taludes de canais.

Material do canal	**Inclinação máxima (H:V)**	**Valor de Z**
Rocha Sã	Vertical	0
Rocha alterada	¼:1	0,25
Solos argilosos compactados	1:1	0,50 a 1,00
Solos em canais largos	1:1	1,00
Solos em canais estreitos	1,1/2:1	1,50
Solo arenosos solto	2:1	2,00
Solo argiloso poroso	3:1	3,00

Fonte: Adaptado de Cirilo *et al*. (2003)

O limite da velocidade de operação é função do material do canal, bem como da carga de material sólido transportado. Na Tabela 5, são apresentadas as velocidades admissíveis (FORTIER; SCOBEY, 1926 *apud* CIRILO *et al*., 2003).

Tabela 5 – Velocidades admissíveis em canais.

Material do canal		**Velocidade admissível (m/s)**		
		Água sem sedimento	**Água com sedimentos não coloidais**	**Água com sedimentos coloidais**
Solos não coloidais	Areia fina	0,46	0,46	0,76
	Argilo-arenoso	0,53	0,61	0,76
	Argilo-siltoso	0,61	0,61	0,91
	Silte aluvionar	0,61	0,61	1,07
	Argiloso	0,76	0,69	1,07
	Argila estabilizada	1,14	1,52	1,52
	Cascalho fino	0,76	1,14	1,52
	Cascalho grosso	1,22	1,98	1,83
	Seixos e pedregulho	1,52	1,98	1,68
Solos Coloidais	Argila densa	1,14	1,52	1,52
	Silte aluvionar	1,14	0,91	1,52
	Silte estabilizado	1,22	1,52	1,68

Fonte: Adaptado de Yang (1996).

As velocidades admissíveis da Tabela 5 referem-se a canais aproximadamente retilíneos, sendo que reduções de 5% a 22% devem ser aplicadas para o caso de canais sinuosos (CHOW, 1959).

Além disso, os valores apresentados na Tabela 5 se referem a canais com lâmina d'água igual ou inferior a 1 metro de profundidade. Para profundidades superiores, deve-se ajustar a velocidade limite com o coeficiente de ajuste calculado de acordo com a expressão (13) (YANG, 1996):

$$K = \left(\frac{Rh}{Rh1}\right)^{1/6} \tag{13}$$

Onde:

Rh - Raio hidráulico do canal dimensionado (m);

Rh1 - Raio hidráulico referente à profundidade de um metro (m).

No geral, no dimensionamento de canais de macrodrenagem, admitindo as simplificações do escoamento permanente, seja ele uniforme ou gradualmente variado, é aceito que quanto maior o raio hidráulico da seção, maior será a sua capacidade de descarga. Entretanto, devido aos efeitos reais da variabilidade do escoamento no tempo e no espaço, nem sempre o cálculo direto das dimensões da seção a partir da hipótese de regime permanente levará ao resultado definitivo.

Nesses casos, o problema real a ser resolvido pelo engenheiro projetista é o estudo do comportamento das ondas de enchente em tais canais, o que pressupõe a determinação, ao longo do tempo e do espaço, de propriedades do escoamento não-permanente ou transitório, tais como profundidades, vazões e velocidades médias. Este procedimento é conhecido como “Cálculo de Propagação de Enchentes”, e possui grande importância em hidráulica, seja com o objetivo do acompanhamento do fluxo transitório real ao longo do canal ou para a verificação da variação formatação geométrica e amortecimento de escoamentos transitórios.

É importante notar que as propriedades de um fluxo não-permanente do tipo onda de cheia, possuem características particulares em função de fatores como gradualidade, magnitude, velocidade de deslocamento, geometria canal, tempo de duração, dentre outros. Em termos teóricos, o problema geral é extremamente complexo e a solução matemática generalizada é de difícil determinação (CIRILO *et al.*, 2003).

O fato mais considerável é que não se pode afirmar que qualquer escoamento transitório em um canal possua propriedades com grau de importância semelhantes, no que diz respeito aos termos das equações do regime permanente, principalmente em comparação com a equação dinâmica.

As ordens de grandeza desses termos são muito variáveis em função de efeitos de jusante no escoamento de montante, tal como remanso, o que direciona os métodos de solução das equações governantes para os modelos hidrodinâmicos, este considera todos os possíveis efeitos a jusante sob o escoamento do canal, como refluxo, remanso, ressalto, escoamento supercrítico e o escoamento sob pressão.

Portanto, no tópico a seguir são apresentados exemplos de definições, métodos e equações para representação do escoamento hidrodinâmico real em canais.

2.2.3 Modelagem Hidrodinâmica

A vazão das águas pluviais varia com o tempo e com a intensidade da precipitação. Em condições de tempestades, a vazão em canais de drenagem pode variar em função do tempo drasticamente, assim, torna-se impossível representar esse tipo de escoamento com equações do regime permanente (BUTLER; DAVIES, 2011). O *software* HEC-RAS é utilizado integrado ao sistema proposto nesta tese, é um programa de modelagem hidrodinâmica que utiliza as equações demonstradas a seguir para a simulação de escoamento não-permanente em canais de macrodrenagem.

a) Escoamento não-permanente transitório

Na representação do escoamento não-permanente existem relações muito mais complexas entre a profundidade da lâmina d'água e a vazão, do que as do escoamento permanente. No escoamento não-permanente, quando uma onda de tempestade se move ao longo de um canal, ela se atenua (se espalha e o pico diminui) e se traduz (move-se ao longo do canal), a relação entre vazão e tempo não pode ser prevista com precisão sem levar em conta esses fenômenos (CHOW, 1959).

O nível de precisão obtido no dimensionamento de canais em regime não-permanente, na maioria dos casos, pode evitar o super ou subdimensionamento dessas estruturas. Existem vários métodos disponíveis para análise de condições transitórias em canais de macrodrenagem, sendo alguns baseados em aproximação e outros em tentativas (CHOW, 1959).

Para a representação unidimensional do escoamento não-permanente e gradualmente variado em condutos livres, são consideradas duas equações fundamentais, que usualmente são referidas como "as equações de Saint-Venant" (CHOW, 1959). As equações de Saint-Venant podem ser escritas na forma da equação dinâmica e equação da continuidade. A equação dinâmica é dada por:

$$\boxed{S_f = S_o}_{1} - \frac{\partial y}{\partial x} - \boxed{\frac{v}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial x}}_{2} - \boxed{\frac{1}{g} \cdot \frac{\partial v}{\partial t}}_{3} \quad (14)$$

Onde:

y - Profundidade hidráulica (m)

v - Velocidade (m/s)

x - Distância (m)

t - Tempo (s)

So - Declividade do fundo (-)

Sf – Declividade de atrito (-)

Na parte 1 da equação (14) não são incluídas as variações de grandezas, como distância e tempo, e aplicadas as condições de escoamento permanente uniforme. O termo 2 representa as variações em função da distância, mas não com o tempo, e aplica-se a condições de escoamento permanente variado. O termo 3 inclui as variações com o tempo e se aplica a condições de escoamento não-permanente (CHOW, 1959).

A equação (14) é comumente apresentada para vazão em função da equação de continuidade (CHOW, 1959):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{Q^2}{A}\right) + gA\,\frac{\partial y}{\partial x} - gA\left(S_o - S_f\right) = 0 \quad (15)$$

Onde:

Q - Vazão (m³/s);

A - área molhada (m²);

B - Largura da boca do canal (m).

A equação (14), equação dinâmica, é composta por termos que representam a declividade do fundo do canal, a declividade de atrito, a variação da profundidade hidráulica e a variação da vazão em função do espaço e tempo. Alguns desses termos

podem ser mais significativos do que outros, oportunizando a simplificação da equação. A forma de simplificação mais drástica é assumir que a maioria dos termos da equação (14) podem ser ignorados, reduzindo-a a (CHOW, 1959):

$$S_f = S_o \tag{16}$$

Isso equivale a ignorar todos os termos, exceto a parte 1 da equação (14), e implica que a relação entre vazão e profundidade é a mesma do escoamento permanente. Assim, combinando a equação (15) e equação (16), obtém-se (CHOW, 1959):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c\frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{17}$$

A onda, chamada de “onda cinemática”, não atenua, mas se traduz na velocidade de onda c. Uma simplificação menos drástica envolve ignorar apenas a variação da vazão com o tempo, isto é, utilizando a equação (14) até o termo 2, o equivalente da equação (17) torna-se (CHOW, 1959):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + c\frac{\partial Q}{\partial x} = D\frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} \tag{18}$$

A “onda difusa” viaja na mesma velocidade c da onda cinemática, mas como resultado do termo do lado direito da equação, está sujeita à difusão. O coeficiente de difusão (D) regula a atenuação da onda à medida que se propaga em direção a jusante. Por simplificação, c e D geralmente são considerados constantes (CHOW, 1959). No Quadro 4 é apresentado o resumo das aplicações das equações de onda.

Quadro 4 – Condições representadas pelas simplificações das equações de onda.

Representação	Onda cinemática (1)	Onda difusa (2)	Onda dinâmica (3)
Ondas de Translação	✓	✓	✓
Remanso		✓	✓
Ondas de atenuação		✓	✓
Aceleração da vazão			✓

Fonte: Butler e Davies (2011).

Ponce e Changanti (1994) quantificaram a faixa de aplicação das simplificações da seguinte forma (equação 19 e 20):

$$TS_o \frac{v_o}{d_o} > 171 \tag{19}$$

$$TS_o (g d_o)^{0,5} > 30 \tag{20}$$

Onde:

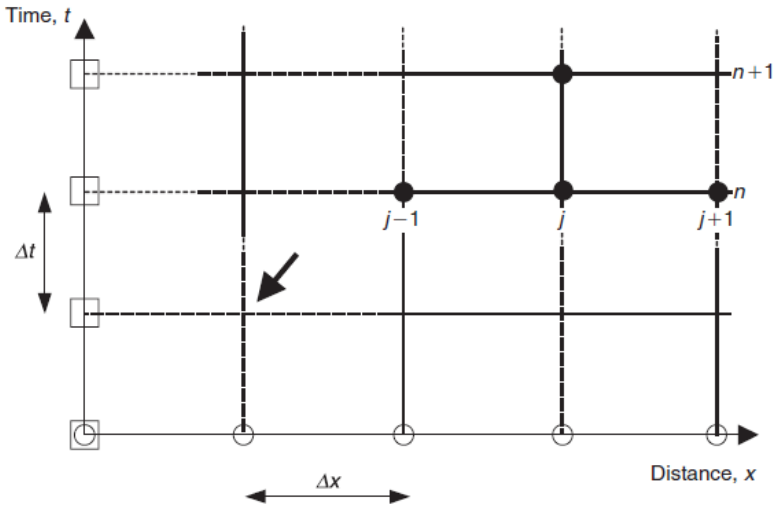
T - Duração da onda de cheia (s)

v_o - Velocidade inicial (m/s)

d_o - Profundidade inicial (m)

As equações principais de Saint-Venant, derivadas neste tópico, são equações diferenciais parciais, uma vez que Q e y são funções da distância (x) e tempo (t). O método mais comum de solução é usar diferenças finitas, envolvendo a divisão da distância e do tempo em etapas pequenas e discretas, isso pode ser representado em um greide bidimensional esquematicamente mostrado na Figura 4 (BUTLER; DAVIES, 2011).

Figura 4 – Solução numérica das equações de escoamento, greide x-t.



Fonte: Butler e Davies (2011).

Na Figura 4, a escala de distância é mostrada como Δx e a escala de tempo como Δt. Os pontos em que as linhas se cruzam são chamados de "nós de cálculo". Os nós marcados com um círculo são os nós de distância para o tempo = 0 (o início do cálculo). É provável que as condições de escoamento para esses nós sejam conhecidas, por exemplo, escoamento de base ao longo de um canal antes do início da precipitação. Os nós marcados com um quadrado são os nós de tempo para a distância = 0 (cabeceira do canal). As condições de escoamento na cabeceira geralmente são conhecidas, por exemplo, vazão de entrada, variando com o tempo. Para calcular as condições no nó marcado com a seta, usando o modelo da onda cinemática, os valores utilizados como entrada da equação serão os valores conhecidos nos nós vizinhos (BUTLER; DAVIES, 2011).

Quando o cálculo for concluído, ele pode ser repetido para sucessivos nós de distância conhecida (os nós à direita da seta na mesma linha horizontal). Quando calculamos as condições em todos os nós de distância conhecida, para o intervalo de tempo Δt, podemos prosseguir para o cálculo dos nós na linha horizontal acima da seta. Para isso, é preciso levar em conta as condições de contorno, ou seja, as condições hidráulicas nos limites do sistema, a montante e a jusante, por exemplo, a vazão na entrada e o nível de água na saída do canal (BUTLER; DAVIES, 2011).

Para um trecho de rio, existem N nós computacionais que ligam N - 1 células de diferenças finitas, a partir dessas células, equações de diferenças finitas 2N - 2 podem ser desenvolvidas. Como existem duas incógnitas 2N (ΔQ e Δz para cada nó), duas equações adicionais são necessárias, sendo essas equações fornecidas pelas condições de contorno de cada trecho, que no escoamento não-permanente são necessárias nas extremidades a montante e a jusante. A seguir são apresentadas as equações que representam as incógnitas de montante e jusante (CHOW, 1959).

b) Condições de contorno a montante

A representação de uma rede hidrológica-hidráulica é composta por um conjunto de M trechos. Assim, as condições de contorno a montante são necessárias na extremidade a montante de todos os trechos que não estão conectados a outros trechos ou bacias de armazenamento. Uma condição de contorno a montante é aplicada por meio de um hidrograma de vazões em função do tempo descargado no

canal. A equação que representa o hidrograma de vazões para o alcance M é dado por (USACE, 2016):

$$\Delta Q_k^{n+1} = Q_k^n - Q_k \quad (21)$$

Onde:

K – é o nó a montante do alcance M

Q – Vazão no rio (m³/s)

A forma de diferença finita da Equação (22), é:

$$MUQ_m \Delta dQ_k = MUB_m \quad (22)$$

Onde:

MUQ_m – é igual a 1

MUB_m – é igual a $Q_1^{n+1} - Q_1^n$

c) Condições de contorno a jusante (Remanso pela maré)

As condições de contorno a jusante são exigidas na extremidade a jusante de todos os trechos que não estão conectados a outros trechos ou bacias de armazenamento. Quatro tipos de condições de contorno a jusante podem ser considerados, dependendo do tipo de dados e características da rede hídrica, são elas (USACE, 2016):

- níveis d'água;
- hidrograma de vazões;
- curva chave;
- profundidade média normal

A condição de curva de níveis d'agua é representada por uma série temporal de níveis de elevação da superfície da água, esta é usada como condição limite a jusante de um se o córrego flui para um ambiente de remanso, como um estuário ou baía, onde a elevação da superfície da água é governada pelas flutuações das marés ou onde flui para um lago ou reservatório de nível(s) conhecido(s). No passo de tempo (n+1)∆t, a condição de contorno de níveis d'água é dada por (USACE, 2016):

$$\Delta Z_N = Z_N^{n+1} - Z_N^n \tag{23}$$

A forma de diferença finita da equação (23), é:

$$CDZ_m \Delta Z_N = CDB_m \tag{24}$$

Onde:

CDZ_m – é igual a 1

CDB_m – é igual a $ZN^{n+1} - ZN^n$

Há diversas maneiras de realizar os cálculos de diferenças finitas, problema que pode ser solucionado pela seleção de métodos apropriados e de etapas adequadas de tempo e distância. Esses métodos são construídos com base em equações diferenciais parciais, utilizando a modelagem matemática computacional, ou seja, modelos computacionais para projetos de dimensionamento de canais de drenagem.

Dessa forma, no próximo tópico serão abordados os principais modelos computacionais construídos com base nos métodos de diferenças finitas e utilizados para o dimensionamento de canais e projetos de macrodrenagem.

2.3 Modelos computacionais para projetos de canais

Os modelos computacionais para drenagem urbana sugiram para suprir duas principais necessidades: operar os sistemas existentes e projetar novos sistemas (BUTLER; DAVIES, 2011).

Nos modelos de operação, o usuário está interessado na simulação do sistema de drenagem existente sob condições específicas de vazão, profundidade, sobrecarga e inundação; o objetivo é verificar se o sistema precisa ser aprimorado e, em caso afirmativo, como isso deve ser feito?

Nos modelos de projeto, os detalhes físicos de um novo sistema são determinados de forma que este se comporte satisfatoriamente quando exposto a condições específicas (ZOPPOU, 2001).

A mesma ferramenta computacional pode ser utilizada para modelar operação e projetos sistemas de drenagem, no entanto a maioria dos *softwares* foram desenvolvidos especificamente para atender um dos dois objetivos (DELETIC *et al.*, 2012). Os *softwares* de projeto têm seu foco na representação de deflúvios extremos e na verificação da capacidade de condução e/ou armazenamento da estrutura projetada. Esse tipo de modelo pode ser desenvolvido em *softwares* mais simples do que aqueles necessários à modelagem de sistema operacionais (BUTLER; DAVIES, 2011).

Atualmente, diversos modelos de dimensionamento são encontrados na forma de pacotes comerciais que têm o objetivo projetar sistemas de drenagem (ZISCHG *et al*., 2019). Esses modelos têm em comum a representação do escoamento superficial e da interação com a rede de drenagem de águas pluviais. São essencialmente compostos por modelos hidrológicos para a transformação da chuva em vazão e de modelos hidráulicos que possibilitam a análise do escoamento (velocidades, níveis, vazões e volumes) (BACH *et al.,* 2014).

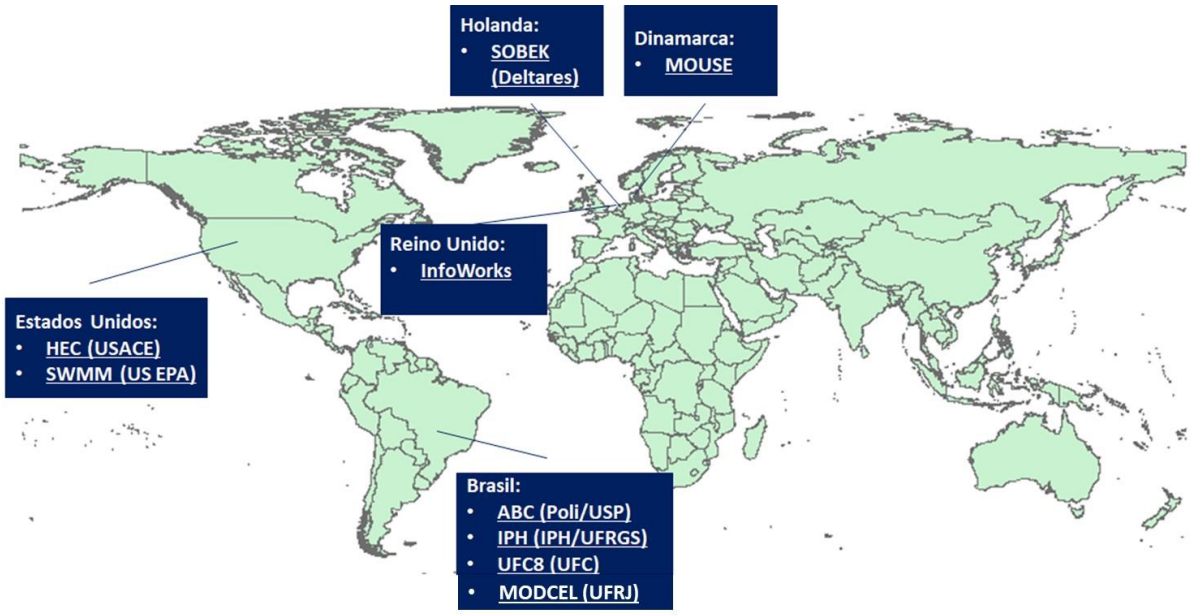
A partir dos dois módulos fundamentais de dimensionamento (hidrológico e hidráulico), os modelos de projeto são derivados, especializando-se em módulos variados, como qualidade de água, transporte de sedimentos na rede, sistemas de bombeamento, estruturas de detenção/retenção, estruturas “verdes”, medidas não estruturais de controle do escoamento, mapeamento de áreas inundáveis etc. (BACH *et al.*, 2014). Em resumo, os pacotes computacionais de projeto podem ser entendidos como a associação de modelos, chuva-vazão e de propagação de onda de

escoamentos (em canais ou galerias), com interfaces versáteis do tipo citadas. Além das citadas, inclui-se compatibilização com Sistema de Informações Geográficas (SIG), com *softwares* de representação gráfica e orçamentária (BEN KHALFALLAH; SAIDI, 2018).

Desse modo, o meio técnico tem presenciado o surgimento de muitos modelos, dos mais simples aos mais complexos, alguns engenheiros de drenagem e muitos pesquisadores da área usam modelos feitos sob medida, desenvolvidos para aplicações muito específicas, no entanto os mais difundidos são os modelos simples voltados a aplicações práticas.

Ao investigar a quantidade de modelos existentes, seria impraticável descrevê-los em apenas um capítulo, portanto, neste trabalho são abordados os pacotes padrão, ou seja, os mais bem conceituados, bem estabelecidos e particularmente proeminentes em algumas partes do mundo (Figura 5).

Figura 5 – Principais pacotes padrão para dimensionamento de sistemas de drenagem urbana.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Nos Estados Unidos (EUA), o modelo SWMM apareceu pela primeira vez nos no início dos anos 70 e continuou a ser desenvolvido desde então (BABAEI *et al*., 2018). Outro pacote bastante popular é a plataforma HEC da *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE), formada por um conjunto de *softwares* para modelagem hidrológica (HEC-HMS), hidráulica (HEC-RAS), análise de danos por inundação

(HEC-FDA) e operação de reservatórios (HEC-ResSim) (BEN KHALFALLAH; SAIDI, 2018).

No Reino Unido, o método TRRL *Hydrograph* foi bastante utilizado na década de 70, contudo a introdução do WASSP no início dos anos 80, baseada no procedimento de *Wallingford*, transformou efetivamente um ramo da engenharia que dependia de decisões conservadoras baseadas na experiência do profissional, em um método sofisticado de análise para produzir soluções melhores e fundamentadas (KUMAR;PICKLES, 2013). Entre os pacotes mais recentes no Reino Unido está o *InfoWorks* do instituto *Wallingford* (BACH *et al.*, 2014).

Na Europa, o SOBEK da Deltares Systems (TENG *et al.,* 2017), desenvolvido na Holanda, e o MOUSE (AFSHARI *et al.*, 2018), desenvolvido na Dinamarca, estão entre os mais populares.

No Brasil, muitos pesquisadores e engenheiros utilizam o modelo ABC 6 desenvolvido na Universidade de São Paulo (USP) (OLIVEIRA *et al.,* 2016) ou o modelo IPH desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS) para transformação da chuva em vazão (CAMPANA; TUCCI, 2001); na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) desenvolveu-se o MODCEL (MASCARENHAS; MIGUEZ, 2002), que usa um conceito de células de armazenamento de água, e na Universidade Federal do Ceará foi elaborado o modelo UFC 8 (CASTRO; BARBOSA; BEZERRA, 2018), voltado ao dimensionamento de redes de microdrenagem.

Nos tópicos seguintes é apresentada uma breve descrição dos pacotes computacionais mais completos encontrados na literatura. Todos os *softwares* são altamente sofisticados e regularmente aprimorados.

2.3.1 SWMM (EUA - USEPA)

O *Storm Water Management Model* – SWMM (Modelo de Gestão de Drenagem Urbana – SWMM), da *U. S.Environmental Protection Agency* (US EPA), é um modelo dinâmico chuva-vazão utilizado na gestão da drenagem urbana, que simula a quantidade e a qualidade do escoamento superficial. Pode ser utilizado para a simulação de um único evento chuvoso, para uma simulação contínua de longo prazo, bem como para a drenagem de águas residuárias. O componente relativo ao escoamento superficial do SWMM opera com um conjunto de sub-bacias hidrográficas

que recebem precipitações e geram escoamentos e cargas poluidoras. O módulo de transporte hidráulico do SWMM simula o percurso destas águas através de um sistema composto por tubulações, canais, dispositivos de armazenamento e tratamento, bombas e elementos de regulação.

O SWMM acompanha a evolução da quantidade e da qualidade do escoamento dentro de cada sub-bacia, assim como a vazão, a altura de escoamento e a qualidade da água em cada tubulação e canal, durante um período de simulação composto por múltiplos intervalos de tempo. É amplamente utilizado em várias partes do mundo para o planejamento, análises e projetos de sistemas de drenagem de águas pluviais em áreas urbanas, sistemas coletores de águas residuárias (sejam eles separados, unitários ou mistos), com muitas aplicações, também, em áreas não urbanas (COSTA; MITSUKO; KOIDE, 2021).

No *software* é possível simular redes multiplamente conectadas, efeitos de jusante, remanso, escoamento à superfície livre ou sob pressão, através de vertedores, orifícios ou conjunto de bombas, canais naturais ou artificiais (MELLER, 2004).

O SWMM é um modelo muito popular, em especial por ser um *software* livre sendo possível que o usuário modifique comandos devido ao seu código aberto, assim, empresas que trabalham no desenvolvimento de aplicativos já realizaram integrações entre o SWMM e o SIG ou CAD, incluindo ferramentas de apresentação dos resultados e melhoria na capacidade do banco de dados do modelo, porém Figueiredo e Oliveira (2011) ressaltam que o código do SWMM não permite uma integração total com o SIG.

2.3.2 HEC-RAS (EUA - USACE)

O modelo HEC-RAS foi projetado pela USACE (*U.S. Army Corps of Engineers*) para realizar cálculos hidráulicos unidimensionais e bidimensionais para uma rede de canais naturais e construídos. O sistema HEC-RAS contém vários componentes para análise de rio, como: (1) cálculos de perfil de superfície de água de escoamento permanente; (2) simulação de escoamento unidirecional, unidimensional e bidimensional; (3) cálculos de transporte de sedimentos; e (4) análise da qualidade da água. A USACE considera um elemento-chave do modelo, que todos os quatro componentes usam uma representação de dados geométricos,

rotinas de computação geométricas e hidráulicas comuns. Além dos componentes de análise do rio, o sistema HEC-RAS contém vários recursos de projeto hidráulico que podem ser utilizados quando os perfis d'água forem calculados. Os recursos de projeto são: gráficos X-Y do esquema do rio, seções transversais, perfis longitudinais, curva-chave, hidrogramas, mapeamento de inundação, entre outros (USACE, 2016).

Os dados de saída do modelo são disponibilizados em configuração tabular. Os usuários podem selecionar tabelas pré-definidas ou desenvolver suas próprias tabelas customizadas. Todas as saídas gráficas e tabulares podem ser exibidas na tela, enviadas diretamente para uma impressora ou passadas pela área de transferência do Windows para outro *software*, como um processador de texto, planilha ou CAD (USACE, 2016).

2.3.3 InfoWorks (Reino Unido-WSI)

O modelo *InfoWorks*, desenvolvido pelo *Wallingford Software* da Inglaterra, é um modelo matemático integrado, podendo fazer modelagem hidrológica, modelagem hidráulica das redes de saneamento e drenagem, bem como modelagem hidráulica de rios. Tudo isso com modelos 1D, 2D, 1D+2D totalmente integrados. O *InfoWorks* ICM permite modelar: Hidrologia, tanto em 1D como em 2D; hidráulica fluvial, em 1D, 2D ou 1D+2D incluindo pontes, redes de saneamento e outras estruturas, qualidade da água e controle de estruturas em tempo real (KUMAR; PICKLES, 2013).

2.3.4 SOBEK (Holanda-WL/Delft)

O SOBEK foi desenvolvido pelo instituto holandês WL/Delft *Hydraulics* em parceria com Instituto Holandês de Gerenciamento de Águas Interiores e Tratamento de Águas Servidas (*Dutch Institute of Inland Water Management and Wastewater Treatment* – RIZA) e empresas holandesas de consultoria em recursos hídricos (DELTARES SYSTEMS, 2019). O SOBEK é formado por um conjunto de modelos para previsão de inundações, otimização de sistemas de drenagem, controle de sistemas de irrigação, projeto de transbordamento de esgoto, morfologia de rios, intrusão salina e qualidade da água superficial. Os módulos da suíte de SOBEK simulam os fluxos complexos e os processos relacionados à água em quase todos os sistemas. Os módulos representam fenômenos e processos físicos de forma precisa

em sistemas de rede unidimensionais (1D) e em grades horizontais bidimensionais (2D).

O modelo SOBEK é dividido em três módulos principais: módulo chuva-vazão, que utiliza o método racional integrado com o modelo de infiltração de Horton; módulo de propagação do escoamento na rede de condutos, resolvendo as equações completas de Saint-Venant e permitindo a simulação de inundações no sistema, o escoamento supercrítico sem simplificação das equações, simulação de redes multiplamente conectadas e de ressaltos hidráulicos; e módulo de controle em tempo real, com simulação do sistema em tempo real, incluindo controle otimizado dos níveis, descargas, altura pluvial, comportas, represas, descarga da bomba, bacias de detenção etc. (DELTARES SYSTEMS, 2019).

2.3.5 MOUSE (Dinamarca-DHI)

O pacote computacional MOUSE (*Modelling of Urban Sewers*) foi desenvolvido pela Universidade Técnica da Dinamarca e o *Danish Hydraulic Institute* (DHI). O sistema apresenta propriedades que simplificam seu uso por meio de melhorias em sua interface gráfica, facilitando a entrada e a modificação de séries de dados, além de contar em sua estrutura com algoritmos para detecção de erros devido à incoerência ou à ausência de dados ou parâmetros. Na versão atual, o aplicativo é organizado em 13 módulos para: simulação hidrológica chuva-vazão; propagação do escoamento, qualidade da água; transporte de sedimentos; simulação de sistemas em tempo real; análise estatística dos dados de saída e ferramentas para apresentação dos resultados (DHI, 2017).

2.3.6 ABC 6 (Brasil - USP)

O SSD ABC – Sistema de Suporte a Decisões para Análise de Ondas de Cheia em Bacias Complexas originou-se com finalidades didáticas, para atender alunos de graduação e pós-graduação. Porém, no seu atual estágio de desenvolvimento, vem sendo utilizado profissionalmente devido às facilidades de utilização da sua interface gráfica e dos seus métodos de cálculo. O modelo ABC (PORTO *et al*., 2006) é um conjunto de métodos hidrológicos clássicos que funcionam articuladamente e são apoiados por interfaces de diálogo como o usuário, rotinas

gráficas e um banco de dados das relações IDF de todo o Brasil. O modelo ABC aplica-se a problemas de drenagem urbana, em especial aos classificados como sendo de macrodrenagem. O modelo se aplica a bacias pequenas, bem como em grandes bacias urbanas (superiores a 50 Km^2), segmentando-se a bacia para considerar a diversidade de distribuição da chuva e ocupação do solo (PORTO *et al*., 2006).

2.3.7 IPH (Brasil - UFRGS)

O modelo IPH simula o comportamento da bacia hidrográfica através de algoritmos simples e com um mínimo de parâmetros. O modelo considera os principais fenômenos do processo de transformação chuva-vazão: as perdas por evaporação e interceptação (vegetal e depressões), a separação do escoamento (infiltração) e a propagação dos escoamentos superficial e subterrâneos; e permite a otimização dos parâmetros. A última versão do IPH, o IPH II, permite simular a distribuição espacial da ocupação urbana e da variação no tempo das contribuições de diferentes sub-bacias. A nova versão leva em conta a variabilidade espacial dos parâmetros, enquanto a anterior considerava parâmetros médios para toda bacia (CAMPANA; TUCCI, 2001).

2.3.8 MODCEL (Brasil - UFRJ)

O modelo MODCEL considera que a natureza pode ser representada por compartimentos homogêneos e interligados, chamados células de escoamento. A cidade e sua rede de drenagem são subdivididas em células, formando uma rede de escoamento bidimensional, com possibilidade de escoamento em várias direções nas zonas de inundação, a partir de relações unidimensionais de troca; na célula, a área da superfície livre líquida depende da elevação do nível d'agua em seu interior, e o volume de água contido em cada célula está diretamente relacionado com o nível d'agua em seu centro. O modelo articula as células em loop (modelo anelado), com possibilidade de escoamento em várias direções na bacia modelada; cada célula recebe a contribuição de precipitações e realiza processos hidrológicos internos para transformação de chuva em vazão; as vazões trocadas com as células vizinhas somam-se às vazões resultantes da transformação da chuva; o escoamento entre

células pode ser calculado por meio de leis hidráulicas, conhecidas como a equação dinâmica de Saint-Venant completa ou simplificada, a equação de escoamento sobre vertedouros livres ou afogados, a equação de escoamento através de orifícios e de bueiros (MASCARENHAS; MIGUEZ, 2002).

O escoamento pode ocorrer simultaneamente em duas camadas, uma superficial e outra subterrânea, em galeria, podendo haver comunicação entre as células de superfície e de galeria. Nas galerias, o escoamento é considerado inicialmente livre, mas pode vir a sofrer afogamento, passando a ser considerado sob pressão. As seções transversais de escoamento são tomadas como seções retangulares equivalentes, simples ou compostas; aplica-se o princípio da conservação de massa à cada célula; cada célula se comunica hidraulicamente com células vizinhas, as quais são arranjadas em um esquema topológico e constituídas por grupos formais em que uma célula de um dado grupo só pode se comunicar com células deste mesmo grupo ou dos grupos imediatamente posterior ou anterior, permitindo a solução numérica pelo método da dupla varredura (MASCARENHAS; MIGUEZ, 2002).

2.3.9 UFC 8 (Brasil- UFC)

O grupo de pesquisa em Hidráulica Computacional da Universidade Federal do Ceara (UFC) desenvolveu uma interface computacional gráfica entre o AutoCAD e o SWMM (*Software* UFC8) para projetos de drenagem urbana, que facilita o trabalho da modelagem dos escoamentos das águas pluviais urbanas. O UFC8 é um *software* de fácil utilização, que unifica desenho, dimensionamento e quantitativos de uma rede de drenagem urbana. O UFC8 possui como interface gráfica o AutoCAD, ou seja, o *software* é instalado dentro deste aplicativo e todo o desenho da rede é feito no ambiente CAD, sendo necessário, para utilização do programa, um bloco de arruamento da área e as curvas de nível do local, as quais podem estar em *Polyline, Lwpolyline ou Spline,* em formato 3D. Para o dimensionamento, são utilizados todos os recursos do *software* SWMM. O *software* simula a rede de drenagem por meio das equações de Saint-Venant (CASTRO; BARBOSA; BEZERRA*,* 2018).

É notável a grande variabilidade de funções dos *softwares* capazes de simular cenários de dimensionamento para projetos de canais de drenagem, a diversidade de ferramentas de cada modelo relaciona-se aos objetivos traçados para o

desenvolvimento da aplicação, assim, no tópico a seguir faz-se uma avalição comparativa sobre as funcionalidades dos modelos apresentados na revisão de literatura e sua aplicação para o alcance dos objetivos traçados nesta tese.

2.4 Comparação das principais aplicações dos modelos

A palavra "modelo" tende a ser usada como sinônimo de “pacote computacional”; no caso em questão, desenvolvimento de projetos de canais de macrodrenagem refere-se à combinação de modelos matemáticos computacionais que representam os diversos processos envolvidos no dimensionamento e elaboração do projeto.

Os “pacotes computacionais” descritos no tópico anterior nada mais são que modelos prontos para realizar determinado trabalho, os quais vão diferir de acordo com o objetivo e foco de desenvolvimento de cada pacote.

De maneira geral, os pacotes computacionais utilizados em drenagem urbana são formatados para realizar trabalhos semelhantes, utilizando caminhos distintos (ferramentas computacionais diferentes). Por exemplo, os modelos InfoWorks, SOBEK, MOUSE, SWMM e MODCEL realizam o mesmo trabalho com diferentes metodologias de cálculos, ou seja, todos são capazes de simular os processos hidrológicos e hidráulicos ocorridos em bacias hidrográficas, levando em conta o desempenho de estruturas de micro e macrodrenagem (CASTRO; BARBOSA; BEZERRA, 2018).

Já os modelos ABC6 e IPH têm seu foco apenas na modelagem hidrológica das bacias e realizam o mesmo trabalho com métodos de cálculo distintos.

Apesar de serem modelos concebidos para drenagem urbana, os modelos HEC-RAS e UFC 8 possuem abordagem mais específicas. O HEC-RAS é voltado para a simulação do comportamento hidrodinâmico de estruturas de macrodrenagem, naturais ou artificiais; o UFC 8 é voltado ao dimensionamento de estruturas de microdrenagem.

Meller (2004) e Garcia (2005) alegam que dentre os modelos hidrológicos utilizados em drenagem urbana, um dos que mais se destaca é o MOUSE, porém é um pacote pago diferente dos modelos SWMM, ABC6, IPH, MODCEL e ABC6, que são gratuitos.

Figueiredo e Oliveira (2011) concluem que alguns modelos têm total integração com o SIG, o que não é o caso do SWMM, apesar de aceitar total integração com o UFC8 e AutoCAD. Apesar de robustos, a maioria dos modelos apresentados não possui bancos de dados para fornecimento de *inputs* à modelagem hidrológica e hidráulica, com exceção do ABC6 que possui banco de dados de equações IDF. As condições de contorno com os dados de montante e de jusante do canal, que irão nortear o encaminhamento da onda de cheia, são elementos fundamentais para o sucesso das simulações, no entanto na maioria das aplicações estas ficam a cargo da inserção manual pelo usuário.

Já em relação à modelagem de outros componentes de um projeto, além da etapa de dimensionamento, tal como a produção de peças gráficas, os pacotes computacionais oferecem o projeto gráfico em interface própria, sem a opção de edição ou integração com o CAD. Uma exceção é o UFC 8, que possui interface gráfica de integração como AutoCAD.

No Quadro 5 é apresentado um comparativo das aplicações consideradas mais relevantes, se tratando do uso de modelos computacionais para o desenvolvimento dos componentes de um projeto de canal de macrodrenagem.

Quadro 5 – Aplicabilidade dos pacotes computacionais para modelagem de projeto de canais.

Modelagem de Projeto de Canais											
Modelos	Dimensionamento				Banco de Dados de Condições de Contorno		Representação Gráfica		Integração		Linguagem de desenvolvimento
	Modelagem Hidrológica		Modelagem Hidrodinâmica		Inputs Hidrológicos	Inputs Hidrodinâmicos	CAD	Gráfico do modelo	Módulos do pacote	Com outros *softwares*	
	Micro.	Macro.	Micro.	Macro.							
Internacionais											
InfoWorks	✓	✓	✓	✓				✓	✓		c, c++, assembly
SOBEK	✓	✓	✓	✓				✓			Java, c+, basic
MOUSE	✓	✓	✓	✓				✓	✓		Phyton
SWMM	✓	✓	✓	✓				✓	✓	✓	Java
HEC-RAS				✓				✓	✓	✓	Java, c+, basic
Nacionais											
ABC6		✓			✓			✓			VBA
IPH		✓						✓			VBA
MODCEL	✓	✓	✓	✓				✓	✓		Java
UFC8	✓		✓				✓		✓	✓	Autolisp e VBA

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

No Quadro 5 é possível observar que a transcrição gráfica dos resultados do projeto de dimensionamento está, na maioria dos casos, restrita aos módulos dos próprios modelos, com a exceção do modelo UFC8, que possui um módulo de integração com o software de representação gráfica AutoCAD.

Segundo Pereira e Soares (2006), o projeto gráfico configura a etapa seguinte do processo a ser desenvolvido após o dimensionamento do projeto. É o próximo componente do projeto rumo à formatação final a ser utilizada como referência ao início das obras. Desse modo, o projeto gráfico tem como principal finalidade viabilizar a visualização detalhada e integrada do projeto com a infraestrutura pré-existente no local e com os dispositivos acessórios necessários que deverão ser implantados. Assim, para assegurar maior integração e compatibilidade, é necessário que o modelo utilizado no desenvolvimento do projeto gráfico seja flexível, com a opção de edição ainda na etapa virtual de planejamento, para compatibilização de possíveis interferências ou falhas no projeto de dimensionamento em relação ao observado em campo. Com isso, no próximo tópico serão abordados os principais aspectos relacionados ao desenvolvimento de um projeto gráfico

2.5 Geotecnologias

2.5.1 Google Earth (Estações Maregráficas)

O Google Earth é um *software* livre que combina imagens de satélite com as características do terreno, para fornecer renderização digital em 3D da superfície da terra, sua interface é considerada de fácil manipulação e com ampla aplicabilidade. Diversas universidades já incorporam o Google Earth em seus laboratórios e currículos, como a Salem State College e a Universidade do Tennessee (DUNAGAN 2007; HANSON, 2009). No Brasil, dissertações e artigos científicos abordam práticas voltadas aos projetos de engenharia (RAMOS& GERALDI, 2002; VOGES & NASCIMENTO2009; OLIVEIRA, 2011).

Allen (op cit, 2009) indica que o Google Earth é uma resposta às necessidades cartográficas surgidas no início do século XXI, que envolveu tanto a tradição ocidental de elaboração de atlas geográficos, como o processo inventivo orientado pelo sistema capitalista de consumo. Ambas as demandas são facilmente percebidas pelas identificações de postos de combustível, restaurantes, cafés, hotéis, no serviço de

informações do tráfego em tempo real, no identificador de rotas, dentre outras ferramentas de localização oferecidas pelo *software* que correspondem aos interesses atuais da sociedade.

Em vários outros aspectos, o Google Earth pode ser visto como uma adaptação do formato tradicional do atlas levado ao ambiente digital. Sendo os antigos Atlas mapas combinados com descrições textuais, e com ilustrações de pessoas, animais e edifícios, os Atlas modernos incluem fotografias de lugares e imagens de satélite. O Google Earth elevou este processo a outro patamar, acrescentando hiperlinks para sons e vídeos, mas conceitualmente não há nada novo sobre essa combinação de elementos "cartográficos" e "não-cartográficos", o novo se refere ao ambiente interativo oferecido pelo o google earth, ou seja, é permitido que o usuário crie arquivos de mapas georreferenciados para diversas finalidades, como por exemplo mapas de estações fluviométricas, mapas de estações maregráficas, entre outros. Além disso, o google earth é uma ferramenta que possibilita a integração de dados com uma grande gama de *softwares* e plataformas computacionais, promovendo o trânsito de dados entre sistemas de informação com diferentes enfoques.

A tendência atual é a utilização das geotenologias para o aperfeiçoamento de projetos na área de engenharia, como proposto no presente trabalho.

2.5.2 CAD e BIM (Perfis Gráficos)

As peças gráficas, ou o denominado projeto gráfico, têm a finalidade de auxiliar os profissionais de engenharia no processo construtivo. É o documento técnico utilizado em campo para dar suporte à execução da obra (PEREIRA; SOARES, 2006).

O projeto gráfico é um passo indispensável para projetar, criar e gerenciar os dados de uma obra; nele são reunidos conjuntos de informações de forma integrada e organizada, a base para modelar desde a formatação inicial do canal até o seu orçamento. Com peças gráficas, como planta baixa e perfis do canal, é possível elaborar os cortes, vistas, detalhes, maquetes virtuais etc. Além disso, as plantas de localização podem configurar importantes ferramentas para o desenvolvimento de intervenções não estruturais na bacia de drenagem urbana.

O projeto geométrico básico de um canal deve conter, no mínimo, as seguintes peças gráficas (PEREIRA; SOARES, 2006):

a) **Planta Geral,** contendo a locação do canal projetado em escala, a bacia hidrográfica, as estacas, comprimentos, interferência (bueiros, pontes etc.), obras de arte, cotas do terreno, tipo de revestimento e sentido do fluxo.
b) **Perfis transversais**, contendo perfis das seções transversais por estaca, dimensões geométricas das seções, declividade do talude, nível d'água e borda livre.
c) **Perfil Longitudinal**, contendo o perfil altimétrico do fundo do canal projetado, perfil altimétrico das bordas do canal e perfil de profundidade da linha d'água.

As plantas, ou desenhos técnicos, devem expressar graficamente os dados numéricos obtidos na etapa de dimensionamento do canal. O dimensionamento de canais de macrodrenagem gera grande quantidade de dados numéricos que necessitam de uma gestão criteriosa. Segundo Castro, Barbosa e Bezerra (2018), existem diversos *software*s capazes de auxiliar na gestão desses dados, permitindo o armazenamento das informações em banco de dados de fácil acesso e manipulação pelo engenheiro projetista.

Os *software*s de gestão de dados podem ser vinculados ao Desenho Auxiliado por Computador (CAD), conferindo agilidade à produção das plantas.

Entre os *softwares* mais renomados para desenho auxiliado por computador está o AutoCAD, um *software* de expressão gráfica em 2D e 3D mundialmente conhecido pela sua estabilidade, eficiência e popularidade, sendo encontrado na maior parte dos escritórios de engenharia e arquitetura, de pequeno, médio ou grande porte; nos últimos vinte anos, esse *software* se tornou a principalmente ferramenta utilizada na elaboração de peças de desenho técnico (CASTRO; BARBOSA; BEZERRA, 2018).

Mais recentemente foi introduzido o conceito de *Building Information Modeling (BIM*), considerado o futuro de projetos e modelagem gráfica para construção. Embora seja visto como uma tecnologia atual e recente, o conceito de BIM foi criado em 1974 pelo professor Charles M. Eastman do Instituto de Tecnologia da Georgia. Inicialmente foi chamado de BDS (*Building Description System*) e surgiu com o propósito de facilitar

a coordenação, comunicação e a colaboração das equipes, além de dinamizar os processos de projeção e execução de uma obra (BARISON, 2015).

Diferente do desenho usual em 2D, a mera representação planificada do que será construído, a modelagem com o conceito BIM trabalha com modelos 3D mais fáceis de assimilar e mais fiéis ao produto. Em comparação simples, seria como abandonar a ideia de fazer o planejamento, desenhando mapas e trabalhar diretamente com maquetes (Figura 6).

Figura 6 – Evolução das metodologias de projeto gráfico.

Fonte: Elaborada pelo autor (2020).

O projeto gráfico ideal realizado em BIM deve agregar todas as partes envolvidas no planejamento de uma construção, fornecendo informações aprofundadas sobre cada detalhe da construção e que podem ser utilizadas por todos os envolvidos, desde engenheiros e arquitetos até planejadores e responsáveis pela compra de materiais.

Em um software que aplique o conceito, vários profissionais podem trabalhar no mesmo projeto ao mesmo tempo e utilizando o mesmo arquivo, adicionando os dados que competem à sua especialidade e verificando as atualizações no modelo em tempo real.

Não se trata de facilitar apenas dados como dimensões de paredes e localização de tubulações hidráulicas e de gás, mas também informações relacionadas a tipos e quantidade de insumos e mão de obra utilizada.

Isso quer dizer que, ao se modelar um canal usando o BIM, é possível especificar parâmetros não apenas de geometria, níveis d’agua, declividade, mas também o material de revestimento dos taludes, fabricantes de materiais, custos, propriedades erosivas, custos envolvidos, dentre outras possibilidades.

Embora a implementação do BIM já tenha sido adotada como uma estratégia nacional em muitos países, tal metodologia encontra-se em fase de difusão e popularização no Brasil. Segundo Castelo, Marcellini e Viana (2018), apenas 9,2% das empresas no ramo da construção civil fazem uso das tecnologias BIM no país.

É importante reconhecer que o sistema BIM é, de fato, mais complexo se comparado à maioria das plataformas atuais mais populares, como o AutoCAD, entretanto os benefícios de sua aplicação ainda são mais relevantes e reforçam sua utilidade e, felizmente, há maneiras de amenizar o impacto dessa transição. Isso já está acontecendo, sendo o BIM o atual foco para *softwares* gráficos, como Autodesk Revit, Vector Works e ArchiCad. Já os programas CAD terão um papel secundário para agregar todas as funcionalidades do BIM (MACHADO; RUSCHEL, 2018).

Se considerarmos o advento da “internet das coisas”, que a tecnologia de realidade aumentada está avançando rapidamente, e a associarmos ao BIM, em breve, com o uso de smartphones, tablets e ferramentas como o Google Glass, poderemos visualizar o projeto gráfico no local em que ele será construído antes mesmo de terminá-lo e interagir com ele, entre outras facilidades (MACHADO; RUSCHEL, 2018).

Apesar de o BIM trazer uma revolução na forma de pensar em projeto, uma vez que promove a multidisciplinaridade e a integração das informações, se deve ter clareza quanto ao conceito do CAD, que é um produto, um software. Em contrapartida, BIM se trata de um conceito que integra diversas informações (gráficas e não gráficas) para auxiliar projetistas, engenheiros e arquitetos a ter o máximo de detalhes de um empreendimento, todas contidas em um único local (VIGNALI *et al*., 2021).

Sendo assim, os sistemas BIM, como o Revit, Archicad e outros, trabalham de forma mais complexa, ou seja, não são considerados ideais para todos os momentos ao longo do desenvolvimento de um projeto. Um exemplo são os desenhos de pré-projeto, da fase de planejamento inicial, concepção e dimensionamento que surgem antes do projeto executivo (VIGNALI *et al*., 2021).

Para desenhos de representação simples, não paramétrica, como um projeto de concepção geométrico de um canal de macrodrenagem, não se considera eficiente gastar horas para desenhar um sistema simplificado em um programa BIM, como Revit e afins, sendo que no AutoCAD o desenho seria executado em menos tempo, até mesmo com um resultado mais apropriado, coerente para a situação (VIGNALI *et al*., 2021).

Portanto, para o nível de simplificação da representação gráfica proposta pelo SIDCAM, entende-se que o BIM seria uma ferramenta subutilizada, sendo considerado mais apropriado o desenho em CAD.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A proposição e desenvolvimento do sistema computacional integrado de dimensionamento e representação gráfica de canais de macrodrenagem denominado SIDCAM, foi pensado para disponibilizar uma ferramenta computacional integrada, capaz de auxiliar projetistas na redução das falhas de dimensionamento em projetos de canais macrodrenagem.

Com esse objetivo, o SIDCAM foi concebido como o principal produto desta pesquisa, seu desenvolvimento foi baseado em um conjunto de interações entre *softwares* de dimensionamento e representação gráfica já consagrados, a fim de fornecer ao usuário, em um único sistema computacional, desde a etapa de geração de dados de entrada, passando pelo dimensionamento hidrológico, hidráulico, hidrodinâmico até a produção automática de elementos gráficos.

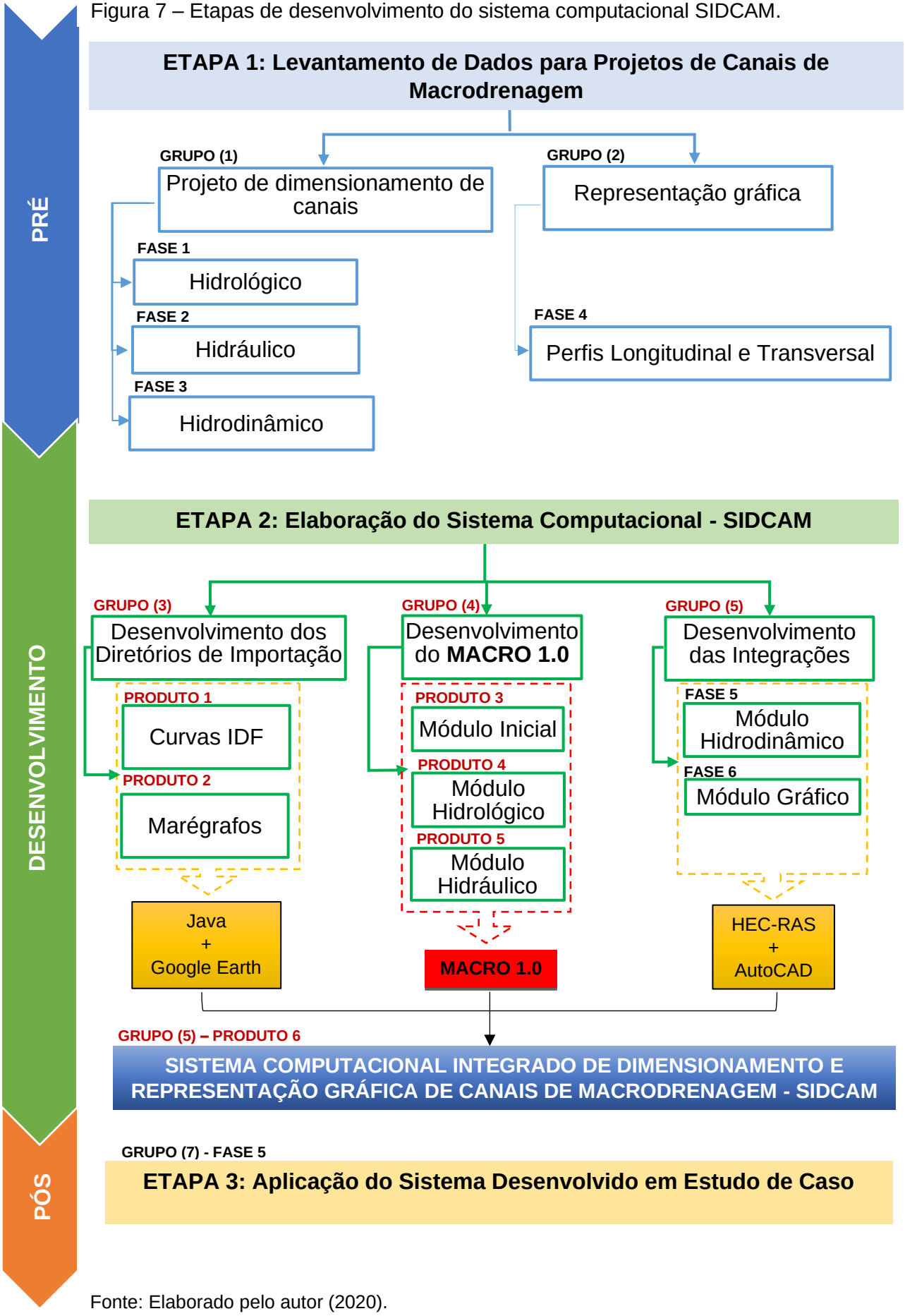
O desenvolvimento do SIDCAM partiu da construção de um módulo central, que é a espinha dorsal do sistema, denominado MACRO 1.0, no qual são interligados outros três *softwares*. Portanto, o SIDCAM é constituído pela integração de quatro *softwares*: o MACRO 1.0, o Google Earth, o HEC-RAS e o AutoCAD, resultando nos quatro módulos do sistema: módulo hidrológico (MACRO 1.0), módulo hidráulico (MACRO 1.0 + Google Earth), módulo hidrodinâmico (MACRO 1.0 + HEC-RAS) e módulo gráfico (HEC-RAS + AutoCAD). Nos módulos é possível realizar o dimensionamento hidrológico, o hidráulico, o hidrodinâmico e a produção de perfis gráficos editáveis, respectivamente.

Para isso, a metodologia proposta foi estruturada em três estágios: pré-desenvolvimento, desenvolvimento e pós-desenvolvimento. Na Figura 7 é apresentada a configuração dos três estágios. No estágio de pré-desenvolvimento, etapa 1, foi realizado o levantamento de dados, métodos e *software*s necessários ao dimensionamento de canais de macrodrenagem e perfis gráficos.

No estágio de desenvolvimento, etapa 2, foi construída a espinha dorsal do SIDCAM, ou seja, o desenvolvimento do modelo MACRO 1.0 e das ferramentas de integração com os três *software*s externos, utilizando a plataforma Java.

No estágio de pós-desenvolvimento, etapa 3, o SIDCAM foi aplicado e avaliado em um estudo de caso em uma bacia em escala real, na bacia hidrográfica do Tucunduba, localizada em Belém/PA.

Figura 7 – Etapas de desenvolvimento do sistema computacional SIDCAM.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

3.1 Etapa 1: levantamento de dados para projetos de canais de macrodrenagem

Nesta etapa foram levantados os parâmetros gerais envolvidos nos cálculos de dimensionamento de canais e produção de peças gráficas. Para tanto, foram realizadas pesquisas bibliográficas a respeito de dados, métodos e *software*s, atualmente empregados em projetos de engenharia de canais aperfeiçoados. A pesquisa bibliográfica teve como foco principal o estudo dos modelos de transformação de chuva em vazão, as equações utilizadas para o dimensionamento geométrico de canais, os *software*s de simulação hidrodinâmica, a produção de peças gráficas e o levantamento de dados de estações marégraficas.

Com o objetivo de facilitar o entendimento dos procedimentos metodológicos desta tese, os dados citados foram organizados em dois grupos: grupo (1): projetos de dimensionamento de canais e grupo (2): projetos gráficos.

3.1.1 Grupo (1): Projetos de dimensionamento de canais

O grupo (1) foi subdividido em 3 fases. Na Fase 1 foram estudados e definidos os dados e métodos utilizados no desenvolvimento do sistema proposto referente à etapa de modelagem hidrológica. Na Fase 2 foram definidos os dados e métodos de modelagem hidráulica empregados no sistema proposto, para o dimensionamento hidráulico dos canais. Na fase 3 foi definido o *software* de simulação hidrodinâmica que seria utilizado na integração ao sistema proposto, para identificar possíveis falhas na etapa de dimensionamento hidráulico dos canais.

a) Fase 1: Definição dos métodos e dados para a modelagem hidrológica.

O módulo hidrológico foi desenvolvido para equivaler-se à etapa de dimensionamento hidrológico dos projetos tradicionais. Os dados utilizados no desenvolvimento deste módulo foram organizados na sequência de desenvolvimento: discretização da bacia, propriedades físicas da bacia hidrográfica, precipitação, infiltração e vazão.

A **discretização da bacia** foi composta da divisão de uma unidade maior em subunidades menores ou sub-bacias, a fim de ajustar a distribuição espacial da precipitação.

As **propriedades físicas da bacia hidrográfica** envolveram, principalmente, o grupo de informações que serão inseridas pelo projetista no sistema proposto, tais como:

- período de retorno da precipitação (anos);
- duração da chuva (min), área da sub-bacia (Km^2);
- porcentagem de área impermeável (%);
- diferença de cota do talvegue principal (m);
- escolha do método de cálculo para determinar o tempo de concentração;
- escolha da equação para cálculo da curva IDF.

A determinação da **precipitação** de projeto é baseada na equação genérica de curvas IDF ou na equação de Pfsfstetter (1957), para os parâmetros de localidade de Arisvaldo (ABC6, 2019) ou de Pfsfstetter (PFSFSTETTER, 1957), respectivamente. Além disso, é levado em conta a duração total da precipitação (min) e o intervalo de tempo de discretização dos dados.

A **infiltração** se refere à capacidade máxima de percolação da água no solo para que, assim, se determine os volumes de precipitação efetiva. No cálculo do volume infiltrado, foi empregada a metodologia *Curver Number (CN)*, do *Soil Conservation Service (SCS).*

Nas **vazões** são apresentados os volumes de escoamento superficial direto que contribuíram para o escoamento no canal, os hidrogramas de projeto são gerados com base no método do Hidrograma triangular do SCS.

Em relação aos métodos considerados no desenvolvimento do módulo hidrológico, foram: o método dos blocos alternados para a distribuição temporal das intensidades de precipitação e geração dos hietogramas de chuva de projeto e as equações de Dooge (DOOGE, 1956 *apud* TUCCI, 1995), Kerby (KERBY, 1959 *apud* TUCCI, 1995), Kirpich (KIRPICH, 1940 *apud* TUCCI, 1995), onda cinemática (TUCCI, 1995) e SCS (SCS, 1975 *apud* TUCCI, 1995) para cálculo do tempo de concentração

das sub-bacias, além dos métodos do *Soil Conservation Service* (SCS) citados anteriormente.

Fase 2: Definição dos métodos e dados para a modelagem hidráulica.

O módulo hidráulico foi concebido para equivaler-se à etapa de dimensionamento hidráulico dos projetos tradicionais. Os métodos e dados utilizados no desenvolvimento deste módulo foram organizados na sequência: propriedades do canal, dimensionamento geométrico e vazão *versus* maré.

As **propriedades do canal** envolvem, principalmente, as informações de concepção do projeto que serão fornecidas pelo projetista, tais como:

- tipo de seção transversal (trapezoidal, triangular ou retangular);
- largura média da seção (m);
- comprimento do trecho entre estacas (m);
- declividade média do trecho (m/m);
- tipo de revestimento dos taludes e fundo.

No **dimensionamento geométrico** foram aplicadas as equações para o dimensionamento de condutos sob regime de escoamento permanente e uniforme.

Para a relação **vazão *versus* maré** foi desenvolvido um algoritmo para criar coincidências sintéticas entre os picos dos hidrogramas gerados no módulo hidrológico com o pico da curva marégrafica de determinada estação. A coincidência entre os picos é feita para todos os hidrograma das sub-bacias de projeto.

b) Fase 3: Definição do *software* de modelagem hidrodinâmica.

Na fase 3 da Etapa 1, o *software* HEC-RAS foi selecionado para trabalhar integrado ao SIDCAM. Ele atua na representação hidrodinâmica das relações complexas do escoamento transitório em canais, especialmente na representação de curvas de remanso causadas pela entrada das águas de maré alta no sistema de drenagem do canal do projeto. Além disso, com o HEC-RAS é possível simular e identificar cenários de transbordos da calha principal e possíveis inundações.

Nos casos de subdimensionamento ou superdimensionamento, o usuário poderá retomar a fase 1 e/ou 2 para implementar alterações, nas vazões dos hidrogramas das sub-bacia e/ou nas dimensões geométricas do canal, até que a nova simulação hidrodinâmica apresente resultado satisfatório, ou seja, que não haja sub ou superdimensionamento do canal.

Os módulos “hidrológico e hidráulico” foram concebidos para fornecer todos os *inputs* geométricos e hidrológicos para à perfeita execução das simulações no HEC-RAS. Para isso, foi prevista a exportação de arquivos com a extensão “*.csv”, o que garante a importação direta dos *outputs* do SIDCAM para o HEC-RAS. Os arquivos *outputs* contêm os seguintes dados:

- hidrogramas por sub-bacia (exportado do módulo hidrológico);
- configuração geométrica do canal (exportado do módulo hidráulico);
- curva marégrafica de níveis máximos maximorum (exportado do módulo hidráulico).

3.1.2 Grupo (2): Representação Gráfica

O grupo (2) foi composto de apenas 1 fase, a Fase 4, na qual foram definidos os tipos de peças gráficas e as informações que deveriam compô-las.

a) Fase 4: Definição das peças gráficas para o módulo gráfico.

Os dados categorizados nas fases 1, 2 e 3 serão utilizados como *inputs* da Fase 4, que consiste na definição do projeto gráfico do canal.

As informações base para a geração das plantas dos perfis do canal estão contidas nos arquivos *outputs* do HEC-RAS. Portanto, foi prevista a exportação dos arquivos do HEC-RAS e importação para o AutoCAD, assim, o projetista utilizará o AutoCAD para abrir e editar as plantas dos perfis transversais e longitudinal do canal dimensionado pelo sistema proposto, conforme a necessidade do projeto.

3.2 Etapa 2: elaboração do sistema computacional - SIDCAM

O Sistema Computacional Integrado de Dimensionamento e Representação Gráfica de Canais de Macrodrenagem – SIDCAM foi concebido para integrar três *softwares* externos com o modelo computacional desenvolvido nesta tese, denominado MACRO 1.0. O MACRO 1.0 é a parte principal do SIDCAM, a partir dele foram construídas as ferramentas de integração com os demais *softwares* que compõem o sistema.

O SIDCAM foi programado em Java com base no método Scrum, o seu desenvolvimento foi realizado em três etapas: grupo (3): desenvolvimento dos diretórios de importação de curvas IDF e marégraficas; grupo (4): desenvolvimento do modelo MACRO 1.0; e grupo (5): desenvolvimento das ferramentas de integrações com HEC-RAS e AutoCAD.

3.2.1 Grupo (3): Desenvolvimento dos diretórios de importação

O desenvolvimento do grupo (3) resultou em 2 produtos. O produto 1 se refere ao diretório de importação de curvas IDF, de Arisvaldo (ABC6, 2019) e Pfsfstetter (PFSFSTETTER, 1957). Com o produto 2 foi criado o segundo diretório de importação, o diretório de curvas marégraficas de níveis máximos maximorum de marés astronômicas das estações maregráficas da Marinha do Brasil.

a) Produto 1: Desenvolvimento do diretório de importação de curvas IDF

O desenvolvimento do diretório de importação de curvas IDF partiu da necessidade de determinação de hietogramas de precipitação de projeto. O código de programação criado em Java foi concebido para executar as equações de curvas IDF (25) e (26) e, assim, gerar um conjunto de dados de intensidades de precipitação distribuídas ao longo do tempo; esse conjunto de dados comporá o gráfico do hietograma de determinada sub-bacia.

ABC6 (2019) e Pfafstetter (1982) propuseram coeficientes de representação das características das precipitações de diversos municípios do território nacional. Os coeficientes “K, n, m, Do, a, b, c, β1, β2, β3, β4”, quando aplicados nas equações (25)

e (26), para determinado município, permitem obter a intensidade de precipitação do local para um evento de chuva com uma duração qualquer.

$$i = \frac{K \,.\, T^{n}}{(D + Do)^{m}} \tag{25}$$

Onde:

i - Intensidade (mm/min);

T - Tempo de retorno (anos);

D - Duração da chuva (min);

K, n, m, Do - variáveis que dependem da localidade.

$$I = \frac{T^{\left(\propto + \frac{\beta}{T^{\frac{1}{4}}}\right)}}{D}\left\{\frac{a.D}{60} + \left[\mathrm{b}.\log(1 + \frac{c.D}{60})\right]\right\} \tag{26}$$

Onde:

i - Intensidade (mm/min);

T - Tempo de retorno (anos);

D - Duração da chuva (min);

a, b, c, β1, β2, β3 e β4- variáveis que dependem do tempo e localidade.

Para alimentar o algoritmo de execução de hietograma, foi necessário construir dois diretórios de importação dos coeficientes “K, n, m, Do, a, b, c, β1, β2, β3, β4”, um para as curvas IDF de Arisvaldo (ABC 6, 2019) e o outro para as curvas IDF de Pfsfstetter (PFSFSTETTER, 1957), esses diretórios foram escritos em Java, com base no IDE Apache Netbeans e no componente do próprio *framework* do Java.

Os diretórios de importação são alimentados por um banco de dados onde estão armazenados os coeficientes de localidade de 165 municípios brasileiros. Esse banco de dados foi construído em Microsoft Access e vinculado ao módulo hidrológico do MACRO 1.0. As planilhas com os coeficientes que compõem os bancos de dados são apresentadas no apêndice B desta tese.

Além das variáveis que dependem da localidade, as equações (25) e (26) são compostas do tempo de retorno da chuva de projeto e duração da tormenta,

parâmetros que dependem do tipo e nível de segurança da estrutura a ser projetada.Produto 2: Desenvolvimento do diretório de importação de marégrafos.

Nos mesmos moldes dos diretórios de curvas IDF, foi concebido o diretório de importação de curvas marégraficas de 334 estações da Marinha do Brasil, localizadas em território nacional. As curvas marégraficas são representadas por um ciclo de 24 horas de níveis máximos maximorum de maré; para tanto, foram consideradas as maiores cotas de previsões astronômicas durante 31 anos de dados históricos (1989-2020).

O diretório de importação de marégrafos foi desenvolvido para alimentar o módulo hidráulico do MACRO 1.0, no que se refere à geração de condições de contorno hidrodinâmicas no exutório do canal de projeto. Desse modo, também foi necessário construir um banco de dados de curvas marégráficas para armazenar as 334 curvas marégraficas de estações distribuídas em território nacional.

O banco de dados das curvas marégraficas é composto por cinco pastas, nomeadas por região (norte, nordeste, centro-oeste, sudeste e sul), onde estão armazenados os arquivos nomeados com código numérico da estação. As estações que compõem o banco de dados de curvas marégraficas, e seus respectivos códigos, são apresentadas no apêndice C desta tese.

No aspecto conceitual, a abordagem do diretório de importação de marégrafos oferece ferramentas de busca e carregamento de arquivos externos ao módulo hidráulico do MACRO 1.0, ou seja, esse é considerado o primeiro processo de integração do sistema proposto, por ocorrer fora do ambiente do modelo Java. Assim, são utilizadas ferramentas do Google Earth e do próprio sistema operacional do usuário para importar o arquivo da curva marégrafica de interesse.

A estratégia de busca e carregamento dos arquivos do banco de dados foi propositalmente inserida nesse algoritmo, uma vez que é pouco provável que os usuários consigam identificar todas as 334 estações marégraficas, por nome ou código. Portanto, é necessário que o usuário abra o arquivo “estacoes_maregraficas.kmz” no Google Earth; nele estão plotadas espacialmente todas as 334 estações marégraficas que fazem parte do banco de dados, assim, o usuário poderá localizar uma ou mais estações próximas ao exutório do canal de projeto, anotar seus códigos de identificação e, posteriormente, carregar a curva marégrafica no módulo hidráulico de MACRO 1.0.

3.2.2 Grupo (4): Desenvolvimento do MACRO 1.0

O MACRO 1.0 é considerado o eixo principal do SIDCAM, ele foi estruturado com um sistema multithread para refatoração de *softwares*, usando como fundamentos os métodos de detecção e inserção de padrões de projeto e a forma abstrata de relacionar os agentes envolvidos com seus arquivos e diretórios, além das percepções e ações que eles realizam no ambiente, resultando na criação de novas funcionalidades.

O Java foi a linguagem de programação escolhida para a programação do MACRO 1.0, por ser considerada uma metodologia ativa e em constante atualização, sendo assim, um facilitador para desenvolvimento de futuras versões do programa. Outro estímulo para uso do Java pauta-se nos componentes de integração com *softwares* externos, como o IDE Apache Netbeans e o próprio framework do Java. A capacidade de integração oferecida pelo Java foi a peça-chave para a sua escolha, uma vez que o desenvolvimento do SIDCAM foi fortemente fundamentado no objeto de integração entre o MACRO 1.0 com os três softwares externos: Google Earth, HEC-RAS e AutoCAD.

Todos os módulos do modelo foram programados em Java orientado a objetos, sendo o design do modelo baseado no Java Swing. Assim, foi possível manter a integridade conceitual do *software*, elaborado incialmente no Microsoft Excel; no entanto, as melhorias promovidas pelo Java foram substanciais ao modelo, são elas:

- Simplicidade de manuseio para o usuário: funções fácies e intuitivas;
- Código aberto e de fácil entendimento, sem repetições;
- Código voltado à integração com outros *softwares;*
- Identação do código, com disposição hierárquica, facilitando a visualização e percepção do programa.

A biblioteca JFreeChart do Java foi utilizada na geração da parte gráfica exibida no MACRO 1.0, ou seja, nos gráficos dos hietogramas e hidrogramas de projeto, nos gráficos de maré, entre outros. Para a coincidência dos picos de vazão com os de maré, foi utilizado um código autoral, desenvolvido nesta tese, de multithread de combinações, utilizando componente do próprio framework do Java.

Com o uso desses componentes, foi possível criar ferramentas de programação fundamentais, como:

- adicionar e excluir sub-bacias, trechos e estacas;
- selecionar o tempo e discretização dos dados;
- selecionar o município de interesse do projeto;
- exportar hidrogramas das sub-bacias;
- acessar o Google Earth de dentro do programa;
- importar marégrafos;
- exportar dados geométricos do canal, importar e exportar arquivos de saída na extensão “*.csv”.

O MACRO 1.0 funciona com uma estrutura modular; os módulos são vinculados aos diretórios de importação de curvas IDF e de curvas marégraficas. Desse modo, os módulos e os diretórios podem ser continuamente aprimorados e alimentados com novos conjuntos de dados, tais como:

- novas metodologias de cálculo “chuva – vazão”;
- novos tipos de seções transversais;
- novas equações de curvas IDF;
- novas estações marégraficas, entre outras.

Portanto, o produto do grupo (4), que é o modelo MACRO 1.0, foi subdividido em 3 subprodutos. O produto 3 representa o menu inicial do MACRO 1.0; o produto 4 se refere ao desenvolvimento do módulo hidrológico do MACRO 1.0; e o produto 5 representa a confecção do módulo hidráulico do MACRO 1.0. A concepção de cada produto será detalhada nos tópicos a seguir.

a) Produto 3: Módulo Inicial

O módulo inicial é o responsável pela categorização e organização dos dados que serão utilizados nos demais módulos do SIDCAM. Para tanto, utilizou-se a estratégia de representação gráfica da bacia e suas interligações com o

desenvolvimento de um diagrama unifilar, que tem como eixo central o canal de projeto.

A organização do diagrama unifilar se dá por blocos; os blocos são denominados *Layout*; cada *Layout* é composto pelo conjunto: sub-bacias de contribuição + estacas + trecho do canal principal.

O diagrama unifilar foi concebido com base na teoria dos grafos (BIGGS, 1986), aplicada à linguagem de programação Java. O algoritmo desenvolvido para manipular o diagrama unifilar da rede hidrográfica conta com no mínimo 1 *Layout* (3 sub-bacias + 2 estacas + 1 trecho) e no máximo 4 *Layout* (9 sub-bacias + 5 estacas + 4 trechos).

Além do diagrama, no módulo inicial foram inseridas as tabelas: “vazões de pico (m³/s)”, “comprimento do trecho (m)” e “cotas do canal (m)”. As informações que irão alimentá-las estão diretamente vinculadas aos algoritmos dos módulos hidrológico e hidráulico.

A tabela “vazões de pico (m³/s)” é automaticamente preenchida com as vazões de pico dos hidrogramas das sub-bacias de projeto. A tabela “comprimento do trecho (m)” é alimentada, pelo usuário, com os comprimentos dos trechos do canal principal. Na tabela “cotas do canal (m)”, as cotas da coluna “fundo” serão preenchidas, automaticamente, ao final da modelagem hidrológica; no entanto, é necessário alimentar as colunas esquerda e direta, que representam as cotas que se deseja para as margens do canal projetado.

b) Produto 3: Módulo Hidrológico

As ferramentas inerentes ao módulo hidrológico do MACRO 1.0 foram desenvolvidas em Java com base no método Scrum, auxiliado pelo IDE Apache Netbeans e componente do próprio framework do Java. O Java possui uma metodologia ativa, portanto, seu framework é considerado um facilitador para a aplicação de algoritmos dinâmicos.

No módulo hidrológico são utilizadas as metodologias *Soil Conservation Service* (SCS) para cálculo da chuva excedente e determinação das vazões de projeto.

Na construção dos hietogramas de projeto foram utilizados os métodos de *Curver Number* (CN) e blocos alternados para a distribuição temporal da chuva

sintética, observando que o passo no tempo (t) não poderia ser superior ao tempo de concentração da sub-bacia, devendo este ser submúltiplo da duração total da chuva.

Já para os hidrogramas de projeto foi empregado o método do *Soil Conservation Service* (SCS) para geração dos hidrogramas sintéticos, ou seja, o gráfico de distribuição temporal das vazões de projeto expressará o Volume de Escoamento Superficial Direto (Vesd) causado por uma Chuva Excedente (Hexc), incidente na Área de Drenagem (AD) de determinada sub-bacia.

Assim, com base nos métodos citados, foram construídas ferramentas integradoras, de forma sistemática, para que o módulo hidrológico fosse capaz de gerar os hietogramas e hidrogramas de projeto.

c) Produto 4: Módulo Hidráulico

O módulo hidráulico do MACRO 1.0 foi desenvolvido para fornecer o dimensionamento geométrico do canal; para tanto, o algoritmo desse módulo foi programado para importar, do módulo hidrológico, os hidrogramas de contribuição das sub-bacias de projeto. As ferramentas do módulo hidráulico foram desenvolvidas em Java com metodologia baseada na equação de Manning para dimensionamento de canais de macrodrenagem, considerando o regime escoamento permanente.

Os cálculos de dimensionamento hidráulico determinam a geometria dos canais de seção trapezoidal, triangular e retangular. Nesse módulo são gerados os arquivos de saída do MACRO 1.0, denominados “geométrico.csv” e o “hidrológico.csv”, que serão utilizados como *inputs* do *software* HEC-RAS. No módulo hidráulico também é possível modelar a coincidência dos picos de marés com os picos dos hidrogramas, os resultados compõem o arquivo “hidrológico.csv”, com o qual é possível simular o alcance da curva de remanso ocasionadas por maré alta.

3.2.3 Grupo (5): Desenvolvimento das integrações

O grupo (5) resultou na entrega de dois produtos. O produto 5, que foi a criação da interface de integração entre MACRO 1.0 com o *software* HEC-RAS, e o produto 6, que foi a interface de integração entre o HEC-RAS e o AutoCAD. Para possibilitar as integrações entre o MACRO 1.0 com os *softwares* HEC-RAS e

AutoCAD, foram desenvolvidas ferramentas de importação e exportação de dados, com uso da classe JFileChoose do Java.

Com a geração desses dois produtos se alcançou a formatação final do SIDCAM.

a) Fase 5: Módulo hidrodinâmico de integração com o HEC-RAS

No módulo hidrodinâmico ocorreram a segunda integração do SIDCAM, entre o MACRO 1.0 e o *software* HEC-RAS. Os arquivos de saída do módulo hidráulico, “geométrico.csv” e “hidrológico.csv”, contendo os dados de diagramação das seções transversais das estacas e pelos hidrogramas de projeto, coincidindo com a curva marégrafica, serão exportados do MACRO 1.0 e importados para o HEC-RAS, a fim de iniciar a modelagem hidrodinâmica para verificação do comportamento do canal sob regime não-permanente e, portanto, a validação ou não das dimensões do canal projetado pelo MACRO 1.0.

O algoritmo construído para geração dos arquivos “geométrico.csv” e “hidrológico.csv” foi programado para formatar os arquivos “*.csv” conforme a exigência de leitura do HEC-RAS, ou seja, as etapas da modelagem hidrodinâmica serão resumidas em: importação dos arquivos “*.csv” para o HEC-RAS, executar o programa HEC-RAS e analisar os resultados da simulação. Uma vez que os resultados da modelagem hidrodinâmica forem considerados satisfatórios, os arquivos *outputs* do HEC-RAS serão preparados para importação do projeto gráfico para o AutoCAD.

b) Fase 6: Módulo gráfico de integração com o AutoCAD

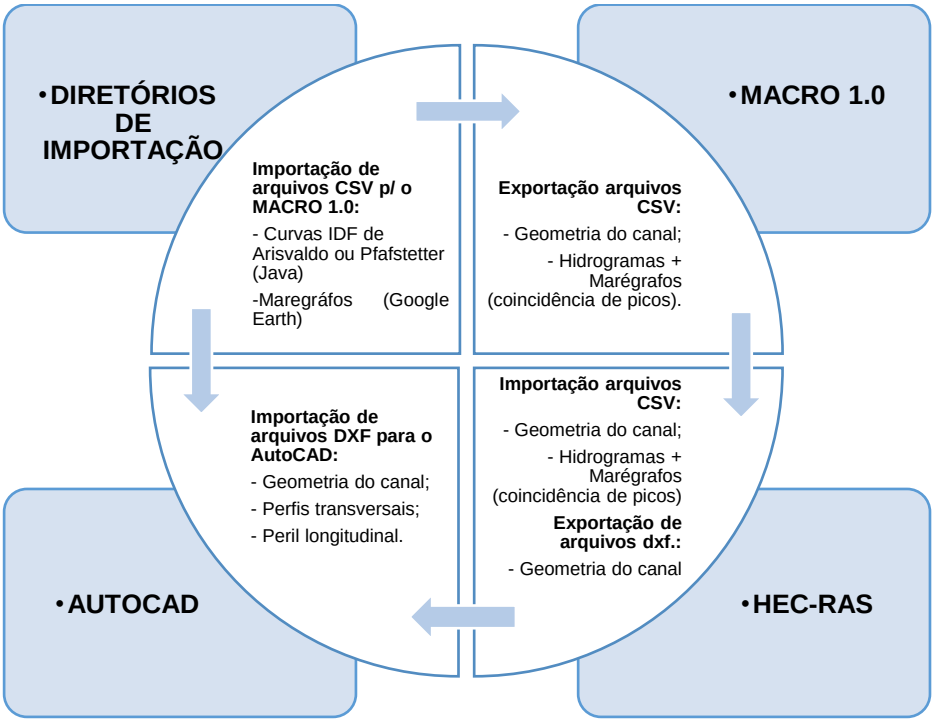
Dado que o canal dimensionado pelo SIDCAM foi validado pela modelagem hidrodinâmica do HEC-RAS, sucedeu-se a terceira etapa de integração do sistema, dessa vez com o AutoCAD. O módulo gráfico consiste na integração entre o HEC-RAS e o AutoCAD, essa integração se dá pela exportação de dois arquivos de representação gráfica: “Perfil longitudinal.dxf” e “Perfis transversais.dxf”. Os perfis longitudinal e transversais do canal dimensionado poderão ser abertos direto no CAD, sendo passíveis de edição pelo projetista.

c) Produto 6: Sistema Computacional Integrado de Dimensionamento e Representação Gráfica de Canais de Macrodrenagem – SIDCAM

Todas as integrações de fases, produtos da tese e *softwares* descritos anteriormente nesta metodologia foram pensadas e elaboradas com a intenção de desenvolver um sistema computacional que integrasse os processos envolvidos no dimensionamento de canais de macrodrenagem, possibilitando que a sistemática dos dados de entrada resultasse na disponibilização do projeto de dimensionamento e dos perfis gráficos de determinado canal objeto de projeto. Portanto, conforme as etapas de integração descritas, se alcançou o objetivo de desenvolvimento do sistema denominado SIDCAM.

Na Figura 8 é apresentado um resumo dos processos de integração entre os principais componentes do SIDCAM, os diretórios de importação, o MACRO 1.0, o Google Earth, HEC-RAS e o AutoCAD.

Figura 8 – Resumo dos processos de integração entre os módulos de MACRO 1.0 e os *softwares* externos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

3.3 Etapa 3: aplicação do SIDCAM em estudo de caso

Para avaliar a aplicabilidade do sistema desenvolvido, foram simuladas, no SIDCAM, as etapas de dimensionamento e peças gráficas do projeto de macrodrenagem do igarapé Tucunduba. Para tal, foram levantados os arquivos do projeto Tucunduba junto à Secretaria de Saneamento de Belém – SESAN.

3.3.1 Validação de dados e critérios de desempenho

A validação do SIDCAM ocorreu com a aplicação e avaliação dos resultados do canal projetado pelo SIDCAM em comparação com o canal projetado pela Leme Engenharia (2012). A metodologia de validação foi focada no desempenho do MACRO1.0, uma vez que o modelo é a parte central do sistema proposto, sendo o responsável pelo dimensionamento do canal, do qual as etapas posteriores, de modelagem hidrodinâmica e gráfica, são totalmente dependentes.

Assim, para avaliar a performance do SIDCAM, optou-se pela análise dos resultados da modelagem hidrodinâmica de dois cenários:

a) C1: Geometria do canal (Leme, 2012) + Hidrológico (Leme, 2012);
b) C2: Geometria do canal (SIDCAM) + Hidrológico (SIDCAM);

O cenário C1 representa o cenário de referência para comparação do desempenho de C2. No cenário C2 foi avaliada a eficiência global do modelo, já que o dimensionamento hidrológico e hidráulico foi realizado no MACRO 1.0.

Assim, conforme Moriasi *et al.* (2007), Brighenti *et al*. (2016) e Rolim *et al.* (2020), para a validação foram aplicados os seguintes testes estatísticos:

a) nash-Sutecliffe (NSE),
b) razão entre a raiz do erro quadrático médio e desvio padrão dos dados observados (RSR)
c) viés erro percentual (PBIAS).

De acordo com a equação (27), o coeficiente de Nash-Sutecliffe (NSE) indica o ajustamento dos dados simulados (MORIASI *et al.*, 2007)

$$NSE = \frac{\sum_{i=1}^{n}(obs - sim)^2}{\sum_{i=1}^{n}(obs - Obs\ média)^2} \quad (27)$$

Para o RSR, na equação (28) os valores são interpretados como uma medida do desvio médio entre os valores observado e o simulado. São apresentadas as classificações desse coeficiente (ZHANG *et al*., 2007).

$$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(obs - sim)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(obs - Obs\ média)^2}} \quad (28)$$

Com a equação (29), é possível obter o viés percentual do erro padrão que, por sua vez, reproduz a estimativa de “falha” do sistema, em termos percentuais (BRIGHENTI *et al*., 2016).

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(obs - sim).100}{\sum_{i=1}^{n} obs} \quad (29)$$

No Quadro 6 são apresentadas as classificações quanto ao desempenho dos dados simulados (Sim) em comparação com os observados (Obs), para os testes estatísticos citados.

Quadro 6 – Classificação do desempenho segundo o método estatístico.

Classificação	**NSE**	**RSR**	***PBIAS* (%)**
Muito Bom	0,75 < NSE ≤ 1,0	0,0 ≤ RSR ≤ 0,50	PBIAS < ±10%
Bom	0,65 < NSE ≤ 0,75	0,50 ≤ RSR ≤ 0,60	±10% ≤ PBIAS > ±15%
Satisfatório	0,50 < NSE ≤ 0,65	0,60 ≤ RSR ≤ 0,70	±15% ≤ PBIAS > ±25%
Insatisfatório	NSE ≤ 0,50	RSR > 0,70	PBIAS ≥ ±25%

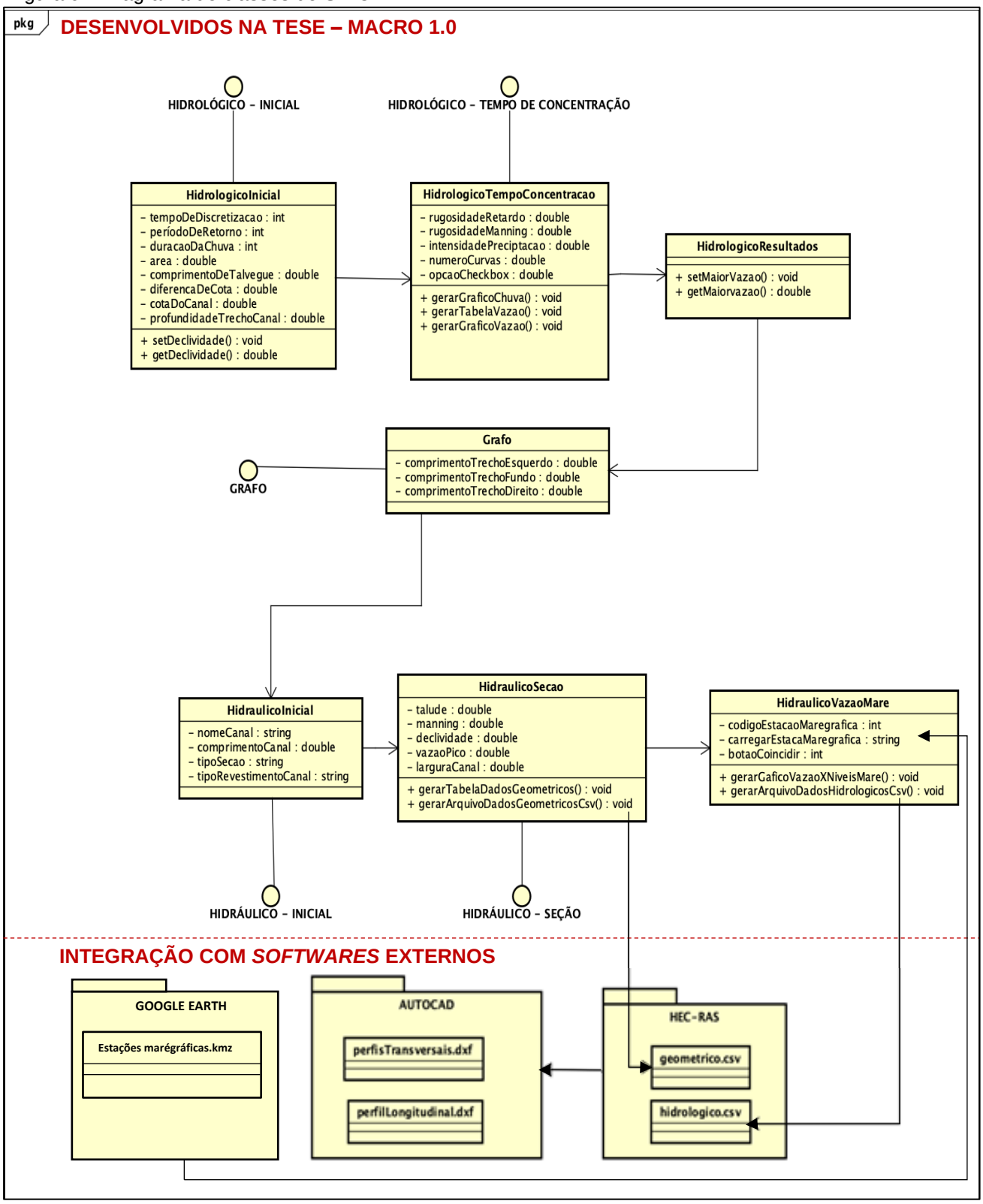
Fonte: Adaptado de Moriasi *et al.* (2007).

As análises foram realizadas para os resultados da modelagem da variável, nível d’agua ao longo do canal Tucunduba (m). Ressalta-se que, de acordo com Oliveira *et al.* (2016), para modelos validados por modelagem hidrodinâmica, não há necessidade de avaliação de diversos cenários e variáveis, pois o meio físico é bastante conhecido e as variáveis envolvidas no problema são poucas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas etapas de pesquisa bibliográfica e materiais e métodos foram selecionados dos principais métodos e *softwares* utilizados no dimensionamento de canais de macrodrenagem. Isso resultou na organizado do desenvolvimento do SIDCAM em cinco categorias de organização de dados, também chamadas de módulos, sendo essas: o módulo inicial, o módulo hidrológico, o módulo hidráulico, o módulo hidrodinâmico e o módulo gráfico. Na Figura 9 é apresentado o diagrama de classes que baseou o desenvolvimento do sistema, apresentados os dados utilizados para modular o sistema, sendo apresentadas as associações, composições e produtos categorizados de acordo com o módulo, dados de entrada e *softwares* que compõem o sistema.

Figura 9 – Diagrama de classes do SIDCAM.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.1 Etapa 2: Sistema Computacional Integrado de Dimensionamento e Canais e Macrodrenagem – SIDCAM

Na Figura 9 é possível visualizar a estrutura organizacional do SIDCAM e as integrações entre os cinco módulos do sistema. Verifica-se que os dados de entrada que devem ser fornecidos pelo usuário darão entrada no sistema pelo módulo inicial (grafo), módulo hidrológico e módulo hidráulico, os demais *inputs* são gerados por ferramentas do próprio sistema ou importados dos diretórios de curvas IDF e curvas marégraficas.

No módulo inicial (grafo) é possível construir croqui esquemático de representação da bacia hidrográfica e sub-bacias de projeto. O diagrama unifilar da bacia é vinculado aos dados de comprimento dos trechos, cotas do canal de projeto e vazões de pico dos hidrogramas gerados para as sub-bacias. A partir da configuração do diagrama unifilar, os dados inseridos no modelo passam a ser categorizados de acordo com cada sub-bacia e organizados em um esquema onde o eixo central do diagrama representa o canal a ser projetado, formado por trechos localizados entre estacas. Cada estaca pode estar interligada e receber contribuição de no mínimo uma e no máximo duas sub-bacias.

No módulo hidrológico é permitido sistematizar as informações de tempo de dicretização de dados, período de retorno, duração da chuva, características físicas da bacia, tempo de concentração e intensidade de precipitação (diretório de importação de curvas IDF) por sub-bacias de contribuição. Com base na sistematização desses dados, o SIDCAM transforma a chuva incidente sobre sítio em vazão, ou seja, gera os hidrogramas de projeto; além dos hidrogramas, é possível visualizar o total precipitado, a precipitação efetiva, o volume infiltrado e o volume de escoamento superficial ao longo do tempo e para cada sub-bacia de contribuição.

No módulo hidráulico é possível executar o dimensionamento geométrico do canal projetado. Para tanto, o algoritmo construído para esse módulo faz a importação automática dos hidrogramas de projeto (resultantes do módulo hidrológico), permitindo, assim, a geração do arquivo “geométrico.csv”, que contém os dados das seções transversais das estacas do diagrama unifilar. Esse módulo possibilita, ainda, modelar coincidências dos picos dos hidrogramas importados com os picos de curvas marégraficas inseridas no módulo hidráulico pela ferramenta importação do diretório de marégrafos, resultando no arquivo “hidrológico.csv”, com o qual é possível simular

o remanso ocasionado pelas marés altas no dimensionamento de canais de macrodrenagem.

O menu inicial, o módulo hidrológico e o módulo hidráulico, que compõem o modelo MACRO 1.0, são produtos desenvolvidos e modelados exclusivamente para esta tese; já os módulos hidrodinâmico e gráfico são produtos de ferramentas de integração concebidas para usufruir dos recursos de *softwares* externos no desenvolvimento de funções do SIDCAM.

Portanto, a estratégia desenvolvida para o módulo hidrodinâmico é a geração pelo módulo hidráulico dos arquivos “geométrico.csv” e “hidrológico.csv” nos moldes de importação do HEC-RAS, assim, as principais condições de contorno exigidas para rodar uma simulação no HEC-RAS estão contidas nos arquivos importados, restando ao usuário pequenos ajustes, a execução do programa e a interpretação dos resultados.

Com relação ao módulo gráfico, os arquivos *outputs* do HEC-RAS poderão ser importados para o AutoCAD, assim, são gerados os arquivos editáveis dos perfis transversais e longitudinal do canal projetado.

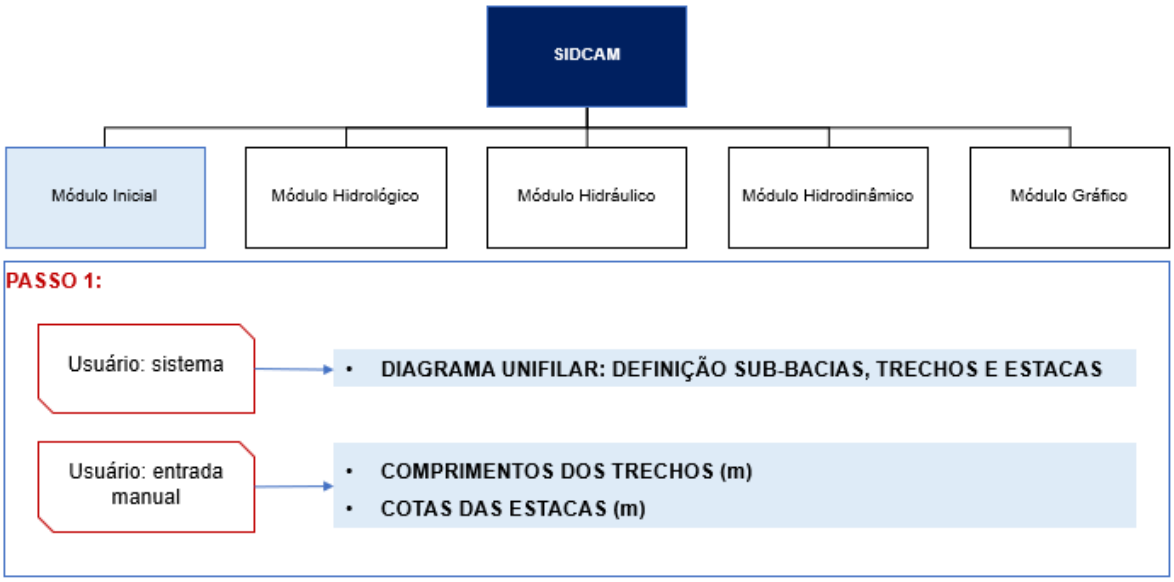
Todos os produtos e fases de aplicação do SIDCAM serão apresentados sequencialmente nos próximos tópicos dos resultados.

4.1.1 Produto 3: Módulo Inicial

O módulo inicial é representado pelo ícone “casa” da barra de módulos do MACRO 1.0. Nesse módulo é possível acessar as funções de construção do diagrama da rede hidrográfica, adicionar ou remover elementos da rede, inserir comprimentos e cotas dos trechos do canal principal.

A modelagem hidrológica, hidráulica e hidrodinâmica do projeto será baseada nas primeiras definições estabelecidas no módulo inicial. Na Figura 10, são apresentadas as etapas de modelagem inicial do SIDCAM.

Figura 10 – Etapas da modelagem do módulo inicial do SIDCAM.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

a) Diagrama unifilar da rede hidrológica (grafo)

Para representar a rede hidrológica da bacia em um diagrama unifilar (sub-bacias, trechos e estacas) foi concebido um diagrama com abordagem dinâmica. O algoritmo desenvolvido para modelar o diagrama foi concebido com base na teoria dos grafos (BIGGS, 1986) aplicada à linguagem de programação Java e é descrito a seguir:

– Algoritmo: diagrama unifilar (Grafo)

Início do laço

Se

$$\begin{bmatrix} estaca = 1; show\ layout1 \\ estaca = 2; show\ layout2 \\ estaca = 3; show\ layout3 \\ estaca = 4; show\ layout4 \end{bmatrix} \quad (30)$$

Fim do laço

Onde:

Layout 1 - é igual à 3 sub-bacias + 2 estacas + 1 trecho;

Layout 2 - é igual à 5 sub-bacias + 3 estacas + 2 trechos;

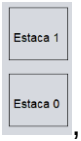
Layout 3 - é igual à 7 sub-bacias + 4 estacas + 3 trechos;

Layout 4 - é igual à 9 sub-bacias + 5 estacas + 4 trechos.

No ambiente Java, o arranjo do diagrama é feito pelo usuário, com a inserção ou remoção dos elementos que comporão a rede hidrológica do projeto.

Os elementos do diagrama, são representados por:

, representa uma sub-bacia de contribuição, que se liga a uma estaca do canal de projeto.



, representam as estacas que formarão o canal de projeto. As estacas podem estar ligadas a no mínimo 1 e no máximo 2 sub-bacias de contribuição. A estaca representa o ponto de confluência entre o canal principal e um afluente ou o ponto de deságue de uma área com drenagem superficial direta. A estaca 0 representa o exutório, e a de maior numeração corresponde à cabeceira do canal. A porção do canal localizada entre duas estacas é denominada “Trecho”.

b) Adicionar (+) ou remover (-) elementos do diagrama.

Adicionar (+): Clicando no ícone

serão inseridas no mínimo 3 sub-bacias e 2 estacas. À medida que se clica no botão

são inseridos, a montante, novos blocos de estaca e duas sub-bacias.

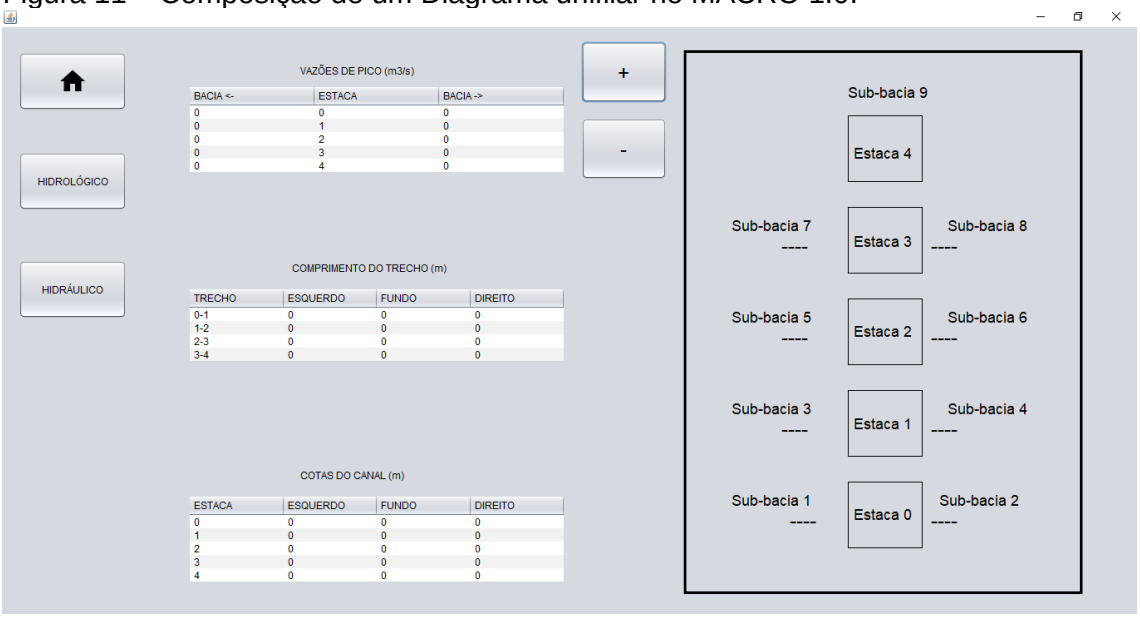
Remover (-): Clicando no ícone

, os blocos de estacas já inseridos são removidos, no sentido de montante para jusante.

A cada bloco de estacas/sub-bacias inserido ou removido são atualizadas as planilhas destacadas na Figura 11. A atualização dar-se-á com a adição ou subtração de linhas, as quais referem-se aos dados correspondentes ao bloco editado.

Um exemplo de diagrama unifilar da rede hidrológica é apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Composição de um Diagrama unifilar no MACRO 1.0.



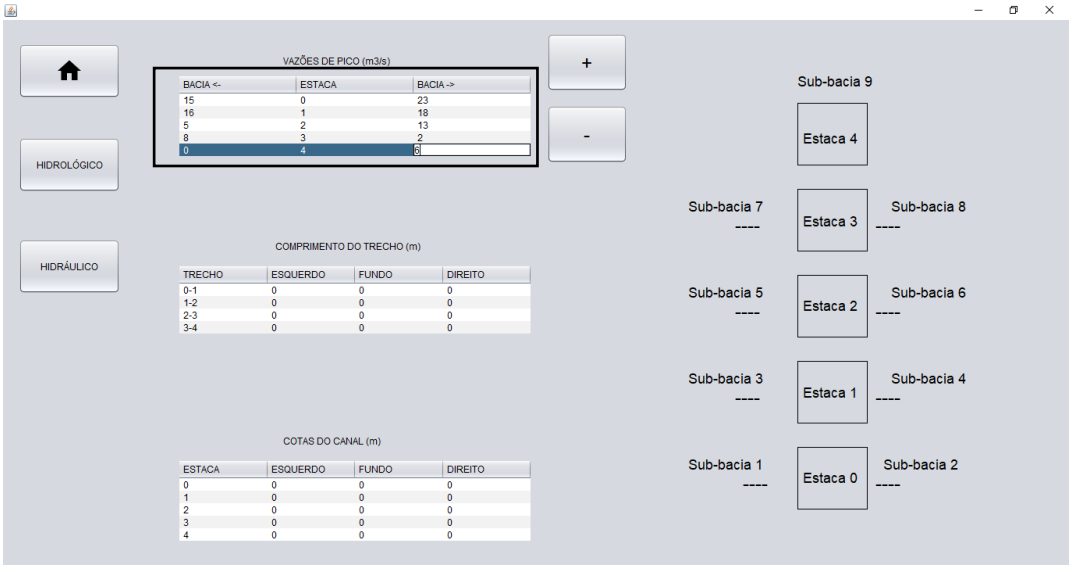
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

c) Tabelas

Finalizada a configuração do diagrama, é necessário alimentar as três tabelas do módulo inicial, são elas:

Tabela Vazões de Pico (m³/s): Essa tabela é alimentada automaticamente ao finalizar os passos do módulo “HIDROLÓGICO”. As células das colunas “BACIA <-“(esquerda) e “BACIA ->”(direita) serão preenchidas com as vazões de pico, dos hidrogramas de projeto das respectivas sub-bacias.

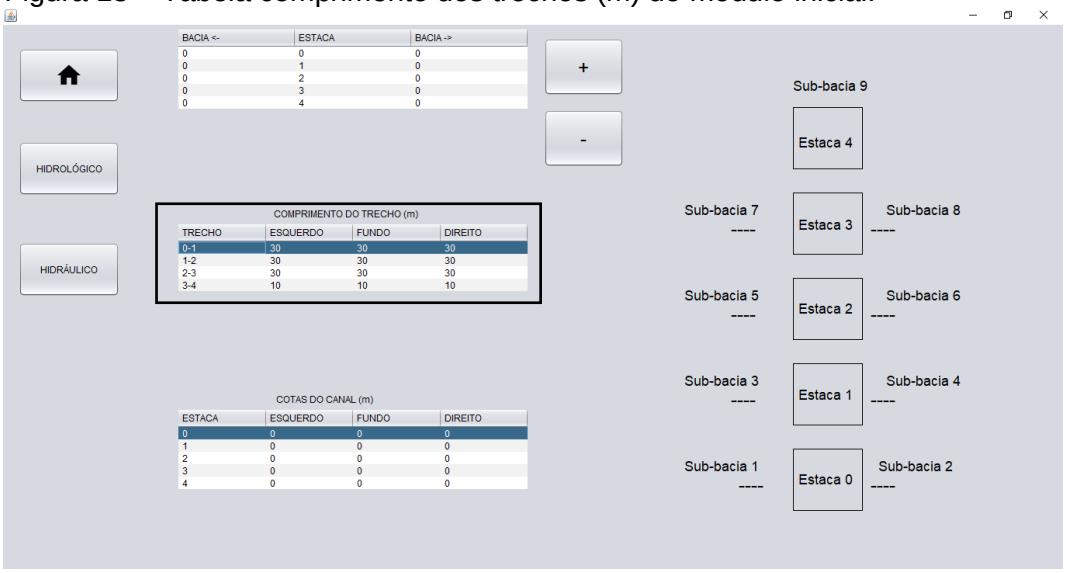
Figura 12 – Tabela vazões de pico do módulo inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tabela Comprimento do Trecho (m): Na tabela comprimento dos trechos (Figura 13), o usuário deverá inserir nas células o comprimento (em metros) dos trechos que compõem o diagrama hidrográfico do projeto. No caso de canais sinuosos, poderão ser inseridas extensões diferentes para “ESQUERDO”, “DIREITO” e “FUNDO”. No caso de canais retilíneos, o usuário poderá repetir as extensões da coluna “FUNDO” em “ESQUERDO” e “DIREITO”;

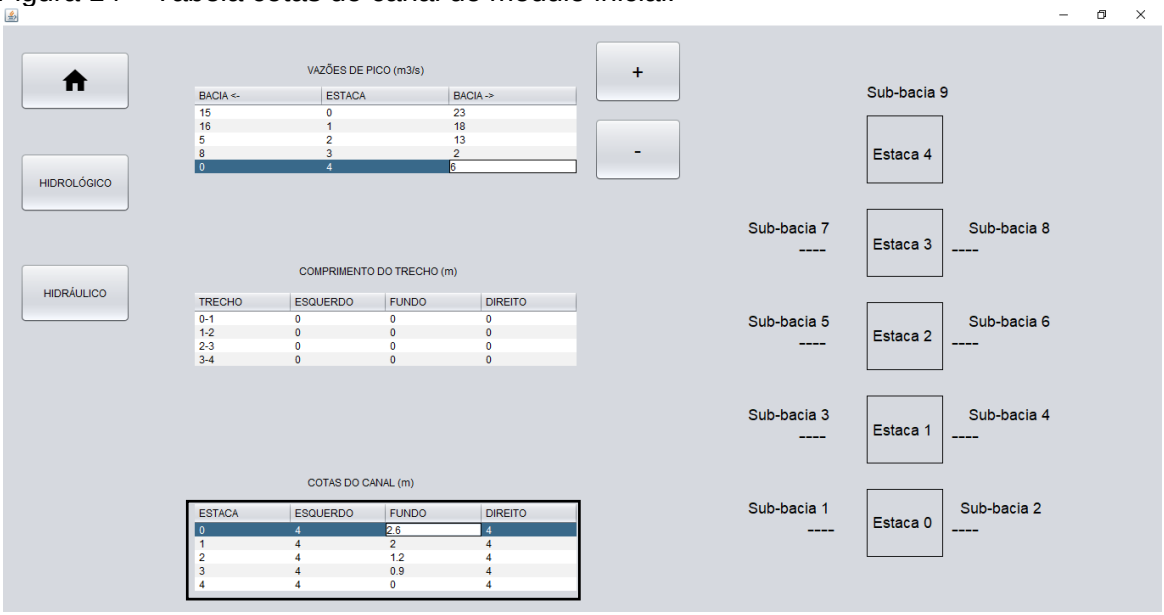
Figura 13 – Tabela comprimento dos trechos (m) do módulo inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

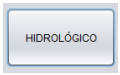
Tabela Cotas do Canal (m): Nessa tabela (Figura 14) são inseridos os dados das cotas do canal projetado. Para cada estaca deverão ser informadas as cotas do fundo e das margens esquerda e direita, conforme o levantamento altimétrico das estacas.

Figura 14 – Tabela cotas do canal do módulo inicial.



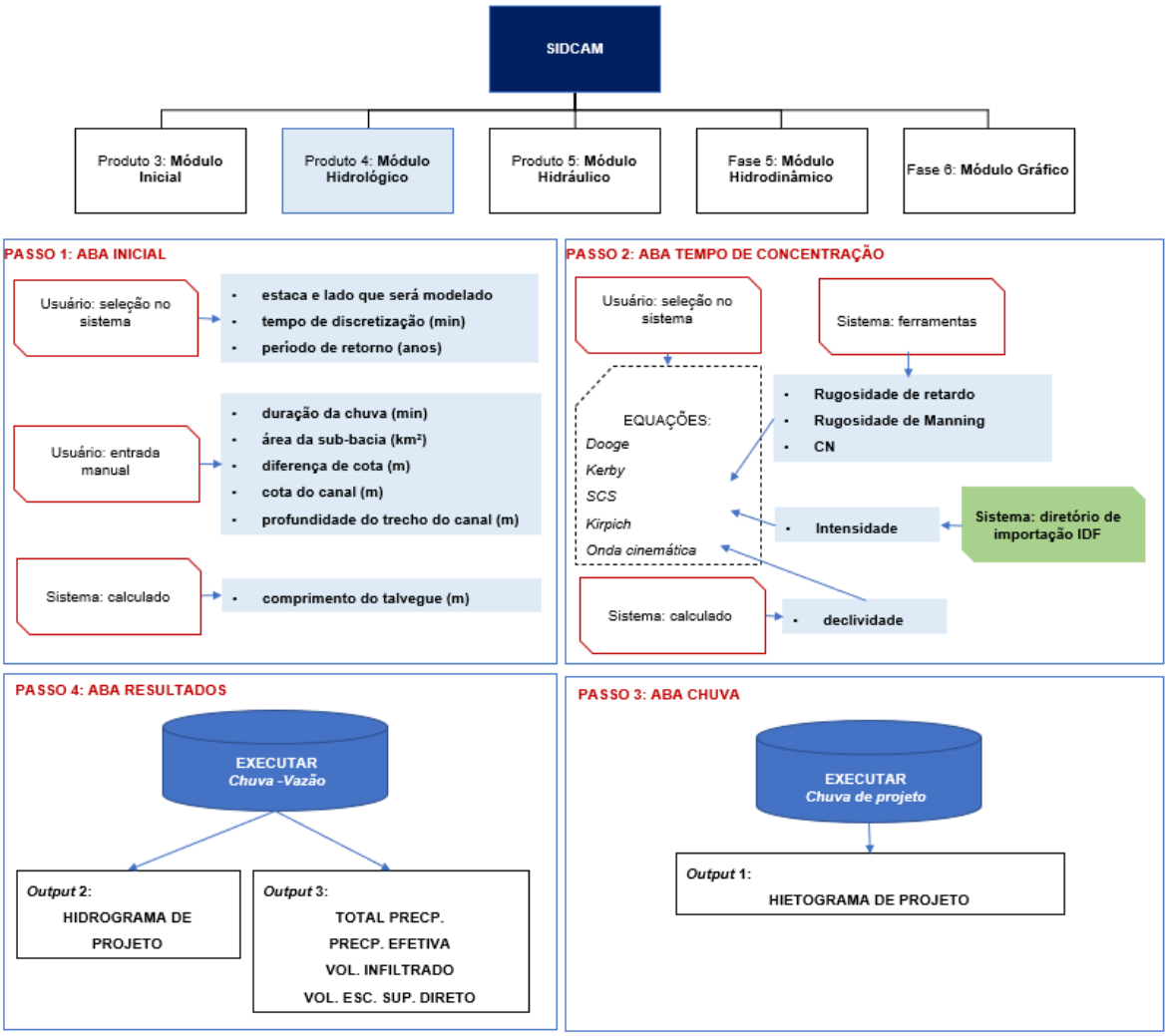
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.1.2 Produto 4: Módulo Hidrológico

O módulo hidrológico é representado pelo ícone “HIDROLÓGICO”  da barra de módulos do MACRO 1.0. Nesse módulo é possível acessar as abas inicial, tempo de concentração, chuva e resultados.

A etapa de modelagem hidrológica do projeto será baseada nas definições estabelecidas nesse módulo considerando o diagrama hidrológico e demais informações inseridas no módulo inicial. Na Figura 15, são apresentadas as etapas de modelagem hidrológica do SIDCAM.

Figura 15 – Etapas de modelagem do módulo hidrológico do SIDCAM.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para representar os processos envolvidos na modelagem hidrológica das sub-bacias (Figura 15), como a discretização dos dados, geração de hietogramas de chuva de projeto e geração de hidrogramas de vazões, foram modelados três algoritmos em Java com base no método Scrum, auxiliado pelo IDE Apache Netbeans e componentes do próprio framework do Java, detalhados a seguir:

– Algoritmo 1: intervalo de discretização dos dados

Início do laço

Para,

$$T(t_0) = td \tag{31}$$

$$\begin{bmatrix} vetor\ tempo = tempo \\ tempo = td + tempo \end{bmatrix} \tag{32}$$

Se,

$$T(t_1) > D \tag{33}$$

Fim do laço

Onde:

t_0 - Tempo inicial (min);

t_d - Tempo de dicretização dos dados (min);

T (t) - tempo no instante t (min);

D - Duração total da chuva (min).

– Algoritmo 2: Determinação da precipitação excedente (hietogramas)

Início do laço

Para,

$$T(t) = D(t) \tag{34}$$

$$\left[I(t) = \left\{ \frac{K\ .\ T^n}{(D(t) + Do)^m} \right\} .60 \right] \tag{35}$$

Fim do laço

Onde:

I(t) - intensidade no instante t (mm/h);

T - Tempo de retorno (anos);

D - Duração da chuva no instante t (min);

K, n, m, Do, m - variáveis que dependem da localidade.

Se não,

$$d' = \frac{D}{60} \tag{36}$$

$$Se\ d' < 8:\ i = 1 \tag{37}$$

$$Se\ d' \geq 8:\ i = 7 \tag{38}$$

Tabela 6 – Valores de alfa e beta segundo Pfafstetter (1982).

n	t (h)	α	β
1	0.083	0.108	beta1
2	0.25	0.122	beta2
3	0.5	0.138	beta3
4	1	0.156	beta4
5	2	0.166	beta4
6	4	0.174	beta4
7	8	0.176	beta4
8	14	0.174	beta4
9	24	0.17	beta4
10	48	0.166	beta4
11	72	0.16	beta4
12	96	0.156	beta4
13	144	0.152	beta4

Fonte: Tucci (2005).

Início do laço

$$j = i + 1 \tag{39}$$

Se,

$$t(i) \leq d' \leq t(j) \tag{40}$$

$$\begin{bmatrix} a_{\propto} = \dfrac{t(j) * \propto (i) - t(i) * \propto (j)}{t(j) - t(i)} \\ b_{\propto} = \dfrac{a(i) - a_{\propto}}{t(i)} \\ a_{\beta} = \dfrac{t(j) * \beta(i) - t(i) * \beta(j)}{t(j) - t(i)} \\ b_{\beta} = \dfrac{\beta(i) - a_{\beta}}{t(i)} \\ \alpha = b_{\alpha} * d' + a_{\propto} \\ \beta = b_{\beta} * d' + a_{\beta} \end{bmatrix} \tag{41}$$

Fim do laço

$$j = i + 1 \tag{42}$$

$$I(t) = \frac{T^{\left(\propto + \frac{\beta}{T^{\frac{1}{4}}}\right)}}{D(t)} \left\{ \frac{a.D(t)}{60} + \left[\mathrm{b.log}\left(1 + \frac{c.D(t)}{60}\right) \right] \right\} \tag{43}$$

Onde:

I(t) - intensidade de precipitação no instante t (mm/min);

T é o tempo de retorno (anos);

D(t) é a duração da chuva no instante t (min);

a, b, c, beta 1, beta 2, beta 3 e beta 4 - variáveis que dependem do tempo e localidade.

$$[\mathrm{I\ proj.(t)} = \mathrm{I(t)} - (\mathrm{I(t)} * \mathrm{K\ (t)})/100)] \tag{44}$$

Onde:

I proj. - Intensidade de projeto com redução no instante t (mm/h);

I(t) - intensidade de precipitação de Porto ou Pfafestetter (mm/h);

K - Fator de redução para um tempo (t) de duração (%).

Para,

$$T(t) = Iproj(t) \tag{45}$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{46}$$

Tem-se,

$$\begin{bmatrix} Vol.precp.(t) = \left\{\dfrac{T(t)\ .\ I\ proj.(t)}{60}\right\} \\ Inc.(t) = Vol.precp.(t) - Vol.precp.(t-1) \\ Precp.acum.(t) = Inc.(t) - Inc.(t+1) \end{bmatrix} \tag{47}$$

Se,

$$Precp.acum.(t) \geq (S.0{,}2) \tag{48}$$

Então,

$$Precp.exc.acum.(t) = \frac{Precp.acum.(t) - (S.0{,}2)^2}{Precp.acum.(t) - (S.0{,}8)} \tag{49}$$

Se não,

$$Precp.exc.acum.(t) = 0 \tag{50}$$

Se,

$$Precp.acum.(t) > 0 \tag{51}$$

$$[Precp.exc.faxia(t) = Precp.exc.acum.(t) - Precp.exc.acum(t-1)] \tag{52}$$

Senão,

$$Precp.exc.faixa\ (t) = 0 \tag{53}$$

Se,

$$T(t) \leq D \tag{54}$$

Fim do laço

Onde:
T(t) - tempo no instante t (min);
I(t) - intensidade da precipitação no tempo t (mm/h);
I proj.(t) - intensidade da precipitação no tempo t, com redução (mm/h);
K(t) - fator de redução no tempo t (%);
Vol.precp. (t) - volume precipitado no tempo t (mm);
Inc.(t) - incremento do volume precipitado no tempo t (mm);
Precp.acum. (t) - volume precipitado acumulado no tempo t (mm);
Precp.exc.acum.(t) - volume de escoamento superficial direto acumulado no tempo t (mm);
Precp.exc.faixa (t) - volume de escoamento superficial direto por faixa no tempo t (mm);
D - Duração total da chuva (min).

– Algoritmo 3: Determinação das vazões de projeto (hidrogramas)

Para,

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{55}$$

$$Ia = 0{,}2\ .S \tag{56}$$

$$\frac{tR}{2} = \frac{td}{2} \tag{57}$$

$$tp = (0{,}6\,.\,tc) + \frac{td}{2} \tag{58}$$

$$tb = 2{,}67\,.\,tp\ (t) \tag{59}$$

$$Qu,p = \frac{2{,}08\,.\,Ad}{(\frac{tp(t)}{60})} \tag{60}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta R\ (t) = Precp.Exc.Acum.(t) - Precp.Exc.Acum\ (t-1) \\ nº\ Blocos = nº\ td \\ t_{p-bloco(t)} = T(t) + tp \\ t_{b-bloco(t)} = T(t) + tb \\ Q_{u,p-bloco(t)} = \frac{Qu,p\,.\Delta R\ (t)}{10} \end{bmatrix} \tag{61}$$

Então, para Bloco = 1,

Início do laço 1

$$t_{início} = td \tag{62}$$

Início do laço 2

Se,

$$t_{início-bloco} \leq tp\ bloco\ (t) \tag{63}$$

Então,

$$t_{início-bloco} = t_{início} + td \tag{64}$$

Fim do laço 2

Início do laço 3

Se,

$$t_{p-bloco} \geq t_{início-bloco} = t_{início} + td/2 \quad (65)$$

$$t_{início-bloco} = t_{início} + td \quad (66)$$

Se não,

$$t_{início-bloco} = t_{início} \quad (67)$$

Fim do laço 3

Para,

$$P_{b-bloco} = P_{b-bloco(t)} \quad (68)$$

$$Q_{u,p-bloco} = Q_{u,p-bloco(t)} \quad (69)$$

$$P_{cm-bloco} = \frac{\Delta R\ (t)}{10} \quad (70)$$

$$C1 = \frac{Qu,p}{tp} \quad (71)$$

$$C2 = \frac{Qu,p}{(tb - tp)} \quad (72)$$

Se,

$$T(t) < t_{início-bloco} \quad (73)$$

Então,

$$Q_{bloco\,(t)} = 0 \tag{74}$$

Se,

$$t_{início-bloco} < T(t) \leq t_{p-bloco} \tag{75}$$

Então,

$$Q_{bloco\,(t)} = C1.P_{cm-bloco}.(T(t) - t_{início-bloco}) \tag{76}$$

Se,

$$t_{p-bloco} < tempo(t) \leq t_{b-bloco} \tag{77}$$

Então,

$$t_{p-bloco} < tempo(t) \leq t_{b-bloco} \tag{78}$$

Se,

$$Q_{bloco\,(t)} = Q_{u,p-bloco} - C2.P_{cm-bloco}.\left(T(t) - t_{p-bloco}\right) \tag{79}$$

Se,

$$T(t) < t_{b-bloco} \tag{80}$$

Então,

$$Q_{bloco\,(t)} = 0 \tag{81}$$

$$\begin{bmatrix} Bloco\ 1 & Bloco\ 2 & Bloco\ n \\ Q1\ (t_0) & Q2\ (t_0) & Qn\ (t_0) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ Q1\ (t_n) & Q2\ (t_n) & Qn\ (t_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q\ proj._{(m^3.S^{-1})} \\ \sum Q1\ (t_0), Q2\ (t_0) \dots Qn\ (t_0) \\ \vdots \\ \sum Q1\ (t_n), Q2\ (n) \dots Qn\ (t_n) \end{bmatrix} \quad (82)$$

Fim do laço 1

Onde:

S - capacidade máxima de retenção de água do solo após o início do escoamento perda potencial máxima ao início da tormenta (mm);

Ia - perda inicial (mm);

tp - tempo de pico (min);

tb - tempo de base (min);

Q u,p - descarga de pico ($m^3/(s.cm)$);

Ad - área de drenagem da sub-bacia (Km^2);

ΔR - variação de volume do incremento da precipitação excedente acumulada (mm);

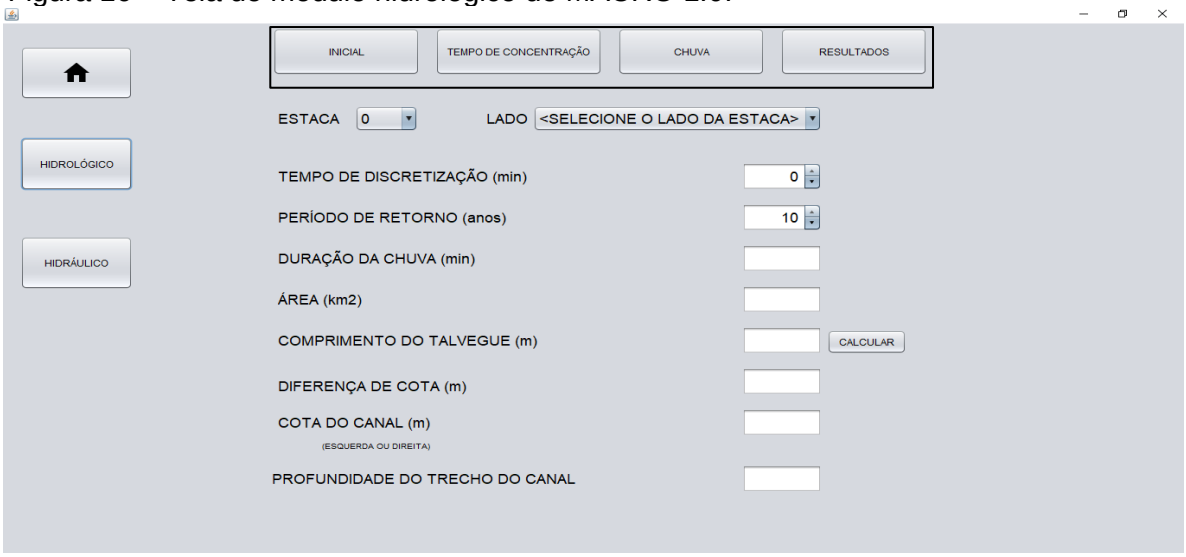
Bloco - sequência numérica, de nº inteiras, correspondentes aos intervalos de tempo discretizados;

$t_{início}$ - corresponde ao primeiro intervalo de tempo discretizado;

Q proj - vazão de projeto (m^3/s).

No módulo hidrológico é necessário seguir a ordem de fluxo das abas, clicando sequencialmente em INICIAL > TEMPO DE CONCENTRAÇÃO > CHUVA > RESULTADOS (Figura 16).

Figura 16 – Tela do módulo hidrológico de MACRO 1.0.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

d) Aba Inicial

Clicando no botão “INICIAL”, será necessário inserir, em ordem, as seguintes informações:

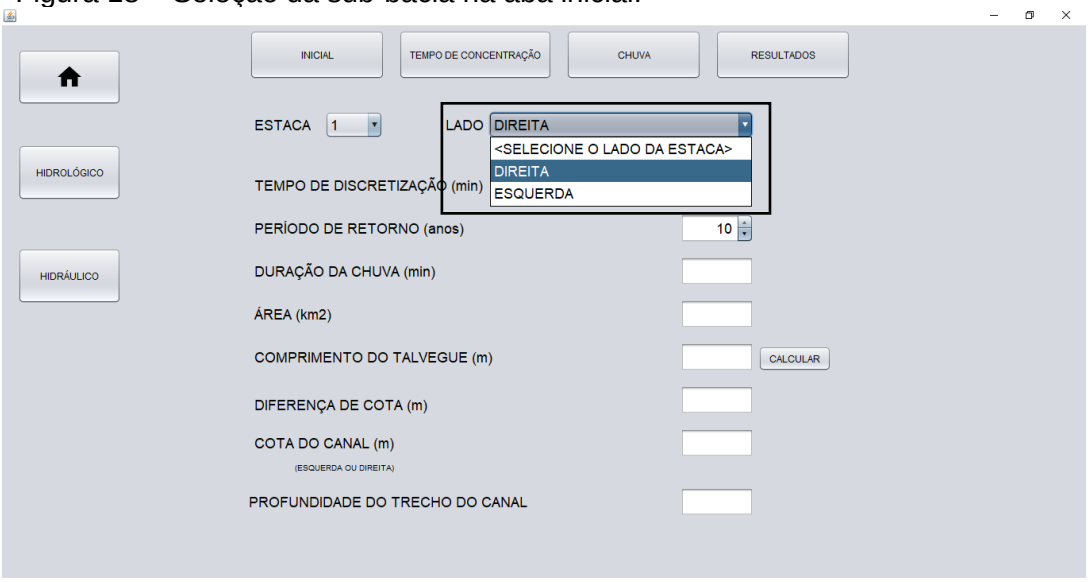
Estaca: na caixa de seleção o programa exibirá todas as estacas inseridas no diagrama hidrológico, selecione uma das estacas para inserção de dados (Figura 17). Em seguida, os demais dados devem ser inseridos nos próximos itens e passos do módulo “HIDROLÓGICO”. Esse processo deve ser repetido para todas as estacas presentes da caixa de seleção.

Figura 17 – Seleção de estaca na aba inicial.

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Lado: nessa caixa de seleção o usuário seleciona uma das duas sub-bacias ligada à estaca anteriormente selecionada. Para tanto, se deve escolher entre lado esquerdo ou direto, de acordo com a localização da sub-bacia de interesse (Figura 18). À medida que o lado da sub-bacia é selecionado, todas as informações das abas posteriores serão correspondentes à sub-bacia em questão (Figura 19);

Figura 18 – Seleção da sub-bacia na aba inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Tempo de Discretização (min): permite selecionar o intervalo de tempo em que os dados de saída serão discretizados. É recomendável que o intervalo seja na ordem de 1/10 do tempo médio de concentração da sub-bacia. Deve-se fixar o mesmo tempo de discretização para todas as sub-bacias de projeto;

Período de retorno (anos): permite selecionar o período de retorno da chuva de projeto, em anos. O usuário tem a opção de escolher de 10 a 100 anos;

Duração da chuva (min): permite inserir a duração da chuva de projeto;

Área (Km²): permite inserir a área da sub-bacia selecionada;

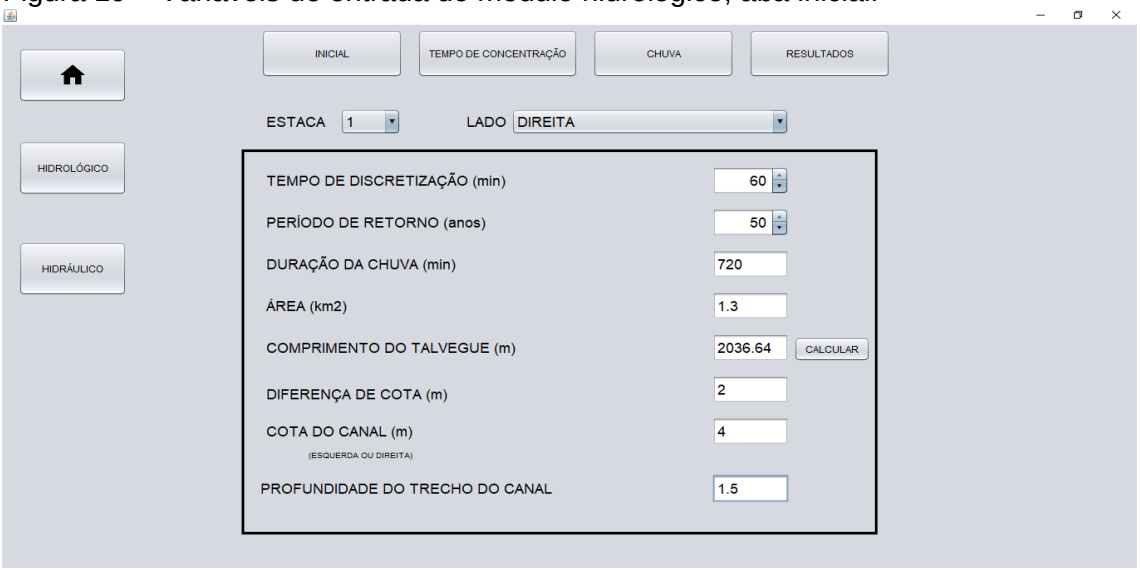
Comprimento do Talvegue (m): clicando em “CALCULAR”, o programa estimará o comprimento do talvegue da sub-bacia selecionada;

Diferença de cota (m): permite inserir a diferença de cota, entre montante e jusante, do talvegue da sub-bacia selecionada;

Cota do canal (m): permite inserir a cota da margem, esquerda ou direita, do canal principal, para a estaca selecionada;

Profundidade do trecho do canal (m): permite inserir a profundidade média do trecho do canal, localizado entre a estaca selecionada e a imediatamente a montante desta.

Figura 19 – Variáveis de entrada do módulo hidrológico, aba inicial.

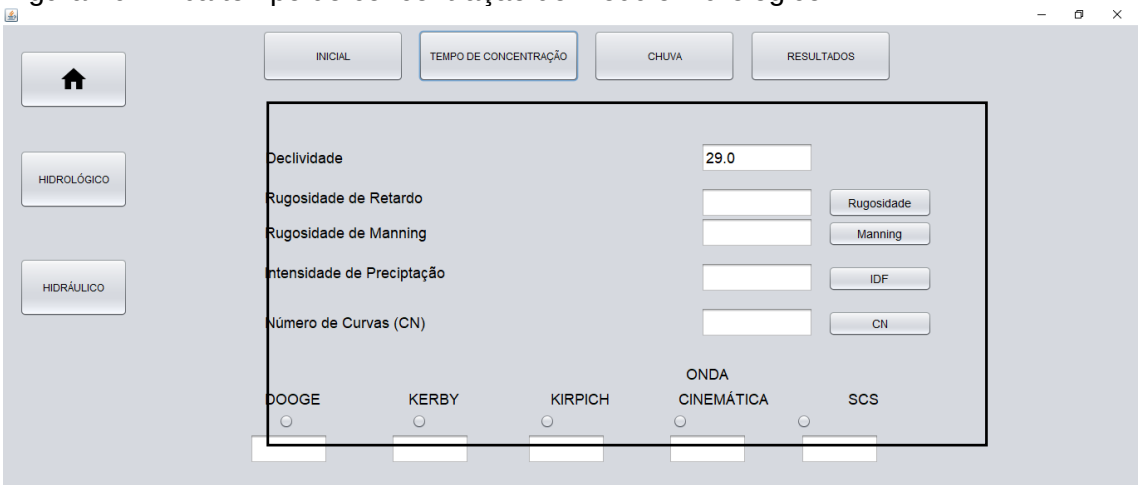


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

e) Aba tempo de concentração

A próxima aba é a “TEMPO DE CONCENTRAÇÃO”. Nela é necessário fazer as seguintes escolhas (Figura 20):

Figura 20 – Aba tempo de concentração do módulo hidrológico.

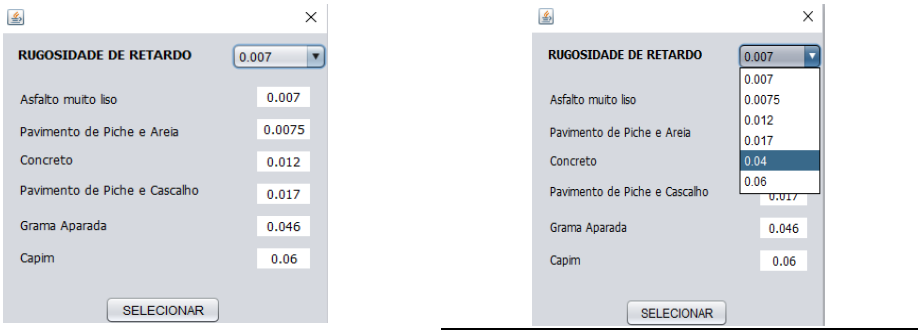


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Declividade (m/km): o programa estimará a declividade do talvegue da sub-bacia selecionada;

Rugosidade de retardo: caso o usuário selecione a fórmula de Kerby para cálculo do tempo de concentração, deve-se inserir a rugosidade de retardo clicando no botão “RUGOSIDADE”, o programa abrirá uma janela com algumas opções de coeficientes de retardo. Na caixa de seleção deve ser selecionado o valor correspondente ao seu tipo de cobertura majoritária do solo e clicar em “SELECIONAR” (Figura 21).

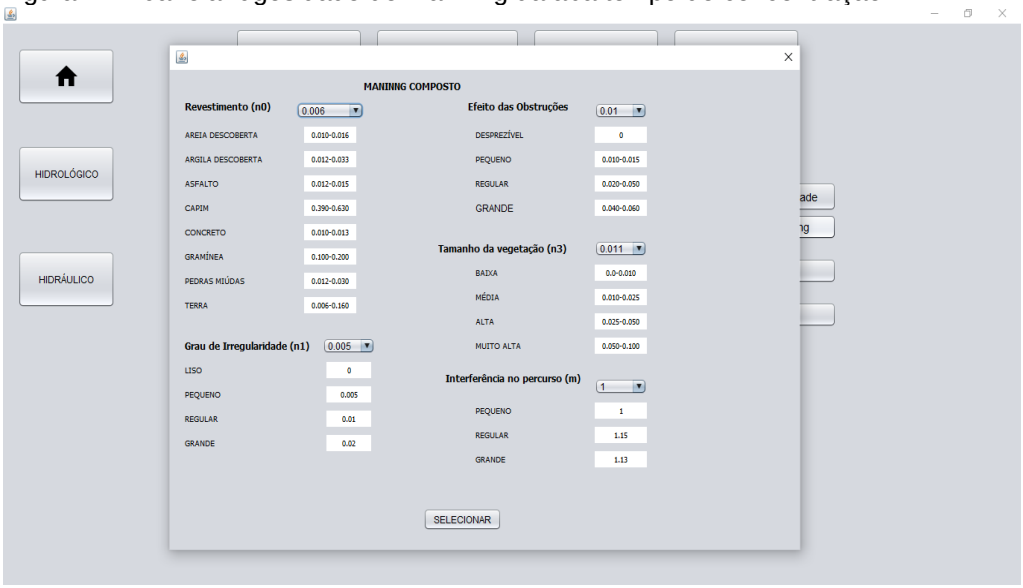
Figura 21 – Janela rugosidade de retardo da aba tempo de concentração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Rugosidade de Manning: caso o usuário selecione a fórmula da onda cinemática para cálculo do tempo de concentração, deve-se inserir a rugosidade de Manning clicando no botão “Manning”, o programa abrirá uma janela com algumas opções para determinar o coeficiente de Manning composto. O usuário deve selecionar valores, nas caixas de seleção, para cada uma das variáveis, n0, n1, n2, n3 e m e, em seguida, clicar no botão “SELECIONAR” (Figura 22);

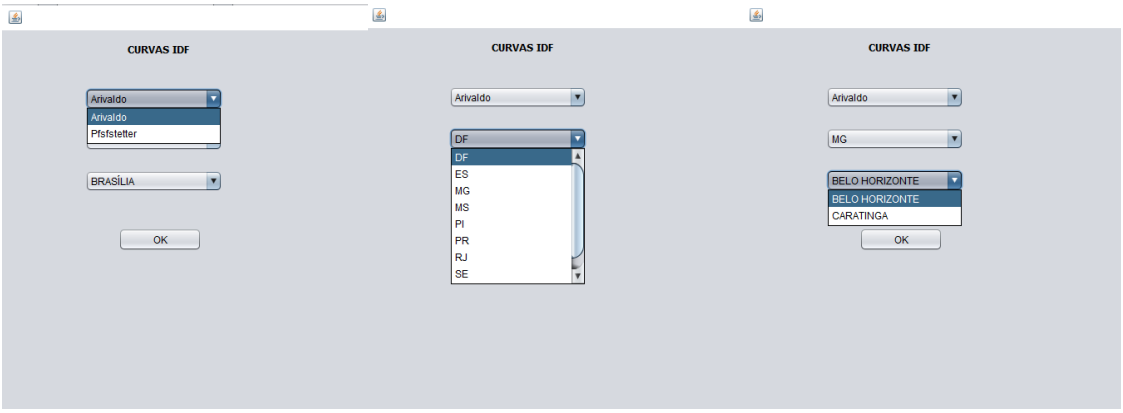
Figura 22 – Janela rugosidade de Manning da aba tempo de concentração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Intensidade de precipitação: caso o usuário selecione a fórmula da onda cinemática para cálculo do tempo de concentração, deve-se inserir a intensidade de precipitação clicando no botão “IDF”; é aberta a janela com algumas opções de curvas IDF para cidades do território nacional (Figura 23). Primeiro, é preciso escolher um dos dois diretórios de importação de curvas IDF (Arisvaldo ou Pfafstetter), em seguida seleciona-se o estado e a cidade do projeto, clicando em ok;

Figura 23 – Janela do diretório curvas IDF.

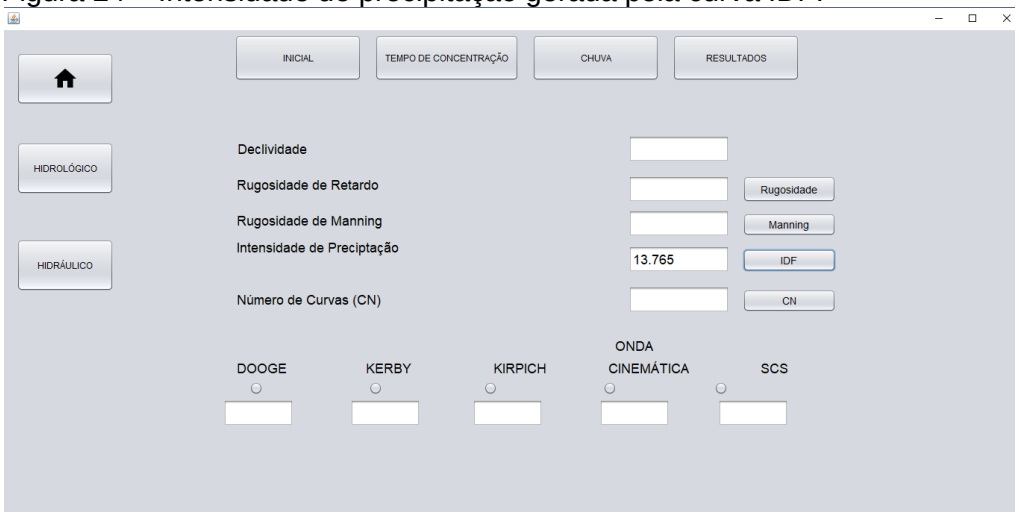


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Diretório de importação de curva IDF: Os diretórios de curvas IDF foram construídos para importar, do banco de dados IDF, as variáveis requeridas para cálculo das curvas IDF pelas equações, Equação genérica (PORTO *et al*., 2005) e Pfafstetter (1982). No banco de dados das variáveis de Arisvaldo (ABC6, 2019) estão

armazenados os dados das variáveis K, n, Do e m, de 67 municípios distribuídos em nove estados brasileiros. Já no banco de dados das variáveis de Pfafstetter (1982) estão armazenados dados das variáveis a, b, c, β1, β2, β3 e β4, de 98 municípios brasileiros. Essas duas tabelas de atributos são apresentadas nos Apêndices da tese. Após a seleção, o modelo fornecerá a intensidade de precipitação em mm/h e o gráfico de distribuição temporal da chuva de projeto (Figura 24 e Figura 27).

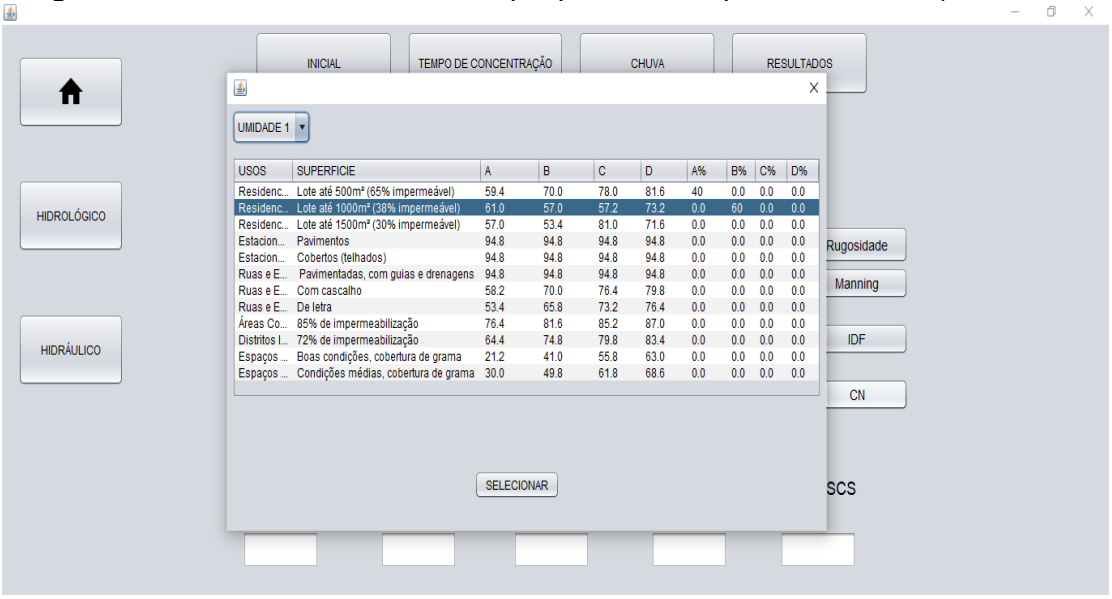
Figura 24 – Intensidade de precipitação gerada pela curva IDF.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Número de curva (CN): caso o usuário selecione a fórmula do SCS para cálculo do tempo de concentração, deve-se inserir o valor de CN clicando no botão “CN”, abre-se uma janela para determinação do CN. No primeiro momento é necessário determinar, na caixa de seleção, a condição de umidade do solo da sub-bacia (Umidade I, II ou III). Normalmente escolhe-se umidade II (condição intermediária). A seguir, é possível entrar com as porcentagens de área correspondentes aos grupos hidrológicos do solo da sub-bacia (A, B, C ou D) e clicar em selecionar (Figura 25). A soma das porcentagens deve ser de 100% da área.

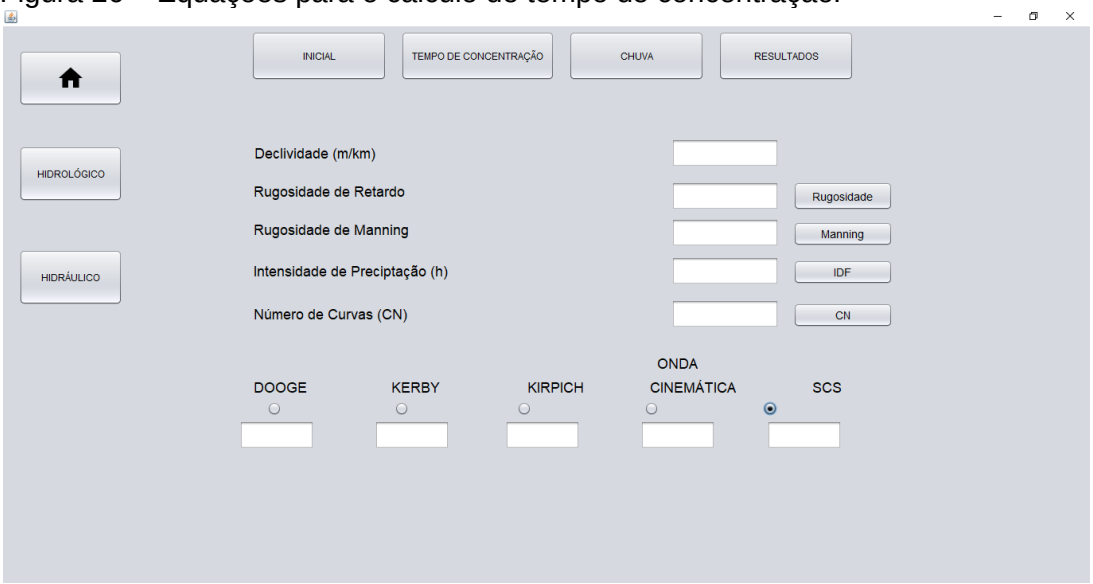
Figura 25 – Janela número de curva (CN) da aba tempo de concentração.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Equações do tempo de concentração: o programa estima o tempo de concentração da sub-bacia por meio de fórmulas em default, para tanto, há uma relação de cinco equações disponíveis (Figura 26). A equação selecionada por último será utilizada no cálculo pelo modelo, devendo estar com o ponto azul da seleção. No exemplo da Figura 26, a equação que será utilizada pelo modelo é a SCS.

Figura 26 – Equações para o cálculo de tempo de concentração.

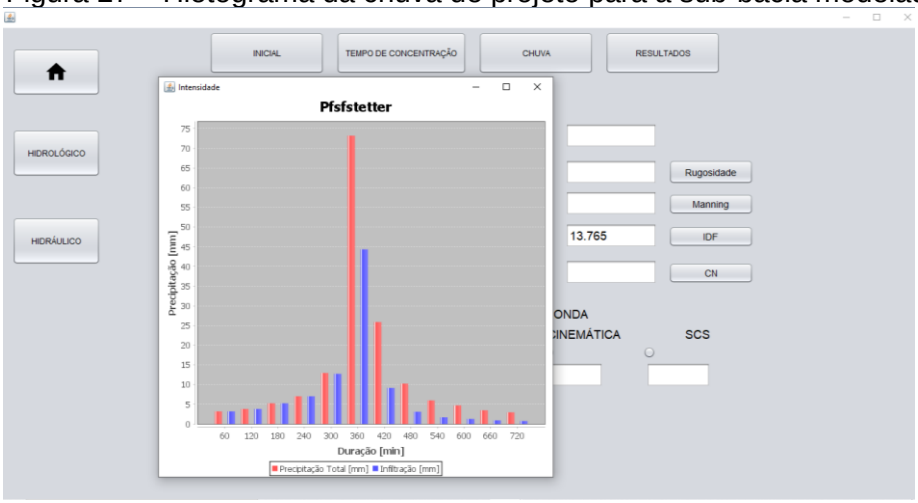


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

f) Aba Chuva

Ao clicar no botão correspondente à aba “CHUVA”, é possível visualizar, em gráfico, a distribuição temporal da chuva de projeto, conforme hietograma apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Hietograma da chuva de projeto para a sub-bacia modelada.

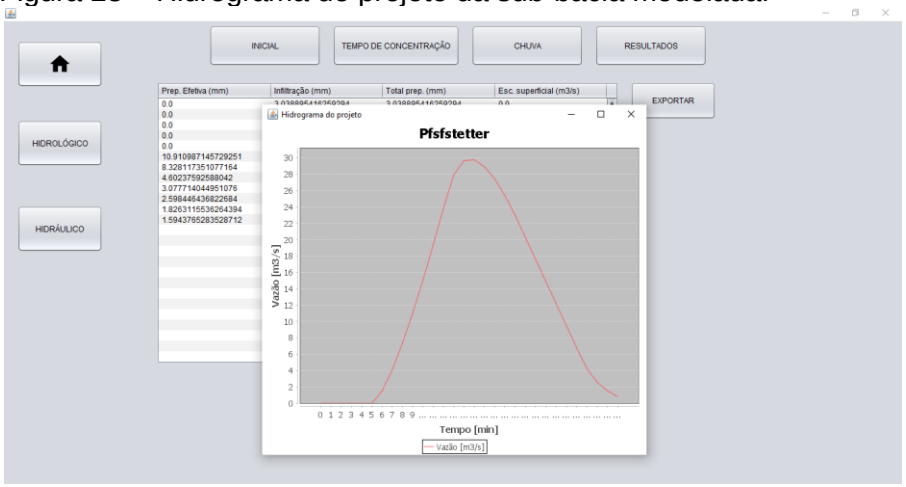


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

g) Aba Resultados

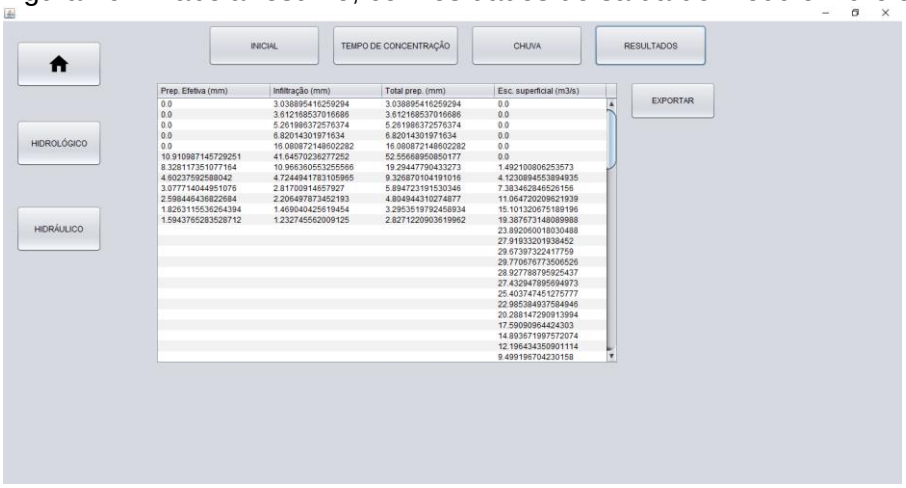
Clicando no botão “RESULTADOS”, o usuário visualizará uma tela com o gráfico do hidrograma de projeto (vazões) (Figura 28). Minimizando esse gráfico, é possível observar a tabela com o resumo dos dados de saída do módulo hidrológico, são eles: precipitação efetiva (mm), infiltração (mm), precipitação total (mm) e escoamento superficial (m³/s) (Figura 29).

Figura 28 – Hidrograma de projeto da sub-bacia modelada.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 29 – Tabela resumo, com os dados de saída do módulo hidrológico.



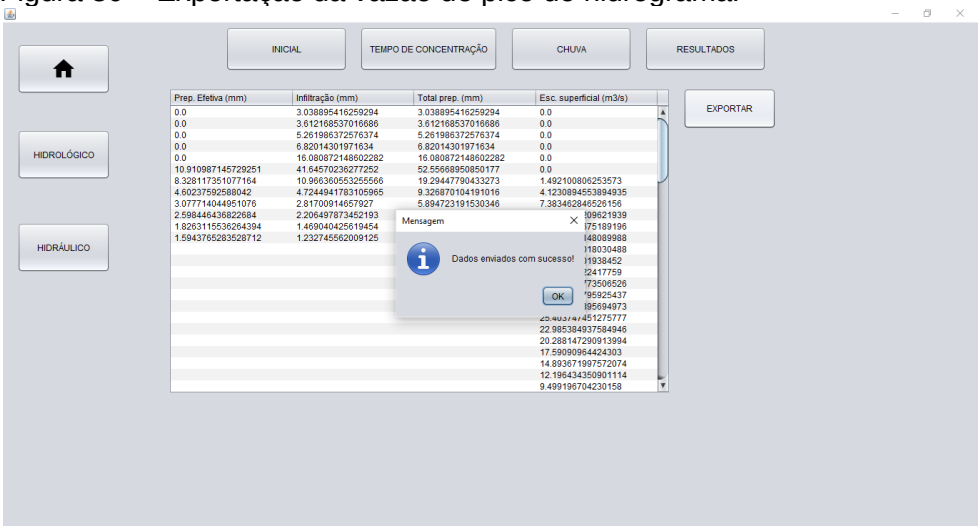
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os resultados da modelagem hidrológica, apresentados no gráfico e na tabela acima, correspondem a apenas uma das sub-bacias de projeto, a selecionada anteriormente na aba “INICIAL”.

Para finalizar a rodada do módulo hidrológico, o usuário deve clicar no botão “Exportar”. Com essa ação, os dados do hidrograma de projeto da sub-bacia em questão são enviados para o módulo “HIDRÁULICO”, bem como para a tabela “Vazões de Pico (m³/s)” do “MENU INICIAR”.

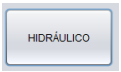
A mensagem dados enviados com sucesso (Figura 30) confirma o envio dos resultados da modelagem hidrológica. Clicando em “OK”, o programa retornará para a primeira aba do módulo hidrológico, aba “INICIAL”, para a inserção dos dados da próxima sub-bacia do diagrama.

Figura 30 – Exportação da vazão de pico do hidrograma.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

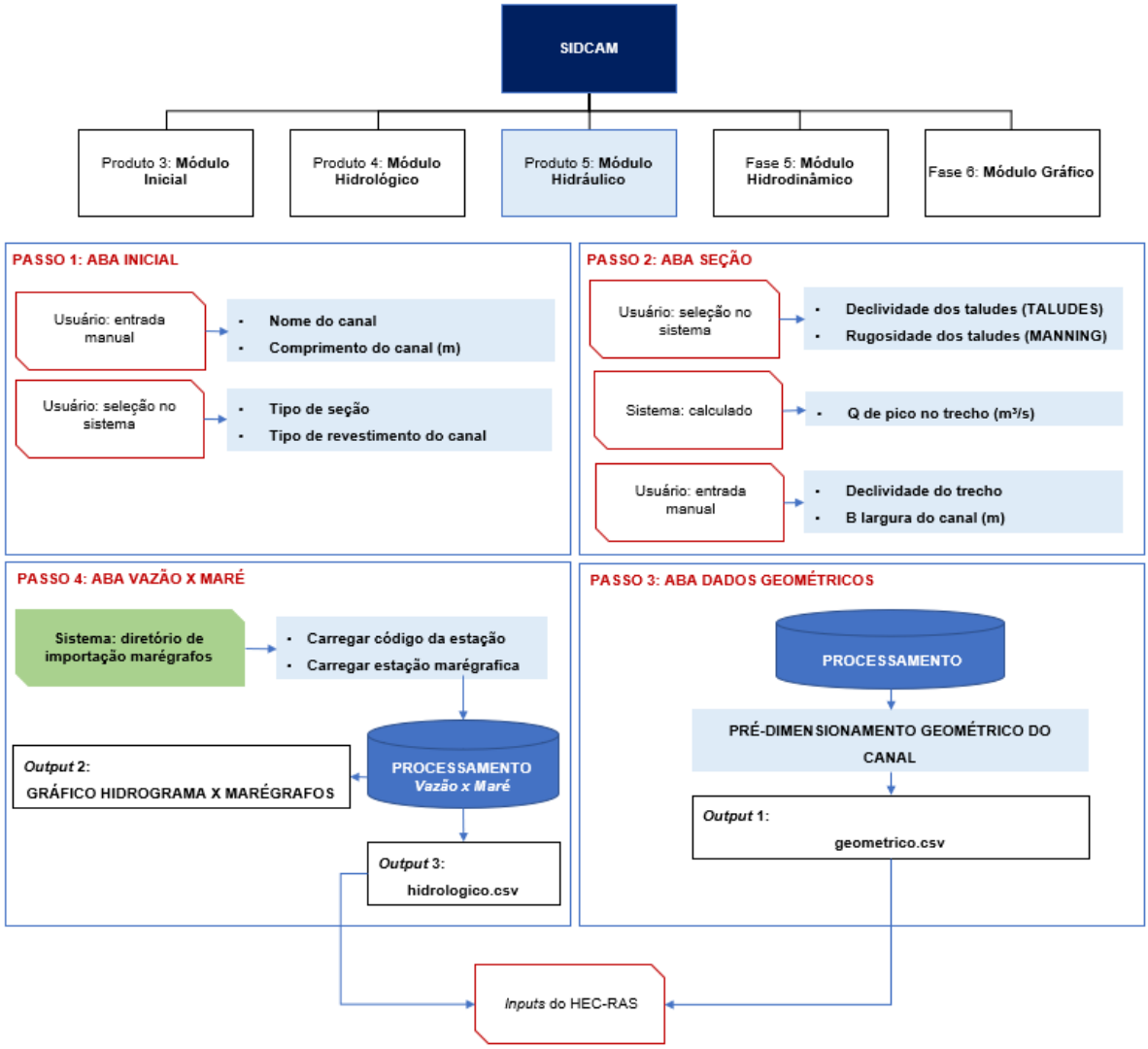
4.1.3 Produto 5: Módulo Hidráulico

O módulo hidráulico é representado pelo ícone “HIDRÁULICO” 

da barra de módulos do MACRO 1.0. Nesse módulo é possível acessar as abas inicial, seção, dados geométricos e vazão x maré.

Nesse terceiro módulo do SIDCAM são realizados os cálculos de dimensionamento do canal de projeto, tendo como base os hidrogramas de projeto gerado no módulo “HIDROLÓGICO”. Na Figura 31, são apresentadas as etapas de modelagem hidráulica do SIDCAM.

Figura 31 – Etapas de modelagem do módulo hidráulico do SIDCAM.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Para representar os processos envolvidos na modelagem hidráulica do canal (Figura 31Figura 15), como a dimensionamento geométrico do canal, foi modelado algoritmo em Java com base no método Scrum, auxiliado pelo IDE Apache Netbeans e componentes do próprio framework do Java, esse algoritmo é detalhado a seguir:

Início do laço

$$h = 0{,}001 \tag{83}$$

Se,

$$Am.Rh^{1/3} \leq \frac{n.Q}{\sqrt{S}} \tag{84}$$

$$[Prof.Esc.(h) = h] \tag{85}$$

Se não,

Sair do laço (Break)

$$h = 7{,}000 \tag{86}$$

$$\begin{bmatrix} Am = \{b + (m * h)\} * h\ ;\ Pm = b + 2 * hh\sqrt{1 + h^2)}\ \ (trapezoidal) \\ Am = m * h^2;\ Pm = 2 * h\sqrt{1 + m^2)}\ \ (triângular) \\ Am = h * B\ ;\ Pm = B + 2 * h\quad (retângular) \\ Qproj = \binom{1}{n} *\ A_m * R_h^{\frac{2}{3}} * S^{1/2} \end{bmatrix} \tag{87}$$

Então,

$$Q_{pico} \leq Q_{proj.} \tag{88}$$

Fim de laço

Onde:

h - profundidade da lâmina d'água (m);

Am - área molhada da seção transversal (m²);

Rh - raio hidráulico da seção transversal (m);

n - o coeficiente de *Manning Strickler*;

Q - vazão escoada no trecho do canal (m³/s);

S - declividade média do trecho (m/m).

A área de trabalho do módulo “HIDRÁULICO” será subdividida em 4 abas, seguindo a sequência dos botões, INICIAL > SEÇÃO > DADOS GEOMÉTRICOS > VAZÃO X MARÉ, conforme Figura 32:

h) Aba inicial

Clicando no botão “INICIAL”, o usuário deve inserir as seguintes informações (Figura 32):

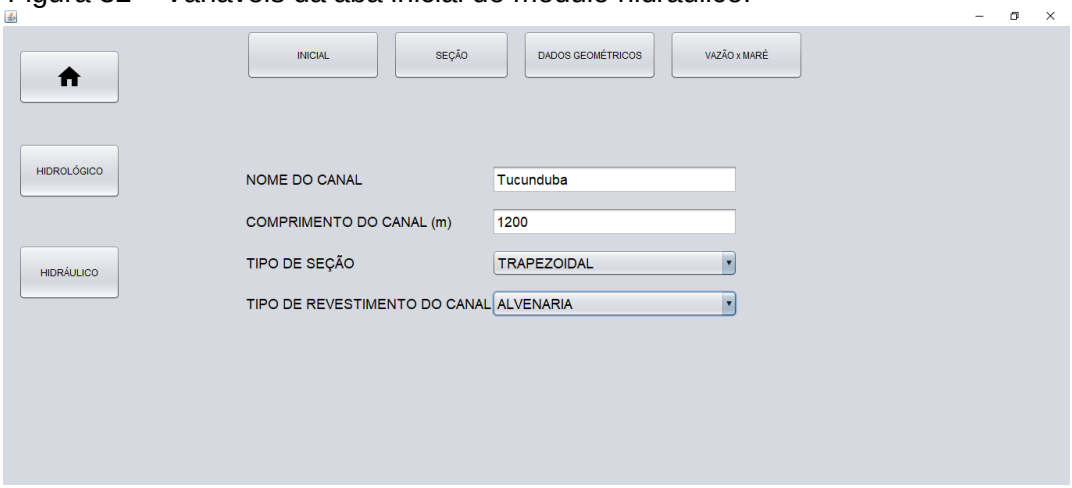
Nome do canal: inserir um nome para o canal de projeto;

Comprimento do canal (m): permite entrar com a extensão total do canal principal;

Tipo de seção: permite selecionar entre trapezoidal, triangular ou retangular, para o tipo de seção transversal do canal projetado;

Tipo de revestimento do canal: permite selecionar um tipo de revestimento do canal projetado.

Figura 32 – Variáveis da aba inicial do módulo hidráulico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

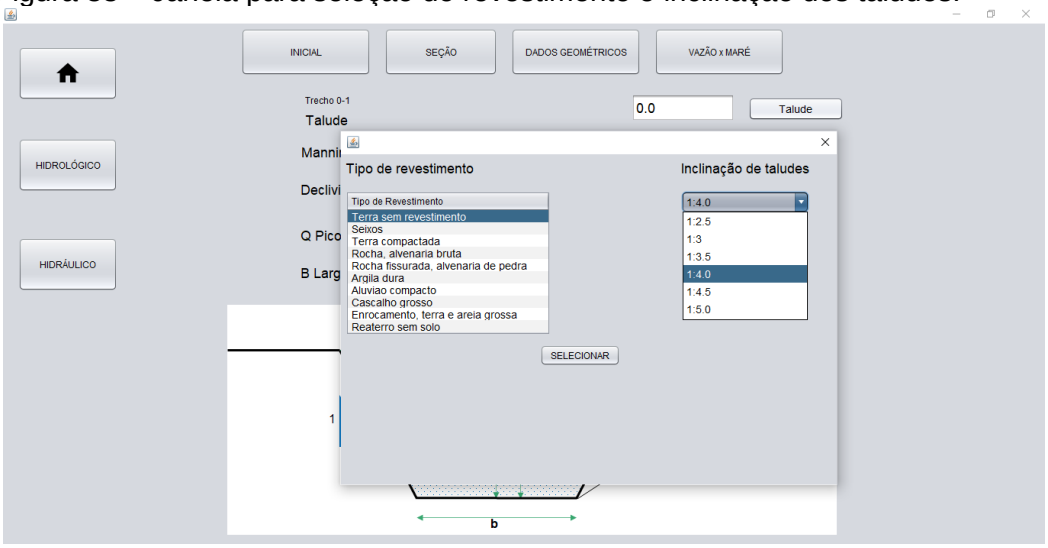
i) Aba seção

Na aba “SEÇÃO”, o usuário encontrará as seguintes informações:

Trecho: no canto superior esquerdo da tela é possível identificar o trecho do canal principal que está sendo modelado. O trecho muda imediatamente para o mais a montante, à medida que finaliza a rodada de passos do módulo hidráulico.

Talude: clicando no botão “TALUDE”, o programa abrirá uma janela com algumas opções de tipos de revestimento dos taludes e suas respectivas inclinações (Figura 33), após selecionar a inclinação do talude segundo o tipo de revestimento do projeto, deve-se clicar em “SELECIONAR”.

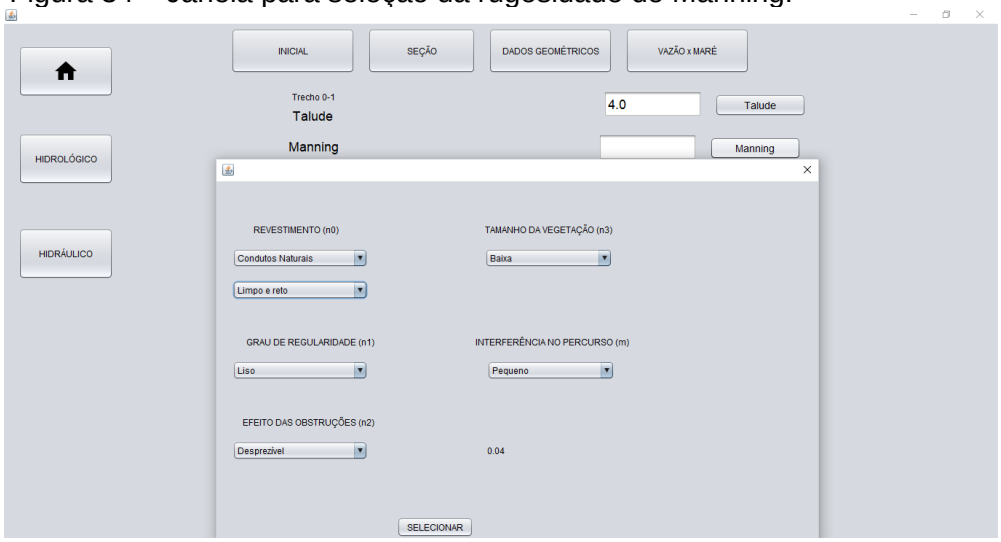
Figura 33 – Janela para seleção do revestimento e inclinação dos taludes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Manning: clicando no botão “MANNING”, o programa abrirá uma janela para composição do Manning composto para o canal principal (Figura 34), o usuário deve selecionar opções em todas as caixas de seleção.

Figura 34 – Janela para seleção da rugosidade de Manning.



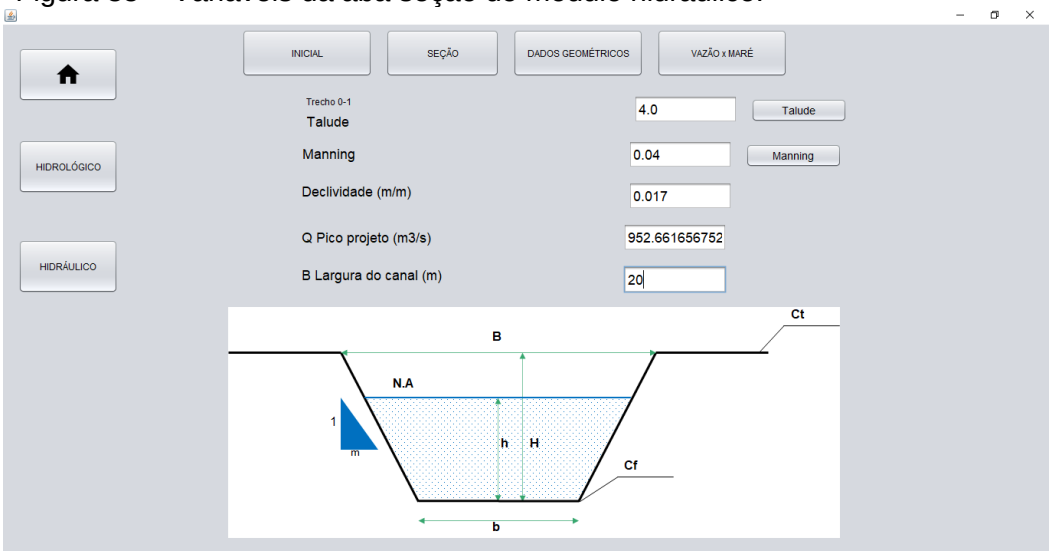
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Declividade (m/m): permite inserir a declividade média desejada para o canal de projeto;

Q de pico projeto (m³/s): o programa importará, do módulo "HIDROLÓGICO", a vazão de pico do trecho em questão;

B Largura do canal (m): permite entrar com a largura da superficial livre de água para o referido trecho.

Figura 35 – Variáveis da aba seção do módulo hidráulico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

j) Aba dados geométricos

A partir desta aba (Figura 36), o modelo iniciará a integração com os *softwares* externos, HEC-RAS e Google Earth. Clicando na aba "DADOS GEOMÉTRICOS", o usuário visualizará uma tabela, contendo as seguintes colunas:

River: o nome do rio principal, inserido na aba "Inicial";

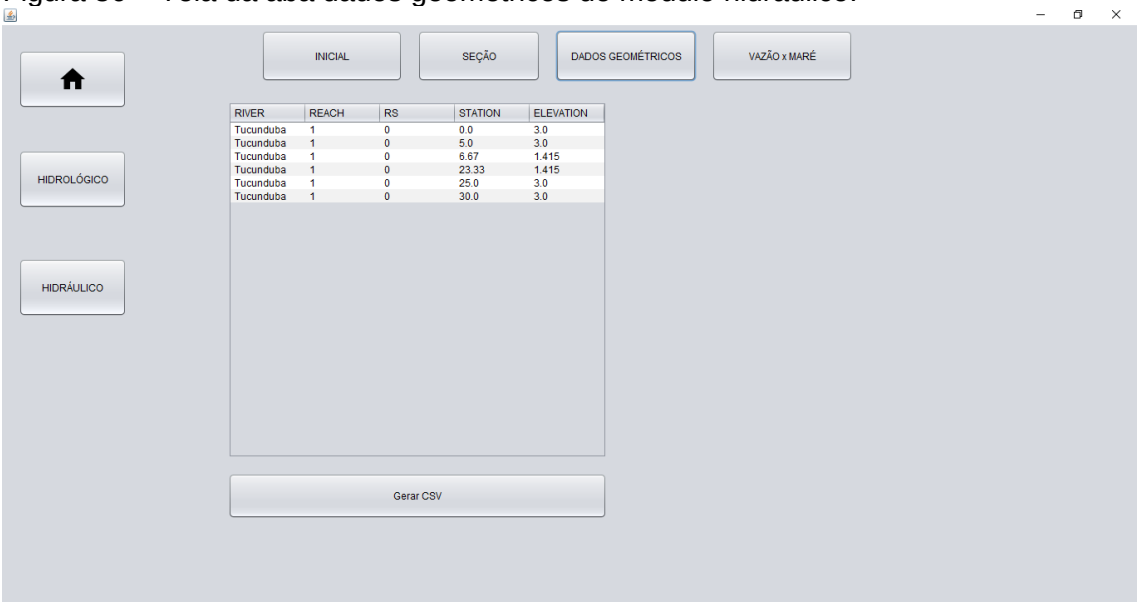
Reach: número 1, corresponde ao número de canais que serão modelados; da estaca inicial do trecho, no sentido jusante para montante;

RS: número da estaca inicial do trecho, no sentido jusante para montante;

Station (m): comprimento da seção transversal;

Elevation (m): elevação da "station" correspondente na seção transversal.

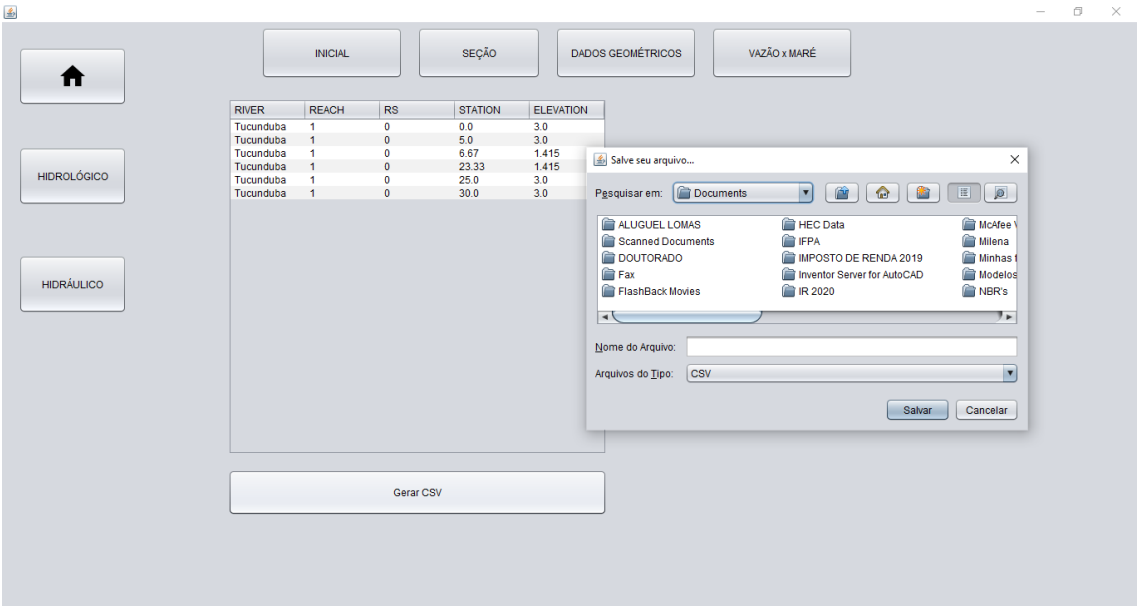
Figura 36 – Tela da aba dados geométricos do módulo hidráulico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

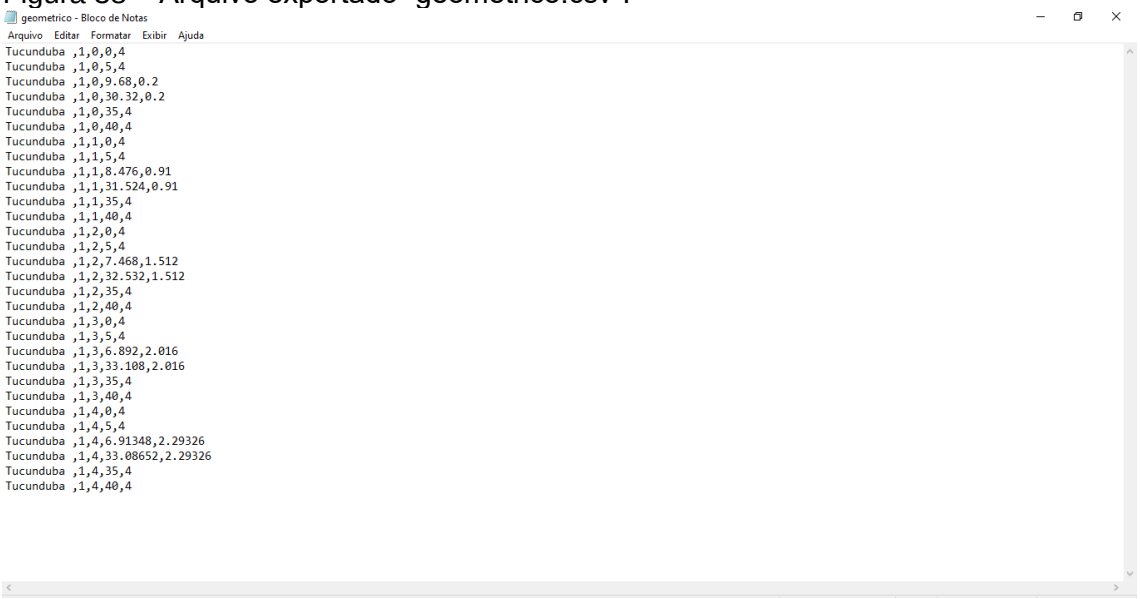
A tabela mostrada na Figura 36 foi concebida para gerar um arquivo de importação de dados geométricos do canal para o HEC-RAS. Logo, clicando no botão “GERAR CSV”, o programa abrirá uma janela para salvar os dados geométricos em um arquivo com extensão “*.csv” (Figura 37). Este será o primeiro arquivo fornecido pelo MACRO 1.0, para ser input de dados geométrico para a modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS (Figura 38).

Figura 37 – Exportação do arquivo “geométrico.csv”.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 38 – Arquivo exportado “geométrico.csv”.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

k) Aba Vazão x Maré

Nessa etapa, o programa irá gerar o segundo arquivo de extensão “*.csv” para ser importado ao HEC-RAS como *input* hidrológico.

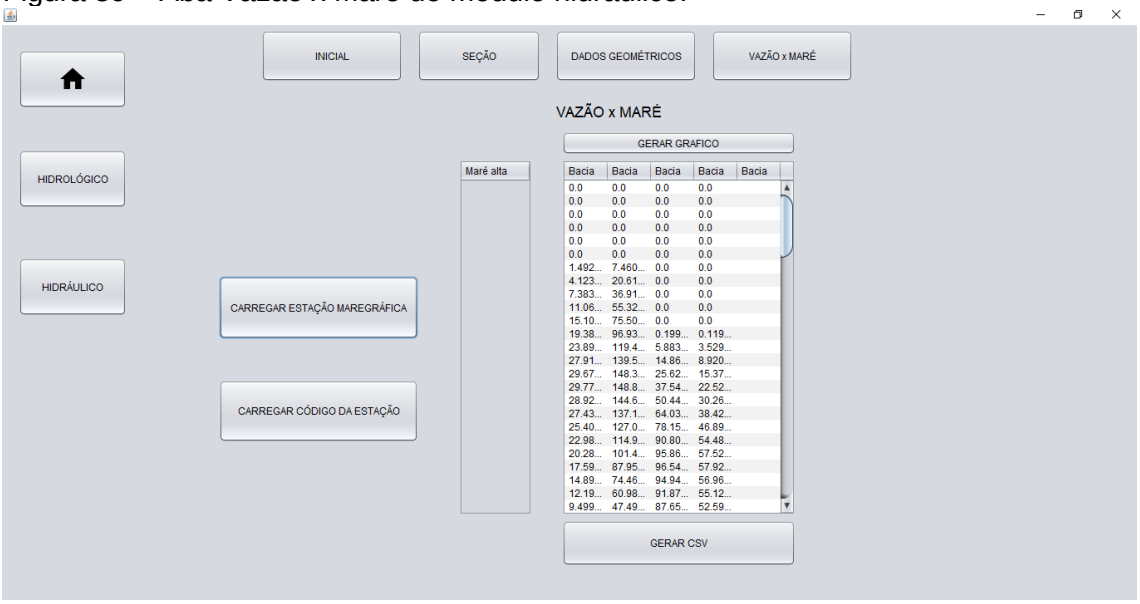
O segundo arquivo. “*.csv”, será composto por dois conjuntos de dados:

Série de hidrogramas de projeto (m³/s): sendo 1 correspondente à estaca da seção de cabeceira, e os demais das sub-bacias de contribuições laterais;

Série sintética de níveis máximos de maré (m): um marégrafo com 24 h de dados de níveis d’água, que será utilizado como condição de contorno da seção mais jusante (exutório) do canal.

Ao clicar na aba “VAZÃO X MARÉ”, é possível visualizar tabela com as séries de hidrogramas de projeto gerados para cada sub-bacia do diagrama de projeto. Os hidrogramas foram importados para essa aba ao final da modelagem de cada sub-bacia (Figura 39).

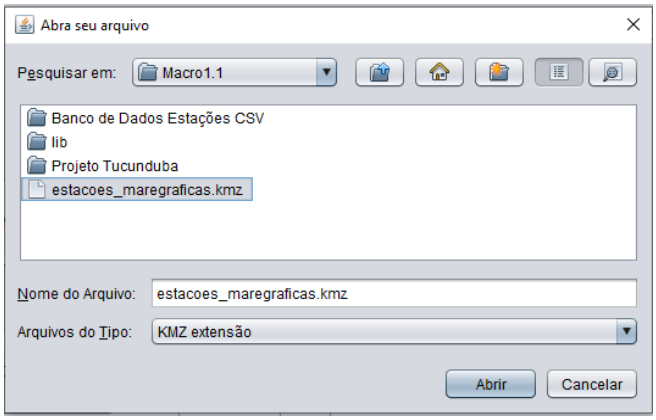
Figura 39 – Aba Vazão x Maré do módulo hidráulico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Carregar estação marégrafica: ao clicar no botão “CARREGAR ESTAÇÃO MAREGRÁFICA”, o programa abrirá o diretório de importação marégrafico (Figura 40), para o usuário selecionar e abrir o arquivo denominado estacões_maregraficas.kmz, localizado na pasta do modelo MACRO 1.0.

Figura 40 – Janela do diretório de importação marégrafico.

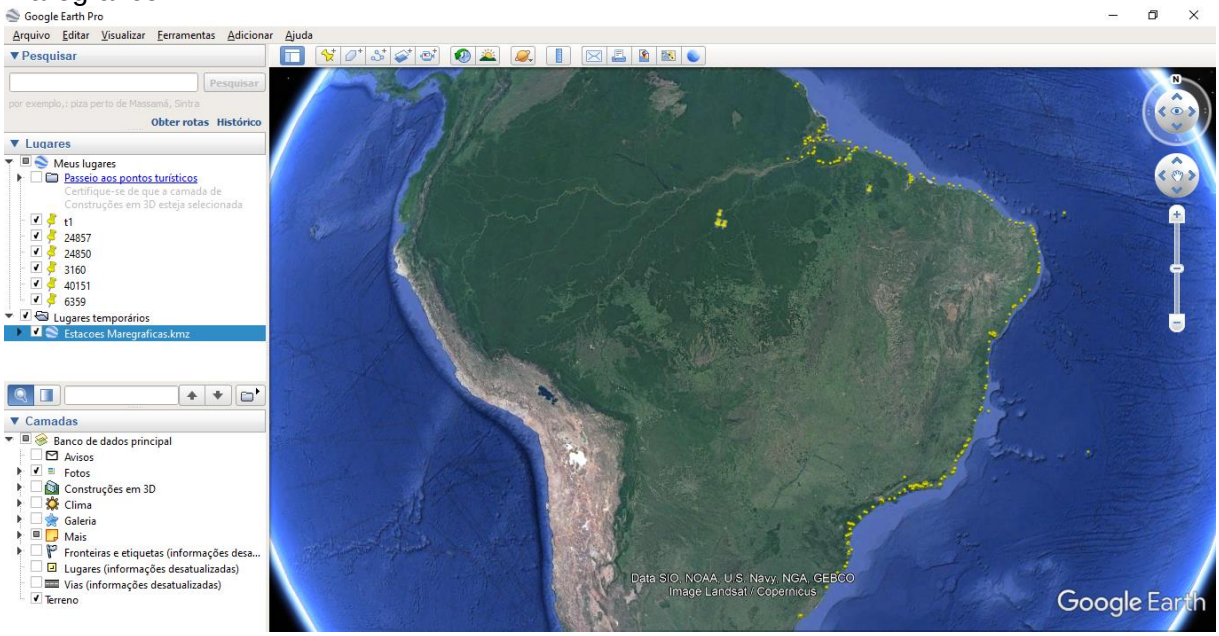


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

O programa direcionará para a interface do Google Earth, abrindo o arquivo da Figura 41. Esse arquivo é composto das estações maregráficas que podem ter suas séries históricas importadas para o MACRO 1.0. Navegando pelo arquivo “estacões_maregraficas.kmz”, o usuário deve selecionar a estação mais próxima/representativa ao exutório do seu projeto e, em seguida, anotar seu código. No exemplo da Figura 43, a estação selecionada foi Porto de Belém, código 10520.

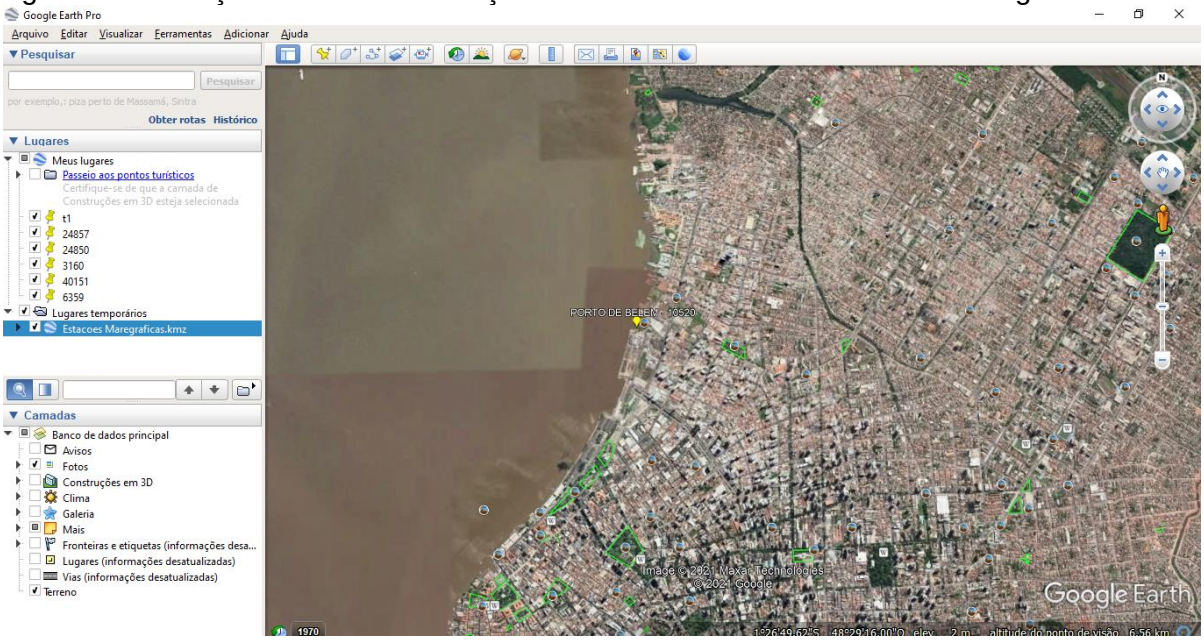
No apêndice B são identificadas todas as estações marégraficas que têm suas curvas de dados históricos armazenadas no banco de dados deste diretório.

Figura 41 – Distribuição espacial das estações marégraficas do diretório de importação marégrafico.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 42 – Seleção de uma das estações do banco de dados de curvas marégraficas.

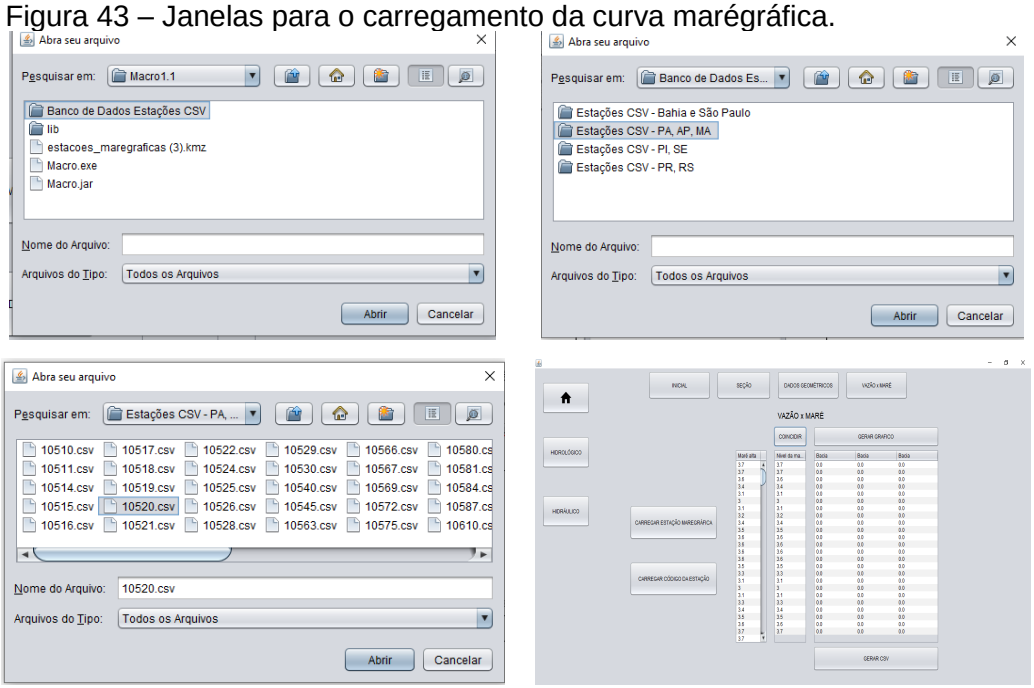


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Carregar Código da Estação: clicando no botão “CARREGAR CÓDIGO DA ESTAÇÃO”, o programa abrirá a janela “Abra seu arquivo” (Figura 43), para o usuário entrar na pasta do modelo MACRO 1.0. Em seguida, na pasta Banco de Dados

Estações CSV, o usuário deve selecionar a pasta correspondente ao estado que sua estação maregráfica se localiza e, então, selecionar o arquivo nomeado com o código da estação de interesse. Clicando em abrir, na coluna Maré Alta, o programa carregará a série de níveis de maré máximas.

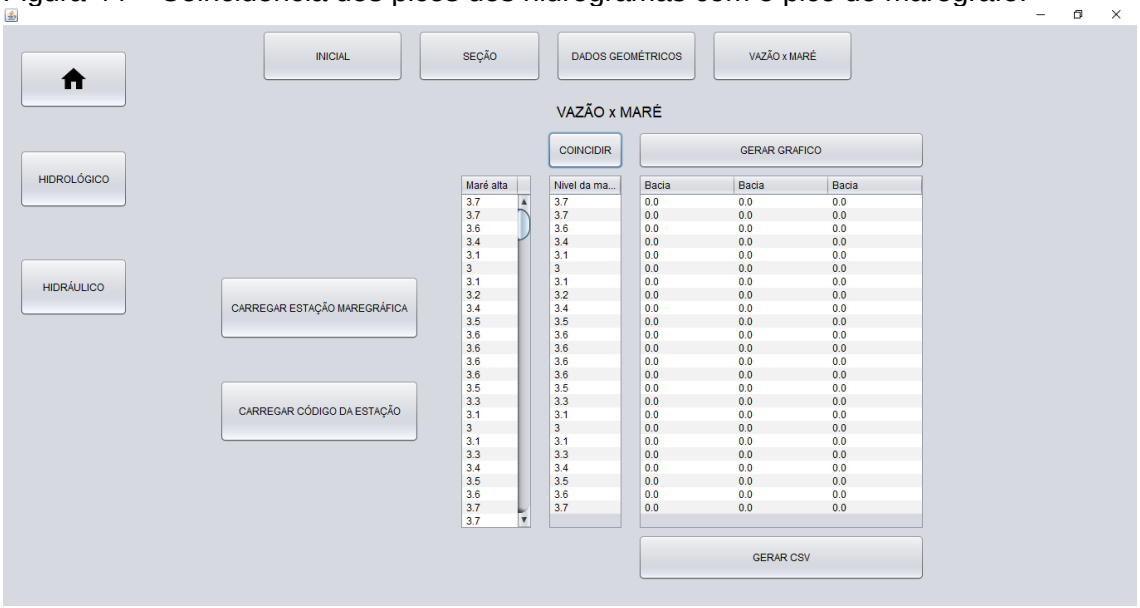
Figura 43 – Janelas para o carregamento da curva marégráfica.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Coincidir: para que haja a coincidência dos picos dos hidrogramas de projeto com o pico do marégrafo (maré alta), o botão “COINCIDIR” assume a função de barra de rolagem, o usuário deve clicar sucessivas vezes até que o valor de pico de maré se localize na mesma linha dos picos dos hidrogramas de projeto (Figura 44).

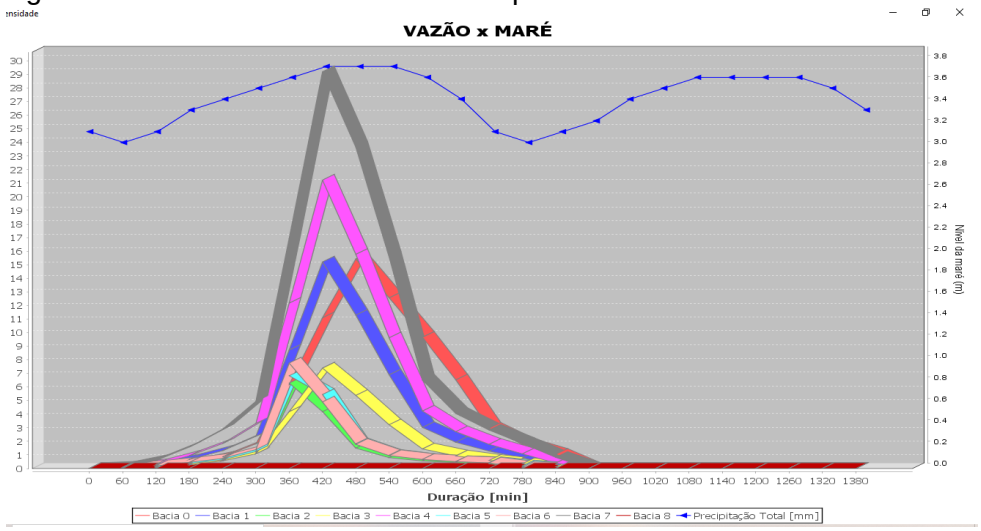
Figura 44 – Coincidência dos picos dos hidrogramas com o pico do marégrafo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Gerar Gráfico: clicando no botão “GERAR GRÁFICO”, o programa abrirá o gráfico com a coincidência dos picos de hidrogramas com o pico do marégrafo, conforme mostrado na Figura 45.

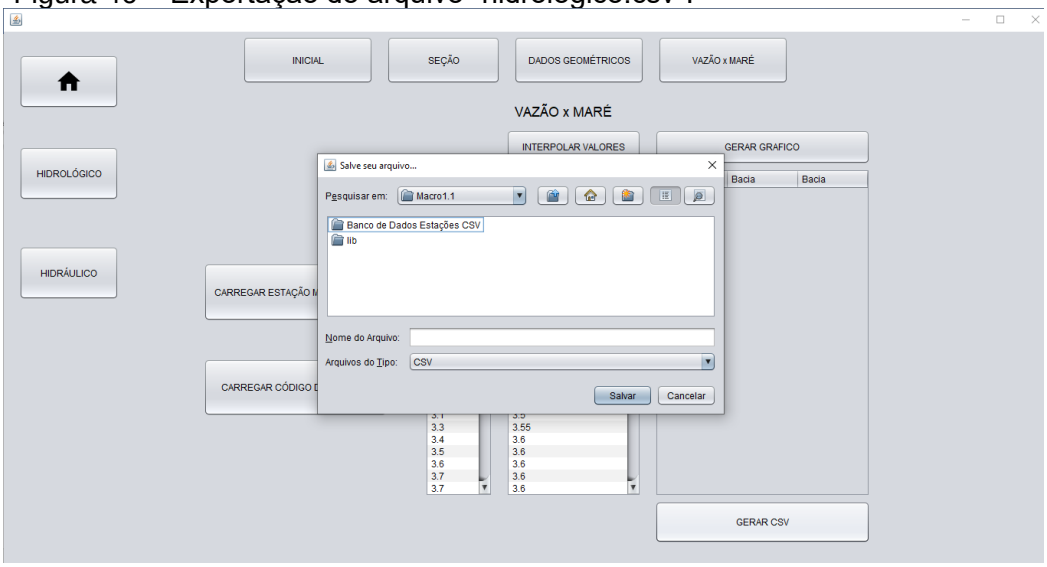
Figura 45 – Gráfico de coincidência de picos.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

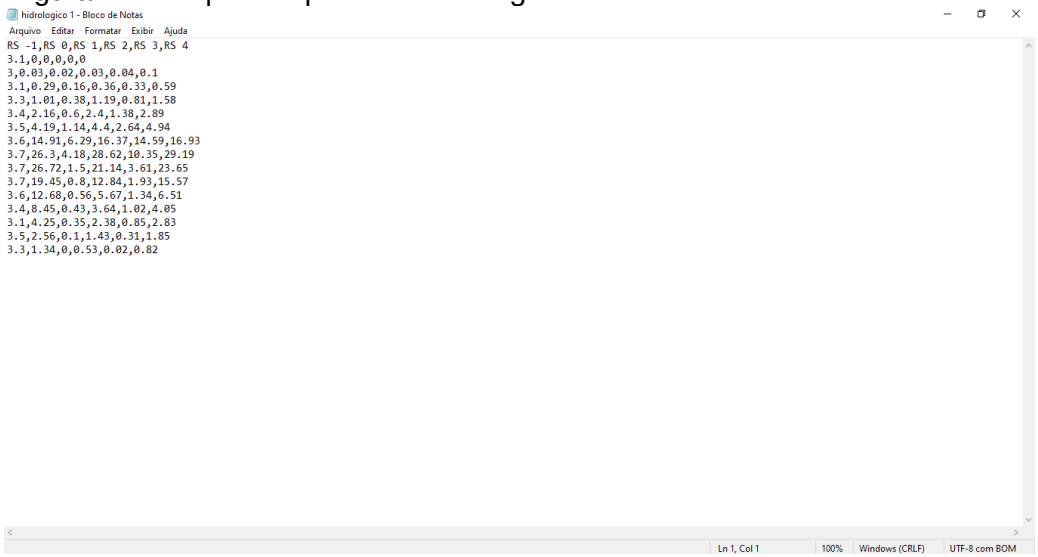
Gerar CSV: Clicando no botão “GERAR CSV”, o programa abrirá a janela “Salve seu arquivo” (Figura 46), sendo permitido nomear e salvar o segundo arquivo “*.csv” do seu projeto. No arquivo “.csv”, constaram as condições de contorno hidrológicas que serão importadas para o HEC-RAS (Figura 47).

Figura 46 – Exportação do arquivo “hidrologico.csv”.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 47 – Arquivo exportado “hidrológico.csv”.

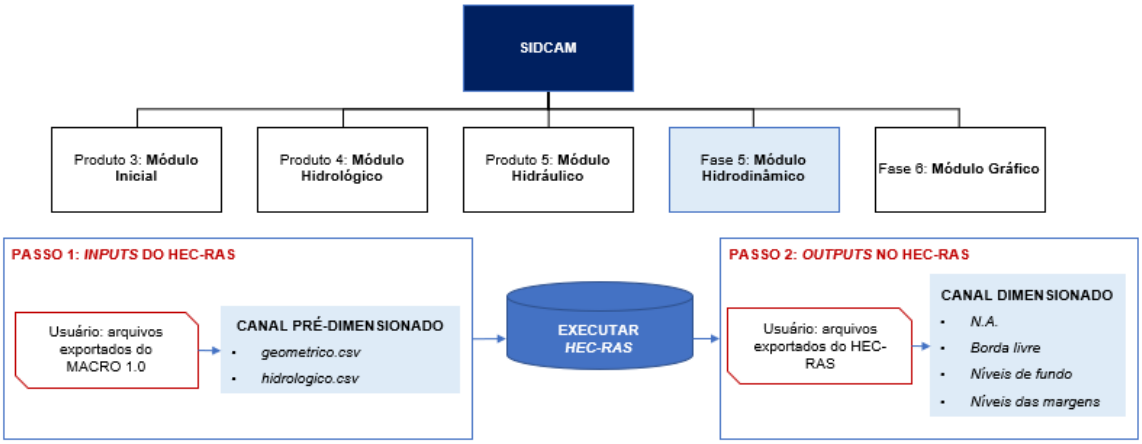


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.1.4 Fase 5: Módulo Hidrodinâmico

Para realizar a modelagem hidrodinâmica do canal projetado por MACRO 1.0, será necessário utilizar o *software* HEC-RAS. Na Figura 48, são apresentadas as etapas de modelagem hidrodinâmica do SIDCAM.

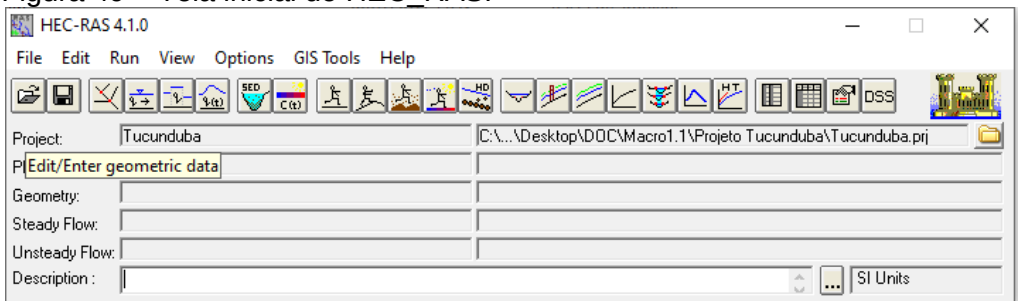
Figura 48 – Etapas de modelagem hidrodinâmica do SIDCAM.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

A tela inicial do *software* HEC-RAS é apresentada na Figura 49.

Figura 49 – Tela inicial do HEC_RAS.

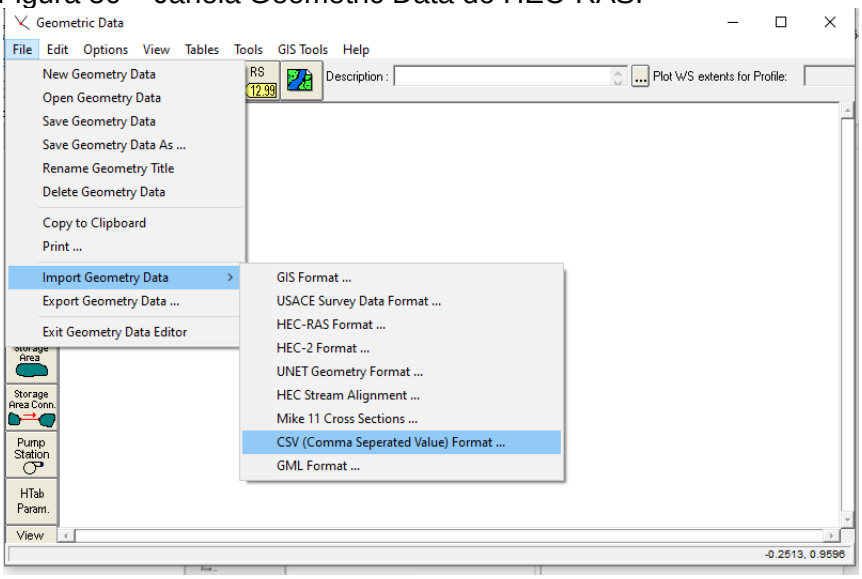


Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

l) Importando para o HEC-RAS

Para importar o primeiro arquivo “*.csv” gerado pelo MACRO 1.0, deve-se clicar no botão “Edit/Enter geometric data”, localizado na barra de menus da janela inicial do HEC-RAS (Figura 49). Em seguida, já na janela “Geometric Data” (Figura 50), clicar em FILE>IMPORT GEOMETRY DATA>CSV (*Comma Seperated Value*) Format.

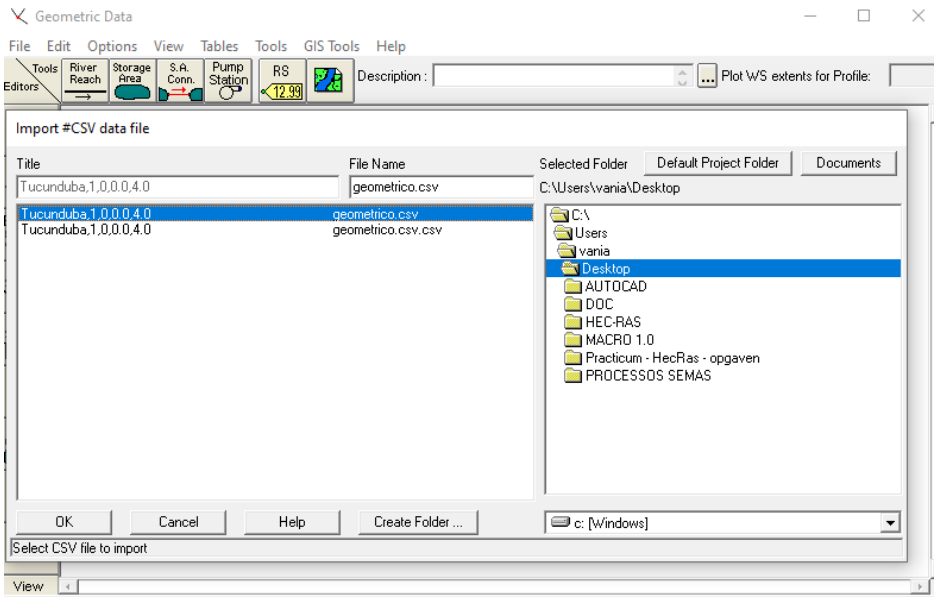
Figura 50 – Janela Geometric Data do HEC-RAS.



Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Na janela de importação (Figura 51), selecionar o primeiro arquivo “*.csv” exportado do módulo “HIDRÁULICO” de MACRO 1.0. Nesse arquivo estão salvos os dados geométricos do canal projetado.

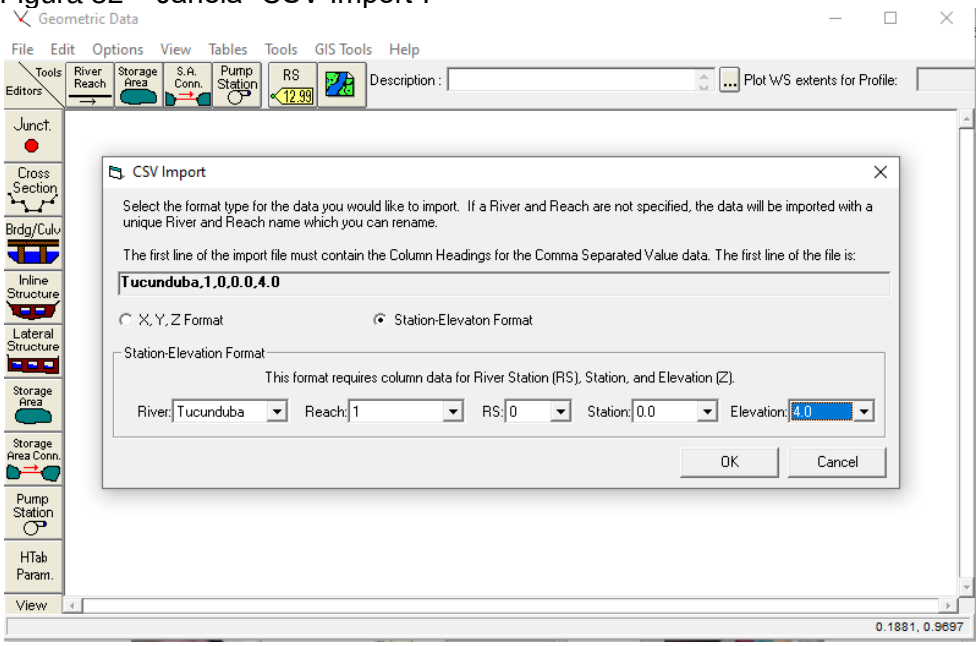
Figura 51 – Janela de Importação arquivo “*.csv”.



Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Após selecionar o primeiro arquivo “*.csv”, a janela “CSV Import” aparecerá na tela (Figura 52). Nela, marque a opção “Station-Elevation Format” e preencha as caixas de seleção seguindo a ordem da lista de itens apresentada na Figura 53.

Figura 52 – Janela “CSV Import”.

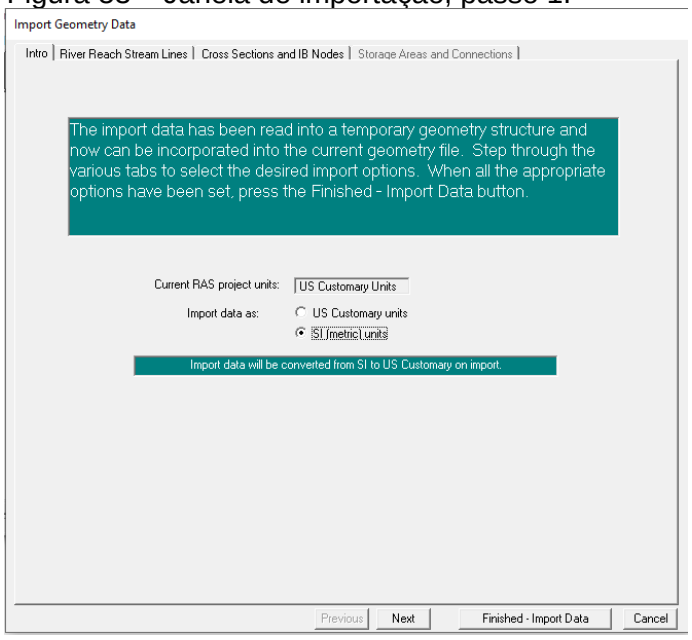


Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Em seguida, o programa apresentará algumas janelas de importação, segue-se a seguinte ordem:

Na janela da Figura 53, o usuário deve selecionar S.I (*metric units*) e seguida clicar no botão “Next”.

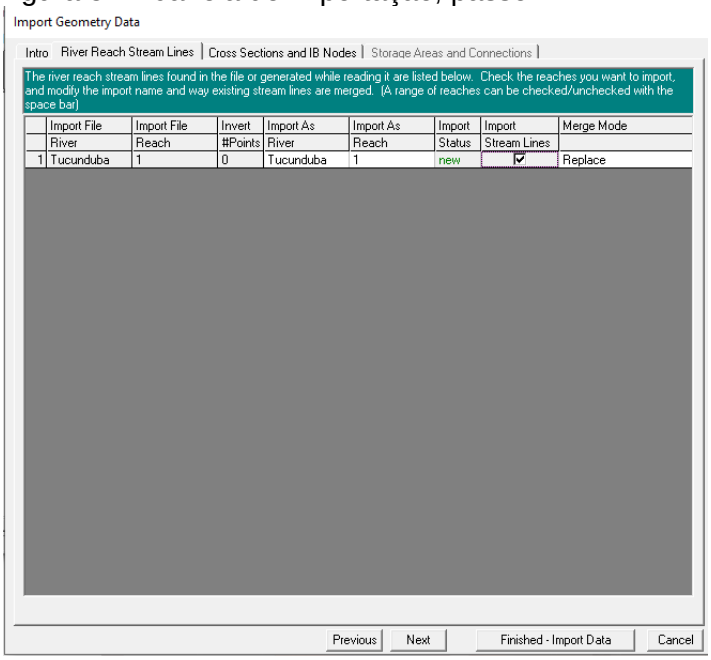
Figura 53 – Janela de importação, passo 1.



Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Marcar a caixa de seleção “stream lines”, em seguida clicar no botão “Next” (Figura 54).

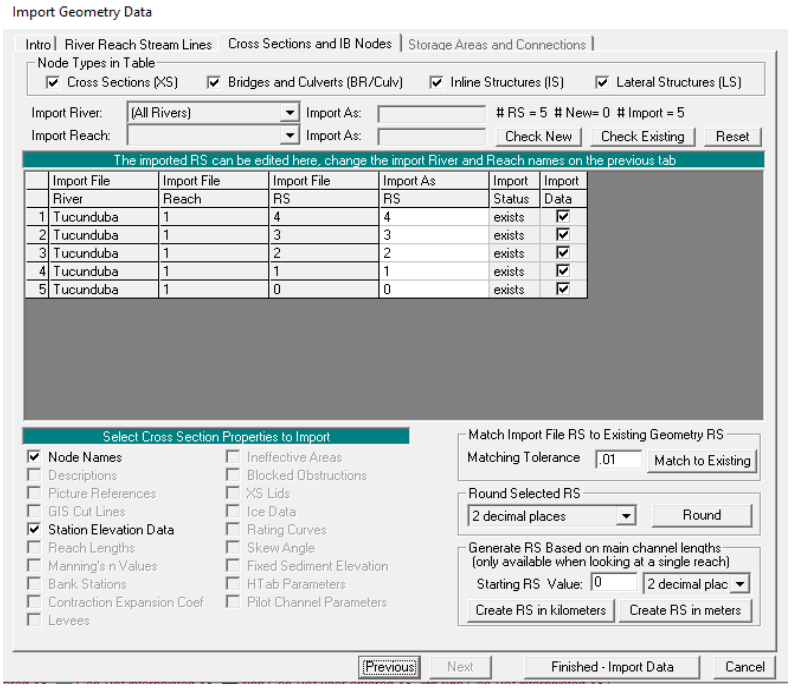
Figura 54 – Janela de importação, passo 2.



Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Para finalizar a importação dos dados geométricos, clicar no botão “Finished – Import Data” (Figura 55).

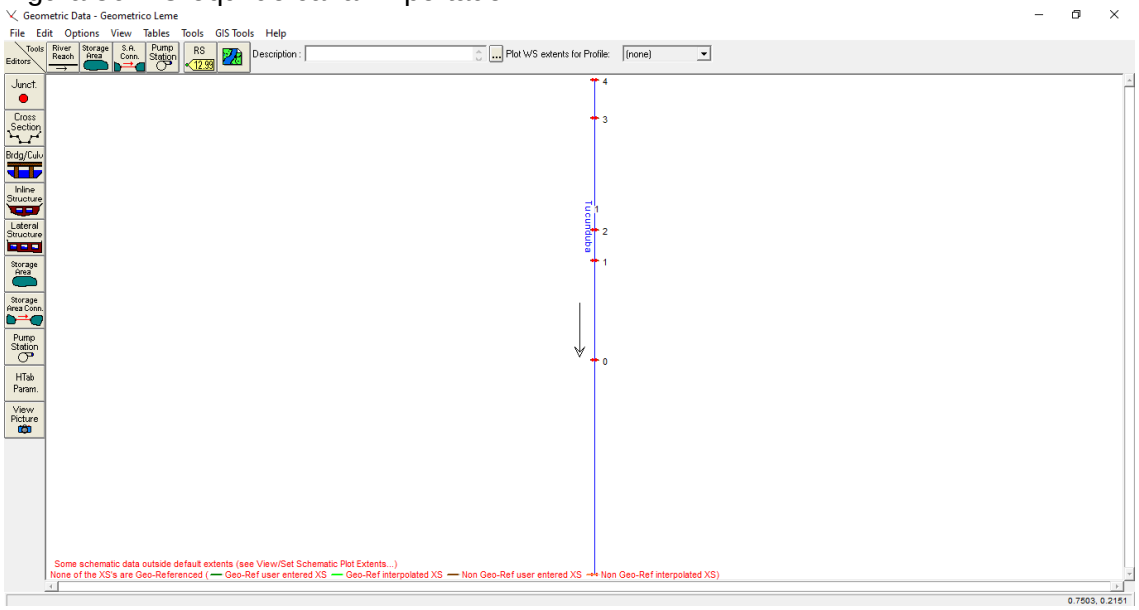
Figura 55 – Janela de importação, passo 3.



Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Assim, o croqui geométrico do canal aparecerá conforme exemplo da Figura 56.

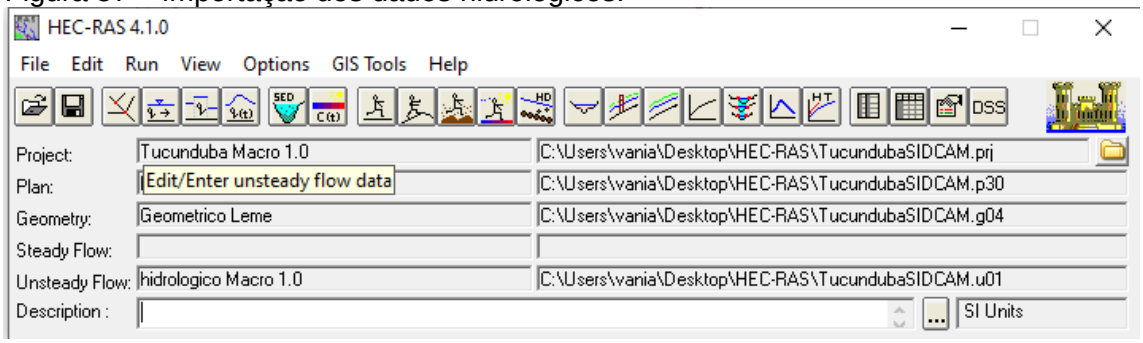
Figura 56 – Croqui do canal importado.



Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Após finalizar a importação dos dados geométricos, o usuário deve fechar as janelas e voltar à interface inicial de HEC-RAS. Clicando no botão “Edit/Enter unsteady flow data” (Figura 57), é dado acesso à janela para inserção dos dados hidrológicos que compõem o segundo arquivo “*.csv” exportado de MACRO 1.0.

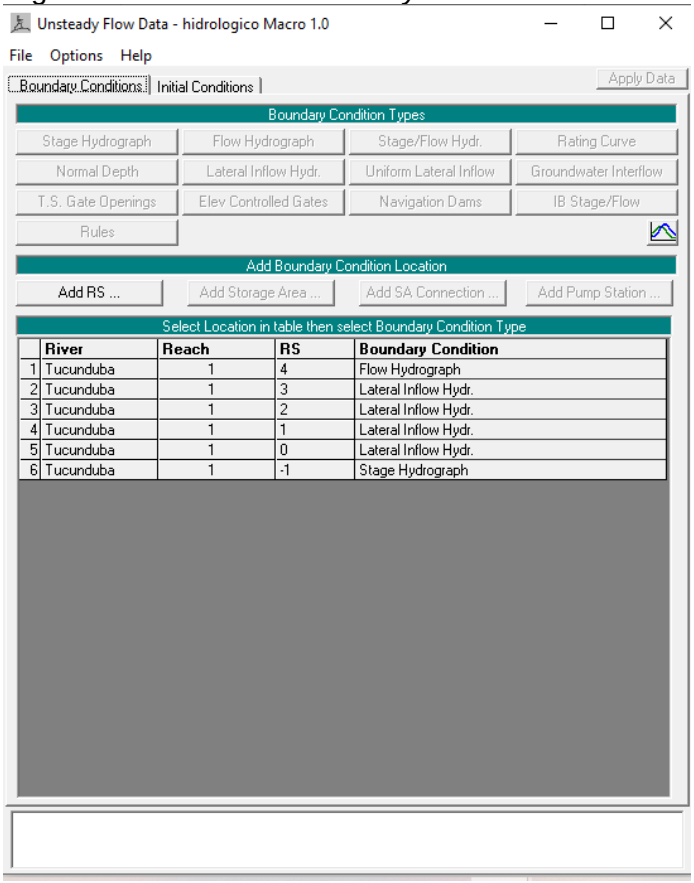
Figura 57 – Importação dos dados hidrológicos.



Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Na janela da Figura 58, o usuário deve inserir as condições de contorno hidrológicas do seu projeto que serão salvas no segundo arquivo “*.csv” exportado da aba “VAZÃO X MARÉ” do módulo “HIDRÁULICO”.

Figura 58 – Janela de *unsteady flow data*.



Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Após importação dos dois arquivos “*.csv”, o usuário deve rodar o seu projeto no HEC-RAS, clicando em: MENU INICAL>PERFORM AN UNSTEADY FLOW SIMULATION.

Uma vez considerados satisfatórios, os resultados da modelagem hidrodinâmica serão exportados para o AutoCAD.

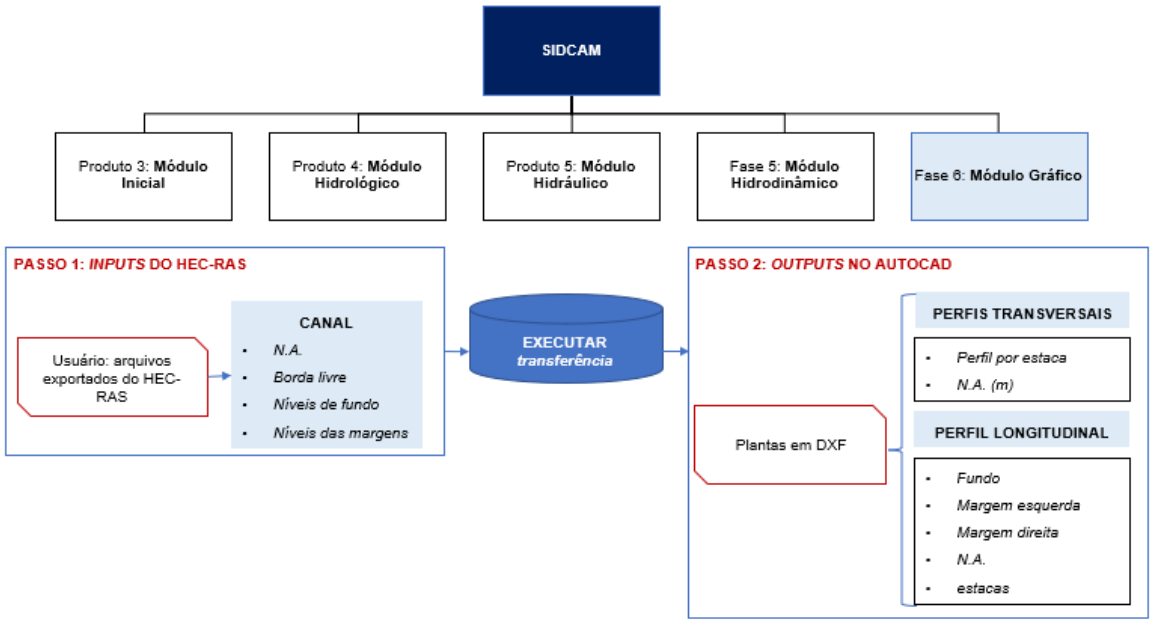
Caso os resultados de HEC-RAS sejam insatisfatórios, deve ser feita a revisão dos dados de entrada dos módulos hidrológicos e/ou hidráulicos e, assim, gerados novos arquivos “*.csv” para importar ao HEC-RAS ou, ainda, para alterar a geometria do canal diretamente no HEC-RAS.

4.1.5 Produto 6: Módulo Gráfico

A representação gráfica é a última etapa do dimensionamento de macrodrenagem projetado pelo SIDCAM. Os resultados desse módulo são as plantas dos perfis transversais e longitudinal do canal projetado, geradas para edição no

AutoCAD. Na Figura 59, são apresentadas as etapas de modelagem gráfica do SIDCAM.

Figura 59 – Etapas de modelagem gráfica do SIDCAM.

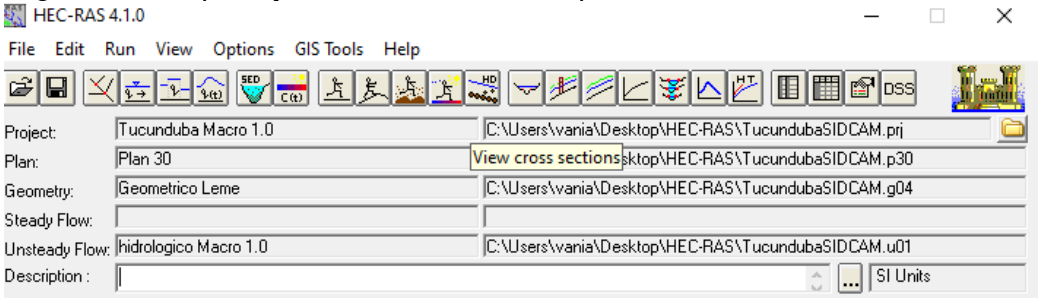


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

m) Exportando do HEC-RAS para o AutoCAD

Para exportar os resultados da modelagem hidrodinâmica para o AutoCAD, o usuário deve ir em: HEC-RAS>MENU INICIAL> VIEW CROSS SECTIONS (Figura 60).

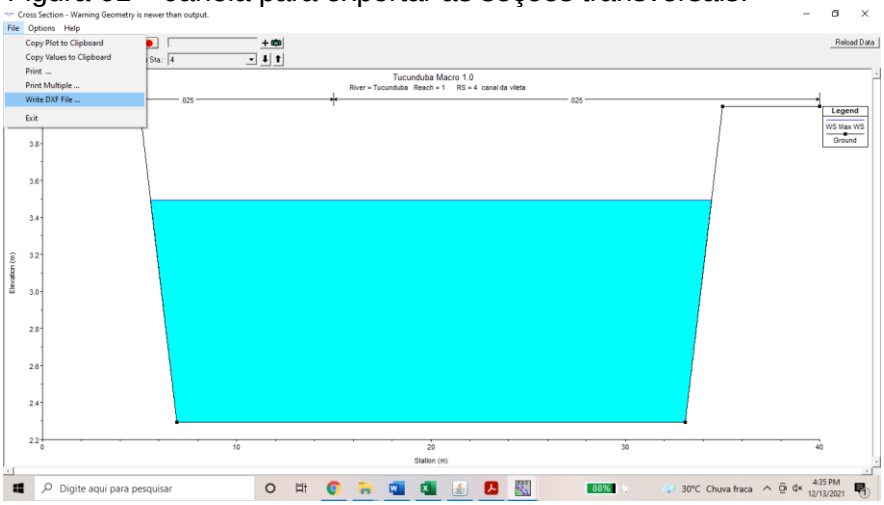
Figura 60 – Exportação dos resultados dos perfis transversais.



Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Na janela “Cross Section” selecione FILE> WRITE DXF FILE (Figura 61).

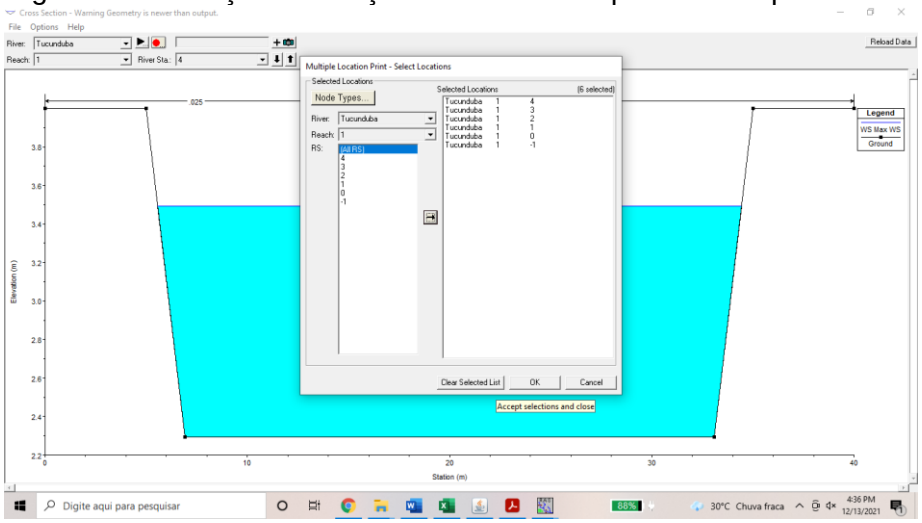
Figura 61 – Janela para exportar as seções transversais.



Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Em seguida, clique em All RS, seta para lado e em “ok” (Figura 62):

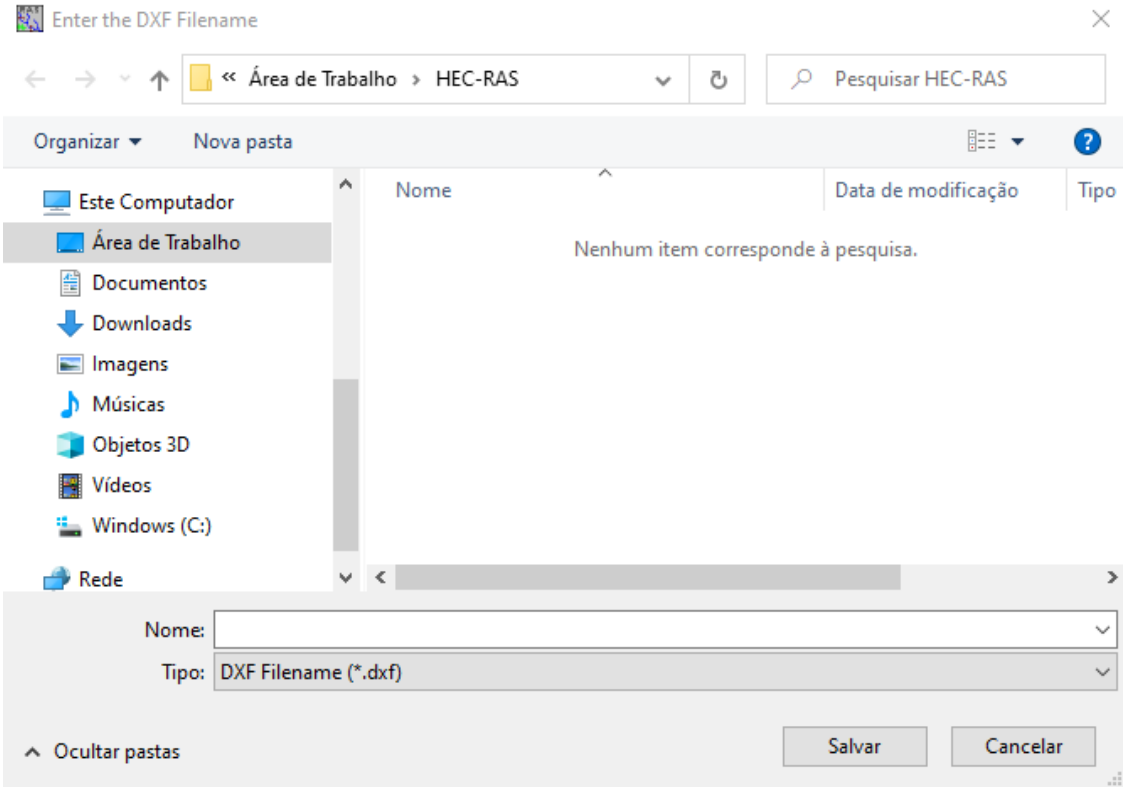
Figura 62 – Seleção das seções transversais que serão exportadas.



Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Abrirá uma janela para nomear e salvar o arquivo “*.dxf” das seções transversais do canal (Figura 63).

Figura 63 – Salvar em .dxf os perfis transversais exportados.

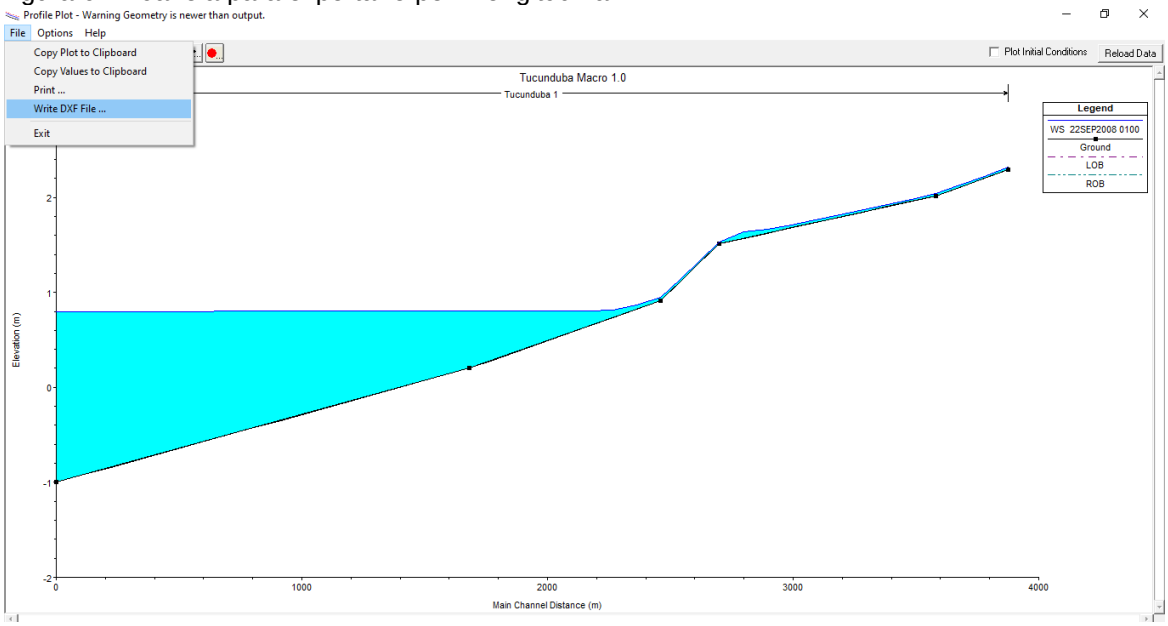


Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Para exportar o perfil longitudinal, o usuário deve ir em: HEC-RAS>MENU INICIAL>VIEW PROFILES.

Na janela “Profile Plot” selecione FILE> WRITE DXF FILE (Figura 64).

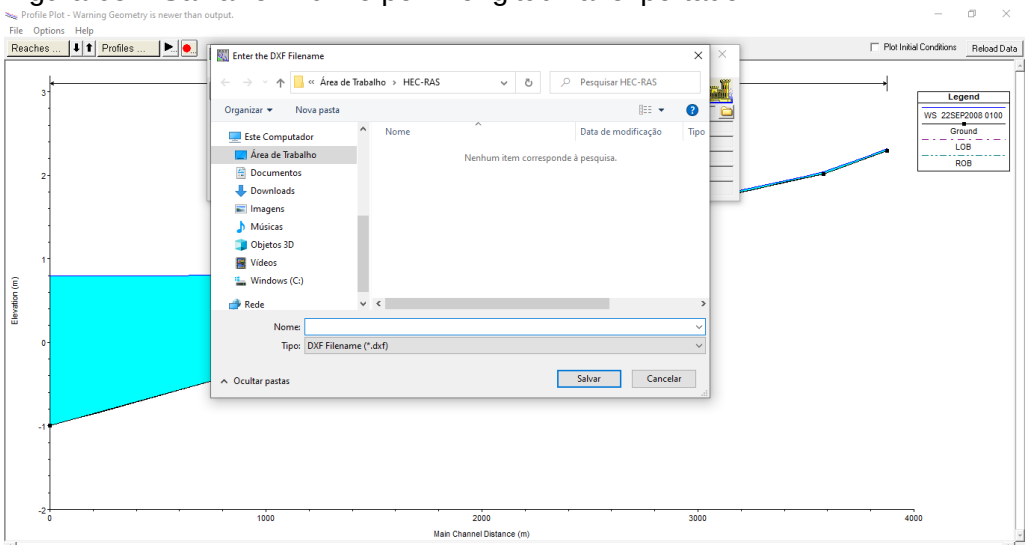
Figura 64 – Janela para exportar o perfil longitudinal.



Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

Abrirá uma janela para nomear e salvar o arquivo “*.dxf” do perfil longitudinal do canal (Figura 65).

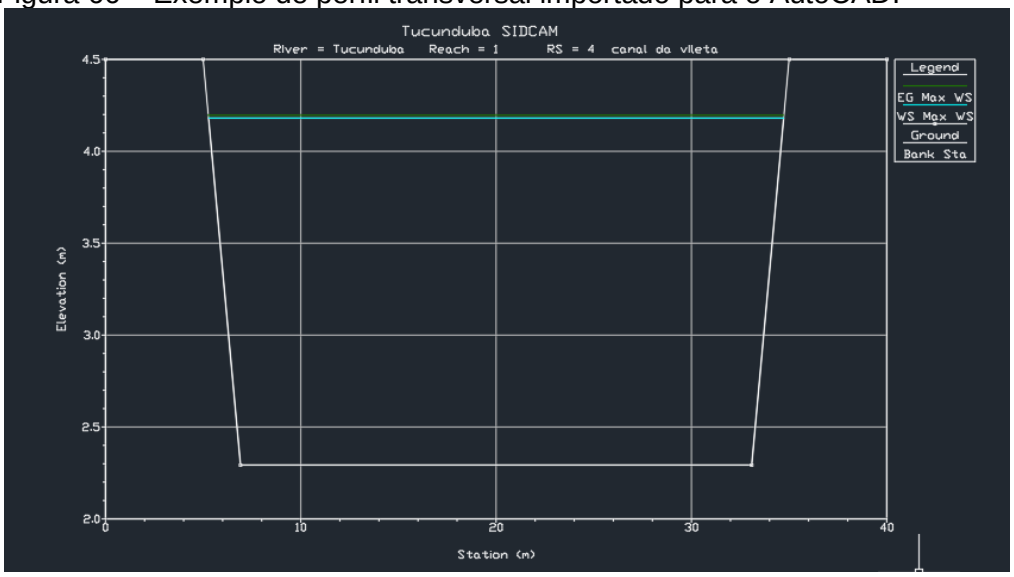
Figura 65 – Salvar em .dxf o perfil longitudinal exportado.



Fonte: Software HEC-RAS 4.1 (2021).

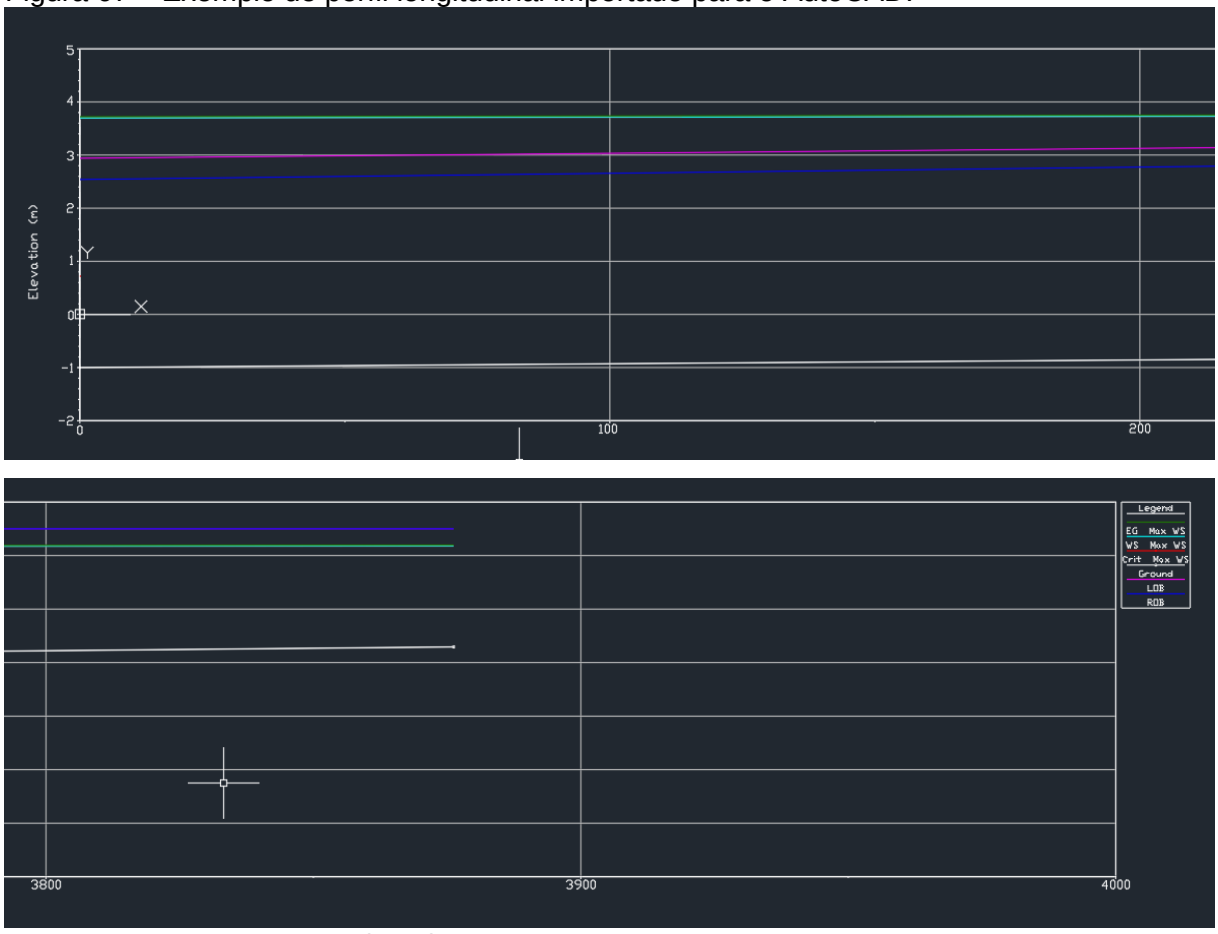
Os arquivos exportados em “*.dxf” podem ser abertos normalmente no AutoCAD e editados conforme a necessidade do projetista. Os perfis transversais e o longitudinal são compostos de dados, como nível d’água, cotas do fundo e margens. Na Figura 66 e Figura 67 são apresentados exemplos de perfis importados para o AutoCAD.

Figura 66 – Exemplo de perfil transversal importado para o AutoCAD.



Fonte: SIDCAM em AutoCAD (2021).

Figura 67 – Exemplo de perfil longitudinal importado para o AutoCAD.



Fonte: SIDCAM em AutoCAD (2021).

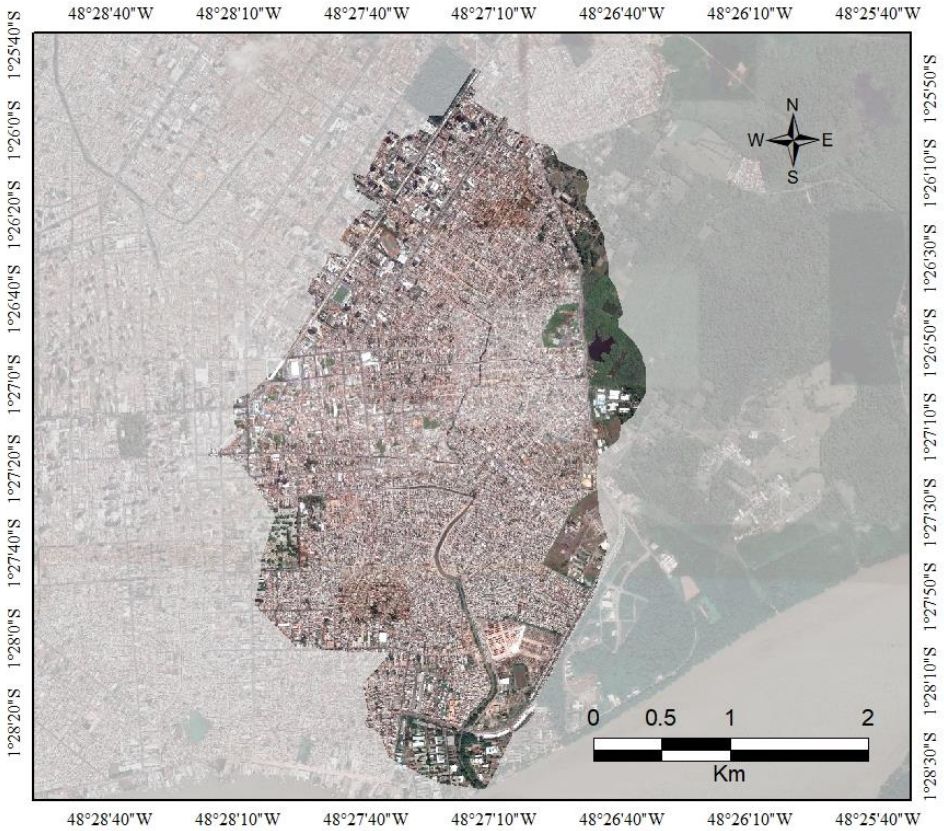
4.2 Etapa 3: resultados da aplicação em estudo de caso

Para avaliar a confiabilidade e a aplicabilidade do sistema desenvolvido, foi realizada a simulação do SIDCAM com o projeto executivo do sistema de macrodrenagem da bacia do Tucunduba, referente aos volumes de memoriais (dimensionamento) e de peças gráficas (perfis transversais e longitudinal).

A bacia hidrográfica do Tucunduba (Figura 68) está localizada a sudeste da capital do estado do Pará, Belém, é considerada a segunda maior do município, com área de aproximadamente 962 ha. Seu canal principal, igarapé Tucunduba, drena toda a área da bacia para o rio Guamá, que escoa para a baía do Guajará.

A baía do Guajará está situada em uma região estuarina, com importante influência marinha e oscilação de mesomaré de 3 a 4 m. Da área total da bacia, 575 ha estão em cota inferior a 4 metros, o que lhe impõe uma condição de terrenos alagadiços (permanentes ou intermitentes) devido, principalmente, às coincidências dos picos de maré alta do rio Guamá e chuvas intensas (LEME, 2012).

Figura 68 – Bacia hidrográfica do Tucunduba.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Em 2015, o governo do estado do Pará, por meio da Secretaria de Estado de Integração Regional, Desenvolvimento Urbano e Metropolitano – SEIDURB, apresentou a segunda etapa do projeto de macrodrenagem do igarapé Tucunduba, elaborado em dois momentos distintos. A prefeitura de Belém apresentou o projeto e construiu o primeiro trecho do canal, localizado entre a foz e aruá São Domingos. O projeto desenvolvido pelo governo do estado teve o foco no segundo trecho e objetivou definir, tecnicamente, as obras necessárias ao alargamento, retificação e controle de inundações do canal, no trecho do canal localizado, entre a Rua São Domingos e a Tv. Vileta.

Para tanto, a Leme Engenharia apresentou uma metodologia de dimensionamento baseada em modelagem hidrológica e hidrodinâmica, utilizando os métodos do SCS e o *software* HEC-RAS. Com base nos resultados das simulações hidrodinâmicas, foram apresentadas diversas alternativas para a retificação do igarapé, contudo optou-se pela configuração apresentada nos próximos tópicos. Essa configuração geométrica do canal foi para comportar os volumes de cheia na incidência de picos de precipitação e marés altas.

Portanto, o projeto de macrodrenagem do igarapé Tucunduba foi considerado adequado para a validação do sistema proposto, principalmente devido à sua metodologia de dimensionamento e à disponibilidade dos dados.

Para o desenvolvimento do estudo de caso, foram levantadas informações do projeto executivo utilizado como referência (LEME, 2012) e utilizados nos testes do SIDCAM, tais como: dados geomorfológicos da bacia, variáveis hidrológicas, variáveis hidráulicas e variáveis hidrodinâmicas, bem como as peças gráficas dos perfis transversais e longitudinais do canal projetado.

Os métodos e dados apurados foram usados como condições de contorno do modelo MACRO 1.0 e na validação do SIDCAM.

4.2.1 Fase 1: Dados e métodos utilizados

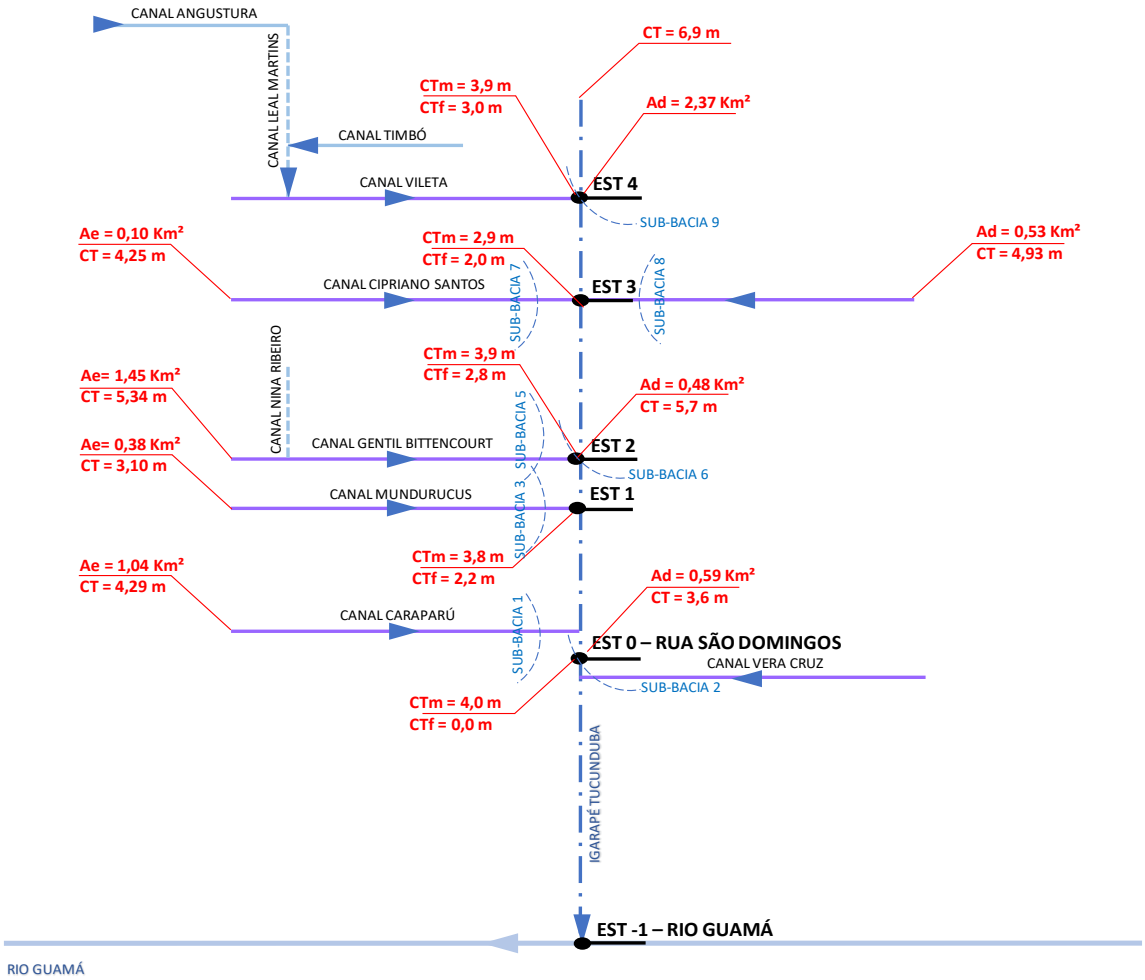
a) Dados Geomorfológicos

Para o levantamento dos dados geomorfológicos do projeto Tucunduba, foram apuradas e sistematizadas as seguintes informações:

- Identificação de sub-bacias e suas áreas de contribuição;
- Definição da localização das estacas;
- Identificação dos trechos e extensão que compõem o canal principal;
- Identificação das altitudes e declividades das sub-bacias, tributários e canal principal.

Na Figura 69, é apresentado o diagrama unifilar da rede hidrográfica da bacia do Tucunduba, gerado no SIDCAM com os dados adotados no projeto de referência (LEME ENGENHARIA, 2012).

Figura 69 – Croqui para desenvolvimento do diagrama unifilar da bacia hidrográfica do Tucunduba.



LEGENDA

- Igarapé Tucunduba (canal principal da bacia)
- Afluente do Tucunduba
- Canal paralelo
- Subafluente do Tucunduba
- Rio Guamá
- Representação das sub-bacias
- **EST** Estacas do canal principal
- **CTm** Cota da margem do canal principal
- **CTf** Cota do fundo do canal principal
- **CT** Cota do terreno na cabeceira dos rios afluentes
- **Ae** Área de contribuição das sub-bacias do lado esquerdo
- **Ad** Área de contribuição das sub-bacias do lado direito

Área de drenagem (km²) e Cotas (m) apuradas com base no Projeto de Macrodrenagem do Igarapé Tucunduba.

ESTACA	N	E	TRECHO	L (m)
0	9.838.155,9717	783.174,9815	-1-0	1680,0
1	9.838.343,2777	783.006,0332	0-1	760
2	9.838.753,1623	783.288,0178	1-2	260
3	9.839.029,3205	783.219,9045	2-3	860
4	9.839.992,5029	783.410,7412	3-4	296,215

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

b) Variáveis hidrológicas

A variável hidrológica *Curver Number* (CN), apresentada na Tabela 7, foi apurada de acordo com o estudo de Martins (*apud* TARGA *et al*., 2012). Os valores apresentados foram utilizados na modelagem do tempo de concentração das sub-bacias e consequente geração dos hidrogramas de projeto pelo MACRO 1.0.

Tabela 7 – Valores de CN adotados no projeto Tucunduba.

Sub-bacias	**CN**
1; 3; 5; 7	97
2; 6; 8;	96
9	98

Fonte: Targa *et al*. (2012).

c) Variáveis hidráulicas

Os dados referentes às variáveis hidráulicas do canal foram obtidos nos memoriais do projeto de macrodrenagem Tucunduba. Na Tabela 8 são relacionados os dados utilizados nos testes do SIDCAM:

Tabela 8 – Variáveis hidráulicas do projeto Tucunduba.

Variáveis	**Dado**
Tipo de seção	Trapezoidal
Revestimento	Alvenaria
Taludes	1:2 (V:H)
Coef. de Manning	0,025
Declividade média do fundo do canal	0,0009 m/m
Largura média da superfície livre de água	30,0 m
Cota das margens do canal projetado	4,0 m

Fonte: Leme Engenharia (2012).

d) Variáveis hidrodinâmicas

Para as variáveis hidrodinâmicas, foi necessário somente o levantamento dos coeficientes de contração e expansão adotados no projeto, uma vez que os resultados do MACRO 1.0 fornecem as variáveis geométricas e hidrológicas de entrada do HEC-RAS. Na Tabela 9, são relacionados os dados obtidos nos memoriais do projeto.

Tabela 9 – Coeficientes de contração e expansão do HEC-RAS adotados no projeto.

	Contração	**Expansão**
Transição gradual	0,1	0,3

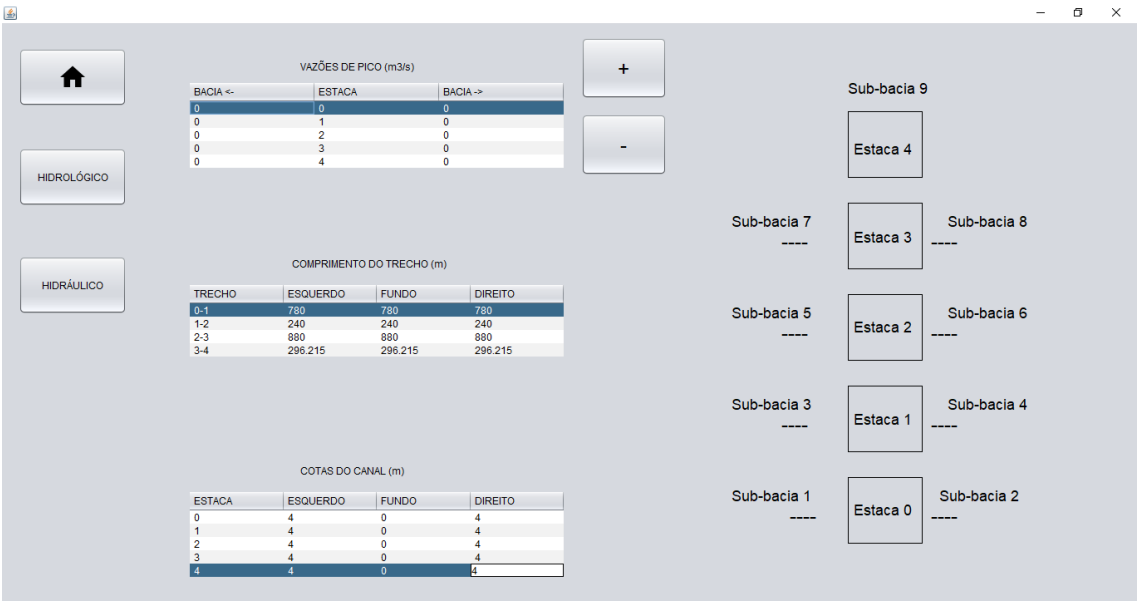
Fonte: USACE (2016).

4.2.2 Fase 2: Resultados da aplicação do MACRO 1.0

a) Menu Inicial

Na primeira tela do modelo MACRO 1.0, menu inicial, foram inseridos: o diagrama unifilar da rede hidrográfica da bacia Tucunduba, as extensões dos trechos do canal Tucunduba e as cotas das vias marginais do canal projetado (Figura 70).

Figura 70 – Tela do menu inicial com dados de entrada para a modelagem da bacia do Tucunduba.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

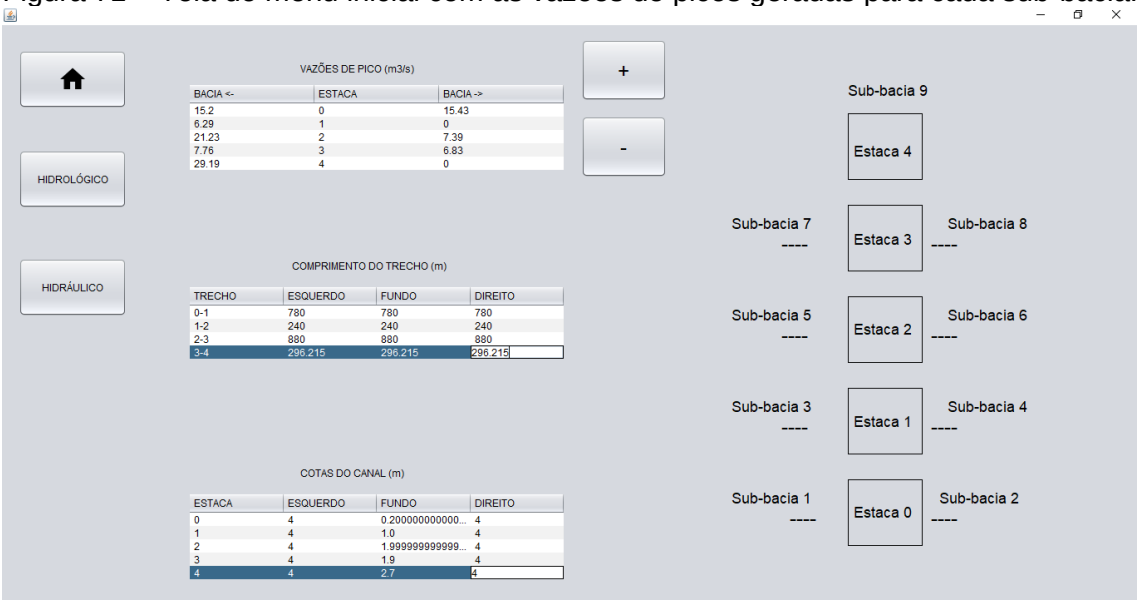
O diagrama unifilar do Tucunduba (Figura 70) foi configurado para 5 estacas e nove sub-bacias. As estacas foram numeradas de 0 a 4, sendo a estaca 0 correspondente à seção da rua São Domingos e a estaca 4 à seção da trav. Vileta. Das 9 sub-bacias presentes no diagrama, 8 foram objeto de modelagem hidrológica (sub's 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8 e 9), ficando de fora a sub-bacia 4. Devido sua inexpressividade, foi incorporada à área da sub-bacia 2. Na Figura 71, é possível observar que, na tabela "vazão de pico (m³/s)", a célula referente à sub-bacia 4 tem a

vazão de pico igual a 0, o que indica que não foram inseridos dados de entrada para essa sub-bacia, ou seja, ela não será modelada.

Em relação à extensão dos trechos, optou-se por considerá-los retilíneos, portanto, foram inseridos os mesmos comprimentos para margem esquerda, fundo e margem direita, de acordo com o trecho, conforme apresentado na Figura 70.

De acordo com Leme Engenharia (2012), as marginais esquerda e direita do canal Tucunduba foram projetadas para serem planas e fixadas em 4 m de altitude, portanto, na “tabela cotas do canal (m)” foi informado ao modelo cotas iguais para todas as estacas marginais.

Figura 71 – Tela do menu inicial com as vazões de picos geradas para cada sub-bacia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2.2.1 Módulo Hidrológico

No módulo hidrológico foram gerados os 8 hidrogramas de projeto para cada sub-bacias. Neste ambiente foram inseridos os dados relacionados às variáveis hidrológicas do projeto, citadas anteriormente.

Na Figura 72 são apresentadas as primeiras janelas de aplicação do módulo hidrológico do MACRO 1.0, sendo possível visualizar as abas “Inicial” preenchidas com os dados das sub-bacias do projeto.

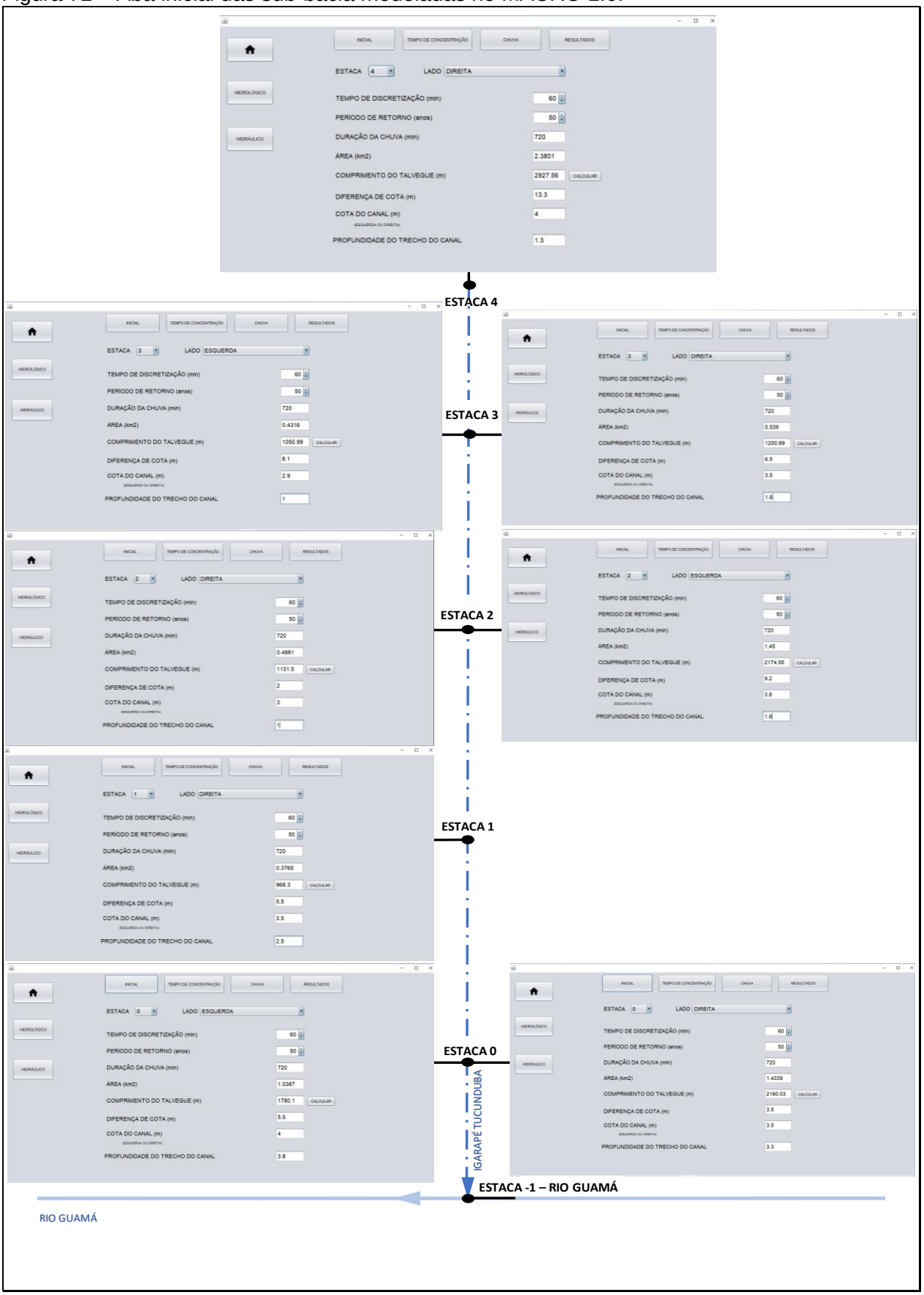
A modelagem hidrológica das sub-bacias foi realizada sequencialmente, de acordo com a numeração das estacas, partindo da estaca 0 até a estaca 4. De acordo com as definições de projeto de Leme Engenharia (2012), se fixou uma distribuição

temporal de dados com intervalo de 60 minutos, um período de retorno de 50 anos e chuva de projeto com duração de 720 minutos, para todas as sub-bacias.

A duração da chuva de projeto foi estabelecida em 720 min, considerando o fato citado por Leme Engenharia (2012), em seu memorial de projeto, que as tempestades na região de Belém possuem duração normalmente menor do que 12 horas, assim, precipitações diárias não foram consideradas para este estudo de caso.

Os dados referentes às áreas das sub-bacias, comprimento do talvegue, diferença de cotas, cota do canal e profundidade dos trechos foram estabelecidos individualmente, de acordo com os dados geomorfológicos de cada sub-bacia, levantados nas plantas do projeto gráfico e apresentados na Figura 72.

Figura 72 – Aba inicial das sub-bacia modeladas no MACRO 1.0.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

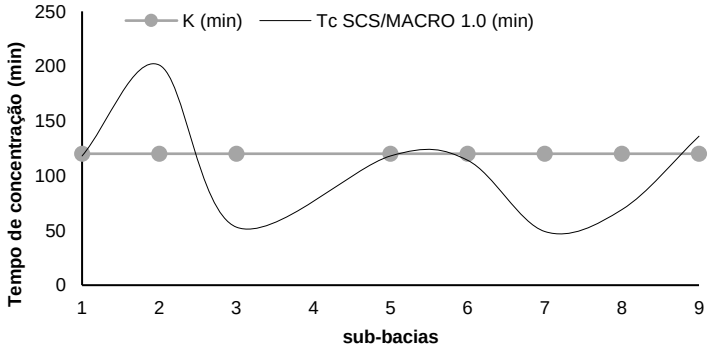
a) Tempo de Concentração

Conforme apresentado na Figura 73, para o cálculo do tempo de concentração, foi selecionada a equação do SCS, dentre as cinco equações disponíveis no modelo, considerando que esta apresenta boa representação para bacias urbanas com CN próximos a 100. Assim, utilizou-se os valores de CN indicados na Tabela 7.

No entanto, considerando Leme Engenharia (2012), a determinação do tempo de concentração (tc) de projeto foi baseada em um modelo hidrológico inexistente no MACRO 1.0, o reservatório único linear (SLR). Nele, o coeficiente de armazenamento K é uma unidade de tempo constante para um sistema considerado linear, ou seja, foi estabelecido que o coeficiente de tempo de escoamento K fosse igual a 2 horas para todas as sub-bacias.

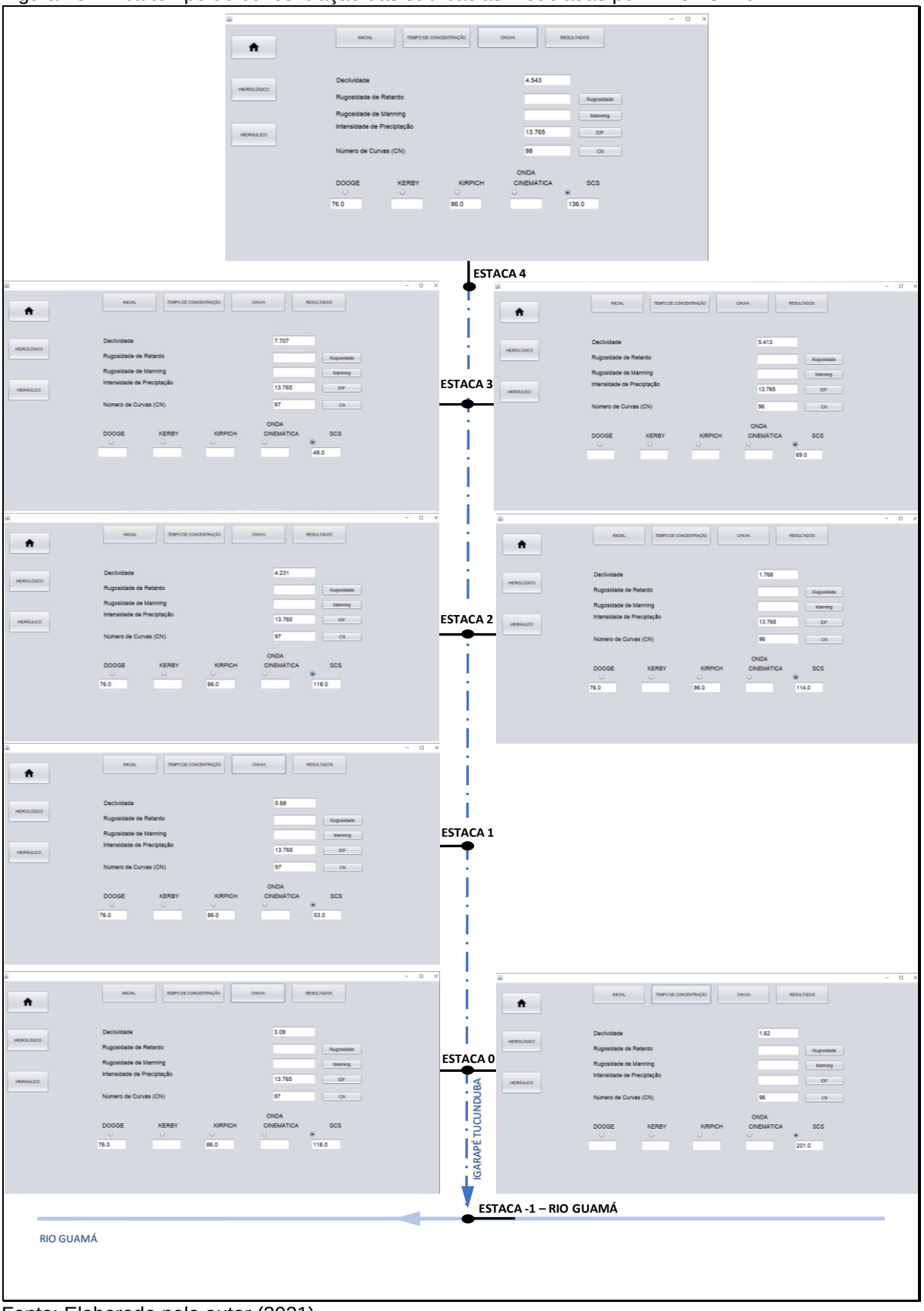
Como pode ser observado na Gráfico 1, os tempos de concentração (tc) calculados pelo MACRO 1.0, apresentaram-se com um máximo de 201 min na sub 2 e o mínimo de 49 min para sub 7. A variação média dos valores de tc's foi de -10% abaixo em relação à K, a maior diferença foi observada na sub 2 com tc 67,5% acima do valor de referência e menor foi sub 5 e 1, com valores tc -1,67% abaixo da referência de projeto. Isso demonstra que, em um cenário mais realista, os hidrogramas de projeto gerados pelo MACRO 1.0 poderão ser incompatíveis com os hidrogramas do projeto Tucunduba, visto a sensibilidade do algoritmo de cálculo chuva-vazão, em relação aos valores dos tc's. Esse tópico criou um alerta de preocupação sobre o desempenho do MACRO 1.0, quanto à geração de hidrogramas de projetos representativos para o dimensionamento de canais de macrodrenagem.

Gráfico 1 – Amplitude do tc de MACRO 1.0 em relação ao de Leme Engenharia (2012).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Figura 73 – Aba tempo de concentração das sub-bacias modeladas por MACRO 1.0.

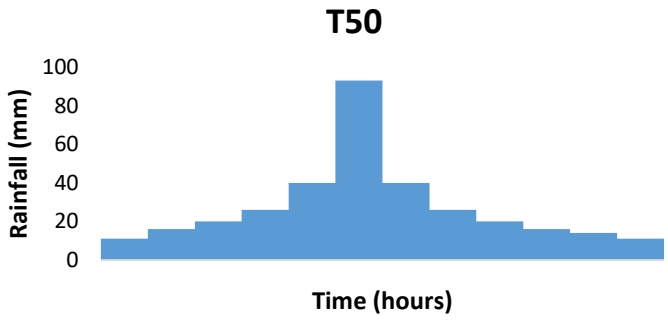


Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

b) Chuva de Projeto (hietogramas)

Na Figura 74 é apresentado o hietograma de precipitação considerado no projeto de Leme Engenharia (2012), que adota a equação de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) da Prefeitura Municipal de Belém, considerando um período de retorno de 50 anos e uma chuva com duração de 720 minutos. O hietograma fornece a precipitação distribuída, simetricamente, a cada 60 minutos; o conjunto dessas informações caracteriza um evento composto usado como entrada *(input)* para a modelagem hidrológica do canal de macrodrenagem do Tucunduba (LEME ENGENHARIA, 2012).

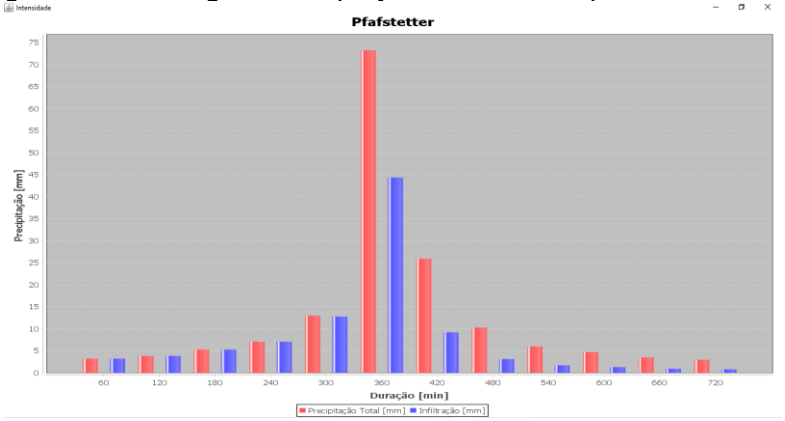
Figura 74 – Hietograma do projeto Tucunduba.



Fonte: Leme Engenharia (2012).

Considerando os dados do projeto (Tr=50 anos, D=720 min e intervalo de discretização=60 min), no hietograma de projeto gerado pelo MACRO 1.0 (Figura 75), se observam projeções de séries de chuva notadamente inferiores em relação à série de Leme Engenharia (2012) (Figura 74).

Figura 75 – Hietograma de projeto Tucunduba por MACRO 1.0.



Fonte: MACRO 1.0 (2021).

Na Tabela 10, se observa uma variação significativa entre as intensidades dos cenários simulados; verifica-se que a principal diferença entre os hietogramas são as intensidades, já que a sua conformação é idêntica, os picos de chuva coincidem em 360 min de duração. A chuva de projeto gerada pelo MACRO 1.0 está subestimada quando comparada aos valores de Leme Engenharia (2012), com uma diferença média de -70% nos volumes de precipitação.

Tabela 10 – Intensidades de precipitação de projeto.

t (min)	Intensidade SIDCAM (mm/h)	Intensidade Leme (mm/h)	Diferença (%)
60	3.19	11	-70.99
120	3.82	16	-76.15
180	5.25	20	-73.77
240	7.04	26	-72.93
300	12.96	40	-67.61
360	73.66	93	-20.79
420	25.45	93	-72.63
480	10.26	40	-74.35
540	5.98	26	-77.01
600	4.71	20	-76.45
660	3.47	16	-78.31
720	2.96	11	-73.10

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No cenário modelado por MACRO 1.0, as intensidades mantiveram-se abaixo do volume inicial definido por Leme Engenharia (2012), de 11 mm/h, até 120 min antes do pico da precipitação (Figura 74 e Figura 75), quando começaram a apresentar intensidades mais altas, chegando ao pico com uma diferença de -20,79% em relação à Leme Engenharia (2012), senda esta, a menor diferença entres os intervalos de simulação.

Pode-se dizer que a diferença entre os cenários de pico foi razoável, porém os demais valores mostraram-se mais que 50% abaixo dos de Leme Engenharia (2012); nesse caso, supõem-se que as variáveis locais consideradas por Pfafstetter (1982) não sejam regionalmente tão refinadas quanto as utilizadas na equação de curva IDF Belém.

Conforme o trabalho de Liew, Raghavan e Liong (2014), a tendência é a utilização de modelos regionais mais refinados, a fim de obter melhores resultados

nas projeções de curvas IDF. A princípio, entende-se que a opção atual de diretório de importação de curvas IDF do MACRO 1.0, para Belém, possa ser ineficiente em fornecer dados regionais refinados.

Espera-se que, quando usado como entrada *(input)* para a modelagem hidrológica, o hietograma gerado por MACRO 1.0 não reflita negativamente nos hidrogramas de projeto, mesmo com disparidade de resultados.

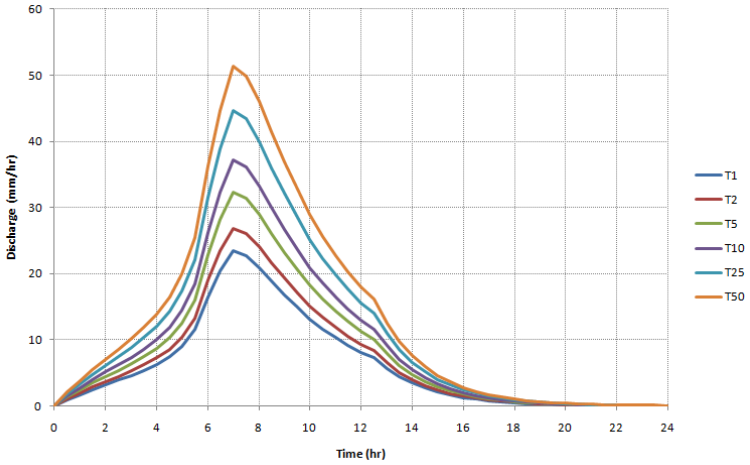
c) Vazões de Projeto (hidrogramas)

Na última aba do módulo hidrológico “Resultados” (Figura 78) foram apresentados os hidrogramas de projeto, contendo os volumes de escoamento superficial gerados pelo MACRO 1.0, para cada sub-bacia.

Como citado anteriormente, o MACRO 1.0 foi concebido para criar séries temporais de vazões sintéticas, hidrogramas, utilizando a metodologia do hidrograma triangular do SCS. Porém, Leme Engenharia (2012) cita que a modelagem hidrológica do projeto Tucunduba foi realizada com base no modelo de reservatório único linear (SLR). A exemplo do modelo do SCS, o SRL transforma a precipitação efetiva em escoamento superficial direto, no entanto seu conceito é que a bacia se comporta como um reservatório em que o volume retido é proporcional ao volume de saída (PEDERSEN; PETER; HELWEG, 1980).

Assim, os hidrogramas unitários de Leme Engenharia (2012) foram gerados, transformando a equação de SRL em um formato de diferenças finitas; como resultado dessa transformação, apresentou-se um único hidrograma para toda a área da bacia (Figura 76). Esse hidrograma foi modelado para seis diferentes tempos de retorno e, então, foram multiplicados pelas áreas das sub-bacias. Posteriormente, foram validados relacionando-os com eventos de tempestade gerados a partir de medições de vazões realizadas no igarapé.

Figura 76 – Hidrogramas do projeto Tucunduba.



Fonte: Leme Engenharia (2012).

Nos estudos de Leme Engenharia (2012) não foram disponibilizados os hidrogramas por sub-bacia de contribuição, mas somente as vazões de pico, portanto, as discussões deste tópico serão pautadas nas correlações entre os picos de vazões dos hidrogramas, por sub-bacia. As vazões pico para cada sub-bacia estão resumidas na Tabela 11.

Para melhor entendimento dos resultados da modelagem hidrológica, os picos dos hidrogramas de projeto gerados pelo modelo MACRO 1.0 foram comparados com os apresentados por Leme Engenharia (2012), observando-se uma proximidade entre os valores para as oito sub-bacias simuladas. Na Tabela 11 são apresentados os valores dos picos dos hidrogramas de projeto gerados por MACRO 1.0 e Leme Engenharia (2012), apenas para o tempo de retorno de 50 anos, bem como a diferença entre os valores de pico, em termos percentual.

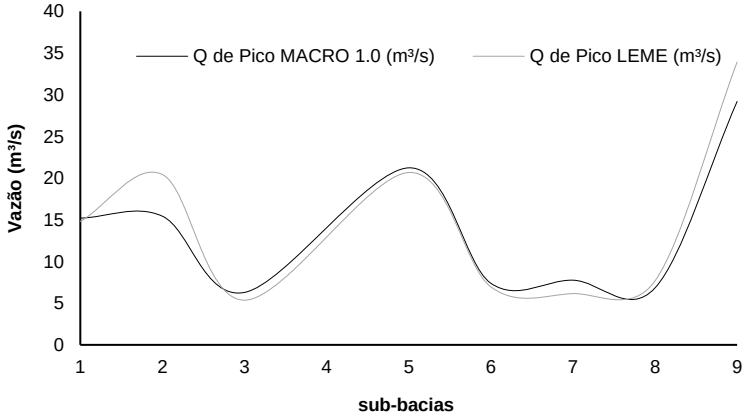
Tabela 11 – Vazões de pico de projeto por sub-bacia de contribuição.

Sub-bacias	Q de Pico SIDCAM (m³/s)	Q de Pico LEME (m³/s)	Diferença (%)
9	29.19	33.93	-13.97
8	6.83	7.68	-11.07
7	7.76	6.15	26.18
6	7.39	6.96	6.18
5	21.23	20.67	2.71
3	6.29	5.36	17.35
2	15.43	20.43	-24.47
1	15.2	14.8	2.70

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Analisando a Tabela 11, nota-se que as diferenças entre os valores de Leme Engenharia (2012) e SIDCAM obedecem correspondência linear. Assim, considera-se que a amplitude de diferenças foi razoável (Tabela 11), uma vez que a maior diferença foi observada na sub 7, com 26,18%, e a menor na sub 1, com 2,70%. Apesar das diferenças serem consideradas pequenas, o MACRO 1.0 manteve-se, para a maioria das sub-bacias, com picos superiores aos de Leme Engenharia (2012), com uma média de volume 11% maior que os de Leme Engenharia (2012); no entanto, nas sub-bacia que apresentaram picos menores que os de Leme Engenharia (2012), a média de volume foi -16.50% menor que os Leme Engenharia (2012). Apesar de 5 entre 8 sub-bacias terem apresentado picos maiores que os Leme Engenharia (2012), a média desse incremento de vazão (11%) foi menor que a média de redução (-16,5%), ou seja, de modo geral, o SIDCAM subestima em -5,48% os volumes de escoamento superficial, diferença considerada baixa se considerada a significância próxima a 5%.

Figura 77 – Comparação entre os picos dos hidrogramas de SIDCAM e Leme Engenharia (2012).



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Ressalta-se que os autores utilizaram métodos diferentes para obtenção das vazões de picos, o que reafirma o fato de que hidrogramas de projeto possivelmente possuíram valores diferentes, no entanto, aproximados para que haja verossimilhança. Apesar da diferença dos resultados simulados para chuva de projeto, a metodologia do SIDCAM mostrou-se eficaz quanto aos resultados da modelagem hidrológica, portanto, entende-se que, apesar do baixo refinamento regional do diretório de Pfafstetter para curvas IDF, este foi considerado satisfatório, contribuindo para reafirmar que o SIDCAM é capaz de gerar hidrogramas de projeto confiáveis,

que podem ser seguramente usados como condições de contorno para modelagem hidrodinâmica.

Portanto, os hidrogramas de projeto gerados no módulo hidrológico foram exportados para o módulo hidráulico a fim de comporem os *inputs* da ferramenta “coincidência de picos de hidrogramas com picos da maré” que, por sua vez, será entrada do modelo hidrodinâmico HEC-RAS.

Figura 78 – Aba resultados hidrológicos das sub-bacias modeladas por MACRO 1.0.

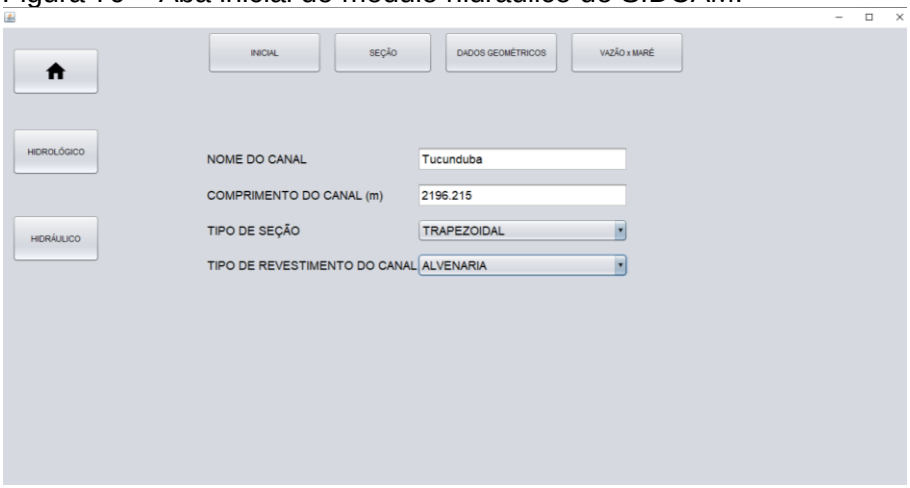
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2.2.2 Módulo Hidráulico

Antes de iniciar a modelagem hidráulica pelo SIDCAM, realizou-se o levantamento das variáveis de entrada necessárias ao modelo, anteriormente apresentadas no item variáveis hidráulicas. Os dados hidráulicos de entrada também foram obtidos nos volumes do projeto de macrodrenagem do igarapé Tucunduba (LEME, 2012). Os resultados de pré-dimensionamento do canal gerados pelo módulo hidráulico serão utilizados como condições de contorno para a modelagem hidrodinâmica, etapa na qual serão validados.

Na Figura 79, é apresentada a janela de aplicação da aba “Inicial” do módulo hidráulico configurada para o estudo de caso do Tucunduba. Nela, é possível observar o comprimento do canal composto do somatório dos quatro trechos (2.196,215 m), definição do tipo de seção como trapezoidal e revestimento dos taludes em alvenaria.

Figura 79 – Aba inicial do módulo hidráulico do SIDCAM.



Fonte: MACRO 1.0 (2021).

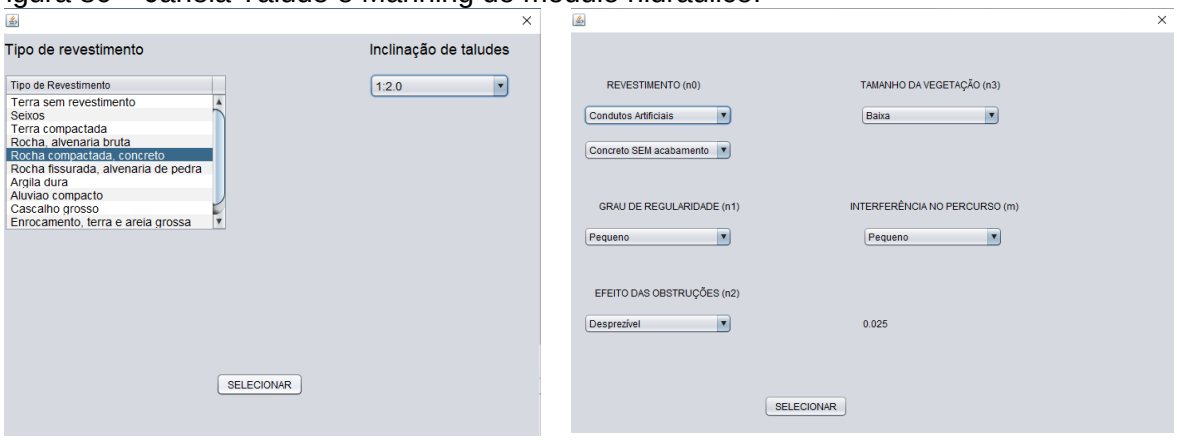
a) Seção

De acordo com as definições do projeto de Leme Engenharia (2012), com exceção da variável “Q pico projeto (m³/s)”, fixou-se os valores das mesmas variáveis hidráulicas inseridas na aba “seções” para todos os trechos (Figura 81).

A inclinação dos taludes foi fixada em 1:2 (H:V), considerado como tipo de revestimento, ao longo de todo canal, a rocha compactada/concreto (Figura 80). O coeficiente de rugosidade de Manning foi estabelecido em 0,025, considerando o tipo de revestimento dos taludes e fundo e grau de irregularidades, obstruções e

interferências no percurso (Figura 80). A declividade média para todos os trechos foi de 0,0009 m/m, a mesma adotada no projeto (Figura 81).

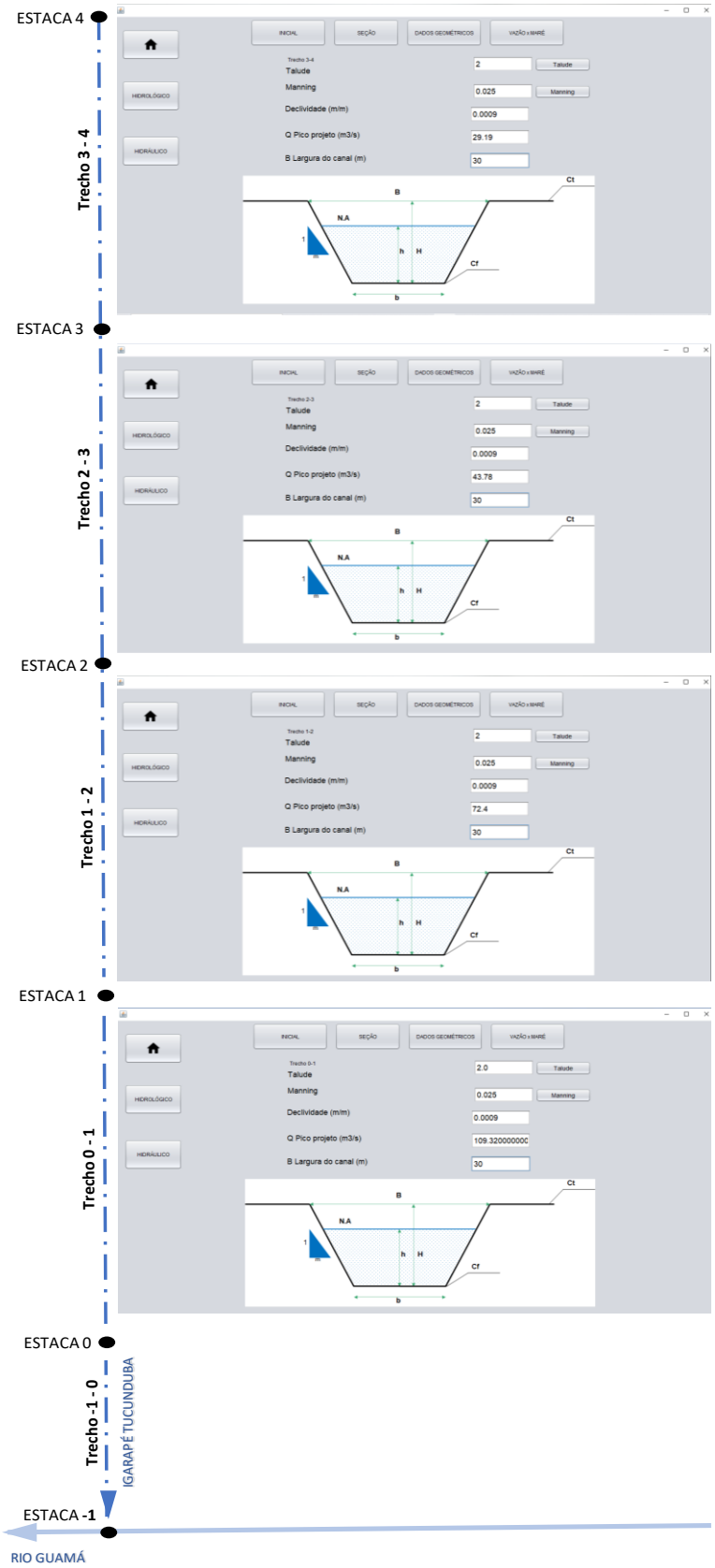
Figura 80 – Janela Talude e Manning do módulo hidráulico.



Fonte: MACRO 1.0 (2021).

Em relação aos dados de “Q Pico projeto (m³/s)”, são compostos pelo somatório das vazões de pico dos hidrogramas contribuintes para o trecho determinado, que foram exportados do módulo hidrológico. Devido ao algoritmo de contribuição lateral, na Figura 81, é possível notar o incremento das vazões de pico à medida que os trechos se aproximam do exutório; no trecho inicial (0 – 1), a vazão de pico é 109,32 m³/s, ou seja, igual à soma de todos os picos dos hidrogramas projeto.

Figura 81 – Aba seções do canal modelado por MACRO 1.0.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Na Tabela 12, é possível visualizar o comparativo das vazões escoadas ao longo dos trechos do canal, segundo dados do SIDCAM e Leme Engenharia (2012). Observa-se uma proximidade entre os valores das duas fontes, o que confirma a pouca variação entre as vazões de picos dos hidrogramas de projeto.

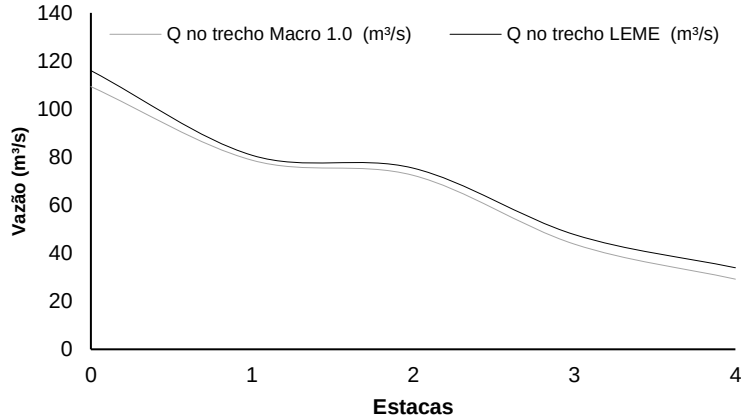
Tabela 12 – Comparativo entre vazões escoadas nos trechos do canal Tucunduba.

Trechos	Q no trecho SIDCAM (m³/s)	Q no trecho LEME (m³/s)	Diferença (%)
3 -4	29.19	33.93	-13.96
2 - 3	43.78	47.76	-8.33
1 - 2	72.4	75.39	-3.96
0 - 1	109.32	115.98	-5.74

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Os valores de escoamento modelados pelo SIDCAM foram todos menores em relação aos de Leme Engenharia (2012) (Tabela 12), o que reafirma a subestimação dos resultados de SIDCAM. A maior diferença, em termos percentuais, é atribuída ao trecho 3 – 4, -13,96% menor que a vazão de Leme Engenharia (2012) para o mesmo trecho, e a maior diferença em termos de volume é vista no trecho 0 – 1, com o acréscimo de 6,66 m³/s. Pode-se dizer que o SIDCAM apresentou resultados considerados muito bons, principalmente para os trechos compreendidos entre as estacas 1 a 3, com cerca de -6% de diferença média em relação aos valores de Leme Engenharia (2012); já nos trechos 0 – 1 e 3 – 4 verifica-se maior distanciamento entre curvas, com diferença média de -10% entre valores (Gráfico 2).

Gráfico 2 – Comparação entre vazões escoadas nos trechos do canal Tucunduba.



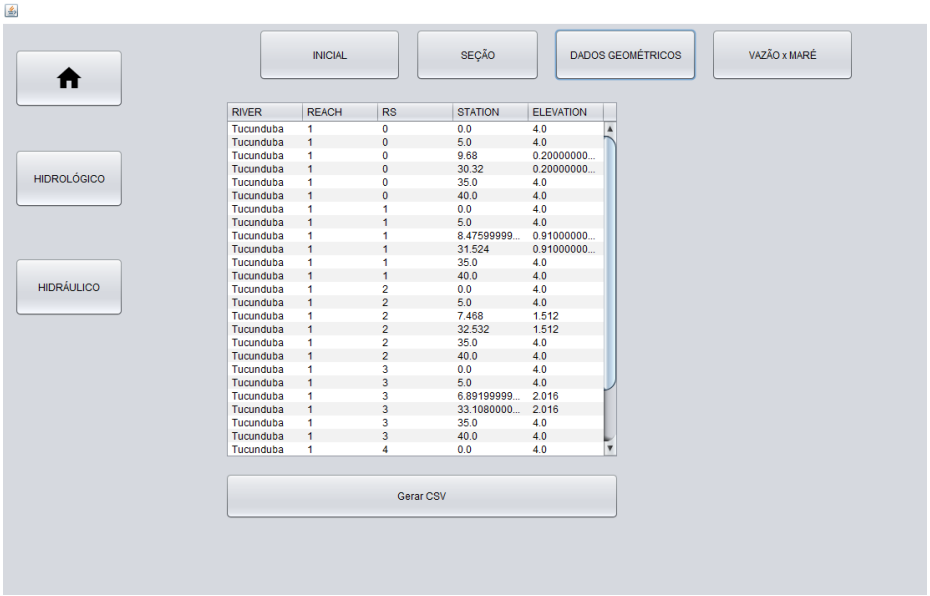
Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Conforme o esperado, as curvas de escoamento apresentaram-se síncronas. Ressalta-se que, para rotear o escoamento ao longo do canal, os autores utilizaram hidrogramas de projeto gerados por metodologias diferentes. Os dados apresentados reafirmam a eficácia dos resultados gerados pelo SIDCAM, concluindo-se que o algoritmo de roteamento de hidrogramas de contribuição lateral, incluído no modelo, é capaz de representar satisfatoriamente cenários de trânsito de cheia em canais, simulando bem a intersecção entre sub-bacias contribuintes, estacas de entrada do escoamento e volumes contribuintes nos trechos.

b) Dados Geométricos

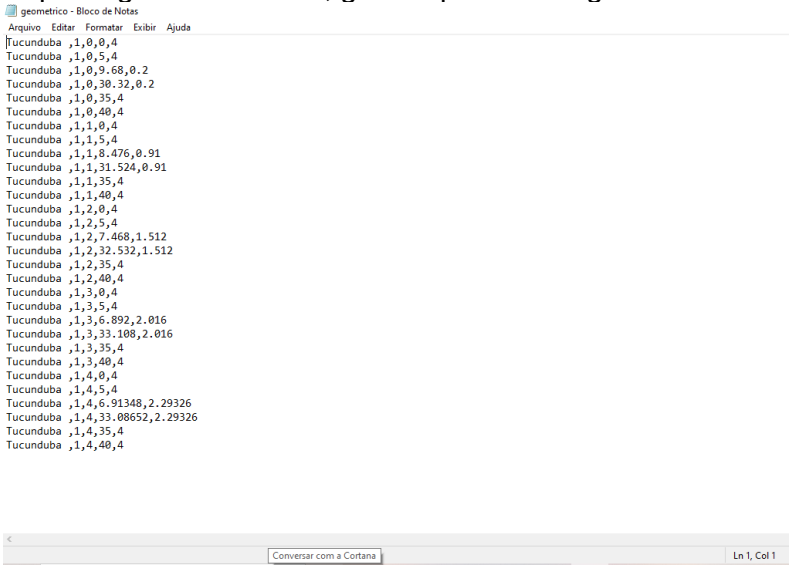
Na Figura 82, são apresentados os dados do dimensionamento geométricos do canal Tucunduba, gerados pelo SIDCAM. Esse conjunto de dados foi exportado do módulo hidráulico em um arquivo com extensão “.csv” (Figura 83), para ser usado como condição de contorno geométrica do HEC-RAS. A validação do dimensionamento geométrico do canal, é tratada no próximo capítulo.

Figura 82 – Janela dados geométricos do módulo hidráulico do SIDCAM.



Fonte: MACRO 1.0 (2021).

Figura 83 – Arquivo “geometrico.csv”, gerado por modelagem hidráulica no SIDCAM.

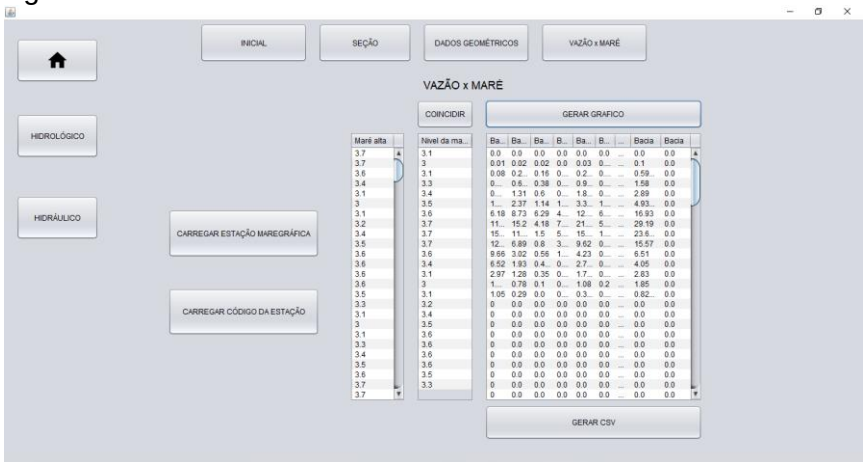


Fonte: MACRO 1.0 (2021).

c) Vazão x Maré

Na Figura 84 é apresentada a janela de aplicação da aba “Vazão x Maré” do módulo hidráulico. No lado direito observa-se uma tabela composta pelos hidrogramas de projeto, gerados no módulo hidrológico para cada sub-bacia de projeto; no lado esquerdo observa-se a coluna “maré alta”, onde foram carregados os valores da curva maregráfica referente à estação selecionada para este estudo de caso.

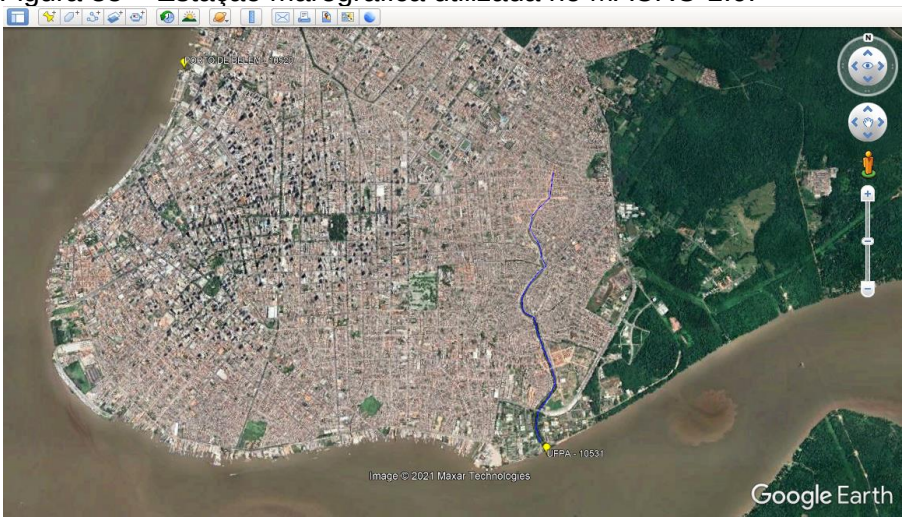
Figura 84 – Janela “Vazão x Maré” do módulo hidráulico.



Fonte: MACRO 1.0 (2021).

Em relação à estação maregráfica, foi selecionada a estação do Porto de Belém – 10520 (Figura 85), por ser a que possui a série de dados históricos mais consistente e maior próximidade ao canal Tucunduba.

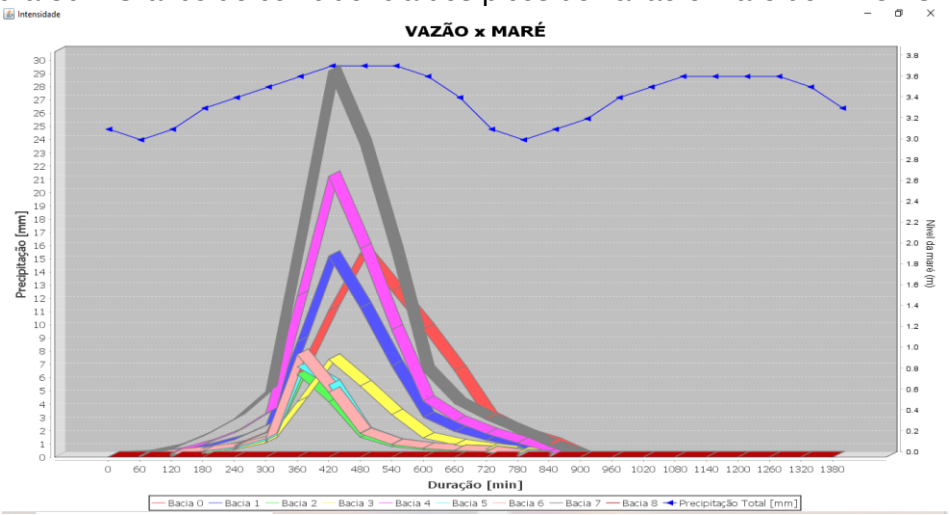
Figura 85 – Estação marégrafica utilizada no MACRO 1.0.



Fonte: Google Earth (2021).

Conforme apresentado na Figura 84, o nível máximo da série de marés máximas históricas da Porto de Belém – 10520, foi de 3,7 m. Clicando no botão “coincidir”, a linha onde localizavam-se os N.M 3,7 m e as vazões de pico dos hidrogramas de projeto, foram colocadas lado a lado, criando o cenário de coincidência de picos de marés com picos de vazões (Figura 86).

Figura 86 – Gráfico de coincidência dos picos de vazão e maré do MACRO 1.0.



Fonte: MACRO 1.0 (2021).

Esse conjunto de dados foi exportado do módulo hidráulico em um arquivo com extensão “.csv” (Figura 87) para importação ao HEC-RAS e será usado como condição de contorno, a montante (hidrogramas) e a jusante (Níveis de maré) do canal, para simulação de fluxo instável e curva de remanso. A sistematização desses dados pelo SIDCAM se tornou necessária, uma vez que o escoamento no canal

Tucunduba é fortemente controlado pela flutuação do nível d'água do rio Guamá que, por sua vez, é controlada pelos níveis de maré do delta do rio Pará.

Figura 87 – Arquivo "hidrologico.csv", gerado por modelagem hidrológica no SIDCAM.

Fonte: MACRO 1.0 (2021).

4.2.3 Fase 3: Resultados da aplicação do SIDCAM

A aplicação do SIDCAM dar-se-á pela modelagem hidrodinâmica do canal projetado; para tanto, serão utilizados os arquivos "*.csv" exportados do sistema, contendo os resultados da modelagem hidrológica e hidráulica.

4.2.3.1 Módulo Hidrodinâmico

No módulo hidrodinâmico, foram simulados dois cenários de escoamento, para termos comparativos, ambos simulados no software HEC-RAS. O primeiro cenário C1 é uma representação do projeto desenvolvido por Leme Engenharia (2012), o qual está em fase final de execução das obras; portanto, este foi tomado como referência para a validação do modelo.

O cenário C2 é a representação do dimensionamento geométrico e hidrológico feito no SIDCAM.

Portanto, os cenários simulados no módulo hidrodinâmico foram:

a) C1: Geometria do canal (Leme,2012) + Hidrológico (Leme,2012);
b) C2: Geometria do canal (SIDCAM) + Hidrológico (SIDCAM).

O canal Tucunduba, em sua seção mais a jusante, possui uma condição de lâmina d'água imposta pela oscilação das marés do rio Guamá; níveis elevados têm causado a paralisação do sistema de drenagem e grande impacto nas inundações observadas a montante da bacia. Assim, foi inserida, no esquema geométrico do HEC-RAS, a seção transversal da Foz do igarapé Tucunduba, denominada estaca -1. Isso foi necessário para melhor representar a oscilação dos níveis de maré e a sua influência no remanso ao longo do canal.

A modelagem hidrodinâmica foi realizada para o trecho do Tucunduba compreendido entre a trav. Vileta e a foz no rio Guamá; o canal foi subdivido em 5 trechos compostos de 6 estacas (-1,0,1,2,3,4), sua seção foi definida como trapezoidal ao longo de toda a extensão, com largura da superfície livre de água de 30 m e profundidades variáveis de acordo com a fonte de dados geométricos utilizada.

Na Figura 88, são apresentados os níveis máximos d'água simulados ao longo do canal e nas seções transversais das estacas.

Apesar dos perfis de linha d'água terem variabilidade semelhante e aproximada ao longo do canal (Figura 88), existem pequenas diferenças entre níveis, observadas nas estacas dos cenários simulados. Observando a Tabela 13, tem-se que as diferenças de níveis mais significativas estão no cenário C1/estaca 4, onde foi encontrado o nível mais alto das simulações, 4,5 m, sendo 0,1 m superior ao máximo encontrado em C2/estaca 4. Enquanto o menor nível foi observado no cenário C1/estaca -1, 3,4 m, sendo 0,3 m inferior ao encontrado na mesma estaca, para C2.

Na Tabela 11, é possível observar que o volume de pico do hidrograma da sub-bacia 9 é o maior dentre todos, tanto para os hidrogramas fornecidos por Leme Engenharia (2012) quanto para os gerados no SIDCAM, também são superiores aos MACRO 1.0, os picos das sub-bacias 8 e 7 fornecidos por Leme Engenharia (2012). Sendo as principais diferenças de níveis observadas nos trechos 5 e 1, ou seja, nos trechos mais a montante e a jusante do canal; em primeira instância, justifica-se os mais altos níveis encontrados no trecho 5 (estacas 4-3) pelos grandes volumes de pico dos hidrogramas de projeto, das sub-bacias contribuintes 9, 8 e 7.

Em relação à diferença de nível entre os C1 e C2 observada no trecho 1, é atribuída às diferenças entre as curvas marégraficas de Leme Engenharia (2012) e do SIDCAM; observa-se que as curvas do SIDCAM consideraram níveis maiores que às de Leme Engenharia (2012), com valores de pico na ordem de 3,7 e 3,4 m, respectivamente. No entanto, na Figura 88, nota-se que a entrada da maré no canal

Tucunduba se dá no primeiro trecho, ou seja, o remanso ocasionado pelo pico da maré alta tem alcance até a rua São Domingos (estaca 0), portanto, a amplitude de 0,30 m de diferença é justificada pelas diferenças de dados das curvas marégraficas.

Tabela 13 – Níveis máximos de água para os cenários C1 e C2.

Estaca	Localização	C1 - N.A máx(m)	C2 - N.A máx(m)	Transbordo
4	canal Vileta	4,5	4,4	SIM
3	canal Cipriano Santos	4,4	4,3	SIM
2	canal Gentil	4,18	4,2	SIM
1	canal Mundurucus	4,02	4,02	SIM
0	rua São Domingos	3,87	3,95	NÃO
-1	rio Guamá	3,4	3,7	SIM

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

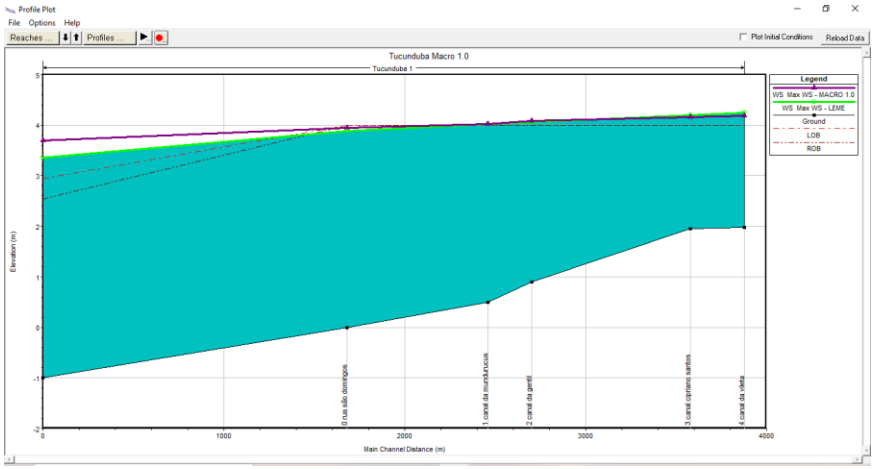
Verifica-se que em ambos os cenários houve o transbordo do canal, tanto para a marginal esquerda quanto direita, entretanto a diferença entre os níveis de transbordo de Leme Engenharia (2012) e SIDCAM foi considerada pequena, com médias 0,27 m (LEME ENGENHARIA, 2012) e 0,23 m (SIDCAM) acima da berma do canal.

Portanto, considerando um fator de segurança para eventos com tempo de retorno de 50 anos e que a falha do canal ocasionará uma lâmina de transbordo 0,23 m acima da berma, conclui-se que a geométrica do canal dimensionado pelo SIDCAM é eficaz na condução hidrodinâmica do escoamento, mesmo para canais onde há remanso.

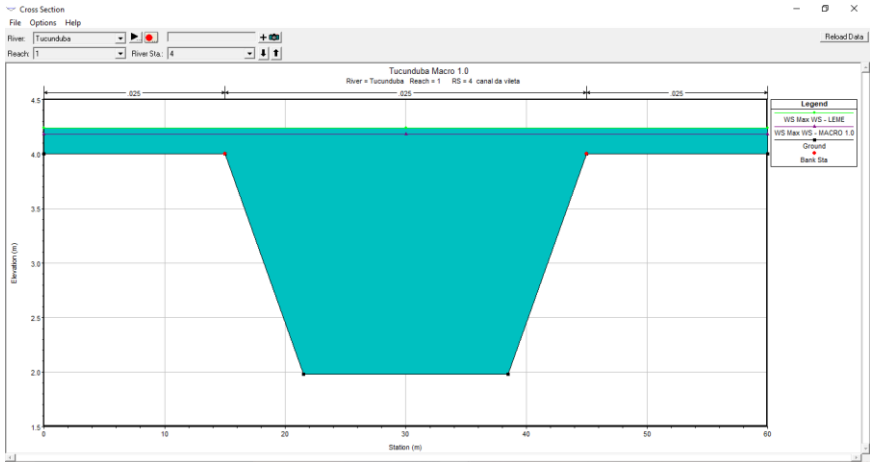
O canal projetado lidou com o amortecimento dos efeitos da redução das descargas de picos; essa consideração permitiu a economia no dimensionamento da seção do canal.

Figura 88 – Resultados da simulação hidrodinâmica de C1 e C2 nos perfis transversais e longitudinal do Tucunduba.

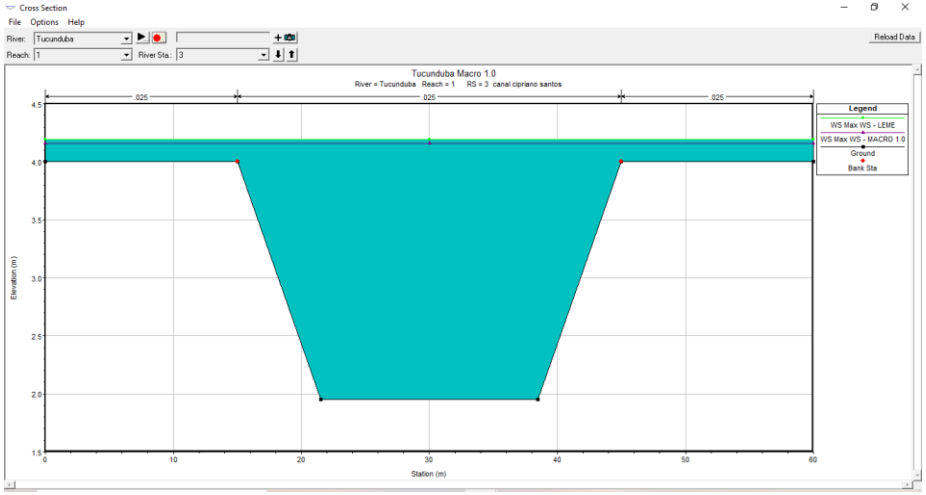
a) Perfil longitudinal



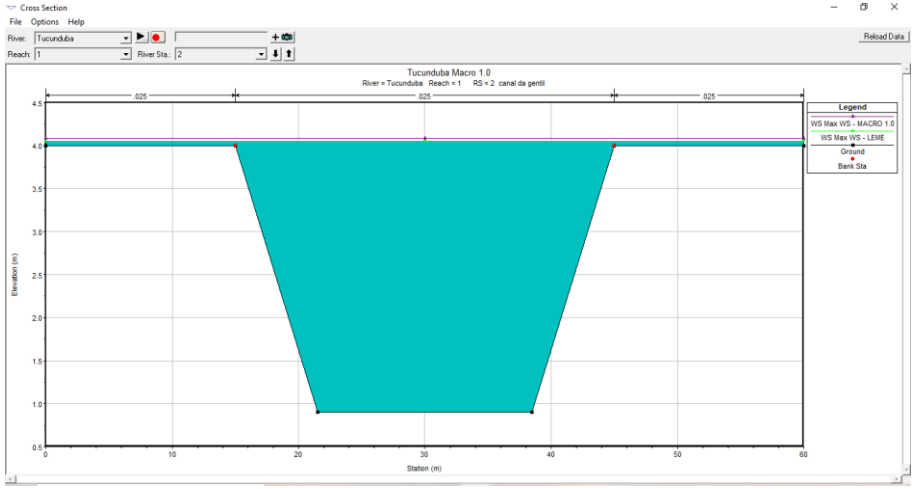
b) Estaca 4



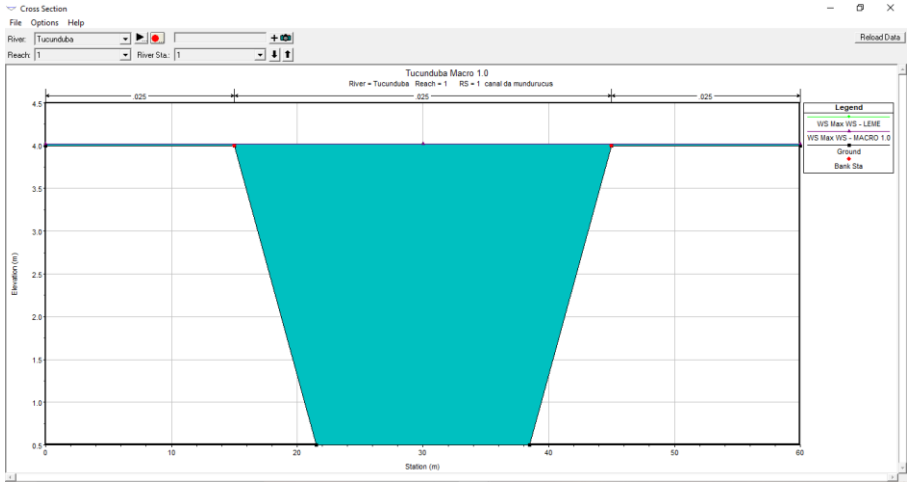
c) Estaca 3



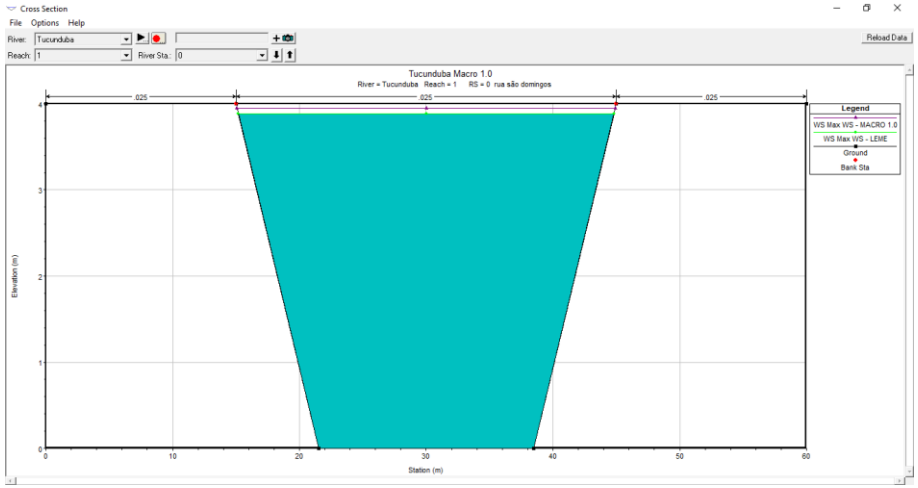
d) Estaca 2



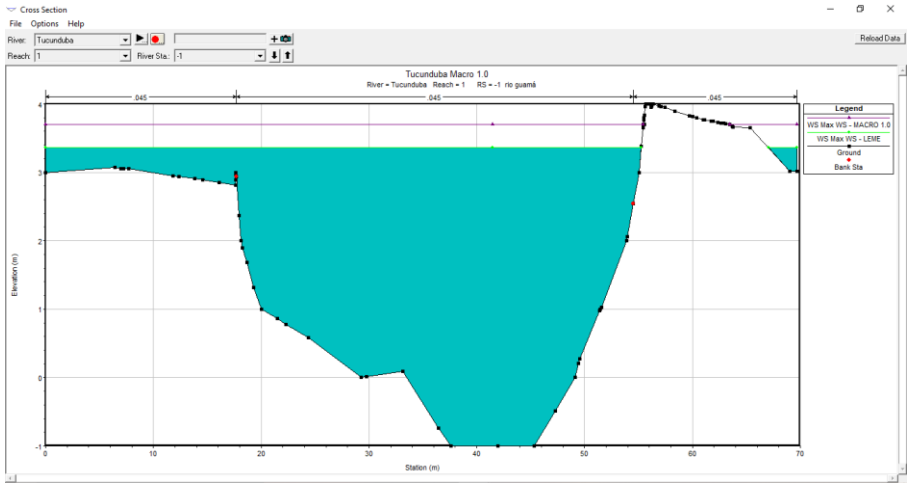
e) Estaca 1



f) Estaca 0



g) Estaca -1



Fonte: Software HEC-RAS (2021).

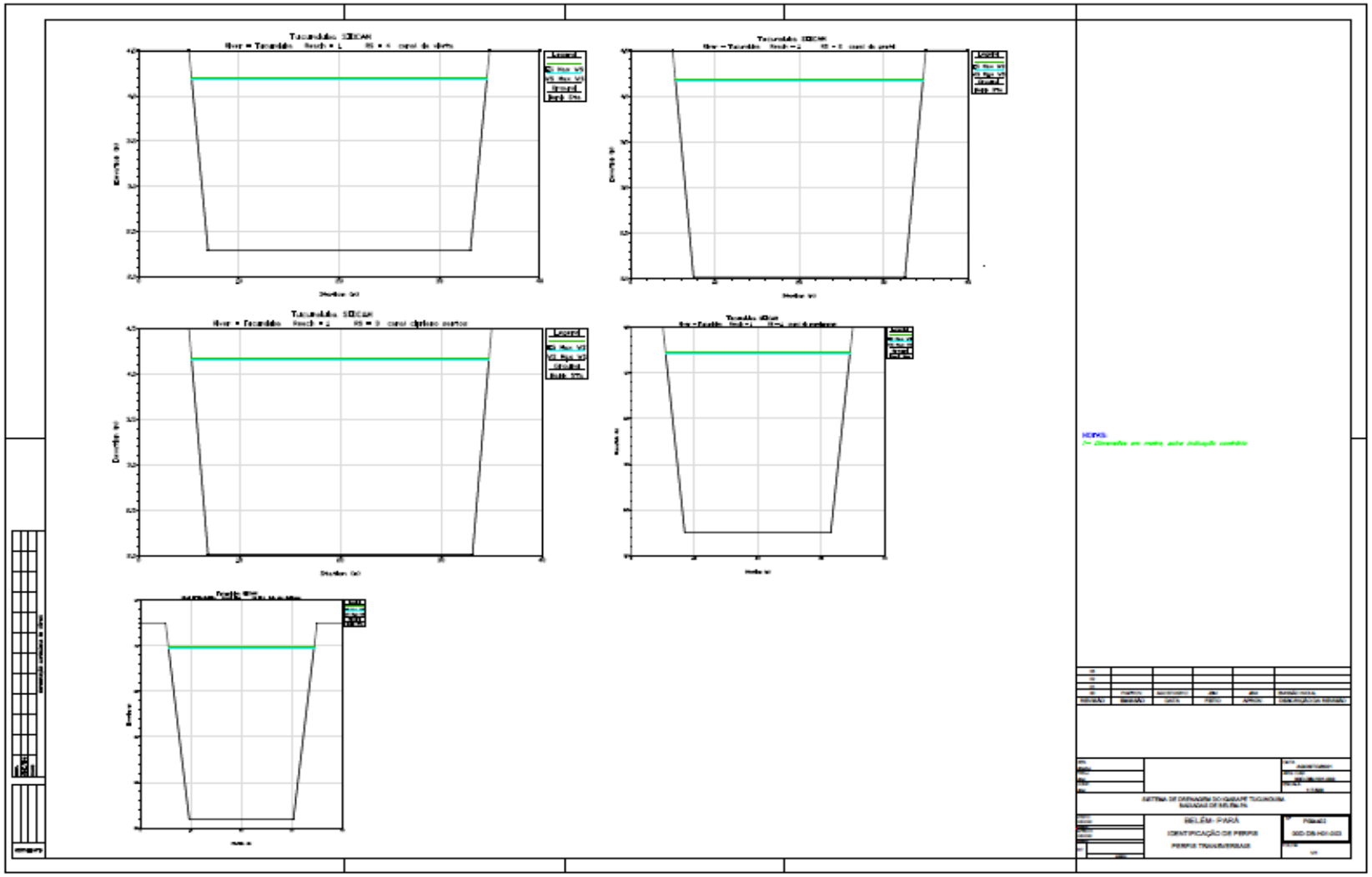
4.2.3.2 Módulo Gráfico

No último módulo do SIDCAM, o módulo gráfico, foram geradas as plantas dos perfis longitudinal e transversais do canal projetado pelo SIDCAM. A partir dos arquivos geométricos do HEC-RAS, foi realizada a importação de dados para o software AutoCAD, dando origem a dois arquivos “.dxf”, conforme apresentado nas Figura 89 e Figura 90.

O arquivo que dará origem às seções transversais (Figura 90) será inicialmente composto pelas seções transversais correspondentes às estacas estabelecidas no diagrama unifilar de MACRO 1.0. Caso o projetista deseje aumentar o número de estacas, é possível realizar, no HEC-RAS, a interpolação das seções entre as estacas e posteriormente importá-las para o AutoCAD.

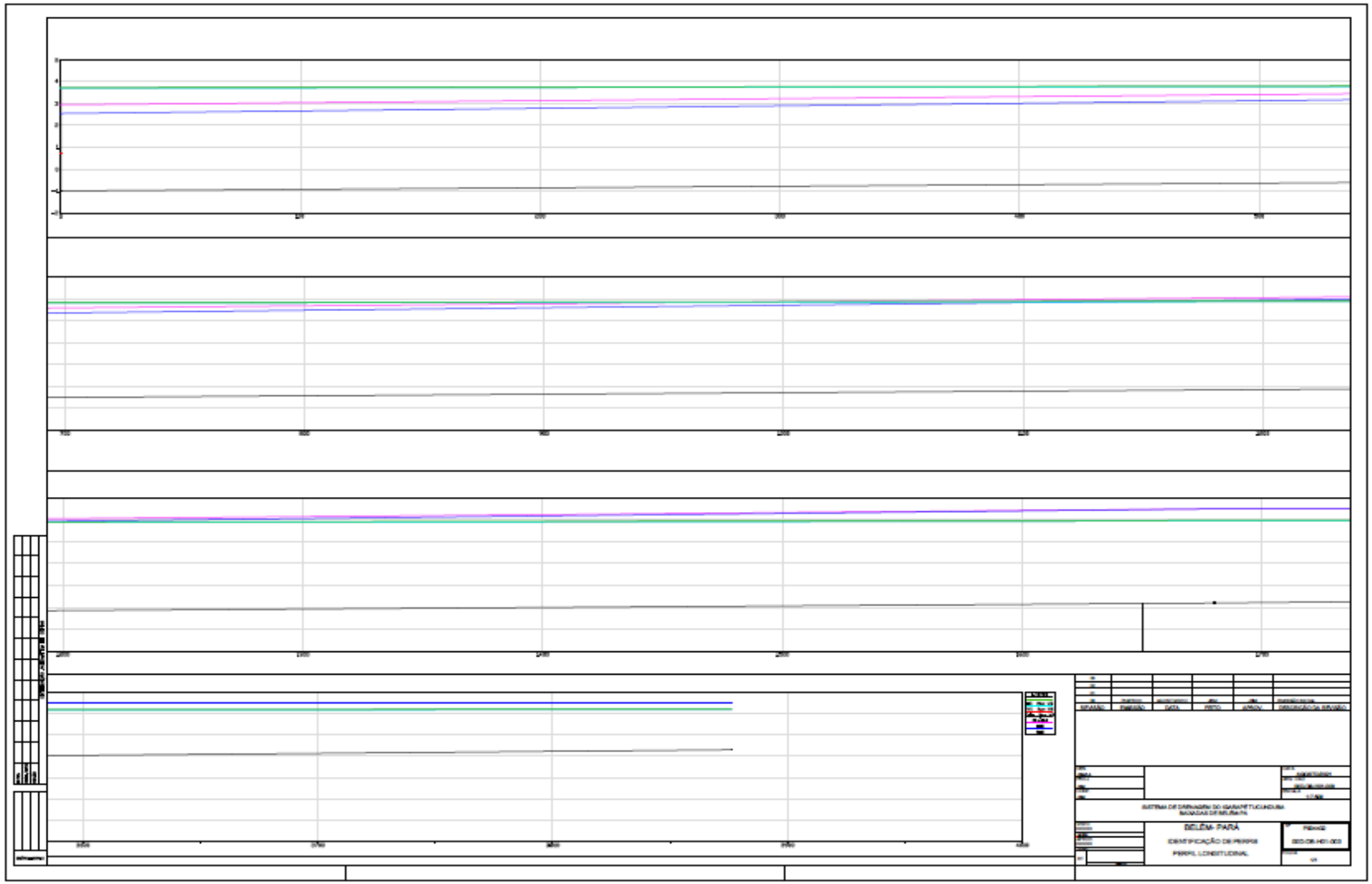
O arquivo que dará origem ao perfil longitudinal (Figura 90) deve ser editado no HEC-RAS, em relação às linhas de grade, cores, escala etc. Essa edição inicial pode ser alterada no AutoCAD, conforme necessidade do projetista.

Figura 89 – Perfis tranversais do canal projetado em “*.dwg”.



Fonte: Software AutoCAD (2022).

Figura 90 – Perfil longitudinal do canal projetado em “*.dwg”.



Fonte: Software AutoCAD (2022).

4.2.4 Fase 4: Análise de inovação e confiabilidade do sistema computacional SIDCAM

4.2.4.1 Análise de confiabilidade do sistema

Diferente da avaliação de modelos hidrológicos, em que se tem um elevado nível de incertezas e simplificações assumidas, a validação de modelos hidráulicos é um processo menos complexo, uma vez que o número de variáveis de decisão é geralmente menor (OLIVEIRA *et al*., 2016).

O parâmetro nível d'água, ao longo do canal (m), foi utilizado para avaliar a confiabilidade do SIDCAM, considerando a aplicação dos testes estatísticos em dois cenários de simulação hidrodinâmica do canal Tucunduba.

Como mencionado no item 3.3.1 da metodologia, no cenário C1 a simulação foi realizada considerando os dados hidrológicos e hidráulicos do projeto de Leme Engenharia (2012), como *inputs* ao HEC-RAS. O cenário C1 foi utilizado como referência para a avaliação do SIDCAM e comparação quantitativa com os resultados dos cenários C2.

O cenário C2 foi construído para avaliar a eficiência hidráulica do canal dimensionado pelo SIDCAM, já que este foi integralmente dimensionamento pelo SIDCAM.

Os níveis d'água ao longo do canal foram avaliados por estaca do projeto, no sentido montante para jusante, na ordem: estaca 4 (E4); estaca 3 (E3), estaca 2 (E2); estaca (E1) e estaca 0 (E0).

Os resultados da validação do sistema são apresentados na Figura 91 e na Tabela 14, sendo nesta apresentado resumo dos valores das funções objetivos e dos erros percentuais para o cenário validado C2. A maioria dos resultados foi classificada como "Muito Bom", com apenas três pontos de dados (PBIAS %) na classe "Bom" (Tabela 14). Essas pequenas divergências nas estacas mais a jusante do canal possivelmente ocorreram devido às diferenças de nível entre os marégrafos utilizados por Leme Engenharia (2012) e pelo SIDCAM, assim como devido à desordem de posicionamento quanto à coincidência dos picos dos hidrogramas com o pico do marégrafo, o que, segundo Leme Engenharia (2012), leva à diferença quando comparado aos dados observados no projeto.

As estacas E4 e E3 apresentaram os melhores resultados de desempenho, ou seja, os níveis d'água foram mais próximos aos de C1, isto é, percebe-se que as duas estacas a montante apresentaram maior correspondência ao escoamento governado majoritariamente pelos hidrogramas de projeto, sem curva de remanso. Assim, reitera-se que a influência do remanso nas estacas mais a jusante (E2, E1 e E0), em que o alcance das águas de maré do rio Guamá é essencial para definir o desempenho do escoamento em determinado ponto do canal.

Tabela 14 – Resumo dos valores das funções objetivo e erros médios e máximos para N.A.

Cenário	Testes	Estaca E4	Estaca E3	Estaca E2	Estaca E1	Estaca E0
C2	NSE	1.00	1.00	0.98	0.98	0.97
	RMSE	0.04	0.04	0.15	0.14	0.16
	PBIAS (%)	3.19	3.47	12.00	11.49	13.13

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

Na Figura 91, verifica-se um excelente ajustamento de curvas em relação aos níveis d'água de C1, especialmente para os níveis de pico, fato corroborado pelos coeficientes apresentados na Tabela 14.

Nas estacas E4 e E3, o ajuste da curva C2 foi praticamente coincidente com os níveis de C1 e observou-se uma pequena disformidade nos níveis de pico e na descida das curvas. Os resultados das estacas E4 e E3 refletiram um erro muito baixo, com amplitude entre -25% a 15%. Os maiores erros foram observados em E4, nas duas primeiras horas de início da simulação (Figura 91).

Na estaca E2, se iniciou um atraso mais acentuado na descida da curva C2 em relação a C1. O mesmo atraso pode ser observado nas estacas E1 e E0, porém, em todos os casos, os erros permaneceram acima de -25%. O aumento dos erros negativos indica uma superestimação dos níveis de descida da curva C2.

Nas três primeiras horas iniciais e finais das simulações foram observados os maiores erros percentuais nas estacas E2, E1 e E0. Isso é justificado pelos baixos volumes de contribuição dos hidrogramas de escoamento superficial, nos instantes iniciais e finais da tormenta, ou seja, nesses instantes, os níveis d'água ao longo do canal Tucunduba estão sendo governados pela curva de remanso originária das águas de maré do rio Guamá, resultando em grandes erros, por volta de 100 % nos instantes iniciais (E1 e E0) e 70% nos finais (E2). Portanto, nessas três primeiras horas de simulação o desempenho do modelo foi considerado "Insatisfatório".

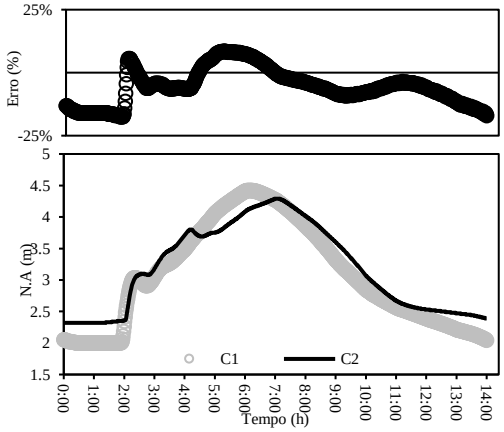
No entanto, ao contrário dos resultados observados nas três primeiras horas de simulação para as estacas E2, E1 e E0, os instantes de pico e de descida das curvas apresentaram erros mais distribuídos, ocorrendo uma pequena antecipação no início das descidas. Logo, conclui-se que os níveis observados nas três horas iniciais e finais de simulação representam muito mais os níveis da curva de remanso do que os níveis gerados pelo escoamento no canal.

É importante reforçar que a curva marégrafica utilizada por Leme Engenharia (2012), em seu projeto, e, portanto, considerada para C1, não teve sua fonte de dados divulgada. O marégrafo de Leme Engenharia (2012) difere, em média, entre 0,5 e 1,0 m dos valores apresentados pela Marinha do Brasil para a estação do Porto de Belém, a qual foi utilizada como base para C2.

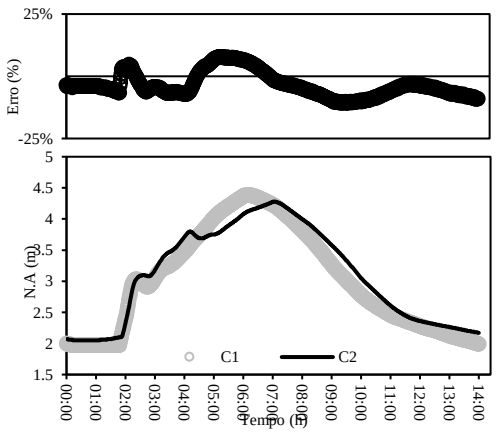
Assim, conclui-se que os resultados da validação do cenário C2 e, portanto, do SIDCAM, foram considerados satisfatórios. O sistema foi capaz de reproduzir bem os níveis de pico e nas descidas das curvas, no entanto ocorreram grandes erros nos instantes iniciais e finais das simulações, quando comparados a C1 (Figura 91).

Figura 91 – Níveis d'água observados e calculados para os cenário C1 e C2 e os erros em função do tempo e dos valores observados.

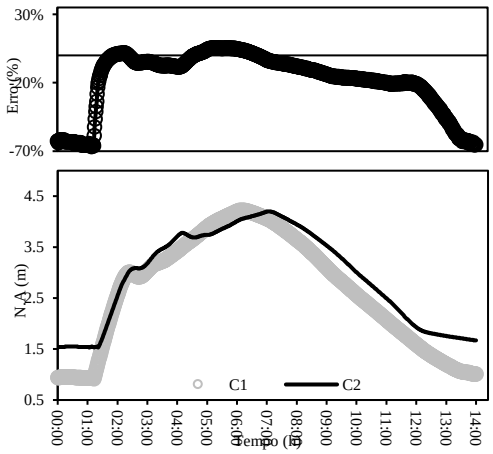
Estaca - E4



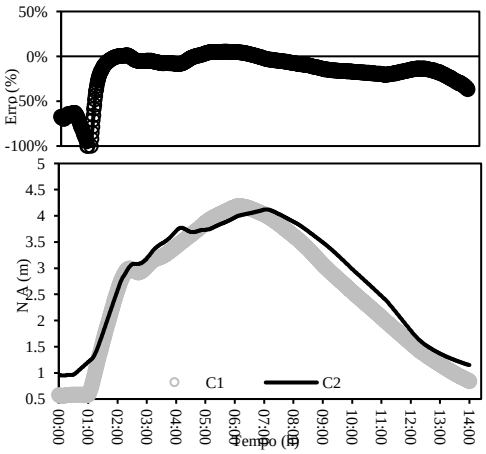
Estaca - E3



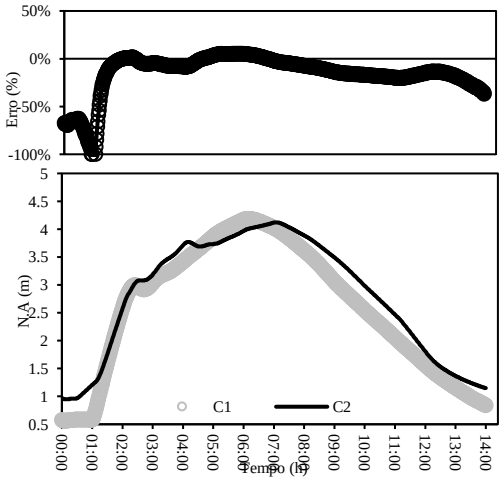
Estaca - E2



Estaca - E1



Estaca - E0



Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

4.2.4.2 Análise de inovação do sistema

O Sistema Integrado para o Dimensionamento de Canais de Macrodrenagem – SIDCAM foi desenvolvido para facilitar a execução dos processos envolvidos na elaboração de um projeto de macrodrenagem. Contudo, nessa primeira versão, não foi possível englobar todos os processos, devido à magnitude dos recursos que seriam necessários; no entanto, focou-se na automação de etapas do projeto que não são contempladas pelos atuais softwares, ou seja, no preenchimento de “lacunas” de etapas do processo que poderiam ser integradas à softwares já consagrados.

Para tanto, primeiramente foram identificadas as “lacunas” dos principais softwares utilizados no desenvolvimento de projetos de drenagem (Quadro 5). As principais “lacunas” observadas referem-se à carência de dados de entradas ou *inputs* dos modelos, pois são poucos os modelos que contam com banco de dados de *inputs*, especialmente banco de dados de níveis de marés. Outra “lacuna” latente é a produção de *inputs* para modelagem hidrodinâmica que, apesar de alguns modelos produzirem, isso ocorre de forma dissociada e sem integração com as etapas do dimensionamento.

Portanto, para garantir a evolução do atual cenário, foram desenvolvidas as ferramentas de geração de dados e integração apresentadas no Quadro 6.

Quadro 7 – Ferramentas de inovação do sistema proposto.

Modelagem aplicada a drenagem urbana										
Pacotes Computacionais	Dimensionamento de Canais		Peças gráficas de canais - perfis editáveis		Integração com outros *softwares*	Banco de dados de *inputs* hidrológicos		Produção de *inputs* para modelagem hidrodinâmica		
	Mod. Hidrológica	Mod. Hidrodinâmica	Long.	Trasnv.		Curvas IDF	Níveis de Marés	Geo.	Hidro.	Hidra.
Internacionais										
InfoWorks	✓	✓			✓				✓	
SOBEK	✓	✓	✓	✓	✓				✓	
MOUSE	✓	✓			✓			✓	✓	
SWMM	✓	✓			✓			✓	✓	
HEC-RAS		✓			✓			✓		✓
Nacionais										
ABC	✓					✓			✓	
IPH	✓					✓			✓	
MODCEL	✓	✓							✓	
UFC 8					✓				✓	
SISTEMA PROPOSTO	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Elaborado pelo autor (2021).

No Quadro 6 é possível observar as principais diferenças e o potencial de inovação do SIDCAM, como o desenvolvimento de funções para geração de peças gráficas editáveis, os bancos de dados de *inputs* de precipitação e marégrafos e a geração de arquivos *inputs* para modelagem hidrodinâmica do canal de projeto. Além das potenciais ferramentas de inovação, a abordagem de integração entre as etapas de dimensionamento e representação gráfica distingue o SIDCAM dos demais

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento do sistema SIDCAM é uma contribuição para agilizar os projetos de canais de macrodrenagem aperfeiçoados, tendo módulos específicos para o dimensionamento de canais e produção de peças gráficas, bem como outro módulo hidrodinâmico para previsão de falhas de projetos, o que é uma contribuição de medida de segurança em relação aos atuais métodos empregados no dimensionamento de canais.

O uso das ferramentas de aplicação do Java e Google Earth facilitou o desenvolvimento do sistema SIDCAM por meio de uma interface amigável, que permitiu a desenvolvimento das funções dos módulos hidrológico e hidráulico.

No módulo hidrológico do SIDCAM é possível construir um diagrama unifilar da rede hidrográfica da bacia, possibilitando a espacialização e parametrização dos dados de entrada do modelo, viabilizando a projeção de um canal com até nove sub-bacias de contribuição, isto é, fornece até nove hietogramas e hidrogramas de projeto.

No módulo hidráulico de SIDCAM são encontradas as ferramentas para o dimensionamento geométrico de um canal macrodrenagem, além de gráficos de coincidência de picos de vazão e maré.

Como *backgound* dessas ferramentas, o SIDCAM possui os diretórios de importação de curvas IDF e marégraficas. Os diretórios são alimentados por dois bancos de dados com informações de 165 municípios e 334 estações marégraficas do território nacional.

Por meio de ferramentas de integração com softwares externos, foi possível realizar a integração do modelo MACRO 1.0, inteiramente desenvolvido na tese, com os módulos hidrodinâmicos e gráfico e, portanto, constituir o SIDCAM. Os arquivos de saída do MACRO 1.0 foram concebidos para serem importados aos módulos hidrodinâmico e gráfico; o modelo se mostrou eficaz quanto à integração com o HEC-RAS e AutoCAD, permitindo a desenvolvimento de gráficos dos níveis d'água ao longo do canal, bem como das seções geométricas transversais e longitudinal.

É importante ressaltar que a simulação do projeto de referência utilizado como estudo de caso demonstrou a funcionalidade e confiabilidade do sistema SIDCAM, apesar da tendência de subestimação dos tempos de concentração em média em -10%, os hidrogramas gerados pelo SIDCAM foram considerados satisfatórios, pois não impactaram significativamente nas dimensões do canal projetado. No entanto, a

confiabilidade dos resultados simulados pelo SIDCAM, assim como de qualquer sistema, depende da precisão dos dados alimentados no sistema pelo projetista.

Na análise de sensibilidade do sistema foi observado baixo erro percentual entre o cenário simulado e o observado no estudo de caso. Os coeficientes de confiabilidade se apresentaram satisfatórios, com classificação de ajuste entre “Muito Bom” e “Bom”, corroborando para a efetividade da ferramenta.

O SIDCAM se mostrou eficaz e pode ser facilmente aplicado com poucos recursos computacionais. As curvas de níveis d’água simuladas apresentaram grandes diferenças quando relacionadas às curvas marégraficas do diretório de importação do SIDCAM. Isso pode indicar que o método utilizado no desenvolvimento dos marégrafos esteja superestimando os níveis, o que pode ser corrigido pelo projetista, substituindo a importação de curvas marégraficas por dados medidos *in loco*.

Dessa forma, conclui-se que o modelo desenvolvido é uma ferramenta que permite a execução de partes das etapas de um projeto de macrodrenagem, não somente no dimensionamento e representação gráfica, mas, principalmente, na verificação de potenciais falhas de projeto, evitando gastos extras e possíveis incidentes. Deve-se ressaltar que o modelo proporcionará uma redução de tempo e custo de execução dos projetos, bem como conferirá agilidade e segurança à tomada de decisão de gestores públicos e técnicos. Assim, é uma contribuição ao atual estado da técnica utilizada no projeto de canais de drenagem de áreas urbanas.

6 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O sistema computacional integrado de dimensionamento e representação gráfica de canais de macrodrenagem SIDCAM foi desenvolvido para integrar os processos envolvidos nos projetos de dimensionamento e produção de perfis gráficos de canais de macrodrenagem, a fim de otimizar a produtividade, precisão, confiabilidade, qualidade e redução do tempo de execução dos projetos.

Apesar de atender aos objetivos estabelecidos para a Tese, ainda podem ser agregadas novas funcionalidades ao sistema desenvolvido, naturalmente de acordo com a funcionalidade específica esperada por cada projetista. De maneira geral, é possível intuir alguns possíveis avanços na atual versão do SIDCAM, como a modelagem gráfica em modelo 3D, mais fácil de assimilar e mais fiel ao produto.

Assim, em trabalhos futuros é sugerida a avaliação da influência no desempenho do sistema com o uso de tecnologia BIM, por meio da construção de ferramenta de integração entre o HEC-RAS e software de construção gráfica em BIM.

Também é recomendado o desenvolvimento de ferramentas integradas voltadas a elaboração de orçamentos, visando a geração de planilhas orçamentárias e cronogramas físico-financeiro.

Pelo exposto, o avanço no sistema desenvolvido (SIDCAM) é factível, porém não deve ser considerado como final, mas sim, como ponto de partida para a continua evolução das ferramentas e softwares que venham a melhorar progressivamente as atividades dos técnicos que elaboram e analisam projetos de canais de macrodrenagem, podendo, ainda, ter a filosofia de integração aplicada em projetos de outras áreas da engenharia.

REFERÊNCIAS

ABC6: Análise de bacias complexas. Versão: 1.35 de 10/05/2019. São Paulo> USP, 2019. Disponível em: http://labsid.eng.br/software.aspx?id=8. Acesso em: 17 maio 2019.

AFSHARI, S. *et al*. Comparison of new generation low-complexity flood inundation mapping tools with a hydrodynamic model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 556. p. 539-556. 2018. Disponível em: https://daneshyari.com/article/preview/8895154.pdf. Acesso em: 24 fev. 2022.

ANA; CPRM. **Relato do planejamento da RHNR e a definição das estratégias de implementação para os próximos anos (5 anos)**. Brasília, DF, 2017. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/22172/3/RHNR_Diretrizes_Implementacao.pdf. Acesso em: 7 mar. 2022.

ARONICA, G.; CANNAROZZO, M. Studying the hydrological response of urban catchments using a semi-distributed linear non-linear model. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 238, n. 1-2, p. 35-43, Nov. 2000.

ASHLEY, R. M. *et al*. Adaptable Urban Drainage: Addressing Change in Intensity, Occurrence and Uncertainty of Stormwater (AUDACIOUS). **Built Environment**, New York, v. 33, n. 1, p. 70-84, 2007.

BABAEI, S.; GHAZAVI, R.; ERFANIAN, M. Urban flood simulation and prioritization of critical urban sub-catchments using SWMM model and PROMETHEE II approach. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 105, p. 3-11, Jun. 2018.

BACH, P. M. *et al*. A critical review of integrated urban water modelling e Urban drainage and beyond. **Environmental Modelling and Software**, Amsterdam, v. 54, p. 88-107, 2014.

BARISON, M. B. **Introdução de Modelagem da Informação da Construção (BIM)**: uma contribuição para formação do projetista. 2015. 390 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

BEN KHALFALLAH, C.; SAIDI, S. Spatiotemporal floodplain mapping and prediction using HEC-RAS - GIS tools: Case of the Mejerda river, Tunisia. **Journal of African Earth Sciences**, Oxford, v. 142, p. 44-51, Jun. 2018.

BERNE, A. *et al*. A preliminary investigation of radar rainfall estimation in the Ardennes region and a first hydrological application for the Ourthe catchment. **Natural Hazards and Earth System Science**s, Berlin, v. 5, n. 2, p. 267-274, 2005.

BIGGS, N. *et al.* **Graph Theory**: 1736-1936. Oxford: Clarendon Press, 1986.

BRIGHENTI, T. M. *et al.* Calibração hieráquica do modelo swat em bacia hidrográfica catarinense. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 53-64, 2016.

BUTLER, D.; DAVIES, J. W. **Urban Drainage**. 2nd. ed. Londres: Spon Press, 2011.
CAMPANA, N.; TUCCI, C. E. M. Predicting floods from urban development scenarios: Case study of the Dilúvio basin, Porto Alegre, Brazil. **Urban Water**, Oxford, v. 3, n. 2, p. 113-124, 2001.

CASTELO, A. M.; MARCELLINI, L.; VIANA, I. A construção digital parte 2. **Blog do IBRE**. Rio de Janeiro: IBRE/FGV, 23 out. 2018. Disponível em: https://blogdoibre.fgv.br/posts/construcao-digital-parte-2. Acesso em: 21 out. 2020.

CASTRO, M. A. H.; BARBOSA, J. M. C.; BEZERRA, A. A. Uma interface gráfica entre o AutoCAD e o SWMM para projetos de redes de drenagem urbana. *In*: SEMINARIO IBEROAMERICANO DE REDES DE AGUA Y DRENAJE, 15., 2017, Bogotá. **Anais** […]. Bogotá: Universidad de los Andes, 2017.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MA YS, L. W**. Applied Hydrology**. New York: Mc Graw-Hill, 1988.

CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics**. New York: Mc Graw-Hill, 1959.

CHU, X.; STEINMAN, A. Event and continuous hydrologic modeling with HEC-HMS. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Virginia, v. 135, n. 1, p. 119-124, Feb. 2009.

CIRILO, J. A. *et al*. **Hidráulica aplicada**. Porto Alegre: UFRGS, 2003.

COSTA, M. E. L.; MITSUKO, T. T.; KOIDE, S. Modelagem hidrológica e hidráulica usando o SWMM - Storm Water Management Model na bacia urbana do Riacho Fundo I - Distrito Federal. **Research, Society and Development**, São Paulo, v. 10, n. 1, e6010111458, 2021.

DELETIC, A. *et al*. Assessing uncertainties in urban drainage models. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 42-44, p. 3-10, 2012.

DELTARES SYSTEMS. **SOBEK**: Hydrodynamics, rainfall, runoff and real time control: user manual. Delft: Deltares, 2019. Disponível em: https://content.oss.deltares.nl/delft3d/manuals/SOBEK_User_Manual.pdf. Acesso em: 24 fev. 2020

DHI. **MOUSE**: Runoff Reference manual. Dinamarca: DHI, 2017. Disponível em: https://manuals.mikepoweredbydhi.help/2017/Cities/MOUSERunoffReference.pdf. Acesso em: 24 fev. 2020.

EMMANUEL, I. *et al*. Influence of rainfall spatial variability on rainfall-runoff modelling: benefit of a simulation approach?. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 531, n. 2, p. 337-348, Dec. 2015.

FADHEL, S.; RICO-RAMIREZ, M. A.; HAN, D. Uncertainty of Intensity–Duration–Frequency (IDF) curves due to varied climate baseline periods. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 547, p. 600-612, 2017.

FAURÈS, J.M. *et al*. Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 173, n. 1-4, p. 309-326, 1995.

FIGUEIREDO, G. C. A.; OLIVEIRA, R. S. **Aplicação do modelo computacional SWMM para simulação de uma rede de drenagem na cidade de Benevides**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade da Amazônia, Belém, 2011.

GARCIA, J. I. B. **Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia hidrográfica do Arroio Cancela**. 2005. 169 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

GARUMA, G. F. Review of urban surface parameterizations for numerical climate models. **Urban Climate**, Amsterdam, v. 24, p. 830-851, Jun. 2018.

GHOSH, B.; PEKKAT, S. A critical evaluation of measurement induced variability in infiltration characteristics for a river sub-catchment. **Measurement**, London, v. 132, p. 47-59, Jan. 2019.

GREEN, W. H.; AMPT, G. A. Studies on soil physics-1. The flow of air and water through soils. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 4, n. 1, p. 1-24, 1911.

HELLMERS, S. *et al*. Multiple linked sustainable drainage systems in hydrological modelling for urban drainage and flood risk management. **Journal of Flood Risk Management**, New York, v. 11, p. S5-S16, Jan. 2018.

HICKS, F. E.; PEACOCK, T. Suitability of HEC-RAS for flood forecasting. **Canadian Water Resources Journal**, Quebec, v. 30, n. 2, p. 159-174, 2005.

HOLBACH, A. *et al*. Environmental water body characteristics in a major tributary backwater of the unique and strongly seasonal Three Gorges Reservoir, China. **Environmental Science**: Processes & Impacts, Cambridge, v. 17, p. 1641-1653, 2015.

HORRITT, M. S.; BATES, P. D. Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 268, p. 87-99, 2002.

IPT. **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. Brasília, DF: IPT, 2007.

KAUR, H.; GARG, P. Urban sustainability assessment tools: a review. **Journal of Cleaner Production**, Oxford, v. 210, p. 146-158, 2019.

KUMAR, A.; PICKLES, D. Application of InfoWorks CS Software for the Hydraulic Design of HATS Stage 2 Sewage Conveyance System in Hong Kong, China. *In*: IAHR WORLD CONGRESS, 35., 2013. Chengdu. **Proceedings** […]. Chengdu: Tsinghua University Press, 2013.

LEME ENGENHARIA. **Projeto do Sistema Macrodrenagem da Bacia do Tucunduba Belém**. Belém: SEIDURB, 2012.

LIEW, S. C.; RAGHAVAN, S. V.; LIONG, S. How to construct future IDF curves, under changing climate, for sites with scarce rainfall records? **Hydrological Processes**, Chichester, v. 28, n. 8, p. 3276-3287, Apr. 2014.

MACEDO, E. P. Análise comparativa dos manuais e orientações técnicas relativas ao dimensionamento de sarjetas e bocas de lobo das capitais brasileiras. *In*: ENCONTRO NACIONAL DAS ÁGUAS, 13., 2020, Porto Alegre. **Anais** […]. Porto Alegre: ABRHidro, 2020.

MACHADO, F. A.; RUSCHEL, R. C. Soluções integrando BIM e Internet das Coisas no ciclo de vida da edificação: uma revisão crítica. **Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, v. 9, n. 3, p. 204-222, 2018.

MAGALHÃES, R. F.; DANILEVICZ, A. M. F.; SAURIN, T. A. Reducing construction waste: a study of urban infrastructure projects. **Waste Management**, New York, v. 67, p. 265-277, Sep. 2017.

MASCARENHAS, F.; MIGUEZ, M. G. Urban flood control through a mathematical cell model. **Water International**, Philadelphia, v. 27, n. 2, p. 208-218, 2002.

MCCUEN, R. **Hydrologic analysis and design**. New Jersey: Prentice Hall, 1998.

MELLER, A. **Simulação hidrodinâmica integrada de sistemas de drenagem urbana em Santa Marta - RS**. 2004. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MELLO, C. R. *et al.* Modelos matemáticos para predição da chuva de projeto para regiões do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 1, p. 121-128, abr. 2003.

MERO, F. *et al.* **Análise das precipitações intensas na cidade de São Paulo**. São Paulo: Centro Tecnológico de Hidráulica, 1979. (Comunicação técnica; 7).

MIGNOT, E.; LI, X.; DEWALS, B. Experimental modelling of urban flooding: A review. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 568, p. 334-342, 2019.

MONTEIRO, L. R. *et al*. Simulação da onda superficial provocada pelo fechamento de comportas utilizando uma aproximação inercial da Equação de Saint-Venant. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 927-936, 2015

MORIASI, D. N. *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, Michigan, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

OCHOA-RODRIGUEZ, S. *et al*. Impact of spatial 10 and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: a multi-catchment investigation. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 531, p. 389-407, 2015.

OGIE, R. I. *et al*. Managing hydrological infrastructure assets for improved flood control in coastal mega-cities of developing nations. **Urban Climate**, Amsterdam, v. 24, p. 763-777, 2018.

OLIVEIRA, F. A. *et al*. Uso de modelo hidrodinâmico para determinação da vazão a partir de medições de nível. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 707-718, out./dez. 2016.

OLIVEIRA, L. F. C. *et al*. Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para algumas localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal**. Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 35, n. 1, p. 13-18, jan./abr. 2005.

OLIVEIRA, M. *et al*. **Curso Capacitação Básica em Defesa Civil**. Florianópolis: CAD UFSC, 2012.

PEDERSEN, J. T.; PETERS, J. C.; HELWEG, O. J. Hydrographs by single linear reservoir model. **Journal of Hydraulics Division**, California, v. 106, n. 5, p. 837-852, May 1980.

PEREIRA, J. A. R.; SOARES, J. M. **Rede coletora de esgoto sanitário, projeto, construção e operação**. Belém: NUMA/UFPA, 2006.

PFAFSTETTER, O. **Chuvas intensas no Brasil**. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Obras de Saneamento, 1982.

PINTO, F. A. *et al*. Equações de chuvas intensas para algumas localidades do Estado de Minas Gerais**. Revista Engenharia Agrícola**, São Paulo, v. 16, p. 91-104, 1999.

PONCE, V. M.; CHANGANTI, P. V. Muskingum-Cunge method with variable parameters. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 162, n. 3-4, p. 433-439, Nov. 1994.

PONTES, P. R. M. *et al*. MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v. 94, p. 1-20, Aug. 2017.

PORTO, R. L. L. *et al*. Planilha Acquante XL. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. **Anais** […]. João Pessoa: ABRHidro, 2005.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4. ed. São Paulo: USP, 2006.

ROLIM, P. A. M. *et al.* Uso da modelagem hidrológica para calibração de curva-chave de vazão em rio amazônico com efeito de remanso. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracaju, v. 11, n. 5, p. 273-283, 2020.

SALVAN, L. *et al*. Drainage system and detailed urban topography: towards operational 1D-2D modelling for stormwater management. **Procedia Engineering**, Missouri, v. 154, p. 890-897, Dec. 2016.

SCHELLART, A. N. A; SHEPHERD, W. J.; SAUL, A. J. Influence of rainfall estimation error and spatial variability on sewer flow prediction at a small urban scale. **Advances in Water Resources**, New York, v. 45, p. 65-75, Sep. 2012.

SCHILLING, W. Rainfall data for urban hydrology: what do we need?. **Atmospheric Research**, Amsterdam, v. 27, n. 1-3, p. 5-21, Dec. 1991.

SEGOND, M. L. *et al*. Simulation and spatio-temporal disaggregation of multi-site rainfall data for urban drainage applications. **Hydrological Sciences Journal**, London, v. 52, n. 5, p. 917-935, Aug. 2007.

SHAH, S. M. S.; O'CONNELL, P. E.; HOSKING, J. R. M. Modelling the effects of spatial variability in rainfall on catchment response. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 175, p. 89-111, 1996.

SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by unit-graph method. **Engineering News-Record**, New York, v. 108, p. 501-505, 1932.

SILVA, D. D. *et al.* Equações de Intensidade-Duração-Frequência da precipitação pluvial para o Estado de Tocantins. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v.11, p. 7-14, Jan. 2003.

SILVA, D. D. *et al*. Estimativa e espacialização dos parâmetros da equação de intensida-duração-freqüência da precipitação para os Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. **Revista Engenharia Agrícola**, São Paulo, v. 18, p. 11-21, 1999.

SNIS. **TAC**: Termo de ajustamento de conduta, celebrado pela Prefeitura Municipal de Patos de Minas e Superintendência Regional de Meio Ambiente do Triangulo Mineiro e Alto Paranaíba. Patos de Minas, 2019.

SNYDER, F. F. Synthetic unit-graphs. **Transactions, American Geophysical Union**, Washington, DC, v. 19, n. 1, p. 447-454, 1938

SOIL CONSERVATION SERVICE. [Draft]. **Structure site analysis computer program DAMS2 (interim version)**. Washington, DC: SCS, 1982.

SOUZA, R. O. M. *et al*. Equações de chuvas intensas para o estado do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 9, p. 999-1005, set. 2012.

SUDERHSA. **Manual de Drenagem Urbana**: Região Metropolitana de Curitiba/PR. Curitiba: SUDERHSA, 2002. Disponível em: https://www.iat.pr.gov.br/sites/agua-terra/arquivos_restritos/files/documento/2020-07/mdu_versao01.pdf Acesso em: 2 maio 2021.

TARGA, M. S. *et al*. Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Ambiente e Água**, São Paulo, v. 7, n. 2, p. 120-142, 2012.

TENG, J. *et al.* Flood inundation modelling: A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling and Software**, Oxford, v. 90, p. 201-216, Apr. 2017.

TUCCI, C. E. M. Coeficiente de escoamento e vazão máxima de bacias urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 5, n. 1, p. 61-68, jan./mar. 2000.

TUCCI, C. E. M.; CRUZ, M. A. S. **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: EdUFRGS , 2000.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. L. **Drenagem urbana**. Porto Alegre: EdUFRGS, 1995.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: ciência e aplicação. Porto Alegre: EdUFRGS, 1995.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: EdUFRGS, 1998.

USACE. **HEC-RAS 5.0 River Analysis System:** user's manual. California: US Army Corps of Engineers, 2016. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Users%20Manual.pdf. Acesso em: 16 abr. 2018.

VIGNALI, V. *et al*. Building information Modelling (BIM) application for an existing road infrastructure. **Automation in Construction**, Amsterdam, v. 128, p. 201-216, Aug. 2021.

WEISS, L. L. Ratio of true to fixed-interval maximum rainfall. **Journal of Hydraulics**, Virginia, v. 90, n. 1, p. 77-82, Jan. 1964.

WESTPHAL, J. A. **Hydrology for drainage system design and analysis**. New York: McGraw-Hill, 2001.

YANG, C. T. **Sediment transport**: theory and practice. Belfast: McGraw-Hill, 1996.

YEN, B. C.; CHOW, V. T. Design Hyetographs for Small Drainage Structures. **Joumal of the Hydraulics Division**, v. 106, p. 1055-1076, 1980.

YEN, B. C. Open channel flow resistance. **Journal of Hydraulic Engineering**, Virginia, v. 128, n. 1, p. 20-30, Jan. 2002.

ZAHED F. O. K.; MARCELLINI, S. S. Precipitacões máximas. *In*: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. (org.). **Drenagem urbana**. Porto Alegre: EdUFRGS, 1995. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos; 5).

ZHANG, H. G. *et al*. Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China. **Transactions of the ASABE**, Michigan, v. 50, n. 3, 911-918, 2007.

ZISCHG, J. *et al*. Future trajectories of urban drainage systems: A simple exploratory modeling approach for assessing socio-technical transitions. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 651, n. 2, p. 1709-1719, Feb. 2019.

ZOPPOU, C. Review of storm water models. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v. 16, n. 3, p. 195-231, Apr. 2001.

APÊNDICE A – BANCO DE DADOS DO DIRETÓRIO IDF

- Banco de dados Porto *et al*. (2005):

			Coef. IDF			
Código Chave	**Estado**	**Cidade**	**K**	**n**	**Do**	**m**
1	PR	Curitiba	99.167	0.217	26	1.15
6	PI	Picos	15	0.203	15	0.784
7	PI	Teresina	21	0.172	15	0.77
23	RJ	Rio de Janeiro	20.65	0.15	20	0.74
54	MG	Belo Horizonte	24.63	0.1	20	0.84
103	SP	Presidente Prudente	21.2	0.271	28	0.85
109	SP	São Paulo	57.712	0.172	22	1.025
148	SP	São Carlos	25.32	0.236	16	0.935
149	SP	São Paulo - Pacaembú	29.1318	0.181	15	0.89
150	PR	Maringá	34.75	0.213	10	1.09
152	ES	Rio Novo do Sul	43.72232	0.2272	27.7162	0.893
153	MG	Caratinga	84.49735	0.176	35.87	1.048
154	RJ	Rio de Janeiro - Mendanha	14.06667	0.177	12	0.698
155	SP	Guarulhos (Bom Sucesso)	17.3567	0.1655	9	0.762
156	SP	Guarulhos (Aeroporto Cumbica)	41.7833	0.1748	19	0.91
157	SP	Guarulhos (UnG)	49.905	0.1946	22	0.938
158	SE	Campo do Brito	15.8898	0.183	10.52	0.753
159	SE	Aquidabã	16.0183	0.153	10.52	0.753
160	SE	Aracaju	20.848	0.188	10.52	0.753
161	SE	Riachão do Dantas	12.973	0.16	10.52	0.753
162	SE	Capela	16.7417	0.182	10.52	0.753
163	SE	Carira	16.7133	0.173	10.52	0.753
164	SE	Cristinápolis	17.345	0.205	10.52	0.753
165	SE	Cumbe	15.4433	0.079	10.52	0.753
166	SE	Santo Amaro das Brotas	20.11	0.125	10.52	0.753
167	SE	Poço Redondo	15.333	0.09	10.52	0.753
168	SE	Estância	17.458	0.166	10.52	0.753
169	SE	Itaporanga D'Ajuda (Faz. Belém)	20.153	0.145	10.52	0.753
170	SE	Japaratuba (Faz. Cajueiro)	17.967	0.11	10.52	0.753
171	SE	Estância (Faz. Camboatã)	16.063	0.097	10.52	0.753
172	SE	Frei Paulo	13.255	0.135	10.52	0.753
173	SE	Indiaroba	20.91	0.158	10.52	0.753
174	SE	Itabaianinha	15.8992	0.108	10.52	0.753
175	SE	Itabi	14.222	0.071	10.52	0.753
176	SE	Itaporanga D'Ajuda	17.03	0.168	10.52	0.753
177	SE	Japaratuba	17.13	0.153	10.52	0.753
178	SE	Japoatã	22.215	0.225	10.52	0.753
179	SE	Lagarto (Jenipapo)	14.865	0.103	10.52	0.753

180	SE	Lagarto	14.1933	0.134	10.52	0.753
181	SE	Malhador	16.0117	0.164	10.52	0.753
182	SE	Nossa Senhora Aparecida	13.495	0.156	10.52	0.753
183	SE	Frei Paulo (Mocambo)	15.2267	0.131	10.52	0.753
184	SE	Monte Alegre	14.5648	0.149	10.52	0.753
185	SE	Nossa Senhora da Glória	15.0867	0.118	10.52	0.753
186	SE	Nossa Senhora das Dores	13.9783	0.161	10.52	0.753
187	SE	Pacatuba	14.893	0.149	10.52	0.753
188	SE	Pedrinhas	14.3083	0.078	10.52	0.753
189	SE	Poço Verde	15.8267	0.109	10.52	0.753
190	SE	Porto da Folha	14.5617	0.125	10.52	0.753
191	SE	Propria	16.4063	0.14	10.52	0.753
192	SE	Riachuelo	15.7367	0.11	10.52	0.753
193	SE	Ribeirópolis	18.0083	0.061	10.52	0.753
194	SE	Salgado	17.555	0.173	10.52	0.753
195	SE	Tobias Barreto (Samanbaia)	13.6967	0.097	10.52	0.753
196	SE	Santa Luzia do Itanhy	17.455	0.089	10.52	0.753
197	SE	Santa Rosa de Lima	17.0483	0.088	10.52	0.753
198	SE	Santo Amaro das Brotas	20.9983	0.165	10.52	0.753
199	SE	São Cristóvão	19.0617	0.187	10.52	0.753
200	SE	Simão Dias	14.375	0.117	10.52	0.753
201	SE	Siriri	16.738	0.161	10.52	0.753
202	SE	Tobias Barreto	14.3817	0.131	10.52	0.753
203	SE	Tomar do Geru	20.8835	0.178	10.52	0.753
204	SE	Umbauba	16.575	0.088	10.52	0.753
205	SE	Japaratuba (Usina Oiteirinhos)	19.715	0.117	10.52	0.753
206	MS	Campo Grande	32.8858	0.178	22	0.8577
207	DF	Brasília	26.245	0.207	11	0.884
208	SP	Campinas	39.29716	0.188	20	0.917

- Banco de dados Pfafstetter (1982):

			Coef. IDF						
Código Chave	**Estado**	**Cidade**	**a**	**b**	**c**	**beta1**	**beta2**	**beta3**	**beta4**
2	RS	Alegrete	0.30	33	20	0.16	0.12	0.12	0.08
3	RJ	Alto Itatiaia	0.70	26	20	0.08	0.08	0.08	0.08
4	PA	Alto Tapajós	0.40	35	20	0.08	0.04	0.04	0.04
5	RJ	Alto Terezópolis	0.80	41	10	0.00	0.08	0.08	0.08
8	SE	Aracaju	0.60	24	20	0.00	0.04	0.08	0.20
9	SP	Avaré	0.30	25	20	0.00	0.04	0.08	0.08
10	RS	Bagé	0.50	23	20	0.08	0.08	0.08	0.08
11	RJ	Bangú	0.10	30	20	0.00	0.12	0.12	0.12
12	MG	Barbacena	0.50	18	60	0.12	0.12	0.08	0.04
13	MA	Barra do Corda	0.10	28	20	-0.08	0.04	0.08	0.12
14	SP	Bauru	0.50	24	20	-0.04	0.08	0.08	0.08
15	PA	Belém	0.40	31	20	-0.04	0.00	0.00	0.04
16	MG	Belo Horizonte	0.60	26	20	0.12	0.12	0.12	0.04
17	SC	Blumenau	0.20	24	20	-0.08	0.08	0.08	0.08
18	MG	Bonsucesso	0.80	18	60	0.04	0.04	0.04	0.04
19	RJ	Cabo Frio	0.20	20	20	0.16	0.20	0.20	0.12
20	RJ	Campos	0.20	27	20	0.12	0.12	0.12	0.08
21	SP	Campos do Jordão	0.20	32	20	-0.04	0.08	0.12	0.12
22	GO	Catalão	0.50	27	20	0.04	0.04	0.04	0.04
24	MG	Caxambú	0.50	23	20	0.08	0.08	0.08	0.08
25	RS	Caxias do Sul	0.50	23	20	0.00	0.08	0.08	0.08
26	SP	Congonhas	0.60	16	60	-0.04	0.04	0.04	0.04
27	MS	Corumbá	0.00	30	20	-0.04	0.12	0.12	0.16
28	RS	Cruz Alta	0.50	33	20	0.12	0.08	0.08	0.04
29	MT	Cuiabá	0.10	30	20	0.08	0.08	0.08	0.04
30	PR	Curitiba	0.20	25	20	0.16	0.16	0.16	0.08
31	RS	Encruzilhada	0.80	22	20	0.04	0.08	0.08	0.08
32	PE	Fernando de Noronha	0.70	23	20	-0.08	0.04	0.12	0.12
33	SC	Florianóplis	0.30	33	10	-0.04	0.12	0.20	0.20
34	GO	Formosa	0.50	27	20	0.08	0.08	0.08	0.04
35	CE	Fortaleza	0.20	36	20	0.04	0.04	0.08	0.08
36	GO	Goiânia	0.20	30	20	0.08	0.08	0.08	0.12
37	CE	Guaramiranga	0.50	22	20	-0.04	0.04	0.08	0.08
38	RS	Iraí	0.50	27	20	0.08	0.08	0.00	0.08
39	RJ	Jacarepaguá	0.20	29	20	-0.08	0.08	0.12	0.12
40	PR	Jacarezinho	0.30	25	20	-0.08	0.08	0.12	0.08
41	PB	João Pessoa	0.60	33	10	0.00	0.00	0.04	0.08
42	AM	Juarete	0.20	37	20	0.04	0.00	0.00	0.00
43	SP	Lins	0.40	19	20	0.00	0.04	0.08	0.04
44	AL	Maceió	0.50	29	10	0.00	0.04	0.08	0.20
45	AM	Manaus	0.10	33	20	0.04	0.00	0.00	0.04

46	SP	Mirante Sant'Ana	0.40	25	20	-0.04	0.12	0.12	0.04
47	RN	Natal	0.70	23	20	-0.08	0.00	0.08	0.12
48	PE	Nazaré	0.40	20	20	-0.04	0.04	0.08	0.08
49	RJ	Niterói	0.20	27	20	0.08	0.12	0.12	0.12
50	RJ	Nova Friburgo	0.40	28	20	-0.08	0.08	0.08	0.08
51	PE	Olinda	0.50	35	10	0.04	0.20	0.20	0.20
52	MG	Ouro Preto	0.60	23	20	0.00	0.12	0.12	0.04
53	MG	Paracatú	1.20	43	10	-0.04	0.00	0.04	0.12
55	PR	Paranaguá	0.30	42	10	0.04	0.12	0.12	0.16
56	AM	Parintins	0.60	30	20	0.04	0.04	0.04	0.08
57	MG	Passa Quatro	0.70	21	20	0.04	0.04	0.04	0.08
58	RS	Passo Fundo	0.70	21	20	-0.04	0.04	0.04	0.08
59	RJ	Petrópolis	0.30	41	10	-0.08	0.12	0.12	0.08
60	RJ	Pinheiral	0.40	19	60	0.08	0.12	0.16	0.04
61	SP	Piracicaba	0.30	25	20	-0.08	0.04	0.12	0.08
62	PR	Ponta Grossa	0.30	23	20	-0.08	0.08	0.08	0.04
63	RS	Porto Alegre	0.40	22	20	0.00	0.08	0.08	0.08
64	RO	Porto Velho	0.30	35	20	0.00	0.00	0.00	0.04
65	CE	Quixeramobim	0.20	17	60	-0.08	0.04	0.08	0.12
66	RJ	Resende	0.30	31	20	0.04	0.08	0.08	0.08
67	AC	Rio Branco	0.30	31	20	-0.08	0.00	0.04	0.08
68	RJ	Rio de Janeiro - Ipanema	0.00	35	10	-0.04	0.12	0.12	0.20
69	RJ	Rio de Janeiro - Jd.Botânico	0.40	39	10	-0.08	0.08	0.12	0.12
70	RJ	Rio de Janeiro - Pça.Saens Pena	0.20	31	20	-0.04	0.12	0.16	0.16
71	RJ	Rio de Janeiro - Pça.XV	0.20	27	20	0.00	0.20	0.20	0.20
72	RS	Rio Grande	0.30	24	20	0.00	0.20	0.20	0.12
73	RJ	Rodovia Presidente Dutra - Km 47	0.30	28	20	0.00	0.08	0.16	0.20
74	BA	Salvador	0.60	33	10	-0.04	0.08	0.08	0.12
75	RJ	Santa Cruz	0.40	26	20	0.00	0.08	0.08	0.16
76	RS	Santa Maria	0.40	37	10	-0.08	0.04	0.04	0.08
77	RJ	Santa Maria Madalena	0.40	24	20	-0.08	0.04	0.04	0.00
78	RS	Santa Vitória do Palmar	0.40	24	20	-0.08	0.12	0.12	0.12
79	SP	Santos	0.70	44	10	0.12	0.12	0.16	0.20
80	SP	Santos - Ipanema	0.20	50	20	0.12	0.20	0.20	0.12
81	SP	São Carlos	0.40	29	20	-0.04	0.08	0.08	0.12
82	SC	São Francisco do Sul	0.30	37	10	0.00	0.08	0.08	0.16
83	PB	São Gonçalo	0.40	29	20	-0.08	0.08	0.12	0.16
84	MA	São Luíz	0.40	42	10	-0.08	0.00	0.00	0.08
85	RS	São Luíz Gonzaga	0.50	30	20	0.08	0.08	0.12	0.08
86	SP	São Simão	0.40	26	20	0.00	0.04	0.08	0.08

87	AC	Sena Madureira	0.20	30	20	0.00	0.04	0.08	0.04
88	MG	Sete Lagoas	0.40	27	20	0.08	0.08	0.08	0.08
89	PA	Souré	0.70	46	10	0.00	0.00	0.04	0.08
92	PA	Tapeirinha	0.30	32	20	0.08	0.08	0.04	0.04
95	SP	Taubaté	0.30	24	20	0.12	0.12	0.12	0.16
96	MG	Teófilo Otoni	0.40	24	20	0.00	0.08	0.08	0.08
97	PI	Teresina	0.20	33	20	0.12	0.12	0.12	0.12
99	RJ	Terezópolis	0.30	36	10	0.08	0.08	0.04	0.12
100	SP	Tupí	0.30	18	60	-0.08	0.12	0.12	0.04
102	MA	Turiassú	0.60	30	20	0.04	0.04	0.04	0.04
105	AM	Uaupês	0.20	36	20	0.08	0.04	0.04	0.04
106	SP	Ubatuba	0.60	46	10	0.04	0.16	0.16	0.16
107	RS	Uruguaiana	0.20	38	10	-0.04	0.08	0.08	0.12
112	RJ	Vassouras	0.40	19	60	0.08	0.08	0.08	0.08
114	RS	Viamão	0.40	21	20	-0.04	0.04	0.04	0.04
115	ES	Vitória	0.30	34	10	0.12	0.12	0.12	0.12
117	RJ	Volta Redonda	0.20	30	20	0.12	0.12	0.12	0.12

APÊNDICE B – BANCO DE DADOS DO DIRETÓRIO MARÉGRAFO

Código	Nome da estação	Estado
10509	Furo grande do jurupari	Para
10510	Ilha do brigue	Amapá
10511	Gurupa	Para
10512	Jupati	Para
10513	Barcarena	Para
10514	Cia. De pesca pina	Pará
10515	Chaves	Para
10516	Almeirim	Pará
10517	Viseu	Para
10518	Afua	Para
10519	Val de cães	Pará
10520	Porto de belem	Para
10521	Vila nazare	Para
10522	Ilha do caldeirão	Para
10523	Canal do vieira grande	Para
10524	São josé do tajapuru	Para
10525	Ilha do mosqueiro	Para
10526	Canivete	Amapá
10527	Vigia	Para
10528	Soure	Pará
10529	Abade	Pará
10530	Fábrica ecomar	Para
10540	Vila são jose do pirarucu	Amapá
10545	Colares	Para
10548	Vila curumu	Para
10551	Sao sebastiao	Para
10557	Angelim	Para
10563	Vila malato	Para
10565	Ponta grossa	Para
10566	Porto de vila do conde	Pará
10567	Abaetetuba - inpex	Para
10569	Cocalzinho	Para
10572	Trapiche de breves	Pará
10573	Nova vida do bispo	Para
10575	Sao luis do tajapuru	Para
10578	Rio tocantins	Para
10580	Ponta negra	Pará
10581	Ilha de santa helena	Para
10584	Curralinho	Para
10587	Cameta	Para
10603	Acaituba	Para
10610	Ssn - santana	Amapa
10620	Porto de santana - icomi	Amapá

10621	Mazagao	Amapa
10622	Ajudante	Amapa
10623	Serraria rio matapi	Amapa
10636	Boavista das pracubinha	Amapá
10650	Ponta do céu	Amapá
10654	Limao do curua	Amapa
10655	Igarapé grande don curuá	Amapá
10656	Escola do igarapé grande do curuá	Amapá
10660	Porto de macapa	Amapa
10670	Caracuru	Pará
10680	Paga dívidas	Pará
10690	Munguba	Pará
10700	Jupatituba	Para
10710	Saudade	Pará
20000	Ilha bela - parte norte	Pará
20520	Fundeadouro de salinópolis	Para
20524	Ilha do machadinho	Para
20527	Cabo maguari	Para
20531	Ponta taipu	Pará
20533	Ilha dos guaras	Para
20539	Portusil	Para
20542	Boiucucanga	Para
20544	Caete	Para
20606	Ponta dos indios	Amapa
20612	Santo antonio do oiapoque	Amapa
20618	Cassipore	Amapa
20619	Trapiche do oiapoque	Amapa
20624	Plataforma penrod	Amapa
20625	Penrod final	Amapa
20630	Santa maria do cocal	Amapa
20636	Igarapé do inferno	Amapá
20642	Ponta guara	Amapa
30106	Recife manuel luis	Maranhao
30108	Alcantara	Maranhao
30109	Rio jerijó	Maranhao
30110	Porto de itaqui	Maranhao
30111	Boa razao	Maranhao
30112	Areia branca - continente	Rio grande do norte
30113	Ilha do cajual - itauna	Maranhão
30114	Terminal da alumar	Maranh'ao
30115	Rio anil	Maranhao
30117	Baia de mutuoca	Maranhao
30118	Sao joao	Maranhao
30119	Mangunca	Maranhao
30120	Sao luis	Maranhao

30121	Quebra-pote	Maranhao
30124	Pericaua	Maranhao
30130	Ilha de santana	Maranhao
30131	Bacanga ii	Maranhao
30132	Turiacu ii	Maranhao
30133	Turiacu iii	Maranhao
30134	Cuma	Maranhao
30135	Bacanga i	Maranhao
30136	Turiacu iv	Maranhao
30137	Sao jose do ribamar	Maranhao
30138	Carutapera	Maranhao
30139	Primeira cruz	Maranhao
30140	Porto de tutoia	Maranhão
30148	Barra do rio preguicas	Maranhao
30149	Terminal da ponta da madeira	Maranhao
30150	Fundeio (ponto a)	Maranhão
30151	Fundeio (ponto b)	Maranhão
30225	Porto de luis correia	Piauí
30226	Barra do timonha	Piaui
30310	Acarau	Ceara
30320	Camocim	Ceara
30330	Paracuru	Ceara
30331	Mundau	Ceara
30335	Pecem - aanderaa	Ceará
30336	Ponta do pecem	Ceara
30337	Terminal portuário do pecém	Ceará
30340	Porto de mucuripe	Ceara
30350	Barra do rio jaguaribe	Ceara
30407	Porto de areia branca - termisa	Rio grande do norte
30414	Ponta caicara	Rio grande do norte
30422	Alazao	Rio grande do norte
30435	Cabo calcanhar	Rio grande do norte
30442	Enseada de pititinga	Rio grande do norte
30443	Porto de guamaré	Rio grande do norte
30445	Porto de macau	Rio grande do norte
30446	Ponta do reduto	Rio grande do norte
30449	Cabo de sao roque	Rio grande do norte
30450	Atol das rocas	Rio grande do norte
30460	Porto de natal	Rio grande do norte
30461	Trapiche da cprn	Rio grande do norte
30463	Base naval de natal	Rio grande do norte
30470	Lagoa guarairas	Rio grande do norte
30477	Tibau do sul	Rio grande do norte
30480	Cabo bacopari	Rio grande do norte
30540	Porto de cabedelo	Paraiba

30620	Ponta de pedras	Pernambuco
30640	Ilha de itamaraca	Pernambuco
30645	Porto do recife	Pernambuco
30680	Tamandare	Pernambuco
30685	Porto de suape	Pernambuco
30720	Porto de pedras	Alagoas
30725	Porto de maceio	Alagoas
30760	Jequia	Alagoas
30761	Pontal do cururipe	Alagoas
30762	Piaçabuçu	Alagoas
30763	Penedo	Alagoas
30764	Farol de peba - al	Alagoas
30765	Serrão	Alagoas
30780	Barra do rio sao francisco	Alagoas
30800	Cabeco	Sergipe
30810	Terminal marítimo inácio barbosa	Sergipe
30819	Farol de sergipe(atalaia)	Sergipe
30820	Barra do rio sergipe	Sergipe
30821	Poxim	Sergipe
30822	Tanques	Sergipe
30823	Plataforma pcm-i	Sergipe
30824	Porto das redes	Sergipe
30825	Capitania dos portos de sergipe	Sergipe
30850	Barra do rio real	Sergipe
30900	Farol sergipe	Sergipe
30950	Fernando de noronha - baia de se	Pernambuco
30955	Fernando de noronha-baia de s. Antoni	Pernambuco
40103	Rio itariri	Bahia
40106	Garcia d'avila	Bahia
40109	Cachoeira	Bahia
40112	São francisco do conde	Bahia
40115	Naje	Bahia
40118	Porto de madre de deus	Bahia
40121	Terminal alves camara	Bahia
40127	Terminal usiba	Bahia
40130	Sao roque	Bahia
40133	Ilha de itaparica	Bahia
40134	Aratu iate clube	Bahia
40135	Base naval de aratu	Bahia
40136	Valenca	Bahia
40139	Morro de sao paulo	Bahia
40140	Porto de salvador	Bahia
40141	Capitania de salvador	Bahia
40142	Barra do camamu	Bahia
40145	Porto de ilhéus	Bahia

40148	Ilhéus - porto velho	Bahia
40151	Canavieiras	Bahia
40152	Cabralia	Bahia
40154	Porto seguro	Bahia
40157	Cumuruxatiba	Bahia
40160	Porto de caravelas	Bahia
40163	Nova vicosa	Bahia
40166	Abrolhos	Bahia
40169	Mucuri	Bahia
40209	Conceição da barra	Espírito santo
40218	Regencia	Espírito santo
40219	Cepemar	Espírito santo
40235	Ponta de meaípe	Espírito santo
40236	Piraque-acu	Espírito santo
40240	Terminal de barra do riacho	Espírito santo
40241	Teste barra do riacho	Espírito santo
40250	Porto de vitoria	Espírito santo
40251	Eames	Espírito santo
40252	Capitania dos portos do espírito sant	Espírito santo
40255	Porto de tubarão	Espírito santo
40263	Ilha da trindade	Espírito santo
40264	Ilha da trindade - aanderaa	Espírito santo
40272	Guarapari	Espírito santo
40280	Terminal da ponta do ubu	Espírito santo
40290	Barra do itapemirim	Espírito santo
40291	Canal da barra - teste	Rio de janeiro
50104	Sao joao da barra	Rio de janeiro
50108	Atafona	Rio de janeiro
50109	Rio das ostras	Rio de janeiro
50110	Buzios	Rio de janeiro
50111	Iate clube costa azul	Rio de janeiro
50112	São tomé	Rio de janeiro
50113	Barra do furado	Rio de janeiro
50116	Terminal de imbetiba	Rio de janeiro
50117	Ilha de santana	Rio de janeiro
50118	Depósito de combustíveis da marinha	Rio de janeiro
50119	Ilha da conceicao	Rio de janeiro
50120	Batalha	Rio de janeiro
50121	Base naval do rio de janeiro	Rio de janeiro
50122	Ilha de brocoio	Rio de janeiro
50124	Ilha de paqueta	Rio de janeiro
50126	Ilha do boqueirao	Rio de janeiro
50128	Saco do pinhao	Rio de janeiro
50129	Piracao	Rio de janeiro
50130	Foz do rio meriti	Rio de janeiro

50131	Ilha do engenho	Rio de janeiro
50132	Bom jesus	Rio de janeiro
50134	Mocangue grande	Rio de janeiro
50136	Ponta do caju	Rio de janeiro
50137	Arsenal de marinha do rio de janeiro	Rio de janeiro
50138	Porto do rio de janeiro	Rio de janeiro
50139	Iate clube do rio de janeiro	Rio de janeiro
50140	Ilha fiscal	Rio de janeiro
50141	Ponta da armacao	Rio de janeiro
50142	Ilha da madeira	Rio de janeiro
50143	Ponta guaia-ilha da madeira	Rio de janeiro
50144	Teste da ilha fiscal	Rio de janeiro
50145	Porto de itaguaí	Rio de janeiro
50146	Fortaleza de santa cruz	Rio de janeiro
50147	Teste ilha fiscal ii	Rio de janeiro
50148	Itacuruca	Rio de janeiro
50149	Ponta do morro do afonso - sepetiba	Rio de janeiro
50150	Imbui	Rio de janeiro
50154	Ponta negra	Rio de janeiro
50156	Porto do forno	Rio de janeiro
50158	Praia de itaipu	Rio de janeiro
50159	Copacabana - salvamar	Rio de janeiro
50162	Club med mangaratiba	Rio de janeiro
50163	Sepetiba	Rio de janeiro
50165	Terminal da ilha guaíba	Rio de janeiro
50166	Itaorna	Rio de janeiro
50167	Farol castelhanos	Rio de janeiro
50168	Estaleiro verolme	Rio de janeiro
50170	Porto de angra dos reis	Rio de janeiro
50171	Enseada de bracui	Rio de janeiro
50174	Recreio dos bandeirantes	Rio de janeiro
50175	Piraquara	Rio de janeiro
50178	Barra da tijuca	Rio de janeiro
50179	Enseada de palmas	Rio de janeiro
50181	Colegio naval	Rio de janeiro
50187	Marambaia	Rio de janeiro
50190	Sitio forte	Rio de janeiro
50193	Parati	Rio de janeiro
50196	Enseada do sobrado	Rio de janeiro
50205	Ubatuba	São paulo
50210	Porto de sao sebastiao	Sao paulo
50211	Montao de trigo	Sao paulo
50215	Piacaguera	Sao paulo
50220	Saco do sombrio	Sao paulo
50221	Conceicãozinha	São paulo

50222	Cosipa	São paulo
50223	Mortona	São paulo
50224	Iguape	Sao paulo
50225	Porto de santos - torre grande	Sgo paulo
50226	Ilha de barnabe	Sao paulo
50227	Praticagem santos	Sgo paulo
50228	Capitania dos portos de são paulo	São paulo
50229	Cosipa i	São paulo
50230	Ilha das palmas	Sao paulo
50235	Ilha da moela	Sao paulo
50237	Guarau	Sao paulo
50240	Ponta paranapua	Sao paulo
50245	Barra de icapara	Sao paulo
50246	Barra de peruibe	Sao paulo
50247	Ponta da prainha	São paulo
50250	Cananeia	Sao paulo
50255	Bom abrigo	Sao paulo
60100	Guaratuba iate clube	Parana
60105	Caiobá	Paraná
60110	Antonina	Parana
60120	Ilha das cobras	Parana
60130	Barra de paranaguá - canal se	Paraná
60131	Capitania dos portos do parana	Parana
60132	Porto de paranaguá - cais oeste	Paraná
60133	Cais da techint	Paraná
60135	Barra de paranaguá - canal da galheta	Paraná
60136	Ponta do poco	Parana
60137	Porto do rio pequere - lfm-cem-appa	Parana
60139	Terminal portuário da ponta do félix	Paraná
60140	Porto de paranaguá - cais leste	Paraná
60200	Ponta da galheta	Parana
60208	Ilha da paz	Santa catarina
60220	Del. Da cap.em são francisco do sul	Santa catarina
60221	Ilha da rita	Santa catarina
60222	Joinville iate clube	Santa catarina
60223	Porto de são francisco do sul	Santa catarina
60224	Penha	Santa catarina
60225	Clube naútico cruzeiro do sul	Santa catarina
60226	Iate clube boa vista	Santa catarina
60228	Estaleiro detroit	Santa catarina
60230	Porto de itajai	Santa catarina
60231	Del. Da cap. Dos portos em itajai	Santa catarina
60232	Praticagem do porto de itajaí	Santa catarina
60240	Porto belo	Santa catarina
60241	Ilha do arvoredo	Santa catarina

60245	Porto de florianopolis	Santa catarina
60250	Porto de imbituba	Santa catarina
60264	Porto de laguna	Santa catarina
60272	Farol de santa marta	Santa catarina
60280	Ararangua	Santa catarina
60310	Torres	Rio grande do sul
60320	Tramandai	Rio grande do sul
60325	Praça da harmonia	Rio grande do sul
60330	Solidao	Rio grande do sul
60331	Laranjal	Rio grande do sul
60340	Pelotas	Rio grande do sul
60341	Asd - deprec	Rio grande do sul
60342	Sao jose do norte	Rio grande do sul
60360	Sarita	Rio grande do sul
60365	Pier de petroleiros	Rio grande do sul
60370	Porto do rio grande	Rio grande do sul
60380	Cais da praticagem do rio grande	Rio grande do sul