UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ENGENHARIA AMBIENTAL

ANTÔNIO EDMILSON DE ALCÂNTARA DANTAS

Incorporação de Imageamento aéreo de alta resolução em modelos hidrodinâmicos para geração de manchas de inundação em um trecho de rio rural

JOÃO PESSOA

2024

ANTÔNIO EDMILSON DE ALCÂNTARA DANTAS

Incorporação de Imageamento aéreo de alta resolução em modelos hidrodinâmicos para geração de manchas de inundação em um trecho de rio rural

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal da Paraíba (Campus I) como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Profª. Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo

JOÃO PESSOA

2024

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

D192i Dantas, Antonio Edmilson de Alcantara.
Incorporação de Imageamento aéreo de alta resolução em modelos hidrodinâmicos para geração de manchas de inundação em um trecho de rio rural / Antonio Edmilson de Alcantara Dantas. - João Pessoa, 2024.
71 f.

Orientação: Davi de Carvalho Diniz Melo.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Mancha de Inundação. 2. Modelagem Hídrica. 3. HEC-RAS. 4. Modelo Digital de Elevação. I. Melo, Davi de Carvalho Diniz. II. Título.

UFPB/BSCT CDU 504(043.2)

Elaborado por ROSANGELA GONCALVES PALMEIRA - CRB-216

FOLHA DE APROVAÇÃO

ANTÔNIO EDMILSON DE ALCÂNTARA DANTAS

INCORPORAÇÃO DE IMAGEAMENTO AÉREO DE ALTA RESOLUÇÃO EM MODELOS HIDRODINÂMICOS PARA GERAÇÃO DE MANCHAS DE INUNDAÇÃO EM UM TRECHO DE RIO RURAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 29/10/2024 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Aprovado

Prof. Dr. Davi de Carvalho Diniz Melo
Orientador
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
Centro de Tecnologia/UFPB

Aprovado

Adriano Rolim da paz
Examinator
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
Centro de Tecnologia/UFPB

Aprovado

Gefferson Celestino de Morais
Examinador Externo

Engº Civil Gefferson Celestino de Morais
Mat.: 9512-5 - DER/PB - Chefe G.P.A.
CREA/PB 182068096-3

Documento assinado digitalmente
gov.br ALINE FLAVIA NUNES REMIGIO ANTUNES
Data: 04/11/2024 14:31:37-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Aline Flavia Nunes Remigio Antunes
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

AGRADECIMENTOS

Em momentos de finalização de ciclos, como o término de graduações, é natural agradecer a todos que estiveram presentes no início, durante e ao término do processo. Os agradecimentos deste trabalho são na verdade, o somatório de agradecimentos de todos que puderam contribuir com a minha formação acadêmica e pessoal ao longo dos anos, em diferentes âmbitos. Primeiramente agradeço aos meus pais Maria Helena e Edmilson Dantas, a quem muito estimo e amo, como também a toda minha família, por permitir condicionantes em meu meio familiar, que foram responsáveis por moldar uma parcela do que eu sou, em especial, Maria das Dores, Terezinha Cruz, Maria José, Maria do Carmo, Joelma Cruz, Pedro Henrique, Maria da Penha, Marcos Alcântara, e o meu avô Manoel Alexandre; agradeço a todos os professores dos níveis fundamentais e médio, por serem responsáveis pela base de conhecimento educacional e humano, e responsáveis pelo início da formação acadêmica; agradeço a todos os professores da Universidade Federal da Paraíba que tive o prazer e a honra de ser aluno, e aprendendo os mais variados temas e conceitos de caráter essencial não apenas para a formação superior acadêmica, como também profissional, em especial: a minha primeira orientadora de Iniciação Científica, Carolyne Wanessa Lins, que em termos literais, ensinou tantos conceitos importantes de SIG, como também os primeiros passos de publicação e escrita científica e a primeira área técnica a qual publiquei, modelagem hidrológica, e projetos por tanto anos; ao meu segundo orientador de Iniciação Cientifica, Celso Augusto Guimarães, por tantos aprendizados indispensáveis nos mais variados temas, e com diferentes propostas, e segunda área a qual publiquei e aprendi, erosão costeira; ao meu orientador deste trabalho, Davi de Carvalho Diniz, por tantas discussões técnicas, aprendizados e oportunidades, mesmo diante de tantos afazeres; ao professor Adriano Rolim da Paz, pela qualidade impecável dos conteúdos apresentados em disciplinas que variaram de natureza expositiva a técnica, em especial a drenagem, que ministrou com empolgação contagiante; a o professor Francisco Jacome Sarmento, pela maestria em explicar conceitos complexos, de uma forma rica e simples, como também por sua extensa experiencia profissional nos mais variados âmbitos compartilhada em tantos momentos; ao professor Cristiano Almeida, pela disponibilidade e oportunidade de acompanhar tantos trabalhos de campo, permitindo uma extensão de grau de aprendizado muito valiosa; aos demais professores, Hamilcar José, Gustavo Barbosa, Gerald Norbert, Ana Cristina, Tarciso Cabral, Carmem Lúcia, Leonardo Vieira, Albanise Barbosa, Heber Pimentel, Claudia Coutinho, Isabelle Yruska e as coordenadoras e vice vigentes, Aline Remígio e Elisangela Rocha.

Não poderia deixar de agradecer aos meus amigos, que durante tantos anos permitiram a maximização de todos estes aprendizados, de forma inigualável, em especial a Felipe Daniel, Pedro Lucena, João Pedro Smith, Emanuel Gomes, Leonardo Maciel, Maria Clara Ribeiro, Gustavo Almeida, Lucas Reis, Samia Maria, Abner Lins, Natalia Duarte, Hércules Felix, Matheus Svendsen, Jorge Mateus, Givanildo Ercílio, Bruno Lacerda, Victor Emanuel, Cinara Leite, Maria Sílvia, e demais "*fiéis escudeiros*".

E por fim, agradeço a Deus, por permitir até o presente momento, tantas experiencias e oportunidades, das mais variadas formadas, a evolução constante e o progresso, não apenas de mim, como de todos ao meu redor.

Não desanimes. Persiste mais um tanto. Não cultives pessimismo. Centraliza-te no bem a fazer. Esquece as sugestões do medo destrutivo. Segue adiante, mesmo varando a sombra dos próprios erros. Avança, ainda que seja por entre lágrimas. Trabalha constantemente. Edifica sempre. Não consintas que o gelo do desencanto te entorpeça o coração. Não te impressiones à dificuldade. Convence-te de que a vitória espiritual é construção para o dia a dia. Não desistas da paciência. Não creias em realização sem esforço. Silêncio para a injúria. Olvido para o mal. Perdão às ofensas. Recorda que os agressores são doentes. Não permitas que os irmãos desequilibrados te destruam o trabalho ou te apaguem a esperança. Não menosprezes o dever que a consciência te impõe. Se te enganaste em algum trecho do caminho, reajusta a própria visão e retorna ao rumo certo. Não contes vantagens nem fracassos. Estuda buscando aprender. Não te voltes contra ninguém. Não dramatizes provações ou problemas. Conserva o hábito da oração para que se te faça luz na vida íntima. Resguarda-te em Deus e persevera no trabalho que Deus te confiou. Ama sempre, fazendo pelos outros o melhor que possas realizar. Age auxiliando. Serve sem apego. E assim vencerás.

*Vencerás de "*Os astronautas do Além*."*

(Emmanuel, psicografia por Chico Xavier)

RESUMO

Países em desenvolvimento, como o Brasil, têm enfrentado um aumento significativo na frequência de eventos de inundação devido a fatores como crescimento acelerado das cidades, aumento na densidade populacional, ausência de planejamento urbano adequado e uso inadequado do solo. De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2021), desastres relacionados ao clima e à água, como inundações e enchentes, foram responsáveis por 45% das mortes e 74% das perdas econômicas globais nos últimos 50 anos. A frequência de estudos e pesquisas de relevância têm aumentado constantemente sobre o tema, analisando estes aspectos, principalmente no que tange eventos extremos, gestão de recursos hídricos e manejo do uso e ocupação do solo. A utilização de modelos que possam analisar e prever situações e cenários do comportamento de rios, dentre estes modelos, está a plataforma do HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) voltadas para estudos hídricos. Sendo assim, o presente trabalho objetiva realizar uma simulação hidrodinâmica de mancha de inundação, utilizando o modelo HEC-RAS, em um trecho de rio rural do nordeste brasileiro. Na região do rio estudado corresponde a um braço do rio Cupissura, em Itambé, Pernambuco, onde monitoramento de vazão e nível vem sendo realizadas. A metodologia seguiu em dois principais subdivisões, a preparação dos dados que envolveram a modificação de um MDT (modelo digital de terreno), obtido por imageamento fotogramétrico, para compor a calha do rio, e a inserção deste dado juntamente com outros de monitoramento na plataforma do HEC-RAS. Foram obtidas manchas de inundação a partir do MDT original e modificado com a inserção da calha, que apresentaram comportamento esperado em termos hidráulicos, no entanto, com uma discrepância de aproximadamente 17% em termos de área, elevando a importância da análises mais aprofundadas sobre a geração de modelos digitais de elevação em simulações de cheias, como de comparações por meio de diferentes métodos objetivando uma compreensão mais detalhada acerca dos resultados.

Palavras-chave: Manchas de inundação, Modelagem hídrica, HEC-RAS, Modelo Digital de Elevação

ABSTRACT

Developing countries, such as Brazil, have faced a significant increase in the frequency of flooding events due to factors such as accelerated city growth, increased population density, lack of adequate urban planning and inadequate land use. According to the World Meteorological Organization, climate and water-related disasters, such as floods and inundations, have been responsible for 45% of deaths and 74% of global economic losses in the last 50 years. The frequency of relevant studies and research on the subject has constantly increased, analyzing these aspects, mainly regarding extreme events, water resource management and land use and occupation management. The use of models that can analyze and predict river behavior situations and scenarios, among these models, is the HEC-RAS (River Analysis System of the Center for Hydrological Engineering) platform for external water studies. Therefore, the present work objective performed a hydrodynamic simulation of a flood patch, using the HEC-RAS model, in a stretch of a rural river in northeastern Brazil. The trained river region corresponds to a branch of the Cupissura River, in Itambé, Pernambuco, where flow and level monitoring has been carried out. The methodology changed in two main subdivisions, the preparation of the data that involved the modification of a DTM (digital terrain model), results from photogrammetric imaging, to compose the river channel, and the insertion of this data together with other monitoring data in the HEC-RAS platform. Flood spots were discovered from the original DTM and modified with the insertion of the channel, which presented expected behavior in hydraulic terms, however, with a discrepancy of approximately 17% in terms of area, increasing the importance of more in-depth analyses on the generation of digital elevation models in flood simulations, as well as comparisons through different methods aiming at a more detailed understanding of the results.

Keywords: Floodplain Mapping, Hydrologic Modeling, HEC-RAS, Digital Elevation Model

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de retificação de angulação de imagem fotogramétrica. 22
Figura 2 – Comparação entre Imageamento por Fotogrametria e por Sensores.....23
Figura 3 – Comparação entre a disposição de dados Raster e Vetoriais.....25
Figura 4 – Distribuição de velocidades a variar da profundidade em uma seção.....26
Figura 5 – Mapa de localização das bacias dos pontos de monitoramento provenientes do relatório.....29
Figura 6 – Mapa de Localização imediata das medições 30
Figura 7 – Seção de monitoramento (estação fluviométrica) no rio Cupissura.....31
Figura 8 – Micromolinete utilizado para as medições de velocidade.....32
Figura 9 – Sensor de nível e Datalogger da Ampeq. 32
Figura 10 – Medição de vazão ocorrida no dia 16/08/2024. 33
Figura 11 - Drone 'Phatom 4 – Pro".....34
Figura 12-– Processamento sendo realizado em Software. 36
Figura 13 – Recorte do Ortomosaico com vegetação sobreposta ao rio (polígono transparente) 37
Figura 14 – Realização da Topo-batimetria com nível e mira de alumínio. 38
Figura 15 – Esquema de Criação da Calha Virtual 39
Figura 16 – Esquema de associação de cada bloco a cada valor de topo-batimetria.....40
Figura 17 – Ilustração em esquema de uma seção dos blocos, com seus respectivos valores de batimetria e fator aleatório.....41
Figura 18- Interface do RAS-Mapper contendo as informações de geometria 44
Figura 19 – Considerações acerca dos valores de Manning Adotados. 45
Figura 20 – Mapa do Ortomosaico e Modelo Digital de Terreno (MDT) 47
Figura 21 – Comparação da Resolução Espacial entre a imagem do Google e o Ortomosaico. 48
Figura 22 – Comparação entre MDT com calha e MDT original.....49
Figura 23 – Mancha de inundação gerada em regime permanente com calha virtual inserida, no ambiente RAS-Mapper. 50
Figura 24 – Curvas de Nível da região de queda altimétrica.....51
Figura 25 – Queda altimétrica da adjacência da calha virtual do rio.....52
Figura 26 – Particle Tracing e Vetor de velocidade na região da queda altimétrica.....53

Figura 27 – Visualização do RAS 3D Viewer. 54
Figura 28 – Registro fotográfico feito no momento da cheia, na região da estrada. 55
Figura 29 - Valores de lâmina de água. 56
Figura 30 – Comparação das manchas de inundação 57
Figura 31 – Presença da queda altimétrica vista por meio do Ortomosaico. 58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Exemplo de tabela utilizada para medição de vazão, realizado no dia 16/08/2024.. 33
Tabela 2 – Coordenadas UTM dos Alvos usados para georreferenciamento 35
Tabela 3 – Topo-batimetria da calha 38

Sumário

1. INTRODUÇÃO 13

1.1. A Ocupação Humana 13

1.2. As enchentes como um óbice global 13

1.3. As inundações no cenário do Brasil 14

1.4. As inundações no cenário do Nordeste brasileiro 16

1.5. As novas tecnologias frente aos desafios 17

2. OBJETIVOS 19

2.1. Objetivo geral 19

2.2. Objetivos específicos 19

3. REFERÊNCIAL TEÓRICO 20

3.1. Topografia 20

3.2. Aerofotogrametria 21

3.3. Sistemas de Informações Geográficas 24

3.4. Medições de vazão 25

3.5. Modelos de Simulação de manchas de inundação 27

4. METODOLOGIA 28

4.1. Preparação da Base de Dados 28

4.2. Metodologia das Simulações 42

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES 47

5.1. Modelo Digital de Elevação do Terreno e Ortomosaico 47

5.2. Modelo Digital de Elevação do Terreno Modificado com Calha 49

5.3. Mancha de Inundação Gerada por Regime Permanente utilizando MDT modificado 50

5.4. Mancha de Inundação Gerada por Regime Permanente no utilizando o MDT original. 57

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ... 59

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 62

8) APÊNDICE 68

a) IBGE-PPP 68

b) Código Python para criação da coluna contendo um fator de aleatoriedade entre +0.15 m e – 0.15 m 69

c) Código Python para a criação da calha e adjacência do rio, com base nas feições dos blocos segmentados contendo as informações batimétricas. 70

1. INTRODUÇÃO

1.1. A Ocupação Humana

O meio-físico natural possui um papel determinante nos padrões de uso e ocupação do solo pela sociedade humana, podendo propiciar não apenas regiões com favorecimento de condições para esta ocupação, como também abundância de recursos naturais, sendo o principal destes, os recursos hídricos (CHELIZ *et al.*, 2023). Esta ocupação, por vezes, ocorre em regiões de risco, aumentando a vulnerabilidade das comunidades a desastres, como deslizamentos de terra e inundações, comprometendo assim resiliência humana destas populações. Segundo um estudo do MapBiomas foi observado que entre os anos de 1985 a 2021 as ocupações em áreas de risco triplicaram, passando de 1,2 milhões de hectares para 3,7 milhões de hectares (Projeto MapBiomas, 2022).

Atualmente, essa ocupação persiste, sendo exacerbada pela falta de espaço e opções habitacionais para comunidades de baixa renda, sendo a urbanização desordenada e a falta de planejamento adequado agravantes principais desses riscos, resultando em perdas econômicas e humanas significativas (Suhua *et al.*, 2024, Silva et al., 2017; Rola et al., 2016; Cofferi et al., 2014).

Países em desenvolvimento, como o Brasil, têm enfrentado um aumento significativo na frequência de eventos de inundação devido a fatores como crescimento acelerado das cidades, aumento na densidade populacional, ausência de planejamento urbano adequado e uso inadequado do solo (Alves & Pereira, 2022). Desde 1970, a expansão urbana em áreas vulneráveis e a falta de infraestrutura para drenagem, juntamente com a urbanização desordenada, têm tornado as cidades mais suscetíveis a eventos extremos. As mudanças climáticas agravam esses problemas, com chuvas mais intensas e imprevisíveis (Alves & Pereira, 2022; Grim et al., 2015; Blank, 2015; Lucena et al., 2011), impactando diretamente a resiliência urbana e a segurança dos habitantes.

1.2. As enchentes como um óbice global

As mudanças antrópicas no uso do solo, principalmente relacionadas pela urbanização intensa e não planejada, afetam negativamente os processos hidrológicos, e favorecendo para o

aumento dos eventos de extremos como inundações, além de serem intensificados pelas mudanças climáticas. De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2021), desastres relacionados ao clima e à água, como inundações e enchentes, foram responsáveis por 45% das mortes e 74% das perdas econômicas globais nos últimos 50 anos. A análise preliminar ainda estima que as enchentes tenham causado perdas econômicas de aproximadamente US$ 115 bilhões nesse período (OMM, 2021). Esses eventos são intensificados pela convergência de grandes volumes de água nos corpos hídricos, devido ao aumento da velocidade do escoamento nos sistemas tradicionais de drenagem, provindos da urbanização (Tucci e Bertoni, 2003, citado por Mendes, 2022).

Em cenários continentais, o mesmo relatório traz dados que na Europa, entre 1970 e 2019, foram registrados 1.672 desastres relacionados a enchentes, tempestades e temperaturas extremas, resultando em mais de 159 mil mortes e prejuízos econômicos de aproximadamente US$ 377.5 bilhões (OMM, 2022). No continente Asiático, as enchentes e tempestades de 2020 afetaram 50 milhões de pessoas, causando cerca de 5 mil mortes e perdas econômicas de bilhões de dólares, com a China sendo o país mais impactado, seguido pela Índia e Japão (OMM, 2021). No continente norte americano, segundo dados da NOAA (National Oceanic and Atmospheric), entre 1980 e 2022, apenas as inundações causaram prejuízos de aproximadamente US$ 177,9 bilhões, nos Estados Unidos (NOAA - NCEI, 2022).

As perdas materiais resultantes das inundações e um elevado número de desabrigados e desalojados, exacerbam as desigualdades sociais e afetam desproporcionalmente as populações mais vulneráveis. Em economias emergentes, onde a infraestrutura é frequentemente inadequada, os impactos são ainda mais severos, com comunidades inteiras sendo deslocadas e enfrentando dificuldades para se recuperar (INMET, 2021; OMM, 2021). Além dos danos materiais, as enchentes afetam gravemente a saúde pública de forma generalizada, aumentando a incidência de doenças transmitidas pela água e problemas respiratórios devido à umidade e mofo (Rizzotto et al., 2024).

1.3. As inundações no cenário do Brasil

As inundações na américa do sul e no Brasil especificadamente, representam um dos desastres naturais mais recorrentes e devastadores, com impactos significativos tanto em áreas

urbanas quanto rurais. De acordo com o relatório “Desastres Naturais na América Latina e Caribe”, das Nações Unidas, entre 2000 e 2019, a América Latina e o Caribe sofreram perdas de aproximadamente US$ 1 bilhão devido a 12 grandes enchentes, estando o Brasil, entre os países com maior número de pessoas expostas a inundações (ONU, 2020). A recorrência de inundações no país tem se intensificado, com eventos severos ocorrendo em intervalos cada vez menores; Estudos do INPA (Instituto de Pesquisas da Amazônia) indicam que, nas últimas três décadas, a média de cheias extremas na Amazônia Central aumentou significativamente, passando de uma ocorrência a cada 20 anos para uma a cada quatro anos. O mesmo instituto apontou que ao longo de 120 anos do registro das cheias, o nível médio da água subiu 1 metro, estando a amplitude anual em aumento de 1,5 metros nas últimas três décadas (INPA, 2024;).

As consequências dessas inundações são devastadoras, incluindo deslocamentos em massa, perdas econômicas e danos à infraestrutura. Entre 2008 e 2012, aproximadamente 1,4 milhão de brasileiros foram desabrigados ou desalojados devido a enchentes urbanas, evidenciando a vulnerabilidade das cidades brasileiras à má gestão do uso do solo e à falta de infraestrutura adequada (IBGE, 2013). Eventos de grande magnitude, como as enchentes de 2011 na região serrana do Rio de Janeiro que resultaram em mais de 900 mortes e prejuízos econômicos superiores a R$ 2 bilhões (Busch et al., 2011; Medeiros et al., 2011)

Além destes registros, outro evento chamou a atenção internacional no mês de maio de 2024, o estado do Rio Grande do Sul enfrentou uma das maiores tragédias climáticas de sua história, com mais de 180 óbitos e centenas de milhares de desalojados (Defesa Civil, 2024). As precipitações de longa duração chegaram a valores altíssimos, ao exemplo da cidade de Santa Maria, 533,3 mm de chuva em 10 dias, um valor 3,5 vezes maior do que o esperado para o mês de abril inteiro; o Lago Guaíba segundo os boletins da Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul, dos 497 municípios, 478 foram afetados pelas cheias, 83% do estado encontrou-se em estado de calamidade; o nível do Rio Guaíba alcançou mais de 5,30 metros, ultrapassando o nível normal, o nível de alerta e superando o recorte do nível da cheia histórica de 1940. As inundações causaram destruição generalizada de infraestrutura, incluindo pontes e estradas, e o rompimento de uma barragem, resultando em deslocamentos massivos de populações. O aumento na frequência destes eventos extremos, em conjunto com a crescente magnitude dos danos, associa-se não apenas com as atividades humanas que alteram o ciclo hidrológico

natural, mas também com as mudanças climáticas como encontra-se amplamente documentado (IPCC, 2007; IPCC, 2014; Singh et al., 2020; Garcia, 2021; IPCC, 2022; INPE, 2022; Dantas et al., 2022; Householder et al., 2023; INPA, 2024).

1.4. As inundações no cenário do Nordeste brasileiro

O Painel Internacional de Mudanças Climáticas (IPCC) tem sido igualmente um dos principais divulgadores da ocorrência destes eventos extremos em diversos continentes ao redor do mundo, como também em regiões como o Nordeste brasileiro (Dantas et al., 2022; IPCC, 2022; Santos & Manzi, 2011). A região do Nordeste brasileiro é a terceira maior do país com 1.544.291 km², representando 18,5% do território nacional e abrangendo 9 estados (Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia). É a maior região em número de Unidades Federativas, com aproximadamente 54,6 milhões de habitantes (Arruda et al., 2024; IBGE, 2022). A região possui os biomas Mata Atlântica, Caatinga e Cerrado, com climas tropical, semiárido e equatorial úmido, e precipitações que podem ultrapassar 2.000 mm em algumas áreas.

No cenário de desastres, o nordeste brasileiro tem a maior ocorrência de destes eventos extremos do país, representando cerca de 40% dos casos, com desastres principalmente associados à estiagem/seca e cheias (Moura et al., 2016; Calado et al., 2020). As inundações correspondem a 21% desses eventos extremos na região (CEPED/UFSC, 2012; BRASIL, 2016). De acordo com o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), por meio de um estudo, apontou que as chuvas intensas do final de maio e início de junho de 2022, nos estados de Pernambuco, Alagoas e Paraíba, resultaram em deslizamentos de terra e inundações repentinas, levando a 130 mortes e mais de 130 mil pessoas afetadas, incluindo pessoas desalojadas (Marengo et al., 2023; CEMADEN, 2023). O mesmo estudo apontou que em 28 de maio de 2022, quase 17% de toda a área urbana de Recife foi atingida por enchentes. As fortes chuvas afetaram 130 mil pessoas, conforme dados da Defesa Civil de Pernambuco.

O Brasil possui cerca de 3.000 quilômetros quadrados de áreas com alto risco de desastres climáticos em predominância; essas áreas foram recentemente determinadas como de

alto e muito alto risco de deslizamentos de terra, inundações e inundações repentinas. Pelo menos 825 municípios apresentam vulnerabilidade crítica a desastres. Das mais de 8 milhões de pessoas em maior risco, cerca de 75% residem em áreas propensas a deslizamentos de terra ou a uma combinação de deslizamentos e inundações (Marengo et al., 2023; CEMADEN, 2023). Essa população enfrenta uma vulnerabilidade considerável, conforme o Censo do IBGE de 2010. Entre 1º de janeiro de 2013 e 5 de abril de 2022, os desastres naturais resultaram em prejuízos de US$ 67 bilhões em todo o Brasil (CEMADEN, 2023).

1.5. As novas tecnologias frente aos desafios

A frequência de estudos e pesquisas de relevância têm aumentado constantemente sobre o tema, analisando estes aspectos, principalmente no que tange eventos extremos, gestão de recursos hídricos e manejo do uso e ocupação do solo. Com o aumento dos processos de urbanização supracitados, e consequentemente das áreas impermeáveis, a diminuição da infiltração da água no solo e do excesso de escoamento das águas são problemas recorrentes dos centros brasileiros. Em bacias hidrográficas de pequeno tamanho, que estão localizadas em regiões muito urbanizadas, esses problemas são propensos a serem maiores, pois o tempo de concentração do escoamento superficial é pequeno (Tucci & Bertoni, 2003).

Mesmo diante dos avanços científicos e tecnológicos, e do massivo conteúdo de notícias e estudos relacionados ao tema, dificuldades básicas ainda se encontram, que provém de limitações estruturais e de incentivo relevância desta temática. A primeira delas é a ausência séries históricas dados, contínuos e de qualidade que permitam análises concisas e de caráter de diagnóstico sobre a susceptibilidade de determinados locais ou regiões; e a segunda é a amplitude da cobertura necessária destes estudos, sendo necessário abranger quantidade imensas de áreas, além de monitorá-las. De acordo com um levantamento do IBGE, apenas 59,4% dos municípios do Brasil não contam com um planejamento de gerenciamento de riscos, e apenas 25% possuem em seu Plano Diretor a prevenção de enchentes e enxurradas (IBGE, 2017). O monitoramento de rios é essencial, sendo o dado chave para o escopo das análises, o que atualmente mostra-se em défice, visto que dos mais de 23 mil pontos de estações

fluviométricas, apenas 15% delas enviam dados em tempo real, prejudicando assim, a realização de estudos mais complexos que exijam menor latência nos dados.

Em termos de amplitude de monitoramento, diversas ferramentas e técnicas já cobrem os objetivos de monitorar vastas regiões ao longo do tempo, como o Geoprocessamento, e o sensoriamento remoto. O geoprocessamento, em termos de utilização já é uma das ferramentas mais amplamente utilizadas e essenciais no monitoramento ambiental, proporcionando uma análise detalhada e precisa de dados geoespaciais. Esta técnica envolve a coleta, armazenamento, processamento e análise de informações geográficas, utilizando tecnologias avançadas e integradas em Sistemas de Informações Geográfica (SIG), sensoriamento remoto e Modelos Digitais de Elevação (MDE) e de Terreno (MDT) que conseguem representar digitalmente e numericamente, de forma topográfica, regiões de grande abrangência. O uso de imagens de satélite e aeronaves remotamente pilotadas (ARP), comumente chamadas de drones, (também de VANT, Veículo Aéreo Não Tripulado) tem revolucionado o campo, permitindo a obtenção de dados em tempo real ao longo do tempo e em alta resolução, essenciais para a identificação de mudanças ambientais e a tomada de decisões informadas (INPE, 2001).

As imagens de satélite fornecem uma visão abrangente e contínua da superfície terrestre, facilitando o monitoramento de grandes áreas com eficiência. Estas imagens são fundamentais para a análise de uso e cobertura do solo, detecção de desmatamento, monitoramento de corpos d'água e avaliação de desastres naturais (INPE, 2001). Drones, por sua vez, oferecem uma flexibilidade maior, permitindo a captura de dados em áreas que exigem uma precisão espacial ainda mais elevada. Eles são particularmente úteis em levantamentos topográficos detalhados e na criação de Ortomosaico – imagens aéreas corrigidas geometricamente para representar uma projeção precisa da superfície terrestre (INPE, 2001; INPE, 2006).

A utilização de modelos que possam analisar e prever situações e cenários do comportamento de rios, é então de suma importância para entender o comportamento hidrodinâmico de rios, auxiliando então na melhor tomada de decisão por parte do corpo técnico-gestor da localidade. Dentre estes modelos, está a plataforma do HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) voltadas para estudos hídricos desenvolvidos pelo Centro de Engenharia Hidrológica (Hydrologic Engineer Center - HEC) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos.

O HEC-RAS é um modelo hidrodinâmico conhecido e amplamente difundido para a previsão de áreas inundáveis, que analisa como a água se move, como as inundações se propagam e como as estruturas hidráulicas afetam o fluxo, indo desde simulações mais simplificadas, em regime de escoamento permanente, até simulações mais complexas em regime de escoamento não-permanente (USACE, 2002). Ele também é empregado para simular o comportamento dos rios durante eventos de cheia, permitindo a criação de mapas detalhados de manchas de inundação (USACE, 2002; USACE, 2013).

A integração desses programas possibilita uma análise robusta e detalhada, essencial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação e sistemas de alerta precoce eficazes (Knebl et al., 2005). Com a facilidade da utilização e aplicação de dados hidrológicos, a avaliação e simulação de eventos extremos são aplicados de maneira bem mais eficaz e rápida, prevendo com maior facilidade futuros eventos extremos em áreas de riscos (Mendes et al., 2002; Oliveira et al., 2016).

Sendo assim, o presente trabalho objetiva realizar uma simulação hidrodinâmica de mancha de inundação, utilizando o modelo HEC-RAS, em um trecho de rio rural do nordeste brasileiro, onde existem medições e dados experimentais em andamento como vazão e nível de água, componentes importantes para simulações desta natureza.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

- Simular a mancha de inundação do rio a partir de um imageamento de alta resolução em um modelo hidrodinâmico, com dados monitorados em campo.

2.2. Objetivos específicos

- Avaliar a mancha de inundação gerada a com uma calha do rio inserida artificialmente.
- Comparar as diferenças entre as manchas geradas com relação a inserção ou não da calha do rio.

3. REFERÊNCIAL TEÓRICO

Para ser realizada uma simulação de cheia em um modelo hidrodinâmico são necessários, dados, parâmetros, e considerações de diferentes naturezas. Muitos destes dados são obtidos empiricamente, outros são estimados a partir de informações coletadas em campo, e processadas computacionalmente. Em análises espaciais no geral, o primeiro dado a ser considerado é a morfometria do terreno, visto que é a partir dela, que os elementos presentes localmente expressam sua dinâmica natural, seja em termos de uso do solo ou de recursos hídricos.

Levantamentos topográficos ou com aeronaves auxiliam a percorrer grandes áreas obtendo informações altimétricas, enquanto técnicas mais locais como a batimetria objetivam traçar perfis que representem a profundidade de corpos submersos. Em vistas de analisar em escalas maiores estas informações espaçadas, comumente entre grandes regiões, ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas a exemplo, são utilizadas com objetivo de anexar a estes dados outras informações, como medidas de vazão e nível, permitindo assim uma modelagem destas informações metodologias de simulação. O seguinte referencial teórico apresenta uma série de conceitos que serão de grande valia para a compreensão da metodologia e dos resultados empregados neste trabalho.

3.1. Topografia

A topografia é uma área fundamental da geociência dedicada à descrição detalhada das características físicas da superfície terrestre. Através dela, é possível medir e mapear tanto áreas urbanas quanto rurais, contribuindo diretamente para atividades como construção civil, planejamento territorial, e engenharias e ciências ambientais. Portanto é uma ciência que está intrinsecamente ligada à interpretação e representação do relevo e das variações do terreno em mapas ou plantas topográficas, viabilizando a visualização e compreensão tridimensional do espaço (Gonçalves *et al.*, 2012).

Os levantamentos topográficos são realizados através de técnicas e equipamentos precisos, sendo os principais, Teodolito, que medem ângulos horizontais e verticais, úteis para a triangulação e posicionamento; Estação Total, equipamento que combinam medições angulares e distâncias; Global Navigation Satellite System (GNSS), é um sistema global de

navegação por satélite que engloba diferentes constelações, como o GPS (Global Positioning System). Esses sistemas permitem a determinação precisa de coordenadas geográficas em qualquer ponto da superfície terrestre; Nível topográfico, usados para medir diferenças altimétricas e criar perfis de terreno equipamento é essencial para medir diferenças de elevação entre dois ou mais pontos (McCORMAC, 2007; Gonçalves *et al.*, 2012).

Embora a topografia seja comumente associada à descrição de áreas em terra, há também a necessidade de mapear características de corpos d'água, como rios, lagos e mares, o que leva ao uso da batimetria. A batimetria refere-se à técnica de medição das profundidades de massas d'água, criando um "mapa" do fundo desses corpos (Pacheco, 2010). Equipamentos como o ecobatímetro são comumente usados nesses levantamentos, emitindo ondas sonoras que, ao atingirem o fundo, retornam, permitindo o cálculo da profundidade. A topo-batimetria, por sua vez, é a integração dessas duas áreas – a topografia terrestre e a batimetria. Esse levantamento integrado é amplamente utilizado em projetos de infraestrutura costeira, dragagens e estudos ambientais, já que possibilita a visualização conjunta do relevo submerso e emergido.

Uma técnica derivada do GNSS que tem ganhado destaque é o RTK (Real-Time Kinematic), que oferece precisão centimétrica com correções de imprecisões presentes no GPS convencional, em tempo real. O RTK é amplamente utilizado em levantamentos geodésicos, agrícolas, construção civil, mapeamento e monitoramento ambiental. Ele se baseia no uso de uma estação de referência fixa e de um ou mais receptores móveis, sendo que as correções de erro na posição são enviadas em tempo real por meio de rádio, internet ou GSM, garantindo precisão nas medições (Consoli, 2017).

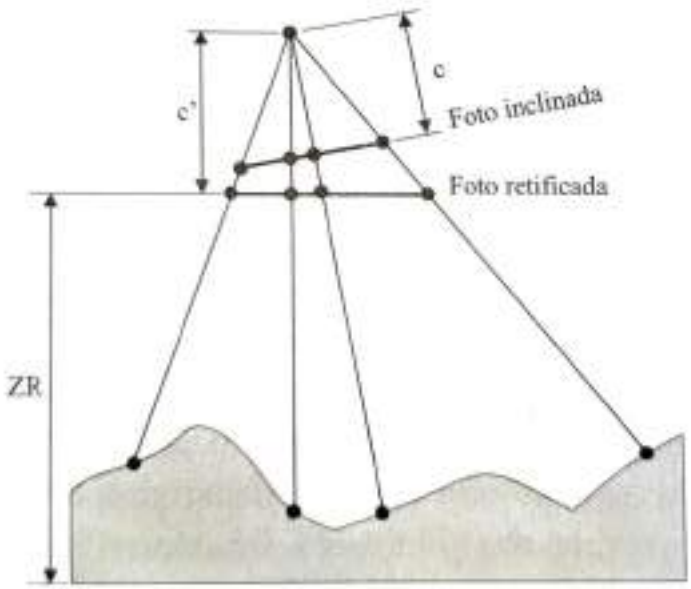
3.2. Aerofotogrametria

A Aerofotogrametria é a aplicação aérea, da fotogrametria, ciência que busca obter informações confiáveis por meio de registros, interpretações e mensurações de imagens. A aerofotogrametria, utilizando comumente aeronaves tripuladas e VANTs (Veíuculo Aéreo Não Tripulado) tem por seu maior campo de atuação contemporânea em outras ciências como Geodésica e Cartografia, onde são utilizadas para posicionamento de pontos na superfície terrestre e produção de mapas.

Os princípios básicos da aerofotogrametria envolvem a captura de imagens de uma mesma área a partir de diferentes ângulos e posições, criando mosaicos estereoscópicos de fotografias. A partir desses mosaicos, é possível aplicar técnicas de sobreposição e triangulação para calcular com precisão a posição de pontos no terreno e, consequentemente, criar modelos tridimensionais da área fotografada (Andrade, 2003).

Após a captura das imagens aéreas, o processo fotogramétrico envolve várias etapas de processamento de dados. As fotografias capturadas precisam ser organizadas, sobrepostas e georreferenciadas para gerar os produtos. Algumas das principais técnicas de processamento incluem a "sobreposição de Imagens", a partir de pares estereoscópicos que possibilita a medição de profundidades e a criação de modelos tridimensionais; "restituição das imagens", um conjunto de técnicas de correções aplicadas às imagens para retificar distorções causadas por fatores como a inclinação da câmera, altura de voo e variações na iluminação (Andrade, 2003; Groetelaars, 2015). A Figura 1 abaixo é um esquema simplificado de uma aerofotografia retificada.

Figura 1 – Esquema de retificação de angulação de imagem fotogramétrica.

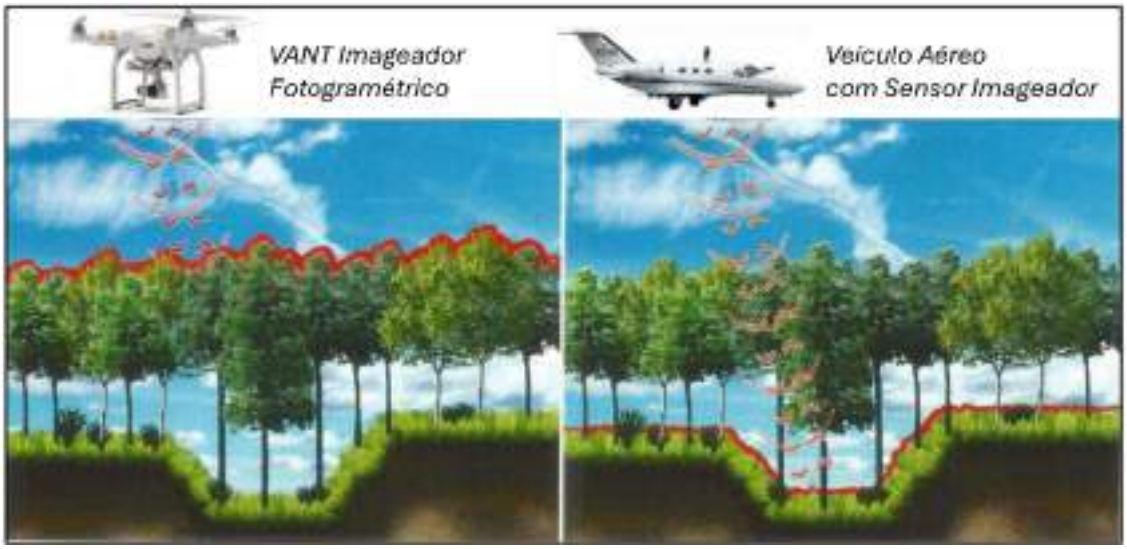


Fonte: Andrade, 2003.

Os principais produtos gerados pela aerofotogrametria para modelos fotogramétricos são o Ortomosaico, um conjunto de ortofotografias, que é uma imagem aérea corrigida geometricamente, onde todas as distorções de perspectiva e relevo são removidas. Esses mapas são amplamente utilizados para estudos de urbanismo, meio ambiente e planejamento territorial, juntamente com Modelos Digitais de Elevação (MDE), do tipo MDS (Modelo Digital de Superfície), criados a partir das ortofotografias aéreas processadas.

Esses modelos são úteis em projetos de infraestrutura, mapeamento de áreas agrícolas, monitoramento ambiental e gestão de recursos hídricos. Ainda assim, metodologia fotogramétrica apresenta limitações quanto a obtenção de Modelos Digitais de Terreno (MDT), visto que a imagens obtidas pelos levantamentos aerofotogramétricos, não conseguem capturar feições e superfícies sobrepostas, podendo um objeto superior ocultar completamente o objeto desejado inferior a ele, o que não ocorre se o veículo aéreo imageador, possuir um sensor com capacidade de penetração do objeto. A Figura 2 abaixo ilustra um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado), tendo sua visualização do terreno ocultada por vegetação, em comparação com um Veículo Aéreo que possui sensor com tal capacidade. (Andrade, 2003; Hung *et al.*, 2018).

Figura 2 – Comparação entre Imageamento por Fotogrametria e por Sensores.



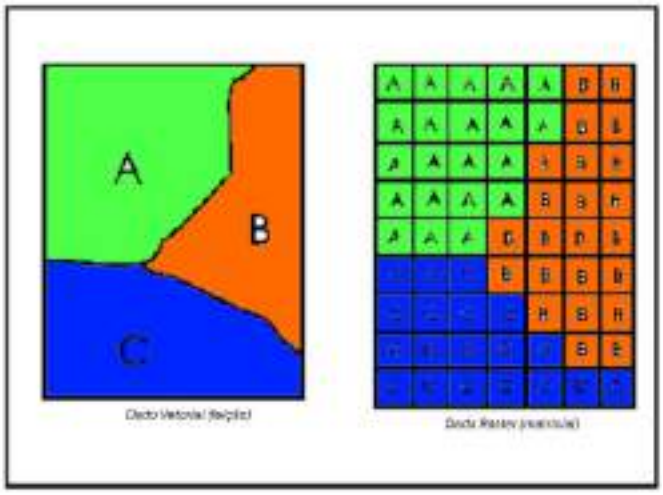
Fonte: Adaptado de Hung *et al.* (2018).

3.3. Sistemas de Informações Geográficas

Tendo em vista o volume de dados gerados por diferentes metodologias de análises espaciais, como métodos topográficos e aerofotogramétricos, faz-se necessário a utilização de softwares com capacidades de composição e processamento destas informações. Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) são ferramentas computacionais capazes de capturar, armazenar, manipular, analisar, gerenciar e apresentar dados referenciados geograficamente (INPE, 2006). Esses sistemas são utilizados para a análise e visualização de informações espaciais e não-espaciais, possibilitando a solução de problemas complexos relacionados à geografia e ao planejamento territorial. A principal característica de um SIG é sua capacidade de integrar diferentes camadas de dados espaciais, facilitando a análise integrada de variáveis geográficas e suas relações. Os dados geoespaciais processados em um SIG são geralmente representados em dois formatos principais: raster e vetor, cada um com suas características e aplicações específicas.

Dados Raster são representados como uma grade regular de células ou pixels, onde cada célula tem um valor associado que representa uma característica do terreno, como elevação, uso do solo ou temperatura. Esse formato é amplamente utilizado em análises de imagens de satélite, Modelos Digitais de Elevação (DEM), que representa numericamente as variações do terreno. Um exemplo comum de dados raster é uma imagem de satélite ou uma fotografia aérea, onde cada pixel representa uma porção específica da superfície terrestre (INPE, 2006; INPE, 2019). Dados Vetoriais são representações de feições geográficas através de pontos, linhas e polígonos. Um ponto pode representar uma entidade como uma árvore ou um marco geodésico; uma linha pode descrever um rio, estrada ou limite geográfico; e um polígono pode representar áreas como lotes, lagos ou bairros. O formato vetorial é altamente preciso para representar feições discretas e detalhadas, sendo amplamente usado em mapas cadastrais, planejamento urbano, rede de transporte e infraestrutura. A Figura 3 abaixo ilustra a mesma área espacializada por raster e por feições de vetores.

Figura 3 – Comparação entre a disposição de dados Raster e Vetoriais



Fonte: adaptado de: INPE (2019).

3.4. Medições de vazão

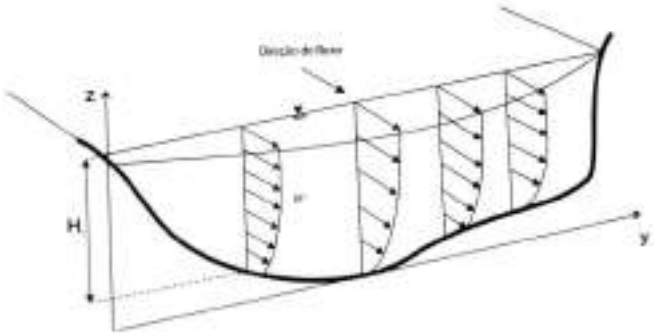
Medições de vazão são necessárias para se conhecer e entender, a disponibilidade e o comportamento da água ao longo de determinado trecho de rio. Os principais componentes que definem o escoamento dos canais livres são, o nível da água, a velocidade e a própria vazão; a não alteração destes parâmetros em escala temporal, regimenta o escoamento como "permanente", isto é, que seus parâmetros não se alteram ao longo do tempo. Quando estes parâmetros não se alteram em termos de espaço, o regime do escoamento é classificado como "uniforme" (Collishonn, 2015). Em regimes permanentes e uniformes a vazão de um canal podem ser estimadas a partir de diversas equações, que em suma relacionam a proporção entre os parâmetros citados; a equação de Manning por exemplo, relaciona o Raio Hidráulico da seção, declividade longitudinal e área do escoamento, pelo coeficiente de Manning, como pode ser visto expresso na equação abaixo.

$$Q = A * \frac{Rh^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}}}{\eta} \qquad (1)$$

Onde “A” corresponde a área do escoamento,” $Rh^{\frac{2}{3}}$” corresponde ao raio hidráulico,” $S^{\frac{1}{2}}$” corresponde a declividade longitudinal/declividade de fundo do canal, e” n” corresponde ao coeficiente de Manning. O coeficiente de Manning é um parâmetro que está relacionado a rugosidade do material existente nas superfícies percorridas pelo escoamento e pelas sinuosidades do canal, sendo diretamente proporcional a eles (Collischonn, 2015).

Em situações reais de medição, além do método analítico, o método comumente utilizado para as vazões de rios é o método baseado em medições de velocidade e de área, ou seja, indiretamente, pela geração do produto entre eles. Este método é realizado através de cortes transversais de cursos de rio, onde a área é coletada por diferentes técnicas topográficas, e a velocidade extraída por equipamentos mecânicos como o Molinete, que calculam o parâmetro a partir da quantidade de giros de suas hélices (Collischonn, 2015). A velocidade da água não sendo igual em todos os pontos da seção, devido ao contato da água com as paredes e o fundo, recomenda-se serem feitas medições em diferentes pontos da coluna d’agua, a depender da profundidade do rio, recomendando-se a 20%, 30%, 40%, 60% e 80% da profundidade; a medição da velocidade pode ser realizada numa única profundidade com considerações de que a lâmina d’água encontra-se entre 15 e 60 cm. Esta medição numa única profundidade deve ser realizada a 60% (Santos et al., 2001; Collischon, 2015). Esta medição é representativa da velocidade média, que será utilizada para cálculo da vazão parcial e posterior vazão total. A Figura 4 representa o esquema de distribuição de velocidades ao longo de uma seção.

Figura 4 – Distribuição de velocidades a variar da profundidade em uma seção.



Fonte: Collischonn, 2015.

Para propagação de cheias e manchas de inundação, são em gerais divididos em dois grupos, métodos hidrológicos e métodos hidráulicos. Os métodos hidrológicos são mais simplificados por utilizarem condições de regime quase-permanente e uniforme, sendo resolvidas por equações como a de Manning; os métodos hidráulicos são bem mais complexos e utilizam um grupo de equações diferenciais formadas pela equação conservação de massa/equação da continuidade (equação 2) e de quantidade de movimento/momentum (equação 3) do rio, chamadas de equação de *Saint-Venant (*Collischonn, 2015; USACE, 2002; Tucci, 2005; Brunner, 2002), que descrevem o regime não permanente.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{A}\right)}{\partial x} + GA\frac{\partial h}{\partial x} = gAS0 - gASf \tag{3}$$

Onde, “A” é a área molhada; “t” é o tempo, “Q” é a vazão, “x” é a distância, “h” é a profundidade, S0 é a declividade do terreno e Sf é a declividade da força de atrito, proveniente de Manning.

3.5. Modelos de Simulação de manchas de inundação

Analiticamente não existem soluções para estas equações diferenciais de Saint-Venant, por isso diversos softwares de modelagem numérica nas décadas mais recentes permitiram soluções completas para estas equações (Collischonn, 2015; USACE, 2002). Um destes modelos, é o HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System). O HEC-RAS é um software desenvolvido pelo Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos para modelagem hidráulica, amplamente utilizado em análises de escoamento em rios, canais e planícies de inundação. Sua principal função é simular o comportamento hidráulico do escoamento superficial, com foco na simulação de cheias e análise de inundações (USACE, 2002).

Ele permite a realização de análises tanto em regime permanente quanto em regime não permanente, com condições de contorno, que influenciam o comportamento do fluxo. No HEC-RAS, essas condições podem ser especificadas para os extremos a montante e a jusante do

trecho de rio ou canal que está sendo modelado. As principais condições de contorno incluem: Vazão Fixa: Uma vazão constante é definida na entrada ou na saída do sistema, sendo essa a abordagem mais simples para simulações em regime permanente; Hidrogramas: Nos estudos de regime não permanente, um hidrograma, que representa a variação da vazão ao longo do tempo; Altura d'água: uma altura d'água ou uma cota específica em uma seção (USACE, 2002; Brunner, 2002).

Outras simulações de cheias mais que não envolvem modelos numéricos complexos e igualmente, válidas e amplamente documentadas, também podem ser realizadas de forma manipulativa por meio de relações com o Modelo Digital de Elevação, partir de dados de nível de água, pluviometrias extremas da região ou por Hidrogramas de cheias (Cian et al., 2018; Paulino, 2014; Moura, 2018).

4. METODOLOGIA

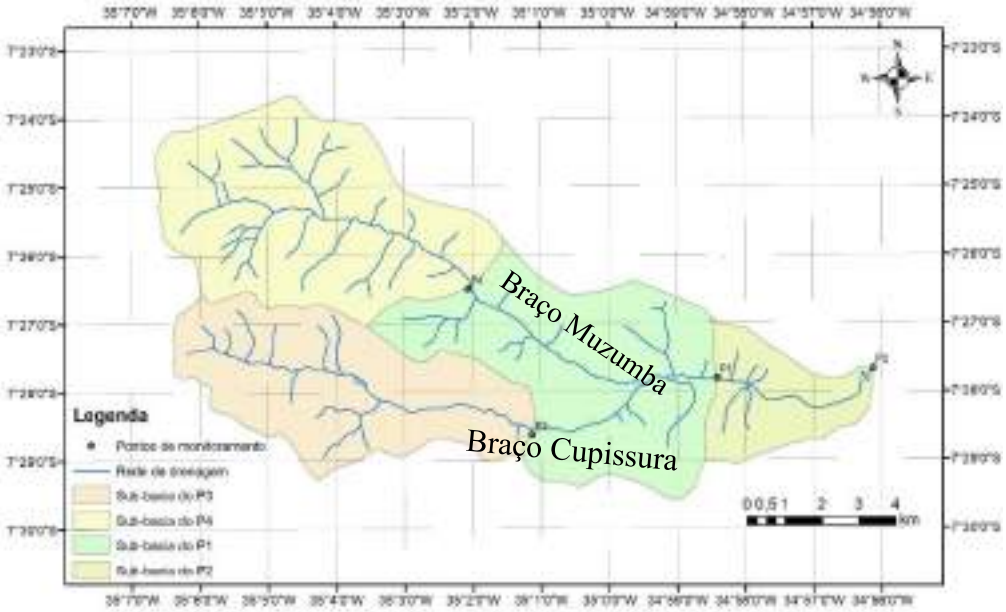
4.1. Preparação da Base de Dados

4.1.1. Descrição da área de estudo

Este trabalho foi desenvolvido em um trecho do rio Cupissura, localizado numa sub-bacia da bacia hidrográfica do rio Abiaí-Papocas. A precipitação média anual, baseada no período de 56 anos de dados (1962 a 2017), é de 1.511 mm, e a evaporação média anual observada é de 1.300 mm. O clima desta área, conforme a classificação climática de Köppen, é do tipo Tropical Úmido, segundo dados do “Relatório de Medições de níveis e vazão do Cupissura (2020)”.

A região estudada possui 4 pontos de monitoramento de vazão e nível de água, espaçados ao longo dos trechos dos rios. A Figura 5 abaixo, é um mapa disponibilizado pelo mesmo relatório mostrando onde encontra-se os pontos de monitoramento, sendo o ponto 4, o escolhido como área de estudo imediata para as simulações.

Figura 5 – Mapa de localização das bacias dos pontos de monitoramento provenientes do relatório.



Fonte: Relatório de Medições de níveis e vazão do Cupissura (2020)

O ponto escolhido "P4" é o ponto mais a montante entre eles, e juntamente com o P2, tem instalado um sensor de nível (transdutor de pressão) para medição de nível de água, sendo o P4 também o que possui melhor acesso com uma estrada bem a frente, estando aos fundos de uma residência. Ele encontra-se na ramificação do Rio Muzumba, apresentando melhores qualidades de medições. Assim como todos os pontos, eles vêm sendo monitorados ao longo de 5 anos por pesquisadores do LARHENA (Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental, da Universidade Federal da Paraíba). A Figura 6 abaixo mostra uma imagem da localização imediata do Ponto 4, região onde ocorrem as medições.

Figura 6 – Mapa de Localização imediata das medições

Fonte: autor (2024).

4.1.2. Monitoramento Fluviométrico

O monitoramento fluviométrico na seção de estudo, iniciado em 2020 pela equipe do Larhena, foi continuado durante o ano de 2024, sendo realizada a batimetria da seção (medição de profundidades transversalmente ao fluxo), medição de vazão e nível.

Para batimetria foram utilizadas discretizações com intervalos de 30cm a 50 cm com auxílio de uma trena, onde seriam coletadas as posições da distância até água, formando assim

as áreas de cada seção. Para medir a vazão, foram determinadas velocidades em vários pontos da seção utilizando dois Molinetes, um convencional (MC) e outro eletromagnético (ME).

O nível de água no rio foi medido manualmente e automaticamente, ambos em relação a um nível arbitrário, cuja cota em relação ao nível do mar foi determinada posteriormente. O monitoramento seguiu-se de 2020 até o período atual (2024), medindo-se batimetria da seção do rio, nível de água e vazão. A Figura 7 abaixo é uma foto da seção de medição do rio estudado.

Figura 7 – Seção de monitoramento (estação fluviométrica) no rio Cupissura

Fonte: autor (2024).

As medições de velocidade do rio foram realizadas indiretamente com suporte de um micromolinete, que foi utilizado para medir o número de rotações a cada 30 segundos. A partir da equação de calibração da hélice do micromolinete, é possível calcular o valor da velocidade. Com as informações do perfil batimétrico, áreas parciais e velocidades médias, são calculadas as vazões parciais, que quando somadas fornecem o valor da vazão total da seção fluviométrica. A Figura 8 abaixo é uma imagem do micromolinete utilizado para as medições.

Figura 8 – Micromolinete utilizado para as medições de velocidade

Fonte: autor (2024).

Para medição do nível da água, foi utilizado um transdutor de pressão e um *datalogger* para registro (Figura 9) . Os dados foram registrados a cada 15 minutos. A cada visita em campo, o nível medido automaticamente era confrontado com a medição manual e, se necessário, era feita a recalibração do sensor. Na Figura 9 encontra-se uma foto do medidor de pressão e o *datalogger*.

Figura 9 – Sensor de nível e Datalogger da Ampeq.

Fonte: autor (2024).

As medições de vazão foram realizadas seguindo a metodologia proposta por Santos *et al.*, 2001, no qual a velocidade pode ser realizada numa única profundidade, quando a lâmina d'água encontra-se entre 15 e 60 cm. Essas medições aconteceram em visitas periódicas no ponto de monitoramento (Figura 6).

Figura 10 – Medição de vazão ocorrida no dia 16/08/2024.

Fonte: autor (2024).

As medições eram anotadas em planilhas que seguiam as posições da trena com as alturas até o nível da água, e logo abaixo os valores relacionados ao micromolinete. O número de giro das hélices era inserido previamente na equação de calibração do micromolinete e o valor da velocidade já era anotado e convertido na planilha. A tabela abaixo exemplifica uma medição ocorrida

Tabela 1- Exemplo de tabela utilizada para medição de vazão, realizado no dia 16/08/2024

Nº da seção	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Posição da trena	450	480	510	540	570	600	630	660	690	720	750	780	810	840
Dist, Da margem (cm)														
Lâmina d'água (cm)	O	28	25	25	24	19	20	19	19	17	18	20	16	
H, med, Da V, (cm)		11	10	10	10	8	8	8	8	6	6	8	6	0
	Vel,	Vel,	Vel,	Vel,	Vel,	Vel,	Vel,	Vel,	Vel,	Vel,	Vel,	Vel,	Vel,	Vel,
Veloc, (m/s)		0.097	0.323	0.497	0.458	0.439	0.397	0.422	0.365	0.429	0.433	0.276		
Veloc, (m/s)		0.102	0.341	0.517	0.442	0.441	0,3 88	0.393	0.38	0.449	0.443	0.299		
Veloc, (m/s)														

Fonte: autor (2024).

A equação 4 abaixo expressa a equação da conversão do número de giro das hélices em velocidade do micromolinete.

$$v = \frac{Ne}{30} * 0.1037 + 0.0206 \quad (4)$$

Onde, “v” é a velocidade média da água na seção “Ne” é o número de giros da hélice do micromolinete.

4.1.3. Levantamento do Ortomosaico e Modelo Digital do Terreno

O levantamento fotogramétrico foi realizado utilizando um drone do modelo “Phantom 4 – Pro”, com sensores de 20 milhões de pixels efetivos (em exibição), com suporte à gravação com qualidade 4K-60p (resolução de 4 milhões de pixels, a 60 quadros-por-segundo) (DJI, 2024). A Figura 11 - Drone ‘Phatom 4 – Pro” abaixo demonstra uma imagem do modelo do drone.

Figura 11 - Drone ‘Phatom 4 – Pro”

Fonte: autor (2024).

Segundo as especificações da capacidade do drone, ele possui uma duração de voo (com relação a bateria) de 30 minutos (DJI, 2024), sendo realizado então 2 voos, com substituição de bateria. O planejamento de voo foi realizado no aplicativo GS PRO, com uma altitude de 50

metros, com sobreposição de 60%. Foram obtidas no total 256 imagens (~3 GB) ao final do levantamento. Antes do voo, foram posicionados no solo, 6 alvos para servirem de pontos de controle (GCPs) para, posteriormente, georreferenciar o mosaico de imagens.

As coordenadas dos 6 alvos foram obtidas por meio de um equipamento GNSS com tecnologia RTK, no sistema de Coordenadas SIRGAS 2000. Posteriormente, a coordenada da base do RTK foi corrigida utilizando o sistema IBGE-PPP. A coordenada original da base possuía coordenadas UTM Norte 9176879.392 e Leste 275387.496, transformando após a correção para coordenadas UTM Norte 9176879.112 e Leste 275387.574.

O processo iniciou as 12:47 e finalizou às 13:50, sendo utilizado pelo IBGE-PPP um fator de conversão de -5,04, com uma incerteza de 0,08 metros. As coordenadas dos alvos então medidas com relação a base foram automaticamente corrigidas após a correção da base. A tabela de coordenadas dos alvos encontra-se na tabela 1 abaixo.

Tabela 2 – Coordenadas UTM dos Alvos usados para georreferenciamento

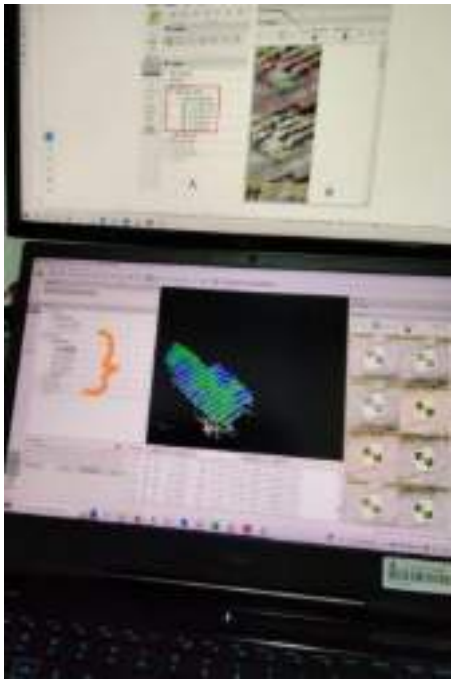
Vértice	Descrição	Norte	Leste	Altitude
0	Base	9176879.1120	275387.5740	56.65
1	Alvo	9177032.3990	275493.1650	49.379
2	Alvo	9176941.2090	275517.4970	49.236
3	Alvo	9177204.8090	275390.2200	50.389
4	Alvo	9176993.3090	275397.6620	54.686
5	Alvo	9176892.1660	275437.6840	52.404
6	Alvo	9176887.5430	275457.2010	50.38

Fonte: autor (2024)

Incluído nos Apêndices deste trabalho encontra-se o relatório do IBGE-PPP. Durante o processamento do Ortomosaico — realizado no Software Pix4d, as imagens que incluíam a presença dos alvos foram anexadas a cada coordenada correspondente dos mesmos (tabela 1), realizando assim o georreferenciamento do conjunto de imagens. Após o georreferenciamento, o software por meio de técnicas de fotogrametria gerou o Modelo Digital de Elevação de Superfície. Posteriormente por meio de uma classificação semiautomática, foram removidos os pontos que correspondiam a objetos como árvores, edificações e outros, com parâmetros automáticos do software, gerando assim o Modelo Digital do Terreno, presente na sessão 5.1 Modelo Digital de Elevação do Terreno e Ortomosaico. A Figura 12-– Processamento sendo

realizado em Software. A Figura 12 abaixo ilustra o processamento no software, na fase de demarcação dos pontos de controle.

Figura 12-– Processamento sendo realizado em Software.



Fonte: autor (2024).

Mendonça (2017) utilizou a mesma técnica de Classificação Supervisionada para a geração de Modelos Digitais do Terreno (MDT) a partir de nuvens de pontos LIDAR (sensor). Neste método, ele classificou os pontos referentes a elementos como vegetação e edificações, utilizando assinaturas espectrais específicas para cada categoria. Essa abordagem permitiu a remoção desses elementos do Modelo Digital de Superfície (MDS), resultando em um MDT que representa apenas o solo exposto. Este processamento foi realizado em um notebook com processador Intel “I7” da décima primeira geração, memorias de expansão de 16Gb, placa gráfica da “NVIDIA” modelo RTX 3060. Visualmente o resultado geral utilizando a técnica de classificação supervisionada conseguiu remover grandes massas de objetos da superfície.

4.1.4. Inserção da Calha do Rio, no Modelo Digital do Terreno

A metodologia de remoção de objetos em modelos digitais de superfície, como qualquer método matemático, possui défices e perdas quanto a obtenção do modelo de terreno (Mendonça 2017; Faria 2017; Gohara et al., 2015), não só devido a imprecisões de cunho numérico, como a própria incapacidade de captar o terreno abaixo de uma superfície mais alta sobreposta, o que ocorre majoritariamente na aerofotogrametria.

O levantamento aerofotogramétrico utilizado para obtenção do Ortomosaico e do Modelo Digital de Elevação da região do rio, por ocorrer em uma zona rural, possui a característica de ter uma vegetação ciliar densa margeando-o, como pode ser visto na seção de resultados Modelo Digital de Elevação do Terreno e Ortomosaico, como também na Figura 13 abaixo, ainda assim, foi possível delimitar a feição que corresponde ao rio, por meio da própria vegetação, como em pequenos locais onde ele torna-se visível. Também foi possível observar através do traçado no Ortomosaico que a extensão do rio no MDT possui 497 metros.

Figura 13 – Recorte do Ortomosaico com vegetação sobreposta ao rio (polígono transparente)

Fonte: autor (2024).

Devido ao rio não estar visível no imageamento aérea, o modelo digital do terreno não pôde fornecer detalhes acerca do relevo ao longo e suas margens. Para sanar essa limitação, foi realizada uma topo-batimetria de uma seção do rio, a fim de observar suas cotas adjacentes, como também internas do rio, para representá-las no modelo digital de terreno. Utilizando uma mira de alumínio graduada e um nível topográfico, a partir de uma cota conhecida (nível de referência zerado) próxima, proveniente dos alvos de controle (ponto 6, Tabela 2), foi feito um caminhamento a partir deste nível de referência por todos os pontos altimétricos. O levantamento seguiu encontrando ao total 18 valores altimetrias espaçadas de 50 cm, traçando os perfis da topografia adjacente e na calha do rio (Figura 14).

Figura 14 – Realização da Topo-batimetria com nível e mira de alumínio.

Fonte: autor (2024).

A tabela abaixo representa os valores topo-batimétricos da calha do rio, com relação a um nível de referência zero.

Tabela 3 – Topo-batimetria da calha

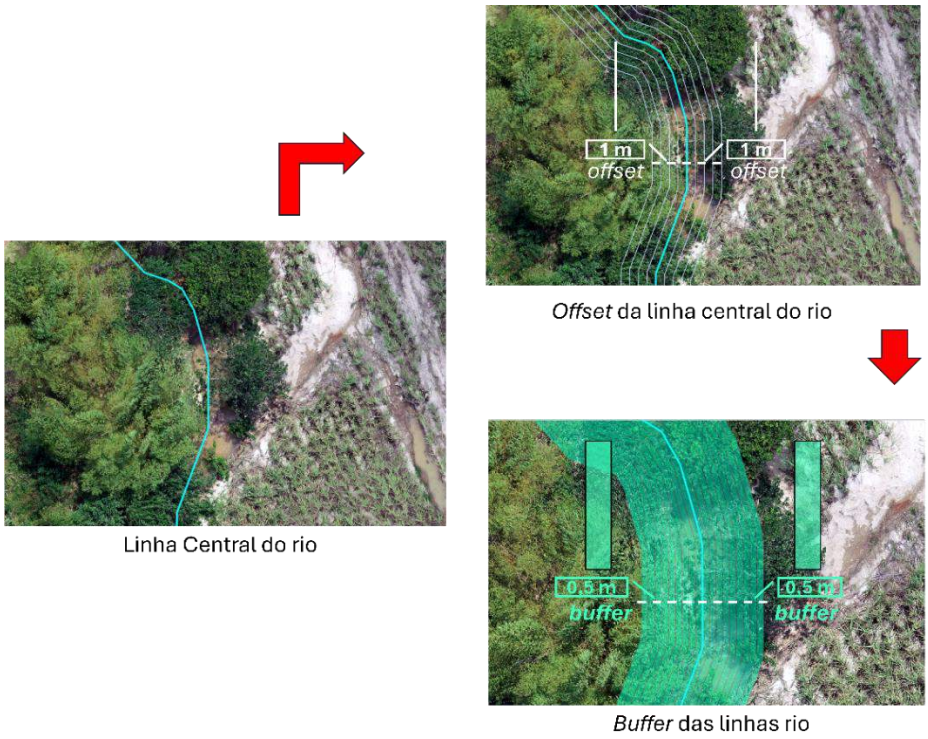
Distância (m)	Altimetria (m)	Distância (m)	Altimetria (m)
0	0	4.5	-1.779
0.5	-0.094	5	-1.817
1	-0.111	5.5	-1.852
1.5	-0.162	6	-1.872

Distância (m)	Altimetria (m)	Distância (m)	Altimetria (m)
2	-0.325	6.5	-1.905
2.5	-0.849	7	-1.607
3	-1.702	7.5	-1.457
3.5	-1.757	8	-1.692
4	-1.755	8.5	-1.427

Fonte: autor (2024).

A partir da topo-batimetria, foi realizado em um software SIG, a modelagem da calha do rio no MDT, utilizando blocos contendo o valor de cada batimetria. Primeiramente foi obtido o alinhamento do rio, a partir da linha central do polígono que representa o rio, construído com base no Ortomosaico. Posteriormente foram inseridos 4 *offsets* (deslocamentos) sequenciais a cada 1 metro, para cada lado da linha central, totalizando 4 linhas paralelas para cada lado. Após isso, foi utilizado a função "*buffer*" em cada linha paralela, com espaçamento de 0,5 metros para cada lado, derivando assim 18 blocos contínuos ao longo do rio. A Figura 15 abaixo ilustra os passos para a criação dos blocos representativos que servirão para inserção das batimetrias.

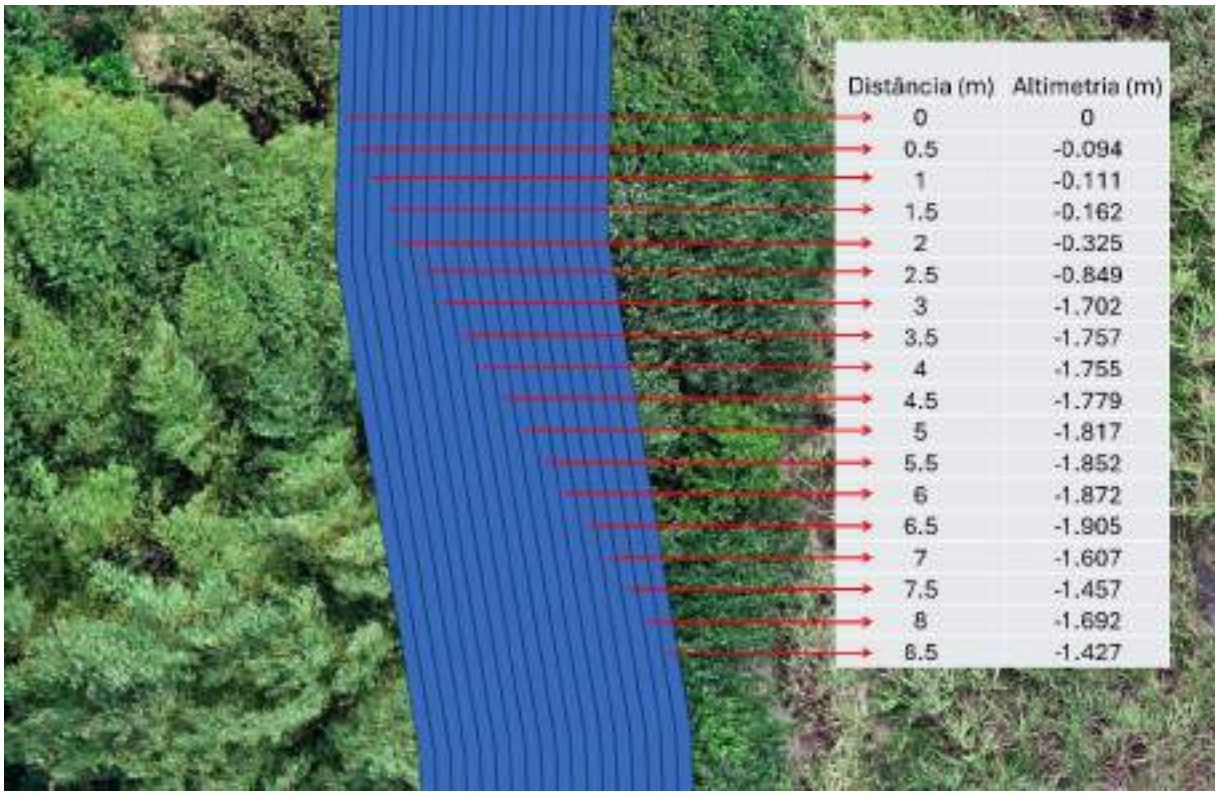
Figura 15 – Esquema de Criação da Calha Virtual



Fonte: autor (2024).

Foi inserido uma coluna de nome “topo-batimetria” na tabela de atributos da feição de cada um dos 18 blocos, contendo o valor da altimetria correspondente a determinada posição de cada um, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Esquema de associação de cada bloco a cada valor de topo-batimetria.



Fonte: autor (2024).

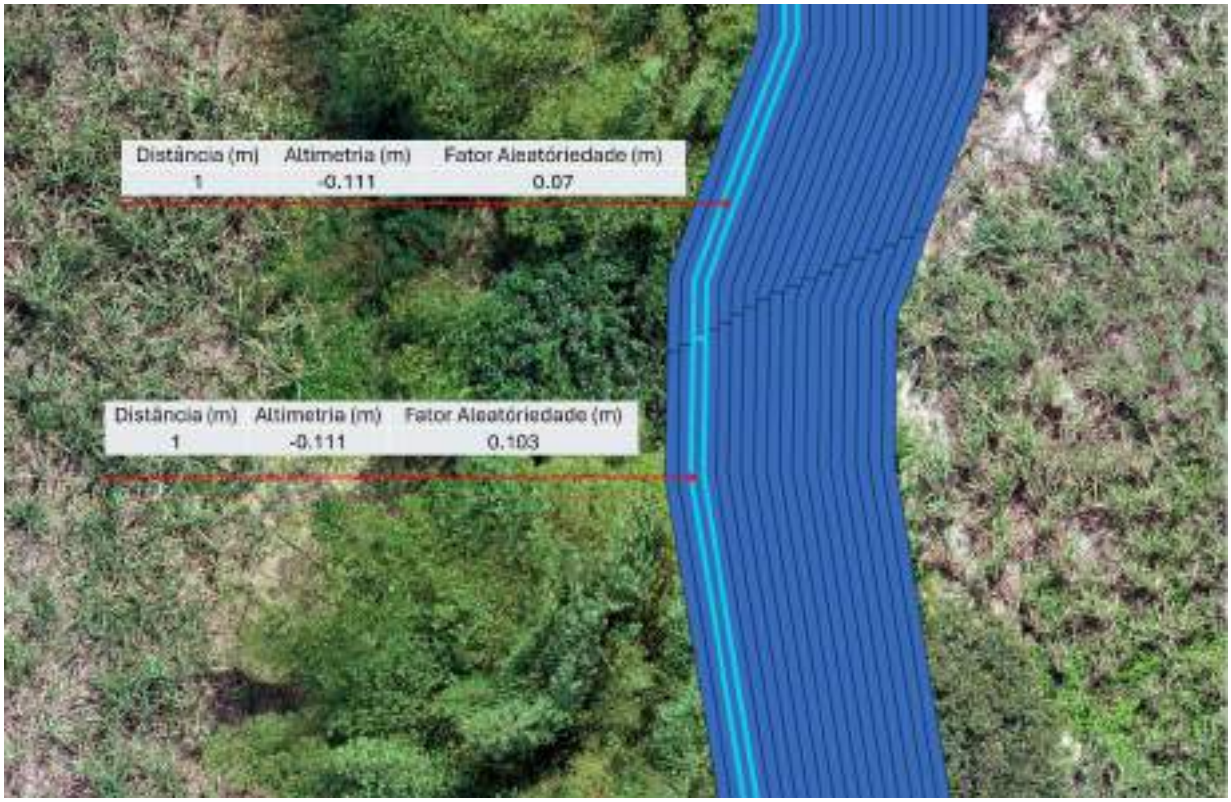
Além disto, de acordo com a consideração de que em pequenos trechos de rio, o perfil das sessões topo-batimétricas varia minimamente como observado em campo, um fator de aleatoriedade foi inserido a cada 100 metros aproximadamente, somado ao valor da batimetria que seria constante ao longo de cada bloco.

Para isto, sabendo que a extensão de cada bloco corresponde exatamente a extensão do trecho do rio (497 metros), foram divididos cada um dos 18 blocos em 5 segmentos de comprimento aproximado de 99.4 metros, criando então uma malha retangular de blocos segmentados que percorre a extensão do rio; utilizando um código em linguagem Python, em cada um destes blocos foi inserido uma nova coluna contendo valores aleatórios, que variam de

+0.15 a – 0.15 metros, afim de estabelecer pequenas variações ao longo da topo-batimetria que seria considerada parcialmente constante; este intervalo de valores foram variações arbitradas com base em observações locais e no MDT, da declividade natural do terreno.

Na sessão em Apêndice deste trabalho, encontra-se o código em Python utilizado para esta manipulação. A Figura 17 é uma ilustração de uma seção dos blocos, onde mostra uma linha de bloco segmentada, ambas contendo a mesma topo-batimetria por estarem na mesma posição altimétrica, mas com variações aleatórias diferentes por estarem segmentadas (com segmentação de aproximadamente 100 metros.)

Figura 17 – Ilustração em esquema de uma seção dos blocos, com seus respectivos valores de batimetria e fator aleatório.



Fonte: autor (2024).

Estas considerações foram tomadas diante não apenas da resolução espacial do Modelo Digital de Terreno, que representa bem mais detalhes na topografia, como também tendo em vista simular a aleatoriedade natural do terreno.

Possuindo as feições que contém os valores de topo-batimetria e valores representando aleatoriedades naturais, foi gerado um novo código Python para que fossem inseridos estes valores no MDT na região correspondente a calha do rio. Sendo todas as manipulações no ambiente SIG, georreferenciadas no Sistema de Coordenadas Planas SIRGAS 2000, Zona 25 S, os pixels que foram modificados para gerar a calha do rio, correspondem exatamente a área onde encontra-se a feição contendo os 18 blocos segmentados.

Esta feição contendo os 18 blocos segmentados, possuindo em seus atributos as informações topo-batimétricas necessárias, o código implementado para modelar a calha então seguiu o algoritmo de álgebra de mapas, somando os valores dos pixels da região onde a calha deve se encontrar (feição contendo o bloco), aos valores topo-batimétricos presentes em cada bloco e seus respectivos fatores de aleatoriedade. A equação 5 abaixo, exemplifica a lógica do algoritmo feita; o código em Python utilizado para modelar os pixels da calha encontra-se na sessão de Apêndices.

$$Pixels\ da\ calha = Pixels_{MDT} + Batimetria_{bloco} + Fator\ Aleatorio_{bloco} \quad (5)$$

Onde Pixels da calha correspondem aos pixels na região do rio a serem modificados para gerar a calha, "$Batimetria_{bloco}$" corresponde ao valor da batimetria no bloco correspondente, "$Fator\ Aleatória_{bloco}$" ao fator de aleatoriedade respectivo a este bloco. O resultado do MDT com a calha encontra-se na sessão de resultados deste trabalho.

4.2. Metodologia das Simulações

Para realização das simulações de cheias, foram utilizados o HEC-RAS com regime permanente na situação com a calha virtual inserida, e sem a calha.

4.2.1. Regime Permanente no HEC-RAS.

Para a modelagem em regime permanente no HEC-RAS (versão 6.6), foram considerados uma série de parâmetros e dados que são requeridos por ele para simular a cheia. Inicialmente os primeiros parâmetros são o sistema de unidades e o sistema de referência, que correspondem a metros no Sistema Internacional e o SIRGAS 2000, Zona 25 S (obtido por

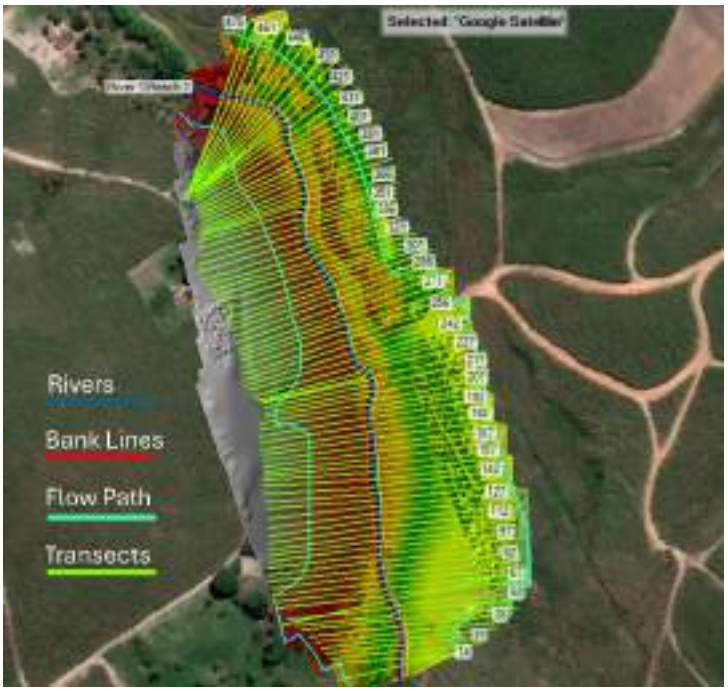
transferência através do *Spatial Reference*, 2024). Os dados seguintes que foram inseridos no modelo, são de caráter geométrico e espacial da simulação.

O HEC-RAS possui in SIG dedicado (RAS Mapper), onde Modelos Digitais de Elevação e feições podem ser criadas e inseridas. Este ambiente permite inserção de informações detalhadas sobre a geometria do canal, incluindo largura, profundidade e inclinação do leito. Esses dados são fundamentais para criar a representação física do canal no modelo, permitindo simulações precisas do fluxo de água. O primeiro destes dados inseridos é o MDT, que será utilizado para construir o parâmetro "*Terrain*", que representa o relevo da superfície que será posteriormente empregado no processamento para criar geometrias precisas na análise de rios e planícies de inundação (USACE, 2002); o MDT utilizado para construção deste "*Terrain*" foi o manipulado contendo a calha artificialmente gerada.

Além do MDT, arquivos de geometria foram requeridos, como o "Rivers", que representa a feição do trecho do rio, a qual já foi obtida anteriormente; "Bank Lines", que definem as margens do canal ou rio, e delimitam os limites laterais da calha do rio, onde ocorrem as mudanças de rugosidade; "Flow Path", que delimita o centro de massa do fluxo em áreas de transbordamento (USACE, 2002). As referidas feições foram delimitadas com base na altimetria e nas mudanças de uso do solo observadas com base no Ortomosaico, sendo criadas em um ambiente SIG independente e importadas para o RAS-Mapper do HEC-RAS.

As "*Cross Sections/transects*" é um parâmetro fundamental para análise de toda a geometria do canal; recomenda-se serem dispostas perpendiculares ao longo do curso d'água para caracterizar a capacidade de transporte do fluxo no canal e na planície de inundação adjacente, como também representar o corte de sessões ao longo do trecho, analisando cada um dos parâmetros inseridos. (USACE, 2002; Mendes et al., 2022). A Figura 18 representa a interface com a vista da geometria contendo todos os parâmetros supracitados.

Figura 18- Interface do RAS-Mapper contendo as informações de geometria



Fonte: autor (2024).

Como é possível observar na figura 1 acima, os transectos preencheram quase integralmente toda a área entre as linhas,, como segue a recomendação (USACE, 2002). Foram traçados para esta construção, transectos em diferentes mudanças de amplitude entre linhas, e utilizado a função de interpolação de feições de transectos, obtendo então uma grade com total de 95 transectos. Na aba de “Edição de Geometria”, fora do ambiente do “RAS-Mapper”, os transectos puderam ser observados mais criteriosamente acerca da extensão de corte e da declividade da seção, com as cotas obtidas a partir do MDT.

Para as condições do escoamento superficial que definem a equação da vazão, na aba de “Edição de Geometrias” estabeleceram-se dois coeficientes de rugosidade de Manning, considerando as áreas vegetais e de canal natural ao longo do trecho de rio. Nas áreas de superfície com vegetação considerável, correspondente ao exterior da calha ("*Bank Lines*), foi utilizado um coeficiente de Manning de 0,4; nas áreas interiores a calha (canal principal/*Rivers*) com canal natural, um coeficiente de 0,16. O coeficiente de Manning é crucial para estudos de macrodrenagem de rios, pois caracteriza a vazão em regime permanente, sendo inversamente

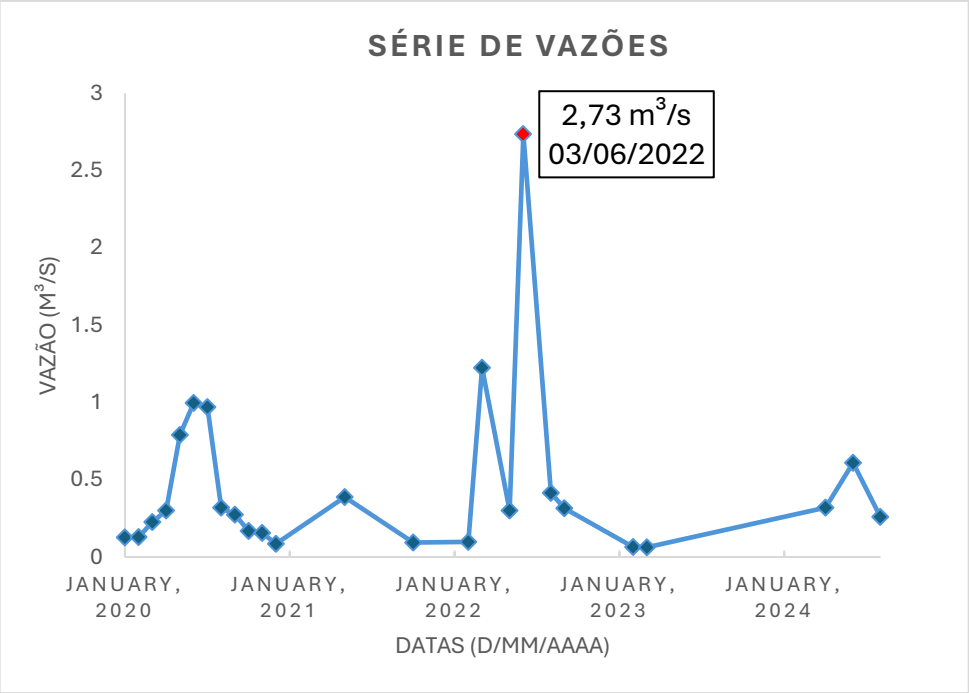
proporcional a ela, conforme ilustrado na equação 1. Os valores de Manning foram obtidos a partir da literatura de Baptista (2011) e IPH, (2005). Esses dados foram inseridos nas configurações de geometria, alterando a tabela de rugosidade das feições inseridas no RAS Mapper; a Figura 19 abaixo, ilustra as considerações tomadas para os Manning adotados.

Figura 19 – Considerações acerca dos valores de Manning Adotados.

Fonte: autor (2024).

Tendo sido feitas as definições de geometria e de regime de escoamento, na aba de gerenciamento da simulação foi escolhido a opção "Steady Flow"; dado que se trata de um regime permanente (isto é, as condições não variam ao longo do tempo), o HEC-Ras requer um valor de vazão a ser inserido para que seja simulado a mancha de inundação. Foram observados os valores de vazão obtidos ao longo da série descrita no item 4.1.2, e selecionado o maior valor presente no intervalo de tempo das medições, objetivando simular a condição extrema do estudo. O Gráfico 1 abaixo transcreve a série de vazões ao longo das medições.

Gráfico 1 – Série de vazões evidenciando um pico dentre os valores.



Fonte: autor (2024).

O valor máximo encontra-se no dia 03/06/2022, onde medido uma vazão de aproximadamente 2,73 m³/s, e como pode-se observar pelas datas, ocorreu no período de chuvas da região. O citado valor foi inserido como vazão de condição do HEC-RAS, juntamente com as condições de contorno do regime, que para montante foi escolhido o nível da água medido no dia da medição de vazão, de 49,305 metros, e para jusante, foi escolhido a declividade de fundo do canal, sendo obtida a partir do MDT, resultando num valor de 0,48%.

A posterior, o HEC-Ras prepara um plano de geração da simulação, que consiste apenas na escolha da geometria, e do regime de escoamento, se encontra-se entre Subcrítico, crítico e Misto, para esta simulação, foi adotado o regime misto, ao qual permite o modelo adotar automaticamente o regime, a depender das condições locais (USACE, 2002; Brunner, 2002). Ao fim foi gerado a mancha de inundação para as condições adotadas, os resultados discutidos encontram-se na sessão 4.3 Mancha de Inundação Gerada por Regime Permanente no utilizando a calha modificada. A posterior também foi realizada a mancha para o MDT original, com as mesmas condições de simulação.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Modelo Digital de Elevação do Terreno e Ortomosaico

O primeiro resultado obtido, e de caráter fundamental para os outros resultados é o Modelo Digital de Elevação do Terreno (MDT), visto que toda a simulação essencialmente depende desta superfície numérica onde será modelada toda hidrodinâmica. A Figura 20abaixo, é um mapa que contêm o modelo digital do terreno e o Ortomosaico das imagens.

Figura 20 – Mapa do Ortomosaico e Modelo Digital de Terreno (MDT)

Fonte: autor (2024).

De acordo as condições de voo fornecidas, com uma altitude de 50 metros, e sobreposição de 60%, no software mencionado no item da metodologia 3.3 Levantamento do Ortomosaico e Modelo Digital do Terreno, foi possível gerar um MDT com Resolução Espacial de 6 centímetros. A precisão do MDT foi considerada alta, estando diretamente relacionado com as condições de voo da aeronave, como altura de voo e sobreposição das imagens (ROCK *et al.*, 2012; Jiménez-Jiménez *et al.*, 2021). A Figura 21 abaixo é uma comparação entre a imagem do google utilizada como mapa de fundo, e o Ortomosaico gerado.

Figura 21 – Comparação da Resolução Espacial entre a imagem do Google e o Ortomosaico.

Fonte: autor (2024).

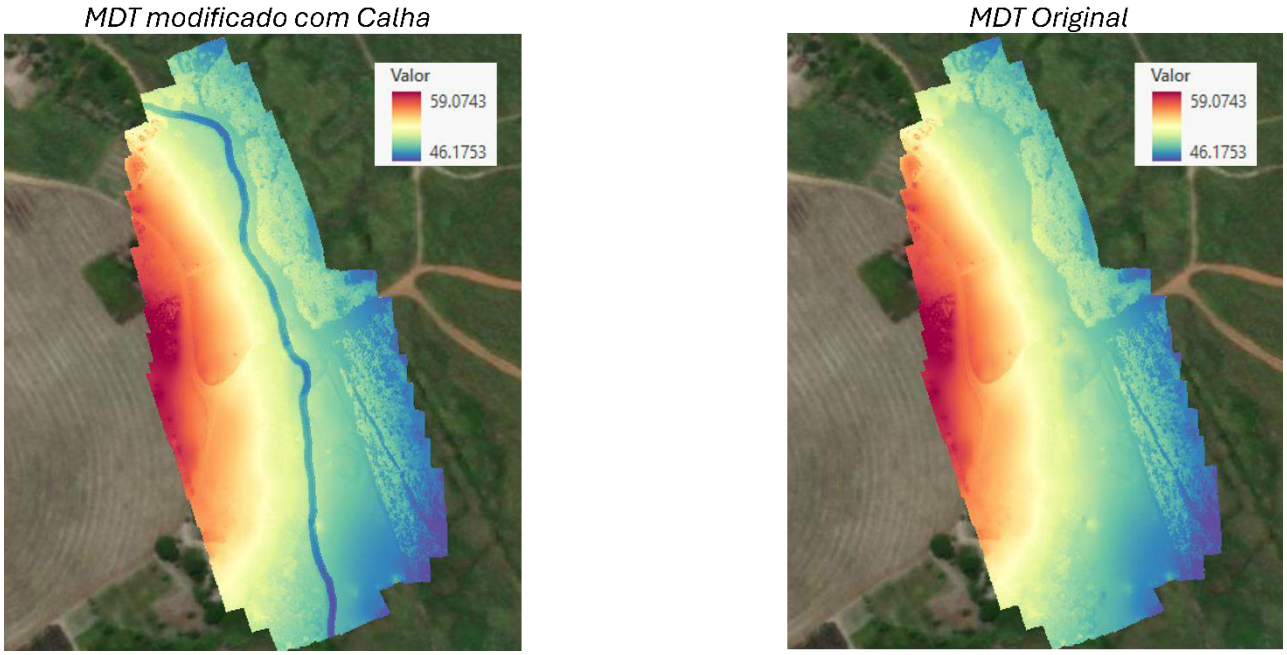
A alta qualidade das imagens, permitiram, seguindo os métodos de fotogrametria, gerar um Modelo Digital de Elevação igualmente preciso e com qualidade como pode ser visto por

toda sessão de resultados; segundo a literatura de Pessacg et al., 2022, condições de voo similares foram utilizadas, gerando impacto positivo na criação de MDE em ambientes DE condições florestais.

5.2. Modelo Digital de Elevação do Terreno Modificado com Calha

Seguindo a metodologia descrita no item 3.4 Inserção da Calha do Rio, no Modelo Digital do Terreno, obteve-se o Modelo Digital do Terreno inserido a calha do rio; a figura abaixo ilustra a comparação entre o MDT original apresentado no tópico anterior, e o MDT com a calha modelada.

Figura 22 – Comparação entre MDT com calha e MDT original.



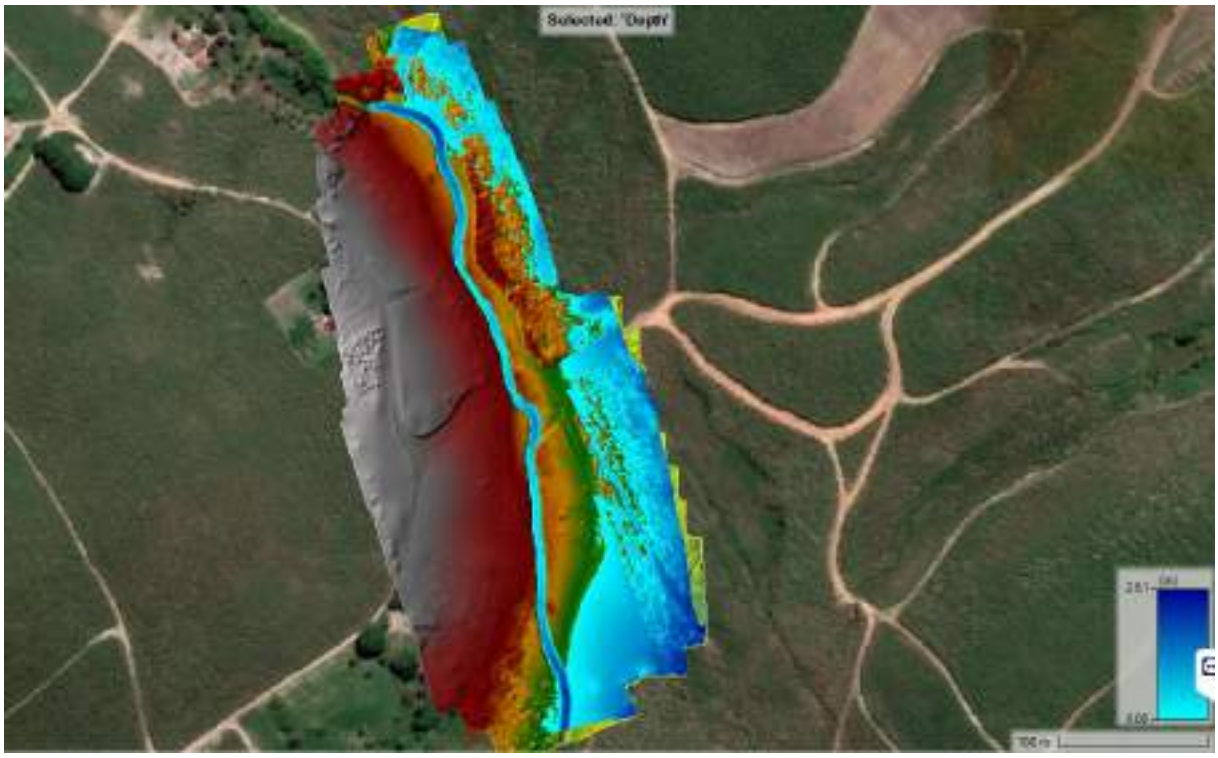
Fonte: autor (2024).

O resultado foi considerado satisfatório visto que os valores inseridos para modelar a calha não modificaram o histograma de cores pois a topo-batimetria não apresentava valores altos de modificação do terreno, como pode ser visto na Tabela 3.

5.3. Mancha de Inundação Gerada por Regime Permanente utilizando MDT modificado

Seguindo a metodologia de geração de mancha descrita no item 3.2.1 Regime Permanente no HEC-RAS., utilizando o MDT modificado com calha inserida, obteve-se a mancha de inundação em regime permanente, como pode ser aferido na Figura 23 abaixo.

Figura 23 – Mancha de inundação gerada em regime permanente com calha virtual inserida, no ambiente RAS-Mapper.



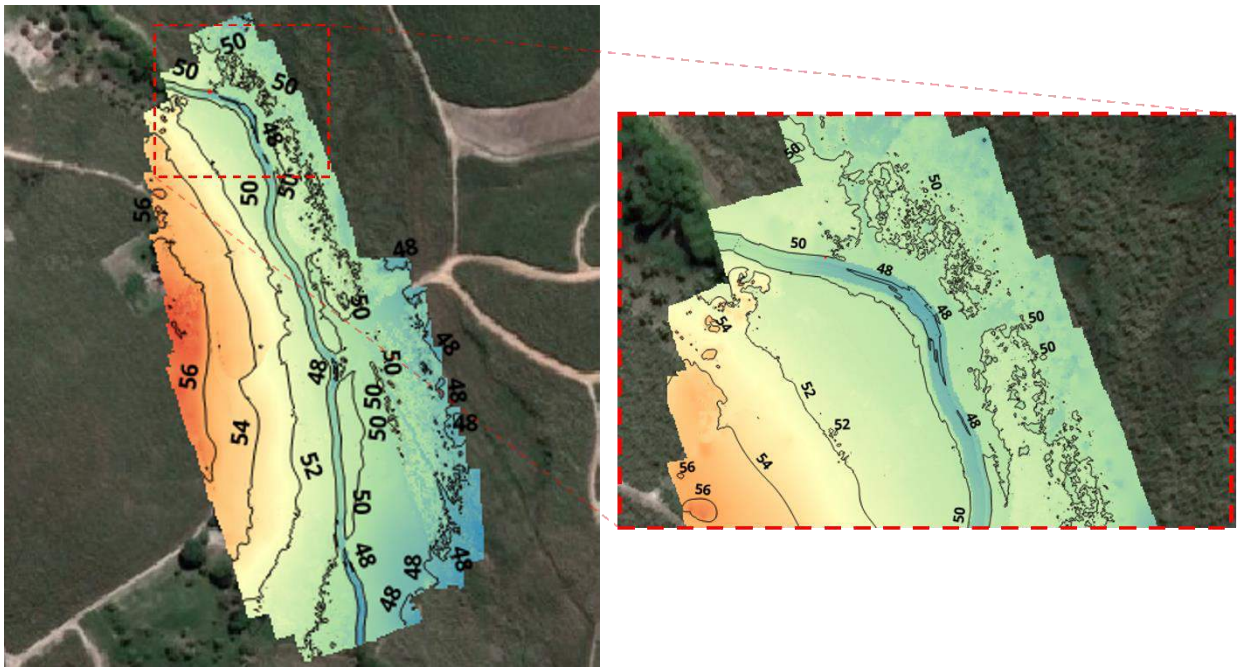
Fonte: autor (2024).

É possível observar que a mancha de inundação seguiu a calha criada artificialmente, com alguns pontos com profundidade alta a variar do terreno. Também foi possível observar, que a mancha de inundação se espalhou para fora da malha delimitada pela calha, na região superior, a partir de altimetrias menores encontradas no terreno.

5.1.1. Análise topo-hidráulica da mancha de inundação

Analisando a o MDT da região, foram geradas curvas de nível com espaçamento de 2 metros, para análise topográfica na região afim de aferir as mudanças de terreno. A Figura 24 abaixo mostra as curvas de nível feitas em ambiente SIG.

Figura 24 – Curvas de Nível da região de queda altimétrica.



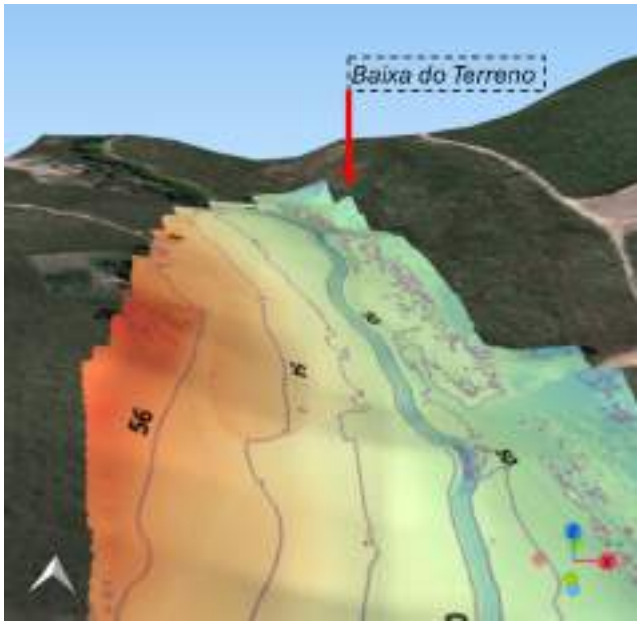
Fonte: autor (2024).

A partir da figura acima, observa-se que existe uma brecha entre as cotas 50 e 48 (espaçamento de visualização de 2 metros), por onde a água, caso atinja esta cota limitante, escoaria, observando uma predominância acentuada da declividade existente do terreno sobre o escoamento predefinido das limitações da calha ─ inseridas virtualmente na topografia do modelo utilizando o método descrito na sessão 4.1.4, como nas geometrias do canal do HEC-RAS.

As ferramentas utilizadas também permitem a utilização de interfaces tridimensionais que auxiliam a visualização do MDT; por meio do SIG, "QGIS", utilizando um *plugin* gratuito no repositório *(Qgis2threejs),* foi possível visualizar a queda altimétrica adjacente a calha do

rio, por onde a água adentrou e teve acesso as cotas da estrada. A Figura 25 abaixo é a visualização da interface do plugin tridimensional, explicitando a queda altimétrica.

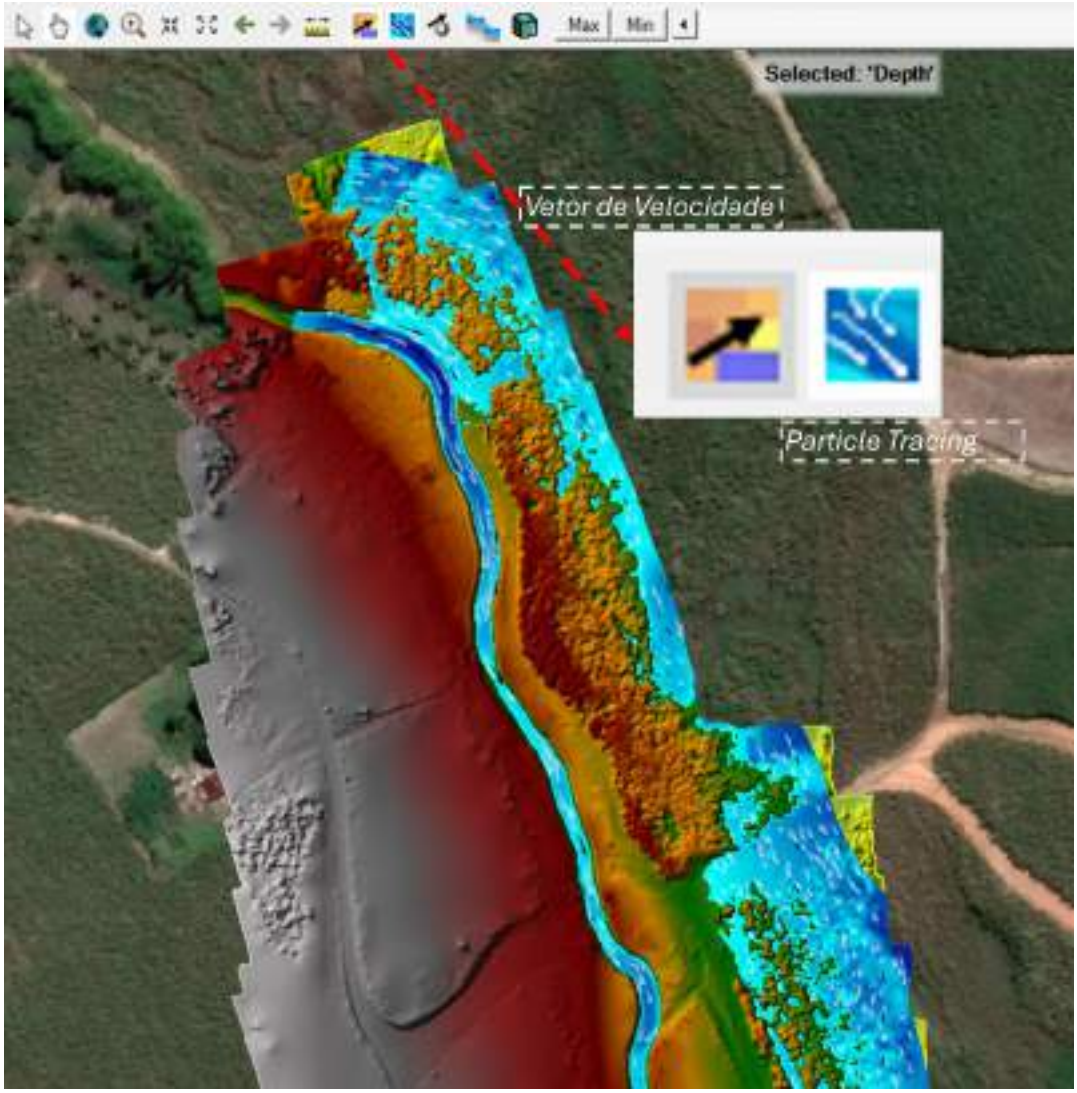
Figura 25 – Queda altimétrica da adjacência da calha virtual do rio.



Fonte: autor (2024).

Além destes métodos de visualização, ainda é possível enxergar em termos hidráulicos a movimentação da água, por meio das cotas topográficas. Dentro do RAS-Mapper, existem diversas funções que permitem tais análises; “particle tracing” que exibe a rota dos fluxos das partículas ao longo de toda a região de estudo, juntamente com o vetor de velocidade que gera setas informando a direção que o fluxo da agua se seguiu podem ser atividas diretamente sobre o MDT e o arquivo geral da mancha; A Figura 26 demonstra as visualizações do “Particle tracing” e o do vetor de velocidade, exibindo pequenas partículas esbranquiçadas que seguem o fluxo, como também setas escuras que apontam sua direção.

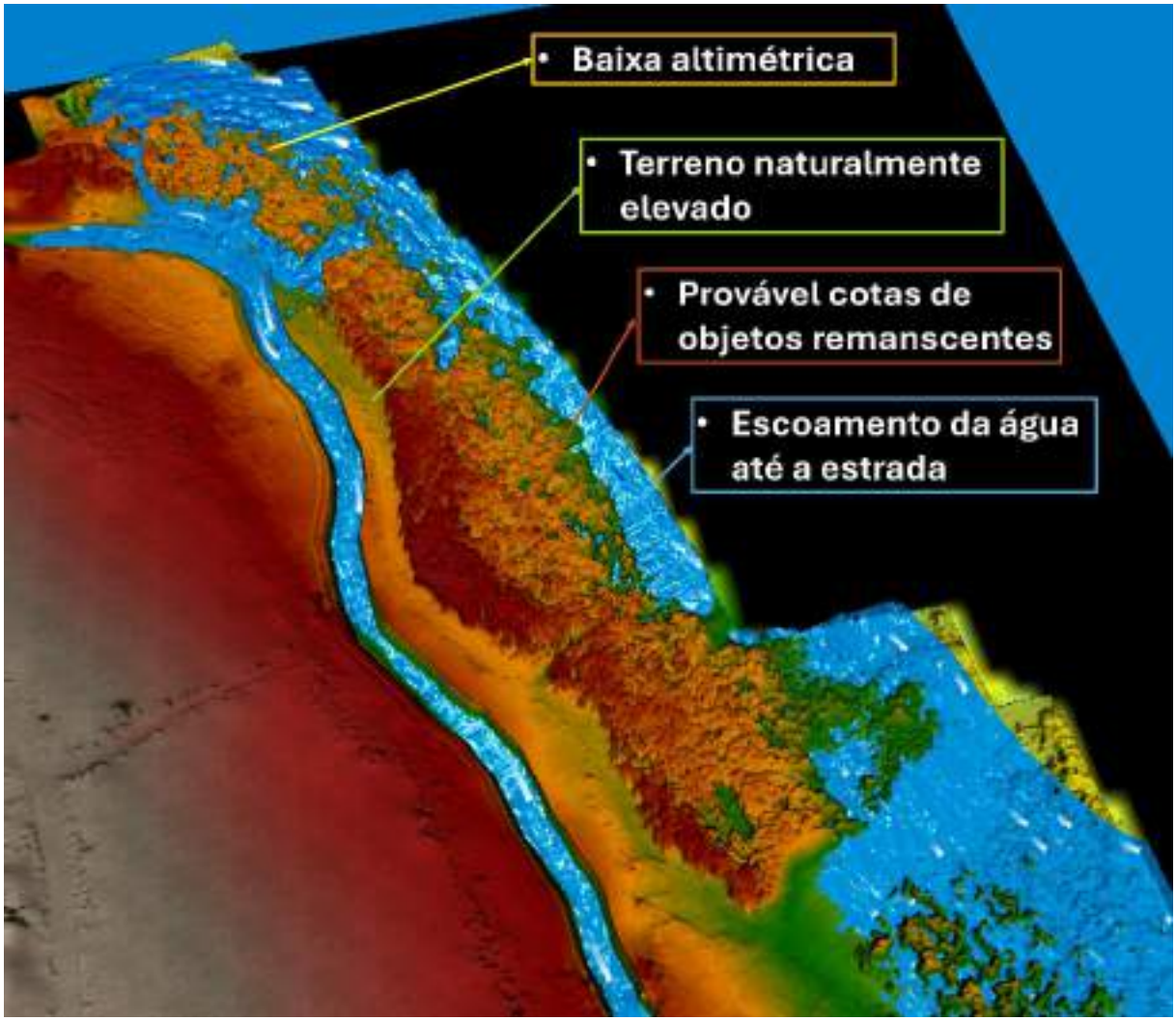
Figura 26 – Particle Tracing e Vetor de velocidade na região da queda altimétrica.



Fonte: autor (2024).

É possível observar, por meio de ambos os parâmetros visuais de fluxo, demonstrando visualmente que a água escapou dos limites da calha do rio, encontrando uma rota de maior declividade descendente, até alcançar a estrada. Outro método de aferição de movimento hidráulico, é a ferramenta “RAS 3D Viewer” nativa do “RAS-Mapper”, por onde é possível visualizar tridimensionalmente o MDT e o caminho da água, como maiores detalhamentos do MDT, que antes não poderiam ser aferidos em visualizações bidimensionais. A Figura 27 abaixo, demonstra a direção do fluxo tridimensionalmente, como detalhamentos do terreno antes não percebidos.

Figura 27 – Visualização do RAS 3D Viewer.



Fonte: autor (2024).

Analisando a figura acima é possível visualizar com maior clareza de detalhes, além do fluxo direcional da água saindo da calha do rio e adentrando na baixa altimétrica, como também o contorno do fluxo da água para regiões mais baixas do relevo, até arrematar na estrada. Também é possível aferir outros pontos, como provável cotas arbustivas, provenientes de objetos remanescentes não removidos durante o processo de classificação supervisionada (ver sessão 4.1.3), que no entanto, não alteraram a topografia, como visto acima, devido ao próprio terreno ser acentuadamente elevado na região.

5.1.2. Análise da lâmina da água na mancha de inundação

Devido a constantes idas a campo para realização de medições, incluindo em períodos com altos índices pluviométricos que ocasionaram cheias como a escolhida para as simulações, como consta no Gráfico 1, é natural que sejam realizados registros fotográficos e de vídeo, especificadamente quando trata-se de uma cheia significativa, que se encontra com comportamento acima de outros dias. No dia com vazão de pico escolhido para a simulação (03/06/2022), foi realizado diversos registros da estrada que se encontra na área de estudo, como pode ser visto na Figura 28 abaixo.

Figura 28 – Registro fotográfico feito no momento da cheia, na região da estrada.

Fonte: autor (2024).

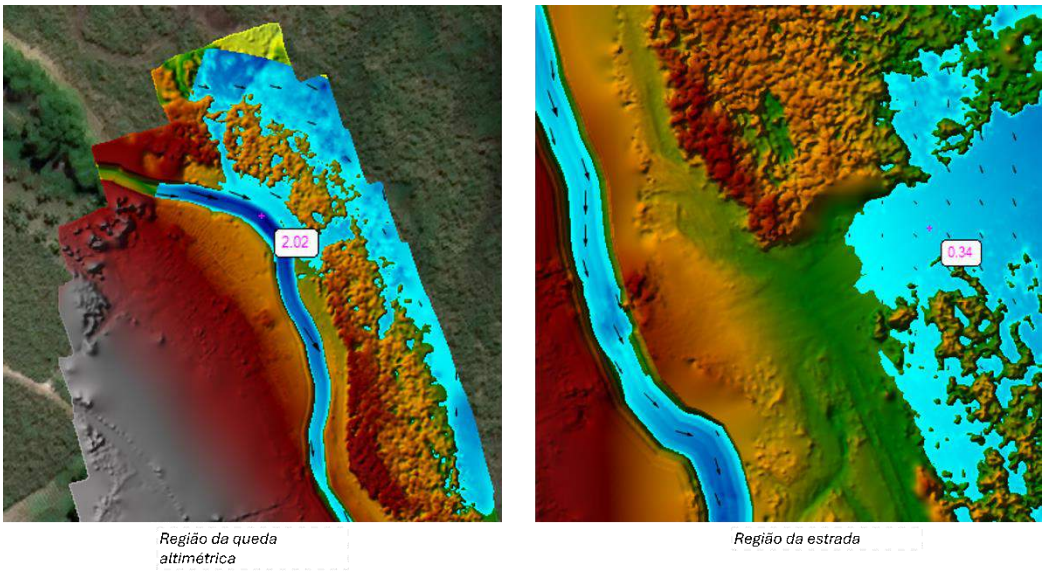
É possível observar explicitamente diante dos resultados observados no subtópico anterior da análise da mancha de inundação, que o comportamento do escoamento foi condizente com o encontrado na situação real do dia da medição, presente na figura acima, com a mancha de inundação simulada atingindo as cotas de nível de água da estrada na região de estudo, tal qual foi possível analisar por onde a água chegou.

Por meio do HEC-RAS também é possível analisar a profundidade da lâmina de água na interface do HEC-RAS. Considerando que a lâmina d'água é dada pela simples igualdade entre a diferença da cota da água por a cota do terreno, como expresso na equação (6) abaixo.

$$y = Cota_{Água} - Cota_{Terreno} \quad (6)$$

Sendo "y" a lâmina de água, "$Cota_{Água}$" a cota do nível da água, e "$Cota_{Terreno}$" a cota do terreno. A cota da água aferida na data da medição, como visto na sessão 4.2.1 Regime Permanente no HEC-RAS com MDT modificado, foi de 49,305 metros, e a cota do terreno, com base em pixels no MDT na região próxima a queda altimétrica, foi de aproximadamente 47 metros, sendo assim, a altura da lâmina teria valores próximos a 2 metros dentro da calha na região superior. Analisando o raster da área alagada da estrada é possível também observar que na Figura 28, a lâmina da água encontra-se pouco abaixo do pneu da caminhonete presente no registro, e os valores observados na estrada gravitaram aproximadamente entre 12 centímetros e 1 metro, podendo visualmente, se aproximarem dos valores encontrados na Figura 28. A Figura 29 abaixo mostra as lâminas de água obtida para ambos os lugares.

Figura 29 - Valores de lâmina de água.

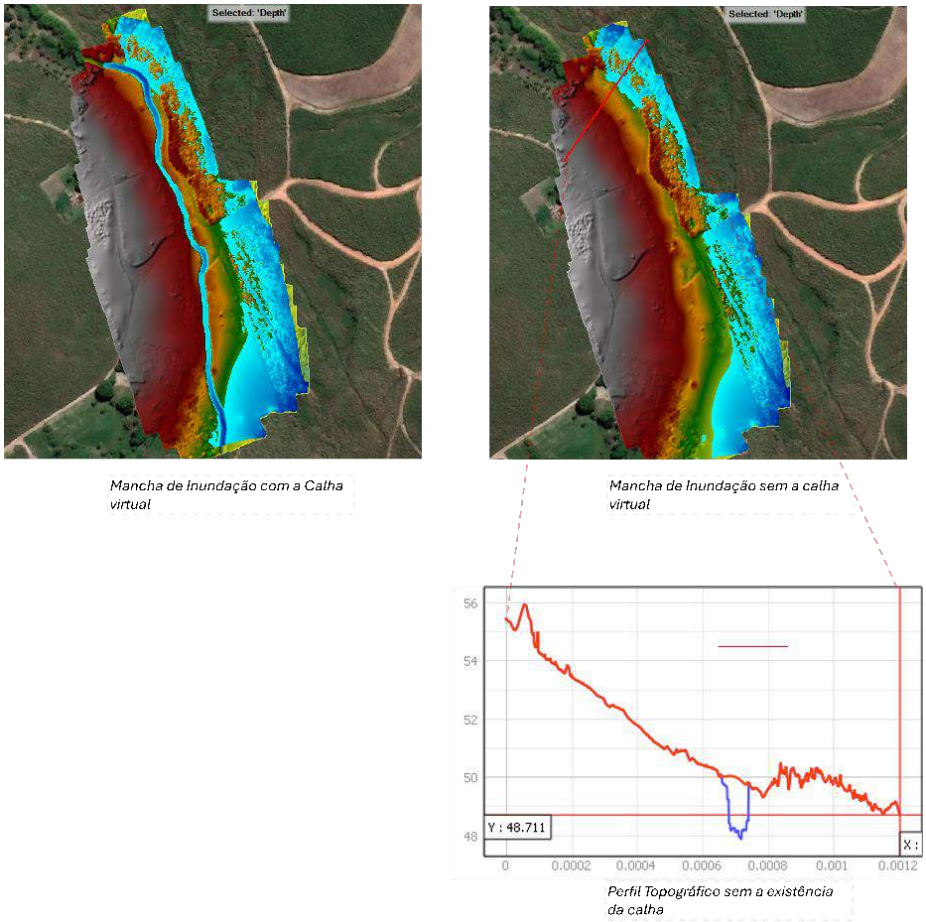


Fonte: autor (2024).

5.4. Mancha de Inundação Gerada por Regime Permanente no utilizando o MDT original.

Por meio da mesma metodologia descrita, foi possível obter a mancha de inundação presente na área de estudo, com o MDT original, mas sem a calha virtual modelada. A Figura 30 abaixo representa a comparação da mancha gerada com e sem a calha virtual, e seu perfil.

Figura 30 – Comparação das manchas de inundação



Fonte: autor (2024).

A partir da comparação direta e panorâmica das manchas é possível observar que a não existência da calha virtual, implicou no volume de água descer pelas cotas, até adentrar novamente na queda altimétrica e seguir para a estrada, repetindo a mancha anterior neste aspecto. O perfil topográfico do terreno na região da queda altimétrica confirma a tendencia do escoamento de descer e ir em direção a queda; no entanto os níveis de água variaram na entrada

da queda altimétrica, mas se mantiveram constantes na estrada. A queda altimétrica, em ambas as simulações, mostrou-se um componente topográfico importante para a região, com relação a hidráulica, por isto, foi analisado sua região no Ortomosaico, e foi encontrado a presença do rebaixamento evidenciado por uma pequena lâmina remanescente de água (Figura 31).

Figura 31 – Presença da queda altimétrica vista por meio do Ortomosaico.

Fonte: autor (2024).

A área total da mancha alagada com a calha virtual apresentou 18.939,08 metros quadrados, enquanto que a área sem a calha apresentou valores de 16.178,09 metros quadrados, evidenciando que a área alaga da calha corresponde a aproximadamente 2.761 metros quadrados; também é possível inferir que, para estas condições topográficas, com estes valores de vazão, com estas modificações de calha, seguindo os métodos descritos, considerando o MDT modificado como a condição mais próxima do real, as áreas apresentaram que a área alagada foi 17% subestimada quando não considera-se a calha virtualmente construída, mesmo assim, em termos de espalhamento de mancha, devido a fatores de topográficos, a mancha ainda conseguiu alagar a estrada.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma série de conclusões podem ser traçadas a partir das metodologias seguidas e dos resultados obtidos para a região de estudo analisado.

- O método de fotogrametria com classificação semi supervisionada se mostrou consistente para a geração dos Ortomosaicos, Modelos Digitais de Elevação, de Superfície e de Terreno.
- O modelo digital de elevação do terreno (MDT) gerado, conseguiu removeu os objetos massivos e de grande tamanho ao longo da área de estudo, consideravelmente bem.
- O método utilizado para modelamento virtual da calha, com base na topo-batimetria aplicada a blocos segmentados, se mostrou condizente em gerar uma calha com características relativamente parecidas a calha natural existente.
- O modelo do HEC-RAS foi utilizado com sucesso para geração de manchas de cheias, com bases de dados existentes e com as condições consideradas.
- A mancha de inundação gerada com base no MDT com a calha virtual, apresentou um comportamento de escoamento esperado e condizente com as concepções traçadas acerca de escoamento.
- Diversos métodos foram utilizados para aferição da dinâmica da hidráulica sobre a topografia do terreno, que demonstraram ter uma predominância acentuada.
- As regiões onde a mancha se estendeu, por meio de registros de campo, confirmou o sucesso da metodologia empregada em obter a mancha de inundação.
- A mancha de inundação gerada pelo MDT original, sem a modificação da calha, apresentou valores de área inferiores devido ao comportamento topográfico natural do terreno em seguir com a cheia em direção a baixa altimétrica, guiada pelo terreno sem a calha construída.
- Diante das condições impostas, a área alagada com a simulação com o MDT original, subestimou os valores em quase 20%.
- Observa-se que a metodologia permitiu encontrar resultados consideráveis acerca do tamanho hidráulico perdido na simulação (quando a calha virtual não é inserida), como também é possível aferir, que a depender do perfil topográfico, pode alterar completamente a dinâmica do escoamento.

- Considerar seções espacialmente mais extensas para impedir que a mancha de inundação alcance a borda da área simulada nas recomendações.
- A constante avaliação dos métodos empregados, e de maiores comparações, permitem obter resultados consideráveis e mais precisos acerca de simulação de cheias, principalmente no quesito de modelos numéricos que representem o terreno, elevando a importância deste dado em simulações de cheias, como de comparações por meio de diferentes métodos, objetivando uma compreensão mais detalhada acerca dos resultados.

Como recomendações para trabalho futuros, algumas considerações podem ser feitas a respeito das obtenção dos dados, das natureza das metodologias empregadas, e de novas análises que podem ser realizadas, em condições de dados similares a estas aqui obtidas.

- Realizar comparações acerca de métodos empregados para obtenção do MDT, como análises tridimensionais do produto, e a avaliação de novas classificações da nuvem de pontos, tendo em vista evitar pequenas superfícies que possam mascarar o terreno objetivado.
- Realizar topo-batimetrias num número maior de sessões, para assim ser possível inserir valores mais próximos dos reais metodologias similares de construção de calha de rios.
- Comparar o método de inserção da calha de rio, pela metodologia descrita neste trabalho, com métodos diferentes, como “stream burning” (Chen et al., 2024).
- Tendo em vista o volume de dados obtidos ao longo do tempo, é possível realizar a simulação em regime não-permanente no HEC-RAS, sendo possível observar o comportamento hidrodinâmico na região, sendo assim possível realizar comparações entre os regimes.
- Outras análises mais simplificadas de geração de mancha de inundação são possíveis de serem realizadas, por diferentes métodos, a depender da disponibilidade dados, para o presente trabalho, as medições contínuas de níveis de água, pode ser classificada considerando a cota da água sobre os valores do MDT, encontrando assim um número de pixels considerados inundados, e consequentemente após uma conversão para vetores, a área total inundada.
- Outra análise simplificada de mancha de inundação também pode ser encontrada utilizando ferramentas SIG; o SIG “Arc GIS Pro” possui na versão atualizada mais recente (Arc GIS

Pro V. 3.33), possui uma aba de simulações, onde é possível inserir valores máximos de intensidade de chuvas sobre determinados Modelos Digitais de Elevação; o programa realiza uma espacialização da lâmina de água ao longo do tempo, sobre as cotas do modelo, gerando assim, simulações de inundação por dado pluviométrico.

- Avaliar áreas maiores de simulação, evitando o fluxo de água confrontar com limitações do da borda da simulação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, J. B. de. (2003). "**Fotogrametria**". Curitiba, SBBE, 2ª edição. José Bittencourt de Andrade, 2003.

ALVES, R. & PEREIRA, M. (2022). "**Desafios e Oportunidades do ESG e das Finanças Sustentáveis: discussões no âmbito das empresas do Grupo Eletrobras**". 21º Seminário de Planejamento Econômico-Financeiro e de Regulação do Setor Energético Brasileiro.

ARRUDA, MARÍLIA.; TREVIZAN, ANA.; MELO DE ANDRADE, LAÍS. (2024). "**Desastre ambiental no nordeste brasileiro". Reflexões Econômicas**. 8. 18. 10.36113/rec.v8i1.4004. Baptista, M; Nascimento, N.; Barraud, S. Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana.

BAPTISTA, M; NASCIMENTO, N.; Barraud, S. "**Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana**" 2. ABRH. 2011.

BRUNNER, G.W. (2002) "**HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual**": U.S. Army Corps of Engineers Report CPD-69, 350 p.

BUSCH, Amarílis; AMORIM, Sônia Naves David. (2011) "**A tragédia da região serrana do Rio de Janeiro em 2011: procurando respostas**". 2011.

CALADO, BIANCA.; VALVERDE, MARÍA CLEOFÉ.; VASCONCELOS, VITOR. (2020). "**Os desastres no Sudeste e Nordeste brasileiro e a sua relação com a precipitação e temperatura**".

CEMADEN - **Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais** (CEMADEN). (2023) acessado em [07/08/2024] através do link: [https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/noticias-cemaden/pesquisadores-brasileiros-fazem-recomendacoes-analisando-as-repentinas-inundacoes-e-deslizamentos-de-terra-em-recife-pe-apos-fortes-chuvas-ocorridas-em-maio-de-2022]

CEPED/ UFSC. (2012) Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres, Universidade Federal de Santa Catarina. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Brasil. Florianópolis**: CEPED/UFSC, 2012. 94p.

CHELIZ, PEDRO & RODRIGUES, JULIANA & LADEIRA, FRANCISCO. (2023). "**O papel do meio físico e relevo na ocupação humana: potencialidades, vulnerabilidades e impactos ambientais (enchentes, erosão e assoreamento) na trajetória histórica da região de Araraquara**" (SP). Revista Brasileira de Geografia Física. 10.26848/rbgf.v16.1.p584-632.

CHEN, Q., MUDD, S. M., ATTAL, M., & HANCOCK, S. (2024). "**Extracting an accurate river network: Stream burning re-revisited**". Remote Sensing of Environment, 312, 114333.

CIAN, F., MARCONCINI, M., CECCATO, P., AND GIUPPONI, C. (2018) "**Flood depth estimation by means of high-resolution SAR images and lidar data**", Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 18, 3063–3084, https://doi.org/10.5194/nhess-18-3063-2018, 2018.

COFFERI, Felipe Pierdoná; HUHN, Rafael; BORDIGNON, Thomaz Gregory. **OCUPAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO PODENDO CAUSAR DESLIZAMENTOS**. Enaproc, v. 1, n. 1, 2014.

COLLISCHONN, W; Dornelles, F. (2015). "**Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**". Walter Collischonn, Fernando Dornelles. – Porto Alegre. 2º Edição Revisada e ampliada. ABRH.

CONSOLI, Gianfranco. (2017). "**Avaliação do uso da tecnologia GNSS/RTK e GNSS/RTX para medições rápidas de coordenadas e área em local de inundação**." Trabalho de Conclusão de Curso, especialização. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2017.

Daniel & Fabian, Tobias & Wittmann, F. (2021). Modeling the Ecological Responses of Tree Species to the Flood Pulse of the Amazon Negro River Floodplains. Frontiers in Ecology and Evolution. 9. 10.3389/fevo.2021.628606. INMET - Instituto Nacional De Meteorologia (2021). **Danos sociais e econômicos decorrentes de desastres naturais em consequência de fenômenos meteorológicos no Brasil: 2010 – 2019.** Acessado em: [07/08/2024] através do link https://portal.inmet.gov.br/uploads/publicacoesDigitais/impactos-clima-2010-20192.pdf

DANTAS, A. E. de A.; SANTOS, F. D. de O.; FARIAS, C. W. L. de A. (2022) "**Análise dos impactos das mudanças climáticas sobre os processos hidrológicos na bacia do Rio Taperoá – PB**". ABRHidro, 15º Simpósio de hidráulica e recursos hídricos dos países De língua portuguesa, 2022.

DEFESA CIVIL - **Defesa Civil do Rio Grande do Sul (2024**). acessado em [07/08/2024] através do link: https://defesacivil.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-3-6-9h.

DJI. 2024. Acessado em [07/08/2024] através do link: [https://www.dji.com/br/support/product/phantom-4-pro].

FARIA, T. S. (2017) "**Classificação em área urbana apoiada em imagens aéreas e dados LIDAR**". Defesa de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Thaísa Santos Faria.

FONSTAD, M. A.; DIETRICH, J. T.; COURVILLE, B. C.; JENSEN, J. L.; CARBONEAU, P. E. "**Remote sensing and the structure from motion revolution: The potential for 3D modeling of the environment. Environmental**" Modelling & Software, v. 105, p. 158-173, 2018. DOI: 10.1016/j.envsoft.2018.03.002.

GARCIA, M. V. Y., & OLIVEIRA, H. C. DE . (2021). "***The Influence Of Flight Configuration, Camera Calibration, And Ground Control Points For Digital Terrain Model***

And Orthomosaic Generation Using Unmanned Aerial Vehicles Imagery." Boletim De Ciências Geodésicas, 27(2), e2021015. https://doi.org/10.1590/s1982-21702021000200015.

GOHARA, A. & PAZOTI, M. & SILVA, F. & PEREIRA, D. & ARTERO, A. & PITERI, M. (2015). "**Utilização de dados laser e imagens aéreas para a extração de vias urbanas**". COLLOQUIUM EXACTARUM. 7. 17-36. 10.5747/ce.2015.v07.n2.e114.

GONÇALVES, J.A.; MADEIRA, S.; SOUSA, J.J. (2012). "**Topografia: Conceito e Aplicações**." 3ra. Edição. Lisboa, Portugal. Editora LIDEL, Edições Técnicas Ltda. 2012.

GONZÁLEZ-JORGE, H.; RIVEIRO, B.; ARMESTO, J.; ARIAS, P. "**The role of photogrammetry in the digital surface modeling process: Applications and limitations**." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 173, p. 207-221, 2021. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.03.004.

GROETELAARS, N. J. "**Criação de modelos BIM a partir de "nuvens de pontos": estudo demétodos e técnicas para documentação arquitetônica**" / Natalie Johanna Groetelaars. Tese de doutorado, Universidade Federal da Bahia. 2015.

HOUSEHOLDER, John & Schöngart, Jochen & Piedade, Maria Teresa & Junk, Wolfgang & ter Steege, Hans & Montero, Juan & Assis, Rafael & Aguiar, Daniel & Pombo, Maihyra Marina & Quaresma, Adriano & O. Demarchi, Layon & Parolin, Pia & Lopes, Aline & Feitoza, Gildo & Durgante, Flavia & Weiss Albuquerque, Bianca & Chu, Antonia & Enßlin, "**IPCC. Climate Change 2022: Fully Report, Impacts, Adaptation and Vulnerability.**" Working Group II.

HUNG, M. N. W. B., MOREIRA SAMPAIO, T. V., SCHULTZ, G. B., CROVADOR SIEFERT, C. A., LANGE, D. R., SYRING MARANGON, F. H., & DOS SANTOS, I. (2018). "**Levantamento com veículo aéreo não tripulado para geração de modelo digital do terreno em bacia experimental com vegetação florestal esparsa**". Ra'e Ga, 43.

IBGE, (2013) – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. acessado em [07/08/2024] através do link: [https://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/perfilmunic/2013/]

IBGE, (2022). **INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA**. acessado em [07/08/2024]. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias

IBGE, (2017). **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. acessado em [07/08/2024] através do link: [https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/images/agenciadenoticias/estatisticas_sociais/2018_07/munic_infografico.jpg]

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2001). "**Introdução: Por que Geoprocessamento?**". Acessado em [07/08/2024] através do link: [http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.19.13.48/doc/cap1-introducao.pdf]

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2006). "**Xvi Curso Internacional Em Sensoriamento Remoto E Sistemas De Informações Geográficas**". Acessado em [07/08/2024] através do link: [http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/]

INPE (2022) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. "**Mudança Climática e urbanização arriscada agravaram danos de chuva no Nordeste, diz estudo de atribuição**". Acessado em: [07/08/2024] através do link [https://www.ccst.inpe.br/mudanca-climatica-e-urbanizacao-arriscada-agravaram-danos-de-chuva-no-nordeste-diz-estudo-de-atribuicao]

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2019). "**Introdução ao Geoprocessamento**". Acessado em [07/08/2024] através do link: [https://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/introducao_geo.html/]

IPCC. **Climate Change 2007: Synthesis Report Summary for Policymakers, The Physical Science Basis**. Working Group I.

IPCC. **Climate Change 2014: Fully Report, Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group** II.

IPH, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (2005). **"Plano Diretor de Drenagem Urbana de Porto Alegre –Manual de Drenagem Urbana**", Porto Alegre: IPH/UFRGS, 223 p., 2005.

J.A. Marengo, E. Alcantara, A.P. Cunha, M. Seluchi, C.A. Nobre, G. Dolif, D. Goncalves, M. Assis Dias, L.A. Cuartas, F. Bender, A.M. Ramos, J.R. Mantovani, R.C. Alvalá, O.L. Moraes. (2023). "**Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness**. ", Weather and Climate Extremes,Volume 39, 2023, 100545.

JIMÉNEZ-JIMÉNEZ, S.I.; OJEDA-BUSTAMANTE, W.; MARCIAL-PABLO, M.d.J.; ENCISO, J. (2021) "**Digital Terrain Models Generated with Low-Cost UAV Photogrammetry: Methodology and Accuracy**". ISPRS Int. J. Geo-Inf. 2021, 10, 285. https://doi.org/10.3390/ijgi10050285.

McCORMAC, J.C.; "**Topografia**". Rio de Janeiro, RJ. Editora LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2007.

MENDES, T. A., SOUSA, M. B. DE ., PEREIRA, S. A. DOS S., SANTOS, K. A. DOS ., & FORMIGA, K. T. M. (2022). "**Uso do modelo HEC-RAS com base em informações de LiDAR para avaliação de inundações urbanas**". Engenharia Sanitaria E Ambiental, 27(1), 141–157. https://doi.org/10.1590/S1413-415220200276

MENDONÇA, R. L. (2017) "Filtragem de dados LIDAR para geração de modelo digital do terreno". Dissertação de Mestrado. Rafael Lopes Mendonça. – 2017.

M.R. Knebl, Z.-L. Yang, K. Hutchison, D.R. Maidment. (2005). "**Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San**

Antonio River Basin Summer 2002 storm event". Journal of Environmental Management, Volume 75, Issue 4, 2005, Pages 325-336.

MEDEIROS, Vanesca Sartorelli; BARROS, Mario Thadeu Leme de. "**Análise de eventos críticos de precipitação ocorridos na região serrana do estado do Rio de Janeiro nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011**". Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v. 19, n. 27, p. 1-19, 2011.

MOURA, LYSANNE SOUZA DE. (2018) "**Avaliação dos impactos da urbanização sobre a geração de escoamento superficial na bacia hidrográfica do Rio Jaguaribe-João Pessoa/PB**. Repositório UFPB.

MOURA, MARCELO.; CUNICO, CAMILA.; NÓBREGA, JOSÉ CÂNDIDO DA.; DUARTE, CRISTIANA. (2016). "**Desastres hidrometeorológicos na região Nordeste do Brasil: distribuição espaço-temporal dos reconhecimentos de Estado de Calamidade Pública**". Caderno de Geografia. 26. 259. 10.5752/p.2318-2962.2016v26nesp2p259.

NOAA (2024) - **National Oceanic and Atmospheric, NCEI (National Centers for Environmental Information).** "Billion-Dollar Weather and Climate Disasters | Events". Acessado em: [07/08/2024] através do link: https://www.ncei.noaa.gov/access/billions/events

OMM (2020) – Organização Meteorológica Mundial (2021). "**Water-related hazards dominate disasters in the past 50 years**". Acessado em: [07/08/2024] através do link: https://public.wmo.int/media/news/water-related-hazards-dominate-disasters-past-50-years.

OMM (2021) – Organização Meteorológica Mundial (2020). "**Weather and climate extremes in Asia killed thousands, displaced millions and cost billions in 2020**."Acessado em: [07/08/2024] através do link: https://public.wmo.int/media/news/weather-and-climate-extremes-asia-killed-thousands-displaced-millions-and-cost-billions-2020

ONU (2020) – Organização das Nações Unidas. "**OCHA: Brasil está entre países com maior número de pessoas expostas a inundações**." Acessado em: [07/08/2024] através do link https://brasil.un.org/pt-br/84876-ocha-brasil-est%C3%A1-entre-pa%C3%ADses-com-maior-n%C3%BAmero-de-pessoas-expostas-inunda%C3%A7%C3%B5es

PACHECO, C.A.K., (2010). "**Levantamento Hidrográfico – Topobatimetria do canal entre as ilhas do Lino e do Laje**", Trabalho de conclusão, Depto de Geodesia, UFRGS-Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PAULINO, P. F. (2014). "**Estudo sobre a sensibilidade dos parâmetros do método SCS na determinação de hidrogramas de cheia em bacias urbanas**" (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

Projeto MapBiomas – **Mapeamento Anual de Cobertura e Uso da Terra do Brasil - Coleção 7** (2024), acessado em [07/08/2024] através do link:

[https://oeco.org.br/wpcontent/uploads/2022/11/MapBiomas-A%CC%81reas-Urbanizadas-Destaques.pdf]

PESSACG, F.; GÓMEZ-FERNÁNDEZ, F.; NITSCHE, M.; CHAMO, N.; TORRELLA, S.; GINZBURG, R.; DE CRISTÓFORIS, P. (2022). "**Simplifying UAV-Based Photogrammetry in Forestry: How to Generate Accurate Digital Terrain Model and Assess Flight Mission Settings**". Forests 2022, 13, 173. https://doi.org/10.3390/f13020173

ROCK, G. & RIES, J. & UDELHOVEN, T. (2012). "**Sensitivity analysis of UAV-photogrammetry for creating digital elevation models (DEM)**". International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 38. 69-73. 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-69-2011.

SUHUA Zhou, ZHIWEN Xu, QINSHAN Zhang, PENG Yu, MINGYI Jiang, JINFENG Li, MINGHUI Yang, (2024). **Rainstorm-induced flood risk assessment in developed urban area using a data-driven approach with watershed units**. Science of The Total Environment,Volume 946,2024,174135.

SANTOS, C. A. C. DOS., & MANZI, A. O. (2011). "**Eventos extremos de precipitação no estado do Ceará e suas relações com a temperatura dos oceanos tropicais". Revista Brasileira De Meteorologia**, 26(1), 157–165. https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000100014

Stöcker, C.; Bennett, R.; Nex, F.; Gerke, M.; Zevenbergen, J. (2017). Review of the Current State of UAV Regulations. Remote Sensing, 9(5), 459. DOI: 10.3390/rs9050459.

SPATIAL REFERENCE, 2024 – "**Find your references in any number of formats**!": Disponível em: < https://spatialreference.org/ >

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (2003.). "**Inundações urbanas na América do Sul Porto Alegre**": ABRH, 2003.

TUCCI, C. E. (2005). "**Modelos Hidrológicos**." Carlos E. M. Tucci; Colaboração da Associação Brasileira de Recursos Hídricos/ABRH. – 2° Ed. Porto Alegre: Editora da UFGS, 2005.

USACE. U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (2002). "**HEC-RAS: river analysis system, user's manual**". Davis: Hydrologic Engineering Center, 2002.

ZHENG, F.; WU, B.; ZHU, L. "**Integration of artificial intelligence in photogrammetric data processing: Enhancing the accuracy of remote sensing applications**." Computers, Environment and Urban Systems, v. 87, p. 101617, 2021. DOI: 10.1016/j.compenvurbsys.2021.101617.

8) APÊNDICE

a) IBGE-PPP

IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Relatório do Posicionamento por Ponto Preciso (PPP)

Sumário do Processamento do marco: M00

Início(AAAA/MM/DD HH:MM:SS)	2024/08/16 12:41:25,00
Fim:(AAAA/MM/DD HH:MM:SS)	2024/08/16 13:56:15,00
Modo de Operação do Usuário:	ESTÁTICO
Observação processada:	CÓDIGO & FASE
Modelo da Antena:	CHCI73+ NONE
Órbitas dos satélites:[1]	FINAL
Frequência processada:	L3
Intervalo do processamento(s):	1,00
Sigma[2] **da pseudodistância**(m):	5,000
Sigma da portadora(m):	0,010
Altura da Antena[3](m):	0,000
Ângulo de Elevação(graus):	10,000
Resíduos da pseudodistância(m):	1,70 GPS 5,62 GLONASS
Resíduos da fase da portadora(cm):	0,49 GPS 1,01 GLONASS

Coordenadas SIRGAS

	Latitude(gms)	Longitude(gms)	Alt. Geo.(m)	UTM N(m)	UTM E(m)	MC
Em 2000.4 (é a que deve ser usada)[4]	-7° 26' 30,9763"	-35° 02' 06,5466"	49,61	9176879,12	255387,574	-33
Na data do levantamento[5]	-7° 26' 30,9677"	-35° 02' 06,5487"	49,61	9176879,369	255387,496	-33
Sigma(95%)[6] (m)	0,005	0,013	0,021			

Coordenada Altimétrica

Modelo:	hgeoHNOR_IMBITUBA		
Fator para Conversão (m):	-5,04	**Incerteza (m):**	0,08
Altitude Normal (m):	54,65		

Precisão esperada para um levantamento estático (metros)

Tipo de Receptor	**Uma frequência**		**Duas frequências**	
	Planimétrico	**Altimétrico**	**Planimétrico**	**Altimétrico**
Após 1 hora	0,700	0,600	0,040	0,040
Após 2 horas	0,330	0,330	0,017	0,018
Após 4 horas	0,170	0,220	0,009	0,010
Após 6 horas	0,120	0,180	0,005	0,008

[1] Órbitas estimadas do International GNSS Service (IGS) ou do Natural Resources of Canada (NRCan).
[2] O termo "Sigma" é referente ao desvio-padrão.
[3] Distância Vertical do Marco ao Plano de Referência da Antena (PRA).
[4] A coordenada oficial na data de referência do Sistema SIRGAS, ou seja, 2000.4. A redução de velocidade foi feita na data do levantamento utilizando o modelo VEMOS em 2000.4.
[5] A data de levantamento considerada é a data de início da sessão.
[6] Este desvio-padrão representa a confiabilidade interna do processamento e não a exatidão da coordenada.

Os resultados apresentados neste relatório refletem a qualidade dos dados enviados e do correto preenchimento das informações por parte do usuário.
Em caso de dúvidas, utilize os seguintes contatos: http://www.ibge.gov.br/desenvolvimento/ppp ou pelo telefone 08007218.81.
Este serviço de posicionamento faz uso do aplicativo de processamento CSRS-PPP desenvolvido pela Geodetic Survey Division of Natural Resources of Canada (NRCan).

Posicionamento autorizado por ser do IBGE

b) Código Python para criação da coluna contendo um fator de aleatoriedade entre +0.15 m e – 0.15 m

```
import arcpy
import random

# Definir a camada dos buffers
buffer_layer = "blocos_segmentados"

# Adicionar um campo para armazenar as variações de elevação aleatórias
campo_variação = "Var_Elev"
arcpy.AddField_management(buffer_layer, campo_variação, "DOUBLE")

# Atualizar a tabela de atributos com valores aleatórios para cada segmento
with arcpy.da.UpdateCursor(buffer_layer, [campo_variação]) as cursor:
    for row in cursor:
        # Gera um valor aleatório entre -0.15 e +0.15 metros
        row[0] = round(random.uniform(-0.15, 0.15), 3)
        cursor.updateRow(row)

print("Variações aleatórias aplicadas com sucesso!")
```

c) **Código Python para a criação da calha e adjacência do rio, com base nas feições dos blocos segmentados contendo as informações batimétricas.**

```
import rasterio
import numpy as np
from rasterio import features
from shapely.geometry import shape
import fiona
from rasterio.features import rasterize

# Caminhos para os arquivos
shapefile_path = r"C:\Users\anton\OneDrive\TCC\Map\blocos_segmentados_final.shp"
mdt_raster_path = r"C:\Users\anton\OneDrive\TCC\Levantamento\Levantamento Antonio\Levantamento Antonio\MDE\dem6cm - Modificado.tif"
output_raster_path = r"C:\Users\anton\OneDrive\TCC\Map\MDT_com_Calha_3.tif"

# Abrir o raster MDT
with rasterio.open(mdt_raster_path) as src:
    mdt = src.read(1)
    profile = src.profile
    profile.update(dtype=rasterio.float32)

# Criação da imagem de saída, iniciada com os valores do MDT
out_image = mdt.copy().astype(np.float32)

# Carregar shapefile e obter valores de batimetria e variação de elevação
with fiona.open(shapefile_path, "r") as shapefile:
    for feature in shapefile:
        geom = shape(feature["geometry"])
        batimetria = feature["properties"]["Batimetria"]
        var_elev = feature["properties"]["Var_Elev"]

        # Calcular o valor a ser adicionado ao MDT
        valor_final = batimetria + var_elev

        # Rasterizar o shape atual com o valor da elevação calculada
        mask = rasterize([(geom, valor_final)], out_shape=mdt.shape,
                         transform=src.transform, fill=0, dtype=np.float32)

        # Adicionar o valor no local correspondente do out_image
        out_image += mask

# Garantir que os valores não se tornem negativos ao adicionar
```

```
039 out_image = np.clip(out_image, a_min=0, a_max=None)
040
041 # Definir valores zero como NoData (melhora visualização)
042 nodata_value = src.nodata  # Obtém o valor NoData do raster original
043 out_image[out_image == 0] = nodata_value  # Altera valores zero para NoData
044
045 # Salvar o novo raster (configurações do driver)
046 with rasterio.open(output_raster_path, 'w', **profile) as dst:
047     dst.write(out_image, 1)
048     dst.nodata = nodata_value  # Define o valor NoData no novo raster
049
050 print("Processamento concluído e raster salvo em:", output_raster_path)
```