

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ – UNIFEI INSTITUTO DE CIÊNCIAS PURAS E APLICADAS



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS – PROFÁGUA

TIAGO DE SOUZA ALVES

ELABORAÇÃO DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE PARTE DA BACIA DO RIO CARATINGA PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA URBANA INUNDÁVEL NO MUNICÍPIO DE CARATINGA-MG





ITABIRA – MINAS GERAIS 2023

TIAGO DE SOUZA ALVES

ELABORAÇÃO DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE PARTE DA BACIA DO RIO CARATINGA PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA URBANA INUNDÁVEL NO MUNICÍPIO DE CARATINGA-MG

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Área de concentração: Regulação e Governança de Recursos Hídricos. Linha de pesquisa: Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Neves Lima

ITABIRA – MINAS GERAIS

2023

TIAGO DE SOUZA ALVES

ELABORAÇÃO DE MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA DE PARTE DA BACIA DO RIO CARATINGA PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA URBANA INUNDÁVEL NO MUNICÍPIO DE CARATINGA-MG

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos, Curso de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos (ProfÁgua), Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Área de concentração: Instrumentos da Política de Recursos Hídricos. Linha de pesquisa: Segurança Hídrica e Usos Múltiplos da Água, pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Fernando Neves Lima Instituto de Engenharias Integradas, UNIFEI

Prof. Dr. Júlio César da Silva Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ

Prof. Dr. Roberto Cézar de Almeida Monte-Mor Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, UNIFEI

Itabira, Minas Gerais, 15 de dezembro de 2023.

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho à minha família, em especial ao João Alves Filho, pai, essa é para você.

AGRADECIMENTOS

Quero dedicar esta seção de agradecimentos a todas as pessoas que desempenharam papéis significativos na minha jornada de mestrado, contribuindo para essa importante conquista alcançada.

Primeiramente, expresso minha profunda gratidão à minha esposa Geandréa. Foi através dela que tomei conhecimento do mestrado na minha área de conhecimento. Agradeço por sua paciência infinita, apoio incondicional e por sempre acreditar no meu potencial. Sua presença e incentivo foram fundamentais em cada etapa dessa jornada.

Ao meu pai João Alves, uma fonte constante de inspiração, agradeço por ser meu guia na busca pelo desenvolvimento pessoal e profissional. Sua sabedoria e apoio foram motores essenciais para alcançar este objetivo acadêmico.

À minha mãe Núbia Alves, modelo de companheirismo e perseverança, expresso minha profunda admiração. Sua força e determinação foram fontes constantes de inspiração para mim. Aos meus filhos Tiago e Igor, agradeço pela compreensão durante os desafios e pela paciência diante da minha ausência nestes anos de curso. Seu apoio foi meu combustível para superar obstáculos.

Meu irmão Diogo, um exemplo a ser seguido, merece meu agradecimento. Entre os gêmeos, a busca pelo conhecimento é uma jornada compartilhada, e seu apoio foi crucial.

Nesta trajetória acadêmica, destaco o Prof. Dr. Fernando Neves Lima. Sua dedicação e apoio incansáveis foram fundamentais para o progresso do meu trabalho. Além de ser meu orientador, tornou-se um exemplo de profissionalismo que agora considero um amigo.

Agradeço também aos colegas da Equilíbrio Engenharia, em especial à Dayla e ao Pedro, pela compreensão e apoio tanto no aspecto pessoal quanto profissional. A colaboração deles acrescentou muito à minha jornada.

À Agência Nacional das Águas, quero expressar minha profunda gratidão pela visão estratégica em formar profissionais altamente qualificados em recursos hídricos, notadamente por meio do programa ProfÁgua na Universidade Federal de Itajubá. Agradeço calorosamente a todos os professores envolvidos, cuja dedicação e compromisso notáveis transcendem a simples transmissão de conhecimento. Seu empenho incansável foi um farol orientador em nosso percurso acadêmico, moldando-nos não apenas como estudantes, mas como indivíduos comprometidos com a excelência e o progresso na área. Por último, dedico este trabalho ao imenso amor que sinto por todos eles. Cada pessoa mencionada desempenhou um papel vital na minha conquista acadêmica, e sou profundamente grato por tê-los ao meu lado.

RESUMO

ALVES, Tiago de Souza da. **Elaboração de modelagem hidrológica e hidráulica de parte da bacia do rio Caratinga para determinação da área urbana inundável no município de Caratinga-MG**: estudo de caso no rio Caratinga, Minas Gerais. 2023. 95 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua), Instituto de Ciências Puras e Aplicadas, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Campus de Itabira, Minas Gerais, 2023.

No Brasil, boa parte dos centros urbanos não foram planejados. Como consequência, as cidades têm sofrido com o aumento dos eventos de cheias e consequentemente as inundações. Sob esse contexto, a literatura especializada apresenta ferramentas como a modelagem hidrológica para auxiliar tanto no entendimento nos processos físicos na bacia durante os eventos quanto na tomada de decisão. Como exemplo de aplicação, a cidade de Caratinga, localizada na região do vale do rio Doce, no leste do estado de Minas Gerais, tem sofrido com eventos hidrológicos extremos. Destacam-se os eventos registrados nos anos de 2003 e 2004 que, além das perdas financeiras, também foram marcadas por perdas humanas. Assim, a compreensão dos processos físicos da bacia à montante da cidade se tornou indispensável para a elaboração de um planejamento de macro e micro drenagem baseados em dados científicos confiáveis. Para tanto, o presente trabalho se propõe a aplicar modelos hidrológico e hidráulico com a utilização dos softwares HEC-HMS e HEC-RAS vislumbrando avaliar o comportamento do rio Caratinga no trecho urbano da cidade. Foram empregados os métodos SCS-CN para determinar as vazões de projeto, o método de Cowan para estimar a rugosidade e a separação de eventos por meio do índice rx5day. Adicionalmente, utilizaram-se imagens de satélite e fotografias aéreas para coletar dados sobre a topografia, uso do solo e tipos de solo na região de estudo. Os resultados obtidos mostraram que 21,74% dos eventos resultaram em pontos de alagamento na cidade, apontou também que o rio Caratinga transborda com vazões acima de 20m³/s. Como produto este trabalho fornece um parecer técnico como proposta de diretriz para nortear os administradores públicos de Caratinga e região quanto à elaboração do plano municipal de drenagem urbana.

Palavras-chave: Inundação; Simulação hidráulica; Integração SIG; Rio Caratinga, Hec-Ras.

ABSTRACT

ALVES, Tiago de Souza da. **Preparation of hydrological and hydraulic modeling of part of the Caratinga river basin to determine the urban floodable area in the municipality of Caratinga-MG**: case study on the Caratinga river, Minas Gerais. 2023. 95 p. Dissertation (Professional Master's Degree in National Network in Management and Regulation of Water Resources – ProfÁgua), Institute of Pure and Applied Sciences, Federal University of Itajubá (UNIFEI), Itabira Campus, Minas Gerais, 2023.

In Brazil, mostly of urban centers were not planned. Consequently, cities have suffered from an increase in flood events and consequently floods. In this context, specialized literature presents tools such as hydrological modeling to assist both in understanding the physical processes in the basin during events and in decision making. As an example of application, the city of Caratinga, located in the Doce River valley region, in the east of the state of Minas Gerais, has suffered from extreme hydrological events. The events recorded in 2003 and 2004 stand out, which, in addition to financial losses, were also marked by human losses. Thus, understanding the physical processes of the basin upstream of the city has become essential for developing macro and micro drainage planning based on reliable scientific data. To this end, the present work proposes to apply hydrological and hydraulic models using the HEC-HMS and HEC-RAS software to evaluate the behavior of the Caratinga River in the urban section of the city. The SCS-CN methods were used to determine the design flows, the Cowan method to estimate the roughness and the separation of events using the rx5day index. Additionally, satellite images and aerial photographs were used to collect data on topography, land use and soil types in the study region. The results obtained showed that 21.74% of the events resulted in flooding points in the city, also pointing out that the Caratinga River overflows with flows above 20m³/s. As a product, this work provides a technical opinion as a proposal for a guideline to guide public administrators in Caratinga and the region regarding the preparation of the municipal urban drainage plan.

Keywords: Inundation; Hydraulic simulation; GIS integration; Caratinga River, Hec-Ras.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CICLO DA ÁGUA	19
FIGURA 2 – FLUXO METODOLÓGICO HEC-HMS	22
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA	32
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DAS SEÇÕES NO MODELO HIDRÁULICO	35
FIGURA 5 – MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA DE ESTUDO	37
FIGURA 6 – IMAGEM DO SATÉLITE GOES-13 EM 22/12/2013	38
FIGURA 7 – DESVIO DE PRECIPITAÇÃO NORMAL – JANEIRO 2003 E 2004	38
FIGURA 8 – MDE, HIDROGRAFIA, MUNICÍPIOS E DISCRETIZAÇÃO	40
FIGURA 9 – PEDOLOGIA	42
FIGURA 10 - CLASSIFICAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA B	ACIA
ESTUDADA	44
FIGURA 11 – DISCRETIZAÇÃO DA BACIA ESTUDADA	46
FIGURA 12 – MODELO DA BACIA NO HEC-HMS	47
FIGURA 13 – SUB BACIAS DO MODELO HIDROLÓGICO	48
FIGURA 14 – BACIA HIDROGRÁFICA À MONTANTE DO MODELO HIDRÁULIO	CO 51
FIGURA 15 – BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO SÃO JOÃO	52
FIGURA 16 – MOSAICO E MDE DE PARTE DA CALHA DO RIO CARATINGA	56
FIGURA 17 – PROCESSAMENTO NO RAS MAPPER	58
FIGURA 18 – SEÇÃO 1375	59
FIGURA 19 – DADOS COLETADOS PELO ADCP	61
FIGURA 20 – CAPTAÇÃO DE DADOS DO RIO CARATINGA NA SEÇÃO 1815 – PO	ONTE
DA RUA DONA JULICA	62
FIGURA 21 – TERRA FIRME, SEÇÃO 1815 VISTA PARA MONTANTE	62
FIGURA 22 – CASCALHO, SEÇÃO 1132 VISTA PARA JUSANTE	62
FIGURA 23 – CÓRREGO SÃO JOÃO MONTANTE DA SEÇÃO 393 VISTA I	PARA
JUSANTE	63
FIGURA 24 – PEQUENAS OBSTRUÇÕES NO RIO CARATINGA	64
FIGURA 25 – ENCONTRO DO CÓRREGO SÃO JOÃO COM O RIO CARATINGA	65
FIGURA 26 – VISTA AÉREA DO CÓRREGO SÃO JOÃO	67
FIGURA 27 – SEÇÃO 1815 NO EVENTO DE 02/11/2010	68
FIGURA 28 – MODELO TRIDIMENSIONAL GERADO PELO HEC-RAS 02/11/2020)69
FIGURA 29 – MODELO COM VAZÃO DE 33,8 M ³ /S	70

FIGURA 30 – MODELO COM VAZÃO DE 30,4 M ³ /S	70
FIGURA 31 – MODELO COM VAZÃO DE 22,0 M ³ /S	70
FIGURA 32 – MODELO COM VAZÃO DE 16,3 m ³ /s	71

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - DADOS DE PRECIPITAÇÃO USADOS NOS MODELOS HI	DROLÓGICOS
GRÁFICO 2 – USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA ESTUDADA	43
GRÁFICO 3 - OCUPAÇÃO DO SOLO DAS BACIAS DISCRETIZADAS	43
GRÁFICO 4 - VAZÃO OBSERVADA VS SIMULADA	49
GRÁFICO 5 – COEFICIENTE KGE PARA O MODELO CALIBRADO	
GRÁFICO 6 – VAZÕES DA BACIA DE MONTANTE	
GRÁFICO 7 – VAZÕES RESULTANTES DA MODELAGEM HIDROLÓGI	CA DA BACIA
DO CÓRREGO SÃO JOÃO	53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CATEGORIAS DE CLASSIFICAÇÃO DO USO DO SOLO	NA E	BACIA DO
RIO CARATINGA	•••••	41
TABELA 2: CARACTERÍSTICAS DAS SUB BACIAS	•••••	45
TABELA 3 – PARÂMETROS CALIBRADOS	•••••	49
TABELA 4 – DADOS DA BACIA DE MONTANTE	•••••	
TABELA 5 – DADOS DA BACIA DE MONTANTE	•••••	53
TABELA 6 – RUGOSIDADE DO RIO CARATINGA APLICADA	NO	MODELO
HIDRÁLICO	•••••	65
TABELA 7 – RUGOSIDADE DO RIO CARATINGA APLICADA	NO	MODELO
HIDRÁLICO	•••••	66
TABELA 8 – RUGOSIDADE DO CÓRREGO SÃO JOÃO	•••••	66
TABELA 9 – PRECIPITAÇÕES E VAZÕES	•••••	72

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico
ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler [Perfilador de Corrente
	Acústico Doppler]
ARP	Aeronaves Remotamente Pilotadas
CETEC	Centro Tecnológico
CN	Curve Number [Número da Curva]
CTGA	Caratinga
DSA	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
FEAM	Fundação Estadual de Meio Ambiente
GNSS	Global Navigation Satellite System [Sistema Global de Navegação
	por Satélite]
HEC-MHS	Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling Systems
	[Centro de Engenharia Hidrológica – Sistema de Modelo
	Hidrológico]
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System [Centro de
	Engenharia Hidrológica – Sistema de Análise de Rios]
IDE	Infraestrutura de Dados Espaciais
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
KGE	Kling-Gupta Efficiency [Eficiência Kling-Gupta]
LT	Lagtime [Tempo de retardo]
MDE	Modelo Digital de Elevação
MG	Minas Gerais
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
	[Administração Nacional Oceânica e Atmosférica]
NRCS	Natural Resources Conservation Service [Serviço de Conservação
	de Recursos Naturais]
PMSB	Plano Municipal de Saneamento Básico
ProfÁgua	Mestrado Profissional de Gestão e Regulação de Recursos Hídricos
SCS	Soil Conservation Service [Serviço de Conservação do Solo]

SIG	Sistema de Informações Geográficas
SISEMA	Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
TC	Tempo de Concentração
UFLA	Universidade Federal de Lavras
UFV	Universidade Federal de Viçosa
VANT	Veículos Aéreos Não Tripulados

SUMÁRIO

1	INT	VTRODUÇÃO16			
2	JUSTIFICATIVA17				
3	3 OBJETIVOS				
	3.1	Objetivo geral	.18		
,	3.2	Objetivos específicos	.18		
4	REF	ERENCIAL TEÓRICO	.18		
2	4.1	Modelos Hidrológicos	.18		
2	4.2	Modelagem hidrológica e hidráulica e seus parâmetros	.21		
	4.2.1	HEC-HMS	.21		
	4.2.2	2 Tempo de concentração	.22		
	4.2.3	3 Método SCS-CN	.23		
	4.2.4	HEC-RAS	.24		
	4.2.5	5 Coeficiente de rugosidade	.24		
2	4.3	SIG – Sistema de Informações Geográficas	.26		
2	4.4	Medições indiretas de vazão	.28		
4	4.5	Regionalização de vazão	.29		
2	4.6	Eventos extremos de precipitação	. 30		
2	4.7	Eficiência Kling-Gupta – KGE	.31		
5	MET	FODOLOGIA	.32		
	5.1	Fluxograma	.32		
:	5.2	Delimitação da bacia estudada	.32		
	5.3	Discretização	.33		
:	5.4	Modelos hidrológicos	.33		
:	5.5	Modelo hidráulico	.34		
6	RES	ULTADOS E DISCUSSÕES	.36		
(5.1	Caracterização da área de estudo	.36		

	6.2	Resultados da modelagem hidrológica	47
	6.2.1	Vazões de projeto	
	6.3	Modelo digital de elevação da superfície	
	6.4	Modelo hidráulico	
	6.4.1	Geometria	
	6.4.2	2 Dados de vazão	
	6.4.3	3 Rugosidade	
	6.4.4	4 Resultado da modelagem hidráulica	67
7	CON	VSIDERAÇÕES FINAIS	72
8	REF	ERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
А	PÊNDI	CE A – Produto	78
A h	APÊNDI idráulico	CE B – Dados de precipitação e vazão utilizados nos modelos hid	rológicos e
A	PÊNDI	CE C – Seções da vazão máxima simulada no modelo	
A	NEXO	A – Relatório de processamento do aerolevantamento	

1 INTRODUÇÃO

A urbanização desorganizada, no Brasil, a partir do êxodo rural que se iniciou na década de 1950 provocou inúmeras ocupações irregulares, sejam elas em várzeas ou em encostas (SANTOS, MILTON, 1993). Em Minas Gerais, o modo de ocupação urbana no município de Caratinga resultou nas condições desfavoráveis que parte da população vive atualmente, ou seja, ocupando áreas susceptíveis à inundação (COSTA, 2007).

As inundações advindas de eventos naturais extremos, amplificados em consequências de ações antrópicas no meio ambiente, tem sido objeto de estudos no intuito de compreendêlas e então aplicar instrumentos de gestão para mitigar seus impactos no meio urbano, em consonância Anchieta *et al.* (2020) reforçam que é fundamental, conhecer, compreender e diferenciar o conceito destes fenômenos para interpretar as condições técnicas específicas, assim entendendo a melhor medida ou ferramenta à ser empregada buscando a prevenção desses eventos.

De acordo com Monte *et al.* (2016), soluções de prevenção estruturais e não estruturais são mecanismos realizados para minimizar os impactos socioeconômicos decorrentes de inundações. Financeiramente mais viáveis, as medidas não estruturais na maioria das ocasiões, focam na prevenção, conservação e buscam uma harmonia entre o meio ambiente e áreas urbanas ribeirinhas.

A busca por uma melhor harmonia com o recurso hídrico demanda de conhecimento sobre o ambiente, este produzido pela ciência que se persegue com o presente estudo. Apesar de já existirem diversas outras modelagens em outras bacias, Anchieta *et al.* (2020) destacam que há características específicas de cada sistema hidráulico que devem ser, necessariamente, consideradas, tanto para o processo de construção do sistema como para o alcance das informações almejadas. Ressaltam ainda a importância na seleção adequada de condições do entorno, pois contribuem muito para o desempenho de uma simulação hidráulica.

Nesse cenário específico, a implementação de uma modelagem digital abrangente da hidrologia e hidráulica de uma bacia em ambiente urbano emerge como uma ferramenta crucial para a gestão eficiente dos recursos hídricos. Essa abordagem não apenas oferece a possibilidade de antecipar eventos críticos, como também proporciona uma extensão significativa no intervalo entre o momento do alerta e a ocorrência do evento em si, (CASERI *et al.*, 2016). Ao compreender e simular o comportamento hidrodinâmico da bacia, é possível identificar áreas propensas a inundações, pontos críticos de escoamento e vulnerabilidades no sistema de drenagem urbana. Essa antecipação mais ampla não apenas permite a implementação

de medidas preventivas de maneira mais eficaz, mas também contribui para a minimização dos prejuízos socioeconômicos associados a eventos extremos, (MATTOS *et al.*, 2022), fortalecendo a resiliência das comunidades urbanas diante de desafios hídricos.

A cidade de Caratinga, localizada na região do vale do rio Doce, no leste do estado de Minas Gerais, tem sofrido com eventos hidrológicos extremos. Destacam-se os eventos registrados nos anos de 2003 e 2004 que, além das perdas financeiras, também foram marcadas por seu rastro de morte. Sendo assim, a pesquisa ampliará o conhecimento sobre a bacia do rio Caratinga, fornecendo informações técnicas confiáveis para o debate em nível científico, aproximando as deliberações, adotadas pelos órgãos públicos, dos fatos específicos da região estudada.

2 JUSTIFICATIVA

O presente estudo se fundamenta na necessidade de obtenção de instrumentos técnicos para a gestão de riscos e eventos extremos das águas, destacando os resultados peculiares da região, para assim, munir os gestores de informações precisas para o planejamento e desenvolvimento de ações a médio e longo prazo que mitiguem os impactos decorrentes do risco de inundações locais e regionais. Neste sentido, o plano municipal de saneamento básico do município de Caratinga apresenta que não existem trabalhos efetivos sobre a macrodrenagem no município (PMSB, 2015).

Segundo Cabral *et al.* (2016), a integração entre os modelos hidrológico e hidráulico ao SIG (Sistema de Informação Geográfica), de um modo geral, mostrou ser um potente instrumento de auxílio dos órgãos federal e/ou estadual no monitoramento de desastres naturais de fator hidrológico, sendo capaz de auxiliar esses órgãos na mitigação dos efeitos desses eventos críticos.

De acordo com Nkwunonwo *et al.* (2020), devido à escassez de estudos locais específicos e à ausência de medidas de gestão ou inadequadamente implantadas, os eventos de inundação podem se tornar mais críticos nos países em desenvolvimento. Anchieta *et al.* (2020) elucidam que o dimensionamento e a modelagem hidráulica de canais de drenagem são essenciais para diminuição de riscos e proteção da sociedade quanto a estes eventos.

A presente dissertação se insere na linha de pesquisa de segurança hídrica e usos múltiplos da água do mestrado Profissional de Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – ProfÁgua, que dentre vários objetivos, possui a avaliação de desastres naturais e eventos

hidrológicos extremos, de modo a melhorar o entendimento da dinâmica espacial e temporal para a realização de modelos de previsão e gestão de riscos de eventos extremos.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Realizar uma análise hidráulica e hidrológica em bacia de estudo para subsidiar políticas públicas de gestão de riscos e eventos extremos.

3.2 Objetivos específicos

- Mapear o atual uso e ocupação do solo na bacia do Rio Caratinga, limitado a à área deste estudo;
- 2) delimitar a mancha de inundação no período urbano da cidade de Caratinga;
- aplicar modelos hidrológicos hidráulicos para a determinação da vazão de transbordamento do Rio Caratinga ao longo da área de estudo;
- elaborar um manual de diretrizes para o plano de drenagem urbana de Caratinga e região.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Modelos Hidrológicos

Modelos hidrológicos são ferramentas capazes de representar matematicamente diversos processos físicos de uma bacia hidrográfica, (PONTES *et al.*, 2015). Para Tucci (1998), o modelo hidrológico foi desenvolvido pela ciência para aperfeiçoar a compreensão e representação de uma bacia hidrográfica. A Figura 1 ilustra os processos físicos da água.

Para Tucci (1998), os modelos chuva-vazão atendem aos propósitos de, principalmente, melhor entender o comportamento dos fenômenos hidrológicos; análise de consistência e preenchimento de falhas; previsão de vazão; dimensionamento e previsão de cenários de planejamento; e efeitos resultantes da modificação do uso do solo.

FIGURA 1 – CICLO DA ÁGUA



FONTE: Adaptado de USGS (2019).

Atualmente, diversos autores utilizam o modelo hidrológico HEC-MHS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling Systems*) para o desenvolvimento de pesquisas que envolvem transformação chuva-vazão. (BRIGHENTI *et al.*, 2016; CABRAL *et al.*, 2016; FERREIRA *et al.*, 2021; FIALHO & NEVES, 2020; E. C. K. SANTOS, 2017)

As aplicações do modelo HEC-HMS permitem analisar a relação dos eventos intensos com a ocupação como proposto por Lima (2019) ao realizar uma simulação na bacia do Ribeirão Arrudas em Belo Horizonte – Minas Gerais.

Ferreira *et al.* (2021) recentemente conduziu um estudo notável no qual explorou o desempenho do HEC-HMS em comparação com o modelo SWAT, focando na simulação de eventos extremos. Os resultados de sua pesquisa revelaram que o HEC-HMS se destaca como uma ferramenta altamente eficaz, sendo capaz de realizar simulações com notável precisão em relação a eventos hidrológicos extremos.

O modelo HEC-HMS tem sido amplamente empregado por diversos autores como uma ferramenta essencial no desenvolvimento de pesquisas nas áreas hidrológica e climática. Sua aplicação abrange uma variedade de estudos que visam compreender e simular os processos hidrológicos em diversas bacias e contextos climáticos, (FERREIRA *et al.*, 2021; LIMA *et al.*, 2023; MATTOS *et al.*, 2022a; E. C. K. SANTOS, 2017)

Na abordagem de modelos hidrológicos, é crucial reconhecer a presença de incertezas. Essas incertezas referem-se à disparidade entre as estatísticas da amostra e as da população, uma divergência que pode surgir devido à representatividade da amostra ou aos erros inerentes à coleta e processamento dos dados da variável aleatória (TUCCI, 2007). Essa complexidade intrínseca ressalta a natureza dinâmica e imprevisível do sistema hidrológico, desafiando a modelagem precisa e evidenciando a importância de considerar cuidadosamente essas incertezas ao desenvolver e interpretar modelos hidrológicos.

Parâmetro do modelo hidrológico, equívoco estrutural na modelagem e na aproximação dos processos hidrológicos, erros nos valores de entrada do modelo tais como chuva, temperatura, evapotranspiração e erros no *output* do modelo para calibração, são apontados por Kuczera *et al.* (2010) como as principais fontes de incerteza de uma modelagem hidrológica.

Há de se destacar quanto a diferença tecnológica entre alguns dispositivos de medição dentro da mesma bacia, ou seja, mecanismos rudimentares como as medições de nível em régua em horários específicos são quase antagônicos aos dispositivos automáticos como os pluviômetros que coletam dados a cada 15 minutos. Desta forma, pode não ser possível identificar o pico de vazão de um determinado curso d'água caso este ocorra entre as medições.

Conforme destacado por Tucci (2005), a estrutura dos modelos hidrológicos é influenciada por três aspectos fundamentais: o objetivo almejado, as limitações impostas e a quantidade e qualidade das informações disponíveis. Estes elementos desempenham um papel decisivo na delineação e configuração dos modelos, influenciando diretamente sua eficácia e capacidade de representar adequadamente o comportamento hidrológico de uma determinada região ou sistema.

Para Tucci (2005), o objetivo, a limitação e a quantidade e qualidade das informações disponíveis são os aspectos mais importantes na estrutura dos modelos hidrológicos. Com o objetivo de atenuar as complicações decorrentes das incertezas, Muleta & Nicklow (2005) exploram os processos de calibração, propondo a sua automatização como uma solução. A automação desses procedimentos emerge como uma estratégia promissora para mitigar os desafios associados à incerteza em modelos hidrológicos. Ao sugerir a automatização da calibração, busca-se aprimorar a eficiência e a consistência na adaptação dos parâmetros do modelo, proporcionando uma abordagem mais ágil e precisa diante das complexidades inerentes à modelagem hidrológica.

Nkwunonwo *et al.* (2020) destacam a importância da calibração dos modelos hidrológicos como um processo essencial para atenuar as incertezas intrínsecas a esses modelos. Reconhecendo a complexidade do ambiente hidrológico e a variabilidade dos sistemas naturais,

a calibração emerge como um instrumento fundamental, permitindo ajustes precisos nos parâmetros do modelo. Essa prática não apenas aprimora a capacidade do modelo em representar adequadamente os fenômenos hidrológicos, mas também contribui para a redução das incertezas inerentes, promovendo uma modelagem mais confiável e eficaz.

Diferentes aspectos podem classificar os modelos hidrológicos. Almeida & Serra (2017) destacam que os modelos são classificados, dentre outras maneiras, de acordo com o tipo de variáveis empregadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos), a relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma como os dados são representados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos) e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

4.2 Modelagem hidrológica e hidráulica e seus parâmetros

4.2.1 HEC-HMS

O sistema de Modelagem Hidrológica (HEC-HMS) foi projetado para modelar os ciclos hidrológicos de bacias hidrográficas. O *software* inclui procedimentos clássicos de exame hidrológico, como infiltração, hidrogramas unitários e distribuição hidrológica.

Após a criação do projeto, é inserido o esquema hidrológico da área de estudo. Para isso são utilizados os seguintes componentes:

- Basin Models (Modelos de bacia);
- *Time-Series Data* (Dados de séries temporais).
- *Control Specifications* (Especificações de controle);
- Meteorologic Models (Modelos meteorológicos);

Cada componente recebe informações para a realização da simulação hidrológica, o componente *Basin Model é* o mais importante, pois representa fisicamente a bacia, nela é adicionada as informações como Área, tempo de retardo, CN e vazão base. Neste componente estabelece-se as metodologias de cálculo.

Após a inserção dos componentes, é possível construir o modelo hidrológico da Bacia Hidrográfica do rio Caratinga, sendo que sua extensão foi discretizada para melhor representação em relação à precipitação, evaporação, composição, uso e ocupação do solo. Para tanto foram utilizadas as seguintes ferramentas do módulo de elementos hidrológicos da bacia (*Basin Hidrologic Elements*): a) *Components/create componente/time series data*, onde são inseridas as informações da série histórica de precipitações b) *Components/create componente/control specifications*, ferramenta que estabelece o intervalo de tempo utilizado na simulação; e, c) *Components/create componente/meteorologic models*, ferramenta que relaciona a série histórica à bacia hidrográfica.

Abaixo, a Figura 2 apresenta o esquema metodológico para a modelagem no HEC-HMS.



FIGURA 2 – FLUXO METODOLÓGICO HEC-HMS

FONTE: Autoria própria (2022).

Os dados necessários para o desenvolvimento do modelo foram obtidos a partir de informações geográficas, geológicas e hidrográficas disponíveis no banco de dados do estado de minas gerais, denominado IDESISEMA.

4.2.2 Tempo de concentração

O tempo de concentração é um parâmetro hidrológico adotado para se estabelecer o tempo necessário que uma partícula de água escoe do ponto mais distante da bacia até seu exutório.

Em uma bacia real, o escoamento superficial pode ser visto como a combinação dos resultados de translação e armazenamento, sendo o primeiro, considerado linear, enquanto o segundo possui escoamento variado em decorrência da carga hidráulica, assim, o tempo de concentração diminui com o aumento da intensidade da precipitação (Silveira, 2005)

A partir do hidrograma unitário triangular do SCS pode-se determinar que o tempo de concentração é 1,42 vezes maior que o tempo de retardo e 1,67 vezes maior que o tempo de pico (McCuen *et al*, 1984).

Inúmeros autores desenvolveram modelos matemáticos distintos para se determinar o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica. A maioria das fórmulas avaliadas por Silveira (2005) são compostas por duas variáveis, comprimento do coletor pluvial principal e declividade média.

Para Silveira (2005), as diversas fórmulas que definem o tempo de concentração variam seus resultados em virtude da tipologia da bacia (urbana ou rural) e da área. Contudo conclui seu estudo recomendando as fórmulas para cada ocasião.

4.2.3 Método SCS-CN

O método SCS-CN foi desenvolvido pelo SCS – *Soil Conservation Service* (atual NRCS – *Natural Resources Conservation Service*) para o cálculo as perdas das chuvas em decorrência das absorções do solo. Trata-se de um modelo comumente aplicado para a determinação de vazões de projeto, (CUNHA *et al.* 2015).

Dentre outros, o principal parâmetro do modelo é o CN (*curve number*) que é determinado a partir das características hidrológicas, pedológicas e cobertura do solo. (ALVES, 2016)

Cunha *et al.* (2015) explicam que uma série de investigações na década de 1940 culminaram no desenvolvimento do método SCS-CN, principalmente por meio de experiências de campo em bacias rurais de pequeno porte na região centro-oeste dos EUA. Contudo, sua concepção e formulação iniciais, ao longo dos anos, foram tomando aplicações mais abrangentes tornando-se uma prática cotidiana da engenharia de recursos hídricos, principalmente em virtude de sua simplicidade de aplicação (ALVES, 2016).

Apesar do estudo de Cunha *et al.* (2015) considerar que o método SCS-CN demanda de aprimoramentos para melhor atendimento às demandas atuais, inúmeros trabalhos técnicos recentes seguem aplicando o método para o cálculo da precipitação efetiva. Principalmente em modelos hidrológicos aplicado no HEC-HMS, conforme mostram os trabalhos de CABRAL *et al.* (2016); FERREIRA *et al.* (2021); E. C. K. SANTOS (2017). No entanto, há unanimidade quanto a necessidade de calibração e validação do modelo visando a diminuição dos erros de superestimativa de precipitação.

4.2.4 HEC-RAS

Assim como o HEC-HMS o HEC-RAS foi desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center* do *U. S. Army Corps of Engineers* (USACE), dos Estados Unidos. Trata-se de um modelo capas de estabelecer as elevações do nível da água ao longo de um determinado trecho do canal hidráulico sujeito a escoamento não-permanente fundamentada nas equações completas unidimensionais de *Saint-Venant* (LAURIANO *et al.*, 2009).

Em virtude da sua eficiência, inúmeros pesquisadores têm aplicado o modelo HEC-RAS para desenvolvimento de pesquisas relacionadas a corpos hídricos. (CABRAL *et al.*, 2016; EL BILALI *et al.*, 2021; FIALHO & NEVES, 2020; GONÇALVES *et al.*, 2013; LAURIANO *et al.*, 2009)

4.2.5 Coeficiente de rugosidade

O coeficiente de rugosidade é um parâmetro fundamental utilizado em modelos hidráulicos de macrodrenagem para representar a resistência ao escoamento em canais e rios. Ele descreve a rugosidade da superfície do canal, influenciando a velocidade e a distribuição do fluxo de água.

O coeficiente de rugosidade é representado pela letra "n" e é comumente conhecido como coeficiente de Manning, em homenagem ao hidrólogo e engenheiro irlandês Robert Manning, que desenvolveu uma equação para calcular a velocidade do fluxo em um canal aberto com base na rugosidade da superfície. A equação de Manning é amplamente utilizada em estudos de hidrologia e engenharia hidráulica (ANCHIETA *et al.*, 2020; DINIZ & SALIBA, 2018; EL BILALI *et al.*, 2021; JOSÉ & NEVES, 2013; LOUSADA, 2023).

O valor do coeficiente de rugosidade depende das características do canal, como a textura do leito, a presença de vegetação, obstáculos e irregularidades. Ele também varia de acordo com as condições de fluxo, como a vazão e a profundidade da água (LOUSADA, 2023).

Os coeficientes de rugosidade são determinados por meio de estudos e medições de campo, análises estatísticas e referências de pesquisas anteriores (DINIZ & SALIBA, 2018). Existem tabelas e gráficos disponíveis que fornecem valores aproximados de coeficientes de rugosidade para diferentes tipos de canais, desde canais revestidos de concreto até rios naturais com leitos rochosos ou vegetação densa.

Esses coeficientes de rugosidade são utilizados em modelos hidráulicos para simular o comportamento do escoamento em larga escala, permitindo a previsão de enchentes, a avaliação

de riscos e a elaboração de projetos de obras de drenagem, como canais de desvio, diques e barragens. A escolha adequada do coeficiente de rugosidade é essencial para garantir resultados precisos e confiáveis nos modelos hidráulicos de macrodrenagem.

Para a determinação do coeficiente de rugosidade na prática, existem algumas metodologias publicadas em literatura. Dentre elas, destaca-se aqui o método de Cowan. Tal método é uma ferramenta fundamental na área da hidrologia e da engenharia hidráulica, usado para calcular o coeficiente de rugosidade em canais naturais e artificiais. Este coeficiente descreve a resistência ao escoamento da água em um canal e desempenha um papel crítico na modelagem hidráulica e na previsão de vazões em rios e cursos d'água. A precisão na determinação desse coeficiente é essencial para entender e prever o comportamento dos fluxos fluviais (JOSÉ & NEVES, 2013).

O coeficiente de rugosidade, frequentemente representado como n, no método de Cowan, varia dependendo das características do leito do canal, incluindo sua composição, irregularidades e cobertura de vegetação. O método de Cowan fornece uma abordagem empírica para estimar o valor apropriado de n (Equação 1), levando em consideração diversos parâmetros que afetam a rugosidade do canal (ARCEMENT & SCHNEIDER, 1989). Os principais parâmetros analisados no método de Cowan incluem:

- Composição do Leito: A natureza do material que compõe o leito do canal desempenha um papel crucial na rugosidade. Superfícies mais ásperas, como cascalho, resultam em valores mais elevados de Manning em comparação com leitos compostos por materiais mais lisos, como solo firme.
- Forma do Canal: A geometria do canal, incluindo sua largura e profundidade, influencia a rugosidade. Canais mais amplos e rasos tendem a ter valores de n mais baixos, enquanto canais estreitos e profundos têm valores mais elevados.
- Cobertura de Vegetação: A presença e densidade da vegetação no leito e nas margens do canal também afetam a rugosidade. Vegetação densa tende a aumentar a rugosidade do canal.
- 4. Estado do Canal: A condição de manutenção do canal, como a presença de detritos, obstruções ou assoreamento, pode introduzir variações na rugosidade.
 À cada parâmetro é atribuído um valor para que seja utilizado na fórmula abaixo.

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m \tag{1}$$

Onde:

n: Coeficiente de rugosidade

 n_0 : Composição do leito;

 n_1 : Irregularidade de superfície;

n₂: Variação da seção transversal do canal;

n₃: Obstruções;

n₄: Vegetação; e

m: Grau de sinuosidade.

Ao compreender e avaliar esses parâmetros, o método de Cowan permite uma estimativa precisa do coeficiente de rugosidade em canais hidráulicos, contribuindo para o desenvolvimento de modelos hidrológicos mais confiáveis. Esta informação é essencial para uma ampla gama de aplicações, desde o dimensionamento de infraestrutura de controle de enchentes até a gestão de recursos hídricos e a previsão de vazões em ambientes fluviais diversos.

Em publicações e pesquisas na área de hidrologia, (JOSÉ & NEVES, 2013; NETO *et al.*, 2020), o uso do método de Cowan desempenha um papel crucial na caracterização de rios e canais, permitindo uma abordagem fundamentada e precisa na análise da dinâmica fluvial e na tomada de decisões relacionadas à gestão de recursos hídricos e ao planejamento de projetos de engenharia.

4.3 SIG – Sistema de Informações Geográficas

O Sistema de Informações Geográficas (SIG), também conhecido como GIS (*Geographic Information System*), é uma poderosa tecnologia que combina dados geográficos, analíticos espaciais e ferramentas de visualização para compreender, interpretar e representar o mundo real. Essa tecnologia tem sido amplamente utilizada em diversas áreas, incluindo planejamento urbano, gestão ambiental, agronomia, geologia, cartografia, logística, pesquisas científicas, entre outras (CABRAL *et al.*, 2016).

Os SIGs possuem várias funcionalidades, como análise espacial, consulta de dados, modelagem e simulação, além de permitir a criação de mapas temáticos personalizados, relatórios e gráficos. Com base nos dados geográficos coletados e nas análises realizadas, os SIGs auxiliam na tomada de decisões mais intensas e eficientes, fornecendo uma compreensão mais aprofundada de padrões, relações e tendências geográficas (FITZ, 2008).

Para a caracterização e classificação do uso e ocupação do solo da bacia foram utilizadas imagens aéreas do satélite Rapideye, enquanto para o modelo digital de elevação as imagens empregadas foram do satélite ALOS.

As informações obtidas em *shape* e *raster* foram processadas no *software* Qgis versão 3.16.8, cujo resultado do processamento são apresentados no capítulo 7 – Discussão e Resultados.

Para a classificação quanto a ocupação e uso do solo na bacia foi utilizado o *software dzetsaka*, que funciona como *plugin* no Qgis. Por meio do programa, é possível categorizar as ocupações observadas por amostragem, desta forma, toda a área estudada pôde ser classificada quanto ao seu uso e ocupação.

Recentemente, autores como Oliveira *et al.*, (2019); Sejati *et al.*, (2020); Souza, (2021); Vale & Silva, (2021) têm aplicado o *dzetsaka* para a classificação supervisionada de superfícies no Brasil e no mundo.

Uma das ferramentas bastante utilizadas em GIS é o Aerofotolevantamento, também conhecido como fotogrametria aérea, que é uma técnica que utiliza fotografias aéreas para obter informações detalhadas sobre a superfície terrestre. Esse método envolve o uso de câmeras fotográficas montadas em aeronaves, como aviões ou drones, para capturar imagens da paisagem a partir de uma perspectiva elevada (SILVA, 2015).

Essas fotografias aéreas são então processadas por meio de técnicas de fotogrametria, que envolvem a análise e interpretação das imagens para extrair informações tridimensionais e medidas precisas do terreno, construções e outros elementos geográficos. O resultado é a criação de mapas, modelos tridimensionais e outras representações precisas do ambiente capturado pelas fotografias aéreas.

O aerofotolevantamento é amplamente utilizado em diversas áreas, como cartografia, planejamento urbano, agricultura, geologia, monitoramento ambiental e na criação de mapas topográficos detalhados. Essa técnica fornece dados valiosos para a análise e tomada de decisões em diferentes setores, aproveitando as vantagens da visão aérea para obter informações detalhadas e precisas sobre a superfície terrestre (VÉLEZ-NICOLÁS *et al.*, 2021).

Conforme destacado por Vélez-Nicolás *et al.* (2021), os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), denominados *Unmanned Aerial Systems* (UASs) em inglês e conhecidos como tal no Brasil, desempenharam um papel revolucionário no campo da hidrologia ao preencher a lacuna existente entre as observações convencionais por satélite e as medições realizadas em solo. Nesse contexto, os autores conduziram uma revisão abrangente destinada a servir como referência para pesquisadores e gestores de recursos hídricos interessados na adoção da tecnologia VANT.

Na mais recente implementação na área de topografia, emprega-se a combinação de Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) e o *Global Navigation Satellite System* (GNSS) para realizar levantamentos aerofotogramétricos. Entretanto, é importante ressaltar que essa tecnologia ainda apresenta limitações em termos de precisão quando comparada aos métodos tradicionais (CARNEVALE *et al.*, 2022).

Carnevale *et al.* (2022) realizaram experimentos com diferentes quantidades e posicionamentos de pontos de apoio, também conhecidos como pontos de controle, para avaliar a melhoria na acurácia do aerolevantamento e concluíram que ao efetuar a locação dos pontos de apoio, é essencial observar a distribuição adequada por toda a área de interesse, assegurando uma abordagem uniforme e abrangente no processo.

Pontos de controle no aerofotolevantamento são pontos conhecidos e precisamente localizados na superfície terrestre que são utilizados para georreferenciar as imagens aéreas obtidas durante o processo de fotogrametria. Esses pontos desempenham um papel crucial na garantia da precisão e na vinculação das informações coletadas durante o levantamento aerofotogramétrico com um sistema de coordenadas terrestres.

4.4 Medições indiretas de vazão

Medições indiretas de vazão em cursos d'água são métodos utilizados para estimar a vazão de água em rios, córregos ou canais sem a necessidade de uma medição direta. Essas técnicas são frequentemente utilizadas quando a medição direta não é viável devido a condições adversas ou limitação de acesso.

Para o presente estudo foi utilizado o *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP). De acordo com a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) dos Estados Unidos, o ADCP é um equipamento utilizado para medir a velocidade e a direção das correntes de água em oceanos, rios e lagos. O ADCP utiliza a técnica de Doppler acústico para medir a frequência das ondas sonoras refletidas pelas partículas em movimento da água, permitindo estimar a velocidade da corrente.

O ADCP é frequentemente montado em um veículo subaquático, como um navio, boia ou robô subaquático, e pode coletar dados em tempo real à medida que o veículo se move (NOAA). Os dados coletados pelo ADCP podem ser usados para uma variedade de aplicações, como previsão de inundações, modelagem de transportes de sedimentos e monitoramento de mudanças no clima oceânico (TEIXEIRA, 2018).

4.5 Regionalização de vazão

A regionalização de vazão é um processo utilizado na hidrologia para estimar as características de vazão em locais onde não há medições diretas. O conceito principal é agrupar estações de medição hidrológica em regiões homogêneas, com base em características geográficas, climáticas e topográficas semelhantes. A partir dessas estações, é possível desenvolver modelos matemáticos que relacionam as características dos locais com as vazões observadas.

Existem várias técnicas e métodos para realizar a regionalização de vazão. Um dos métodos mais comuns é o chamado método da análise regional de frequência, no qual é feita uma análise estatística das séries históricas de vazão nas estações de medição para determinar as funções de distribuição de probabilidade mais adequadas. Essas funções são então usadas para estimar as vazões em locais não monitorados.

Além disso, a regionalização de vazão também pode envolver a utilização de técnicas de geoprocessamento e modelos hidrológicos para considerar fatores como o relevo, o uso do solo e a distribuição espacial das chuvas na estimativa das vazões regionais.

É importante ressaltar que a regionalização de vazão é uma técnica que possui limitações e incertezas, já que é baseada em dados históricos e pressupõe a estabilidade das características hidrológicas ao longo do tempo. Portanto, é necessário ter cautela ao aplicar os resultados obtidos através desse processo e considerar outras fontes de informações disponíveis para uma análise mais precisa.

Em parceria com a Universidade Federal de Viçosa (UFV), o estado de Minas Gerais conduziu um estudo de regionalização de vazão com o objetivo de melhorar o processo de outorga. O estudo seguiu um procedimento metodológico que consistiu em várias etapas, algumas comuns a todas as bacias hidrográficas estudadas e, portanto, apresentadas de forma geral. Essas etapas incluíram a análise das variáveis dependentes e independentes, a avaliação de modelos de regressão, os critérios para a seleção do modelo de regionalização, a espacialização das vazões e a proposta de minimizar a necessidade de extrapolação das equações de regionalização obtidas (IGAM/UFV, 2012). Os dados utilizados no estudo e a seleção do período base foram específicos para cada bacia hidrográfica, sendo assim apresentados de forma individualizada. Além disso, particularidades correspondentes a cada estudo foram tratadas de forma específica.

O objetivo principal do estudo de regionalização de vazão em questão é identificar as vazões mínimas para gerenciar a disponibilidade de água. No entanto, também foi analisada a

vazão média de longa duração durante o estudo, a qual pode ser empregada como vazão de referência em modelos hidráulicos.

4.6 Eventos extremos de precipitação

Eventos extremos de precipitação referem-se a situações em que ocorre uma quantidade excepcionalmente alta de chuva, neve ou outra forma de precipitação em um determinado período. Esses eventos podem ter impactos significativos em termos de inundações, deslizamentos de terra, interrupção de serviços e outros efeitos relacionados à água (LOUSADA, 2023).

Angelo *et al.* (2022) argumentam que a caracterização de um evento de precipitação como extremo ocorre quando a intensidade, a duração ou o acumulado exibem valores notavelmente elevados e fora do padrão esperado para uma região específica. Diversos métodos empregados nessa definição baseiam-se na análise das distribuições de frequência dos acumulados de chuva em séries históricas de dados, levando em conta a ultrapassagem de um limiar percentual como critério determinante.

Os pesquisadores Lu *et al.* (2019) investigaram os efeitos da urbanização na precipitação extrema na região metropolitana do Delta do Rio Yangtze e concluíram que a urbanização exerce um impacto substancial nesse fenômeno. O estudo revelou um aumento significativo nos níveis de recorrência de eventos de precipitação extrema nas áreas urbanas, suburbanas e rurais após a implementação de influências urbanizadas.

Notavelmente, os resultados indicam que o impacto da urbanização na precipitação extrema é mais pronunciado em regiões com baixos níveis de urbanização para eventos de curta duração (Rx1day), enquanto em regiões altamente urbanizadas, a influência é mais proeminente para eventos de longa duração (Rx5day).

Com base nessas descobertas, o estudo destaca a necessidade de considerar cuidadosamente os impactos da urbanização na precipitação extrema no planejamento e gestão urbana. Recomenda-se a implementação de medidas para mitigar os efeitos negativos dessas mudanças, enfatizando a importância de estratégias de gestão sustentável para enfrentar os desafios decorrentes do crescimento urbano.

4.7 Eficiência Kling-Gupta – KGE

A eficiência de Kling-Gupta (KGE), foi introduzida em trabalhos científicos como uma melhoria da amplamente utilizada eficiência de Nash-Sutcliffe. Diferentes tipos de erros do modelo são considerados, nomeadamente o erro na média, a variabilidade e a dinâmica.

Para Gupta *et al.* (2009) uma decomposição do critério de calibração em componentes pode ajudar a melhorar nossa compreensão do desempenho geral do modelo. Em última análise, tal abordagem pode ajudar no desenho de estratégias de avaliação diagnósticas que apoiem adequadamente a identificação de modelos hidrologicamente consistentes.

De acordo com as descobertas de Gupta *et al.* (2009), o critério de Eficiência Kling-Gupta (KGE) se baseia em três componentes essenciais - correlação, viés e variabilidade - cada um com peso igual no cálculo geral do KGE (equação 2). Em um estudo de caso específico, a decomposição tanto do NSE quanto do KGE foi aplicada, visando analisar os diferentes componentes que compõem o NSE, e comparar o desempenho desses dois critérios em várias bacias.

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$$
(2)

Onde:

r é o coeficiente de correlação de Pearson entre os valores observados e simulados.

 β é a razão entre o desvio padrão dos valores simulados e o desvio padrão dos valores observados.

 γ é a razão entre a média dos valores simulados e a média dos valores observados.

Os resultados dessa análise revelam que o critério KGE proporciona calibrações de modelo que são estatisticamente mais favoráveis. Além disso, o KGE demonstra manter resultados estatisticamente mais consistentes durante o período de avaliação independente. Essa conclusão sugere que o critério KGE oferece vantagens significativas, fornecendo não apenas uma calibração robusta durante a fase de desenvolvimento do modelo, mas também resultados mais confiáveis e estáveis ao ser aplicado a dados independentes para avaliação posterior.

Pesquisadores ao redor do globo têm empregado o coeficiente de eficiência KGE para desenvolvimento de pesquisas. (POOL *et al.*, 2018; HALLOUIN *et al.*, 2020; PONTES *et al.*, 2015)

5 METODOLOGIA

5.1 Fluxograma

Inicialmente, o fluxograma representado pela Figura 3 demonstra de maneira geral as etapas metodológicas para o alcance dos objetos deste estudo.

FIGURA 3 – FLUXOGRAMA



FONTE: Autoria própria (2022).

5.2 Delimitação da bacia estudada

Para a delimitação e caracterização qualiquantitativa da bacia estudada utilizou-se o programa de código aberto Qgis versão 3.16.8 (*hannover*), para tanto, as imagens aéreas do satélite *Rapideye* de agosto de 2014 foram processadas para a obtenção de informações relativas ao uso e ocupação do solo. O modelo digital de elevação foi obtido a partir de imagens do satélite ALOS.

As informações relativas à delimitação da bacia hidrográfica estudada foram obtidas por meio de *shapefiles* disponibilizados pela Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IDE-SISEMA).

5.3 Discretização

Em princípio, a fim de conhecer a heterogeneidade bacia hidrográfica de estudo de forma mais precisa, optou-se por dividir a área total em 7 sub-bacias distintas. Essa abordagem permitiu considerar de maneira apropriada diversos aspectos importantes, como a localização dos encontros de cursos d'água relevantes e a distribuição do uso e ocupação do solo na região.

Ao considerar aspectos como encontros de cursos d'água e o uso do solo na definição das sub-bacias, pôde-se abranger uma ampla gama de cenários hidrológicos e ambientais que podem ocorrer dentro da área de estudo. Essa abordagem permitiu obter uma visão mais detalhada e abrangente da bacia, contribuindo para uma análise mais sólida e representativa dos fenômenos hidrológicos em questão.

A discretização da bacia em 7 sub-bacias demonstrou ser uma estratégia eficaz para lidar com a complexidade do ambiente estudado, fornecendo um enquadramento adequado para as investigações hidrológicas realizadas no presente estudo.

No exutório das 3 sub-bacias à montante há a estação fluviométrica (56924500), assim foi possível calibrar o modelo hidrológico para a extrapolação dos parâmetros CN, infiltração e abstração para as demais bacias à jusante.

Para a calibração do modelo hidrológico foram utilizadas informações das estações pluviométrica (1942048) e fluviométrica (56924500) localizadas à montante da bacia hidrográfica. Portanto a calibração e validação da bacia rural foi desenvolvida a partir de 21 eventos de precipitação máxima mensal consecutiva de 5 dias por meio do índice *rx5day*.

5.4 Modelos hidrológicos

A abordagem empregada na modelagem hidrológica deste estudo foi dividida em três fases distintas. Na primeira fase, foram realizadas simulações nas três bacias de montante, nomeadamente Caratinga 1, Barra Alegre e Caratinga 2. Esta etapa foi crucial para a calibração dos parâmetros, como o Número de Curva (CN), abstração e impermeabilização, além de subsidiar a implementação no segundo modelo. O segundo modelo hidrológico abarcou as bacias do modelo anterior e incluiu a bacia Caratinga 03, utilizando os parâmetros derivados da modelagem inicial.

A terceira etapa da modelagem hidrológica foi conduzida na bacia do córrego São João, empregando os parâmetros CN de acordo com a metodologia do Serviço de Conservação de Solo (SCS).

Para as modelagens, foi empregado o *software* HEC-HMS, utilizando a metodologia SCS-CN. As vazões resultantes foram, então, empregadas como entrada para a modelagem hidráulica conduzida nesta pesquisa.

Os dados pluviométricos aplicados na primeira e segunda modelagem foram obtidos da estação pluviométrica (1942048), enquanto para a terceira modelagem hidrológica, foram extraídos os dados pluviométricos da estação do INMET (83592), correspondentes ao mesmo período dos 21 eventos de precipitação máxima mensal consecutiva de 5 dias.

A utilização do HEC-HMS aliado à metodologia SCS-CN e à consideração das subbacias foi essencial para o sucesso desta etapa da pesquisa, fornecendo uma base sólida para a análise dos fenômenos hidrológicos e para a tomada de decisões relacionadas ao estudo da bacia em questão.

Como vazão de referência, será empregada a Q_{mld} (vazão média de longa duração) definida para os trechos de lançamento de vazão no modelo hidráulico.

A pesquisa realizada pelo IGAM/UFV (2012) dividiu a bacia do Rio Doce em três áreas homogêneas, e para cada uma delas, identificou-se a equação que, do ponto de vista estatístico, apresentava o melhor ajuste. A área em foco está localizada na região homogênea 3, e os resultados indicaram que a Equação 3 foi a que melhor se adequou estatisticamente para descrever a vazão média de longa duração.

$$Q_{mld} = 1,257877 P_{eq750}^{0,9244} \tag{3}$$

Onde:

 Q_{mld} : Vazão média de longa duração

 P_{eq750} : Precipitação equivalente menos a inércia hídrica de 750 mm

Por fim, pode-se afirmar que o modelo desenvolvido neste estudo pode ser classificado como determinístico conceitual distribuído estacionário.

5.5 Modelo hidráulico

Para a realização da modelagem hidráulica, será adotado o *software* livre HEC-RAS (versão 6.3.1). Nesse sentido, foram coletadas diversas informações de campo, como

batimetria, rugosidade, velocidade do escoamento, vazão instantânea, entre outras, essenciais para as análises propostas neste estudo.

No contexto da modelagem hidráulica, foi imprescindível a obtenção de dados precisos da superfície do curso d'água em campo. Para tanto, recorreu-se a imagens aéreas capturadas através de um veículo aéreo não tripulado (drone), o que nos permitiu criar um modelo digital de elevação da superfície.

As vazões obtidas a partir dos modelos hidrológicos serão empregadas no modelo hidráulico de maneira contínua. Com o objetivo de evitar interferências entre eventos, será implementada uma janela temporal de 5 dias, contendo dados de vazão média de longa duração para ambos os canais do modelo.

A inclusão de um intervalo de 5 dias entre os eventos tornou-se imperativa devido à restrição do software HEC-RAS, que exige um mínimo de 100 pontos de dados de vazão para processamento adequado. Assim, essa abordagem possibilita a integração eficiente dos eventos, mantendo a consistência no processo.



FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DAS SEÇÕES NO MODELO HIDRÁULICO

FONTE: Autoria própria (2022).

O coeficiente de rugosidade de *Manning* para o canal foi determinado utilizando o método de Cowan, sendo aplicado em cada uma das 23 seções do modelo (Figura 4). Destas, 3
seções tiveram seus dados coletados por meio de medições realizadas com o *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP).

Os dados coletados pelo ADCP foram processados no *software* RiverSurveyor Live versão 3.9.0 produzido pela Sontek/Ysi.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Caracterização da área de estudo

Para alcançar os objetivos propostos para o presente trabalho, foi adotada a região da bacia do rio Caratinga, localizada à montante do município de Caratinga-MG, região leste do estado de Minas Gerais. O rio Caratinga é um dos principais afluentes do rio Doce (Figura 5), a bacia abrange, total ou parcialmente, 29 municípios das regiões da Zona da Mata e Vale do Rio Doce. São eles: Alpercata, Alvarenga, Bom Jesus do Galho, Bugre, Capitão Andrade, Caratinga, Conselheiro Pena, Dom Cavati, Engenheiro Caldas, Entre Folhas, Fernandes Tourinho, Governador Valadares, Iapu, Imbé de Minas, Inhapim, Ipaba, Itanhomi, Piedade de Caratinga, Resplendor, Santa Bárbara do Leste, Santa Rita de Minas, São Domingos das Dores, São João do Oriente, São Sebastião do Anta, Sobrália, Tarumirim, Tumiritinga, Ubaporanga e Vargem Alegre.

A bacia estudada possui 194,586 km² sendo seu talvegue principal o rio Caratinga cuja nascente encontra-se no município de Santa Bárbara do Leste, após 34,73 km, percorrendo pelos municípios de Santa Rita de Minas e Caratinga, atinge-se o exutório no município de Caratinga-MG.

Conforme pode se observar na Figura 6 a região de Caratinga é susceptível à influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e caracterizada por possuir um clima quente e temperado, a amplitude térmica varia de 20 °C à 27 °C no verão e de 13 °C à 22 °C no inverno. A temperatura média anual é de 20,8 °C. O período chuvoso se concentra entre os meses de outubro a março, sendo dezembro o mês com maior média, 308,3mm, considerando os dados do período de 1981 a 2010. A classificação Koppen climatológica de Caratinga é Cwa, ou seja, chuva de verão e verão quente, enquanto Santa Bárbara do Leste e Santa Rita de Minas possuem seu clima classificado como Cwb, diferindo de Caratinga somente quanto ao verão que é considerado moderadamente quente.



FIGURA 5-MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA BACIA DE ESTUDO.



FIGURA 6 – IMAGEM DO SATÉLITE GOES-13 EM 22/12/2013

FONTE: DSA - INPE (2022).

Dois eventos consecutivos no mês de janeiro dos anos de 2003 e 2004 provocaram na sociedade caratinguense o interesse em compreender melhor a bacia hidrográfica do rio Caratinga, desde então novas estações pluviométricas e uma fluviométrica foram instaladas, permitindo que estudos científicos fossem realizados a partir de dados mais precisos.



FIGURA 7 – DESVIO DE PRECIPITAÇÃO NORMAL – JANEIRO 2003 E 2004

FONTE: INMET (2022)

A Figura 7 mostra a anomalia mensal ocorrida no período dos eventos de 2003 e 2004. Nota-se que em 2003 a região sofreu a maior anomalia daquele mês em comparação ao restante do território nacional.

Para as modelagens hidrológicas e hidráulicas, foram escolhidos 21 eventos de precipitação máxima mensal consecutiva de 5 dias usando o índice rx5day, no período entre os anos de 2007 e 2019. Dessa forma, o Gráfico 1 apresenta as precipitações utilizadas nos modelos hidráulicos para a obtenção da vazão de projeto.



GRÁFICO 1 - DADOS DE PRECIPITAÇÃO USADOS NOS MODELOS HIDROLÓGICOS

FONTE: Autoria própria (2022).

Na Figura 8, é possível visualizar o modelo digital de elevação, obtido por meio do satélite ALOS. As cotas de elevação nesse modelo variam significativamente, abrangendo uma faixa que vai de 1370 metros a 545 metros em relação ao nível do mar. Além disso, a Figura 8 destaca a localização estratégica das sedes municipais, a representação da hidrografia que delineia a região, e a discretização adotada para a área de estudo. Essa representação detalhada proporciona uma visão abrangente da topografia da região, sendo essencial para compreender a distribuição das elevações, a interação entre os corpos d'água e a disposição espacial das sedes municipais na bacia hidrográfica estudada. Esses elementos fornecem uma base crucial para análises mais aprofundadas relacionadas à hidrologia, topografia e planejamento territorial.



FIGURA & MDE, HIDROGRAFIA, MUNICÍPIOS E DISCRETIZAÇÃO.

De acordo Mapa Solos do Estado de Minas Gerais com 0 de (UFV/CETEC/UFLA/FEAM, 2010) a região tem a maior parte, 99,11% do solo caracterizado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico enquanto uma pequena parcela, 0,89%, se apresenta como Cambissolo Háplico Distrófico. A Figura 9 exibe a distribuição espacial da composição do solo na bacia.

Com o uso das imagens do satélite Rapideye foi possível promover a classificação do uso e ocupação do solo da bacia do rio Caratinga. Considerando que não foi possível identificar espelho d'água significante na área estudada, foram adotadas três categorias de uso do solo, sendo elas: Vegetação densa, vegetação rasteira e urbanização. Desta forma a Tabela 1 expõe o que foi considerado para o agrupamento de cada categoria.

Com o uso das imagens do satélite *Rapideye* foi possível promover a classificação do uso e ocupação do solo da bacia do rio Caratinga. Considerando que não foi possível identificar espelho d'água significante na área estudada, foram adotadas três categorias de uso do solo, sendo elas: Vegetação densa, vegetação rasteira e urbanização. Desta forma a Tabela 1 expõe o que foi considerado para o agrupamento de cada categoria.

CATEGORIA	RESPOSTA ESPECTRAL
	Remanescentes de mata
Vegetação densa	Culturas de eucalípto
	Culturas de médio porte
Vegetação Rasteira	Pastagem
	Pasto sujo
	Estradas/rodovias
Urbanização	Edificações
	Afloramento rochoso

TABELA 1 – CATEGORIAS DE CLASSIFICAÇÃO DO USO DO SOLO NA BACIA DO RIO CARATINGA.

FIGURA 9-PEDOLOGIA



A Figura 10 apresenta a imagem de satélite e o resultado da classificação adotada para a bacia em estudo, nela pode-se observar a predominância de vegetação rasteira à medida que se aproxima dos núcleos urbanos.

O resultado da classificação da área total, apresentado abaixo na Gráfico 2, demonstra que 40,88% da área classificada corresponde à classe da vegetação densa, enquanto a maior parcela, 41,52% referem-se à vegetação rasteira. Embora a urbanização esteja ocupando a menor parte do solo, é importante ressaltar que são locais com baixa infiltração, ou seja, contribuindo significativamente com o escoamento efetivo.



GRÁFICO 2 – USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA ESTUDADA

FONTE: Autoria própria (2022).

Considerando a discretização adotada para a área de interesse, nota-se que a urbanização se intensifica nas sub bacias Ctga 3, São João e Ctga 4, conforme demonstrado no Gráfico 3 abaixo.





FONTE: Autoria própria (2022).



FIGURA 10 - CLASSIFICAÇÃO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA BACIA ESTUDADA

Os dados extraídos do geoprocessamento para o cálculo do tempo de concentração (Tc) e do *lagtime* (L_t) em cada sub-bacia são apresentados na Tabela 2. Observa-se que a inclinação média do talvegue principal é inferior a 0,5% nas sub-bacias Ctga 2, Ctga 3 e Ctga 4, ao passo que a contribuição proveniente do córrego São João excede 4%. Essa discrepância ressalta a variação nas características topográficas das sub-bacias, indicando áreas com diferentes taxas de escoamento e destacando a influência significativa do córrego São João no sistema hidrológico local.

Sub bacia	Comp. (m)	Desnív. (m)	S (m/m)	Tc (horas)	Lt (min)
B_Alegre	14.226,46	662	0,04653	2,57	92,64
Ctga 1	11.208,66	449	0,04006	2,21	79,52
Ctga 2	3.954,64	16	0,00405	1,55	55,69
Ctga 3	12.416,55	58	0,00467	3,59	129,30
São João	6.089,26	274	0,04450	1,17	42,10
Ctga 4	7.146,58	31	0,00434	2,39	86,17
Bertô	7.457,43	199	0,02668	1,75	63,03

TABELA 2: CARACTERÍSTICAS DAS SUB BACIAS

FONTE: Autoria própria (2022).

A partir dos resultados obtidos, tornou-se evidente a necessidade de conduzir modelagens hidrológicas e hidráulicas mais abrangentes. Essa demanda surge devido à significativa contribuição da bacia do córrego São João para as vazões do modelo hidráulico, conforme demonstrado na Figura 11. Diante disso, foram desenvolvidas duas abordagens de modelagem hidrológica e uma modelagem hidráulica específica para incorporar o aumento do fluxo de água proveniente da bacia do Córrego São João.

A Figura 11 ilustra a região selecionada para a calibração do modelo hidrológico. Os resultados dessa calibração foram posteriormente aplicados a toda a bacia a montante do modelo hidráulico. Destaca-se na imagem a área específica do modelo hidráulico, cuja representação visual é derivada do processamento das fotos aéreas obtidas por meio do aerolevantamento. Essa área delimitada concentra o foco da análise hidráulica e reflete o resultado do tratamento das imagens aéreas para uma interpretação mais detalhada do terreno.



FIGURA11-DISCRETIZAÇÃO DA BACIA ESTUDADA

6.2 Resultados da modelagem hidrológica

Considerando a única estação fluviométrica com dados disponíveis para estudo, as sub bacias utilizadas na modelagem hidrológica foram as 3 localizadas na cabeceira da bacia, ou seja, Barra Alegre (B_Alegre), Caratinga 1 (Ctga_1) e Caratinga 2 (Ctga_2).

A Figura 13 apresenta a hidrografia e a localização das estações utilizadas para aplicação do modelo hidráulico calibrado.

Durante o desenvolvimento do presente estudo, observou que a calibração por evento alcançou melhores resultados em comparação à calibração contínua. Sendo assim, avaliou-se o modelo HEC-HMS face aos eventos selecionados por meio do índice rx5day.

A Figura 12 exibe, esquematicamente, o modelo hidrológico gerado por meio do HEC-HMS, nota-se a junção das sub-bacias CTGA_1, que representa a porção inicial do rio Caratinga, e a B_ALEGRE convergem para a sub-bacia CTGA_2.



FIGURA 12 - MODELO DA BACIA NO HEC-HMS

FONTE: Autoria própria (2022).



FIGURA 13 – SUB BACIAS DO MODELO HIDROLÓGICO

FONTE: Autoria própria (2022).

Entre março de 2007 e novembro de 2019 foram selecionados 21 eventos para a calibração e validação do modelo. A Tabela 3 apresenta os parâmetros calibrados para as sub bacias estudadas.

SUB	ABSTRAÇÃO	CN	IMPER.	LagT
BACIA	(mm)	CN	(%)	(min)
B_Alegre	5	50	20	97,55
Ctga_1	5	50	20	79,56
Ctga_2	5	50	20	55,69

TABELA 3 – PARÂMETROS CALIBRADOS

FONTE: Autoria própria (2022).

Os resultados obtidos a partir da calibração e validação realizadas é apresentada no Gráfico 4. Nota-se que determinados eventos não atingiram coeficiente de desempenho satisfatório, entretanto a maior parcela alcançou KGE acima de 0,4 conforme mostra a Gráfico 5.



GRÁFICO 4 - VAZÃO OBSERVADA VS SIMULADA

FONTE: Autoria própria (2022).

É possível que o desempenho do modelo hidrológico foi mediano em virtude das incertezas quanto aos dados observados, visto que a estação fluviométrica é manual, ou seja, demanda medições diárias realizadas por colaboradores.



GRÁFICO 5 – COEFICIENTE KGE PARA O MODELO CALIBRADO

FONTE: Autoria própria (2022).

6.2.1 Vazões de projeto

Bacia montante

Com base na calibração obtida, optou-se por aplicar, nas áreas de abrangência do presente estudo, os parâmetros de maneira homogeneizada, uma vez que os resultados se apresentaram desta forma. A Figura 14 apresenta a bacia e a hidrografia da área imediatamente à montante do modelo hidráulico.

A Tabela 4 apresenta os parâmetros extraídos da bacia de montante para a obtenção das vazões aplicadas no modelo hidráulico.

ÁREA (km²)	141,41
TALVEGUE PRINC. (M)	27.249,36
DESNÍVEL (M)	517,00
INCLINAÇÃO MÉDIA (M/M)	0,0190
TEMP. CONCENTRAÇÃO (H)	5,00
LAGT (MIN)	180,04

TABELA 4 – DADOS DA BACIA DE MONTANTE.





FONTE: Autoria própria (2022).

Nota-se no Gráfico 6 que o pico de vazão, para o período estudado, ocorreu no em novembro de 2010 apresentando máxima de 43,8 m³/s.



GRÁFICO 6 – VAZÕES DA BACIA DE MONTANTE

Fonte: Autor, 2023.

Bacia São João

A bacia do córrego São João, Figura 15, desagua no rio Caratinga ainda no perímetro urbano e, em virtude de sua vazão, é um importante afluente para a compreensão que se busca nesta pesquisa. Portanto, os dados apresentados na Tabela 5 foram aplicadas para se estabelecer as vazões de pico de cada evento.



FIGURA 15 – BACIA HIDROGRÁFICA DO CÓRREGO SÃO JOÃO.

FONTE: Autoria própria (2022).

ÁREA (km²)	17,71
TALVEGUE PRINC. (M)	6.089,26
DESNÍVEL (M)	274,00
INCLINAÇÃO MÉDIA (M/M)	0,0450
TEMP. CONCENTRAÇÃO (H)	0,835
LAGT (MIN)	31,14

TABELA 5 – DADOS DA BACIA DE MONTANTE.

O Gráfico 7 apresenta as vazões de pico para o mesmo período da bacia de montante, nota-se que os picos coincidem, mesmo se tratando de estações pluviométricas distintas.

A comparação entre as bacias hidrográficas da Montante e do córrego São João revela diferenças marcantes em diversos aspectos cruciais para o entendimento do comportamento hidrológico dessas regiões.

Em termos de extensão territorial, a bacia montante se destaca com uma área significativamente maior, abrangendo 141,41 km², enquanto a bacia do córrego São João apresenta uma área mais modesta de 17,71 km², representando aproximadamente 10% do tamanho da Bacia Montante.

GRÁFICO 7 – VAZÕES RESULTANTES DA MODELAGEM HIDROLÓGICA DA BACIA DO CÓRREGO SÃO JOÃO



FONTE: Autoria própria (2022).

A inclinação média das bacias também desempenha um papel importante no direcionamento do escoamento. A bacia montante, com uma inclinação média de 1,9%,

FONTE: Autoria própria (2022).

contrasta com a inclinação mais acentuada da Bacia do São João, que atinge 4,5%. Essa diferença substancial na inclinação sugere que o escoamento na Bacia do São João é mais acelerado, até o seu encontro com o rio Caratinga. Essa característica pode influenciar significativamente o tempo de reação em casos eventos extremos de precipitação.

Referente ao tempo de reação, observamos outra disparidade significativa. Enquanto a bacia montante possui um tempo de concentração de 5 horas, a bacia do São João apresenta um tempo notavelmente inferior de 0,835 horas. Essa discrepância destaca a capacidade da Bacia do São João de responder rapidamente a eventos extremos de precipitação, certamente em decorrência da sua extensão e da sua inclinação mais acentuada.

Além desses fatores, a urbanização também desempenha um papel relevante. A subbacia do córrego São João revela um cenário onde 20% de seu território é urbanizado, contrastando com a bacia de montante, que mantém uma porcentagem um pouco menor, com 17% de área urbanizada. Esse aspecto pode influenciar a resposta hidrológica da região, especialmente em relação ao escoamento superficial.

Neste contexto, a implementação de estratégias direcionadas à ampliação do tempo de concentração emergem como potenciais amortecedores da vazão de pico que incide nos canais a jusante das bacias de montante e da bacia do córrego São João.

Há de se avaliar que as barraginhas, conforme conceituadas pela Embrapa, constituem pequenas bacias escavadas no solo, caracterizadas por um diâmetro que não ultrapassa 20 metros, acompanhadas de rampas suaves, apresentando de 8 a 10 metros de raio. Distribuídas estrategicamente nas propriedades, essas estruturas desempenham um papel fundamental no manejo sustentável da água.

Portanto, a implantação de barraginhas nas áreas rurais e a adoção de sistemas de drenagem sustentável nas zonas urbanas da bacia são consideradas como instrumentos catalisadores de abstração. Estas medidas não só abrandariam o risco de inundações, mas também desempenhariam um importante papel na moderação das pressões hidrológicas sobre a região.

6.3 Modelo digital de elevação da superfície

O Modelo Digital de Elevação (MDE) da superfície foi obtido por meio da captura de 1354 imagens utilizando uma câmera acoplada ao drone da marca DJI, modelo *Mavic Air 2*. Essa extensa coleta de imagens permitiu uma ampla cobertura da área de estudo, garantindo a representatividade necessária para a geração do MDE.

Devido à baixa precisão do GPS do equipamento utilizado, foi necessário realizar correções para eliminar as distorções que poderiam impactar a qualidade dos dados obtidos. Para tal correção, empregou-se 73 pontos de controle distribuídos ao longo de toda a área de interesse. Esses pontos de controle foram fundamentais para garantir a precisão e a confiabilidade do MDE gerado.

Ao utilizar esses 73 pontos de controle, foi possível realizar ajustes precisos nas informações georreferenciadas das imagens capturadas, corrigindo assim as imprecisões causadas pelas limitações do GPS do drone. Dessa forma, o MDE resultante apresentou uma alta fidelidade topográfica, o que é crucial para uma análise precisa e detalhada dos aspectos relacionados à elevação da superfície na área de estudo.

Com a aplicação dessas correções, temos plena confiança de que o MDE gerado é uma representação fiel da topografia da região, proporcionando uma base sólida para as análises e interpretações dos fenômenos relacionados ao relevo em nossa pesquisa.

Os dados coletados foram processados utilizando o *software Agisoft Metashape Professional*, versão 1.7.6, fornecido pela empresa Equilíbrio Engenharia para o presente estudo. O relatório completo dos resultados desse processamento está anexado a este documento.

Observa-se que a ocupação urbana está em estreita proximidade com o rio Caratinga, conforme mostra a Figura 16. Outro ponto relevante é a constatação das reduzidas variações de cotas entre as vias urbanas e o curso d'água, merecendo destaque.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) derivado do levantamento de campo desempenhou um papel indispensável como entrada no RAS-Mapper. O processamento desse MDE resultou em uma impressionante resolução de imagem de 3,96 cm/pixel, evidenciando a qualidade detalhada dos dados obtidos em campo. Além disso, é relevante notar que o erro total do MDE ficou na ordem de 15,46 cm, demonstrando a precisão alcançada no processo de levantamento. Esses dados refinados, combinados com a resolução notável, são fundamentais para as análises subsequentes no contexto hidráulico, possibilitando uma representação mais fiel e detalhada da topografia da área de estudo.

A introdução do contraste em relação às cotas mais baixas teve como objetivo evidenciar de forma destacada o corpo hídrico no Modelo Digital de Elevação (MDE).



FIGURA 16–MOSAICO E MDE DE PARTE DA CALHA DO RIO CARATINGA.

6.4 Modelo hidráulico

Para a elaboração do modelo hidráulico, foram criados os modelos hidrológicos para a porção montante do rio Caratinga, abrangendo a área de interesse, e para o córrego São João. Além disso, foi realizado um levantamento aerofotogramétrico detalhado da região, complementado por levantamentos e vistorias de campo. Esses elementos constituem os tópicos que serão abordados na sequência.

6.4.1 Geometria

Utilizando o modelo digital de elevação gerado por meio do aerofotolevantamento, foi possível extrair diversos dados da superfície utilizando o RAS-Mapper. Isso permitiu a determinação do leito, das margens e das seções transversais e longitudinais do rio Caratinga, conforme ilustrado na Figura 17.

Devido às alterações repentinas, ao examinar a disposição em planta dos cursos d'água na área urbana da cidade de Caratinga, pode-se afirmar que a urbanização impôs, em certos trechos, um percurso que aparenta ter sofrido retificações para os dois rios da região.

Neste estudo, as seções transversais foram determinadas considerando a potencial alteração no regime de escoamento, seja devido a curvas, inclinação, vegetação, distância, ou qualquer parâmetro que pudesse influenciar na rugosidade do canal hidráulico.

O modelo hidráulico foi elaborado em uma extensão de cerca de 2.450 metros no rio Caratinga (River 1) e aproximadamente 400 metros no córrego São João (S_JOAO). No rio Caratinga, foram estabelecidas 23 seções transversais, enquanto no córrego São João foram definidas 4 seções. Para as seções 1815, 1375 e 376, os dados foram coletados por meio do ADCP com o propósito de utilizar essas informações na calibração da rugosidade.

FIGURA 17 – PROCESSAMENTO NO RAS MAPPER



Após o usuário definir o local de cada seções, o próprio RAS Mapper automaticamente determina o perfil de cada uma, conforme ilustrado na Figura 18.



FIGURA 18 – SEÇÃO 1375

FONTE: Autoria própria (2023).

Nota-se que o evento ocorrido em 21 de março de 2007 fez com que o nível d'água ultrapassasse os limites do leito do rio (representado pelos pontos vermelhos), que, em campo, é bem definido por estruturas de gabião em ambas as margens. A Figura 18 exibe também uma elevação significativa do nível da água.

Contudo, ao definir o perfil da seção, a ferramenta interpreta a estrutura como um sólido maciço, o que não reflete precisamente a realidade, uma vez que as edificações consistem em estruturas com espaços internos vazios. Ou seja, nesses casos, há a possibilidade de acumulação de água em situações de inundação. A mesma consideração é válida no caso das árvores com

copas, que são capturadas durante o aerolevantamento e apresentam volumes muito maiores do que seus troncos.

6.4.2 Dados de vazão

As vazões de pico foram calculadas nos modelos hidráulicos, sendo distribuídas diariamente. Foi estabelecido um padrão de entrada de precipitação sempre às 0 horas de cada dia, permitindo assim que o modelo hidráulico propague a dissipação hidráulica ao longo das 24 horas do dia.

Conforme descrito na metodologia, os eventos precisaram ser processados de maneira contínua. Para evitar interferência entre os eventos, foi acrescentado um intervalo de 5 dias entre eles. A vazão média de longa duração, definida pela Equação 1, foi de 1,33 m³/s para o rio Caratinga e de 0,133 m³/s para o córrego São João.

Dessa forma, tanto no rio Caratinga quanto no córrego São João, foram produzidos 207 dados de entrada no modelo hidráulico, resultando em 4.968 dados gerados na saída do modelo. A vazão do rio Caratinga teve início na seção 2452, enquanto a vazão do córrego São João teve início na estaca 393. Os dois cursos d'água convergiram próximo à seção 1249, onde suas vazões foram combinadas em um único canal.

6.4.3 Rugosidade

Para se determinar a rugosidade, conforme descrito na metodologia, foi empregado o método de Cowan, assim, mesmo nas seções onde não era possível realizar a leitura com o ADCP, foi permitido o cálculo do coeficiente de Manning.

Por ser um método empírico, ele introduz uma certa subjetividade para o autor, especialmente ao considerar intervalos que se sobrepõem a outras características, podendo apresentar amplas variações, como no caso das pedras no parâmetro "n0", que variam de 0,04 a 0,07, representando uma variação de 75%.

Com o intuito de reduzir a subjetividade inerente à avaliação empírica, as três seções que foram submetidas à coleta de dados pelo ADCP foram calibradas e utilizadas como referência para as demais seções.

A Figura 19 exibe imagens extraída do *software RiverSurveyor Live*, ou seja, os resultados dos dados obtidos pela leitura do ADCP nas seções 1815, 1375 e 376,

respectivamente. Observa-se que a profundidade do curso d'água, durante a realização da coleta de dados, variou entre 0,30 e 0,50 metros.

Para a calibração das seções 1815, 1375 e 376, a vazão obtida pelo equipamento foi empregada como entrada de maneira linear no modelo hidráulico. Assim, o ajuste da rugosidade determinou a altura do nível d'água no modelo, buscando uma correspondência próxima ao cenário real. O resultado desse processo fornecerá o coeficiente de Manning como resposta. Contudo, deve-se garantir que as seções são geometricamente semelhantes.



FIGURA 19 - DADOS COLETADOS PELO ADCP

FONTE: Autoria própria (2023)

A leitura do rio por meio do ADCP ocorreu sobre algumas pontes do meio urbano da cidade de Caratinga-MG (Figura 20).

O método de *Cowan* foi utilizado para determinar o coeficiente de rugosidade para as outras 20 seções do rio Caratinga e as 5 seções do córrego São João. Portanto, vistorias de campo foram conduzidas para a interpretação de cada parâmetro do método e sua aplicação.

FIGURA 20 - CAPTAÇÃO DE DADOS DO RIO CARATINGA NA SEÇÃO 1815 - PONTE DA RUA DONA JULICA



FONTE: Autoria própria (2023)

Durante as observações de campo, constatou-se que o leito do rio Caratinga é composto por solo firme, recebendo um valor de 0,028 (Figura 21). Em determinados trechos, foi notada a presença de cascalhos (Figura 22), resultando em um valor de 0,030 para essas áreas específicas. Essa distinção ocorre devido à maior aspereza introduzida pelo cascalho, que afeta significativamente a hidrodinâmica do rio e, por conseguinte, influencia o valor do coeficiente de rugosidade.

PARA MONTANTE



FONTE: Autoria própria (2023)

FIGURA 21 – TERRA FIRME, SEÇÃO 1815 VISTA FIGURA 22 – CASCALHO, SEÇÃO 1132 VISTA PARA JUSANTE



FONTE: Autoria própria (2023)

O córrego São João, entre as seções 393 e 271, foi canalizado com estruturas préfabricadas de concreto em formato retangular (Figura 23), dessa maneira recebeu o valor de 0,018 enquanto as demais seções receberam o valor de 0,028 por tratar-se de terra firme.



FIGURA 23 – CÓRREGO SÃO JOÃO MONTANTE DA SEÇÃO 393 VISTA PARA JUSANTE

FONTE: Rádio Caratinga (2022)

O grau de irregularidade do método está relacionado às condições das margens do rio. Durante as observações de campo, verificou-se que o rio Caratinga e o córrego São João, em trechos não canalizados, exibem canais com taludes laterais levemente desgastados ou erodidos, desta maneira recebera o valor de 0,003. No entanto, o trecho canalizado do córrego São João canalizado, recebeu o valor 0.

As variações nas seções transversais tornam-se evidentes quando o fluxo principal oscila ao longo do curso do rio, o que pode ser observado em campo. Para esse parâmetro, o rio Caratinga recebeu um valor de 0,001, uma vez que é normalmente raso, com poucas mudanças em sua seção. No caso do córrego São João, foi atribuído um valor nulo na seção canalizada e um valor de 0,002 nas demais seções. O valor atribuído ao trecho não canalizado do córrego reflete a presença de depósitos de sedimentos em seu leito.

O método de *Cowan* utiliza uma escala de valores entre 0 e 0,06 para caracterizar os efeitos de obstruções, referindo-se a objetos que podem causar represamento ou alterações no fluxo da água. Portanto, tanto para o rio Caratinga quanto para o córrego São João, foram atribuídos valores correspondentes a obstruções insignificantes, indicando ocupação inferior a

5% do canal. Os valores atribuídos foram 0,001 para a maioria das seções e 0,002 para aquela que, em campo, observou maiores obstruções (Figura 24).



FIGURA 24 – PEQUENAS OBSTRUÇÕES NO RIO CARATINGA

O método de Cowan utiliza valores que variam entre 0 e 0,2 para caracterizar a presença de vegetação nas margens do curso d'água. No caso do rio Caratinga e do córrego São João, no trecho não canalizado, foi aplicado o valor de 0,001, correspondente a gramas e ervas daninhas. Já no trecho canalizado do córrego São João, foi utilizado o valor 0, indicando a ausência de vegetação.

A Figura 25 retrata a confluência do córrego São João, à direita, com o rio Caratinga na região central da cidade de Caratinga-MG. Nela, é possível observar a vegetação predominante nas margens. No entanto, é importante destacar que a municipalidade realiza frequentemente o trabalho de capina, removendo grande parte dessa vegetação, como ilustrado na Figura 21.

Por fim, o grau de meandro pode adicionar à rugosidade um coeficiente de 15% ou 30% a mais na soma dos parâmetros anteriores. Conforme observado na Figura 16, há algumas curvas mais acentuadas em poucos locais, como é o caso entre as seções 710 e 460, e entre as seções 1700 e 1530. Entretanto, a maior parte do trecho estudado não apresenta grandes nuances que justificassem o acréscimo proposto pelo método. Desta forma, a Tabela *6* apresenta os resultados obtidos, para o rio Caratinga, após a conclusão dessa etapa da pesquisa.

FONTE: Autoria própria (2023)

FIGURA 25 – ENCONTRO DO CÓRREGO SÃO JOÃO COM O RIO CARATINGA



FONTE: Autoria própria (2023).

É observável que os coeficientes de rugosidade obtidos por meio da calibração apresentaram valores semelhantes aos resultados provenientes da aplicação do método de Cowan. No entanto, visando aprimorar os resultados no modelo hidráulico, foram utilizados os valores calibrados.

Lyra *et al.* (2010) realizou um estudo para determinar a rugosidade do rio Paracatu para o período de 20 anos, entre 1976 e 1996, neste estudo ele encontrou valores distintos para o período de seca e de cheia, no entanto, concluiu que a variação não se mostrava significativa. O coeficiente de rugosidade daquele curso d'água oscilou entre os trechos estudados sendo a menor 0,0119 e a maior de 0,0594.

TABELA 6 – RUGOSIDADE DO RIO CARATINGA APLICADA NO MODELO HIDRÁLICO

(continua)

SECÕES	RUGOSIDADE	RUGOSIDADE MÉTODO COWAN						
SEÇÜES	CALIBRADA	NO	N1	N2	N3	N4	М	RUGOSIDADE
2452		0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045
2412		0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045
2130		0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045
1946		0,028	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,043
1876		0,028	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,043
1815	0,035	0,028	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,043
1774		0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045

TABELA 7 - RUGOSIDADE DO RIO CARATINGA APLICADA NO MODELO HIDRÁLICO

SECÕES	RUGOSIDADE	E RUGOSIDADE MÉTODO COWAN						
SEÇÜES	CALIBRADA	NO	N1	N2	N3	N4	М	RUGOSIDADE
1700		0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,15	0,052
1530		0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045
1375	0,043	0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045
1249		0,03	0,003	0,001	0,002	0,01	1,00	0,046
1132		0,03	0,003	0,001	0,002	0,01	1,00	0,046
1007		0,03	0,003	0,001	0,002	0,01	1,00	0,046
947		0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045
858		0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045
800		0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045
710		0,028	0,003	0,001	0,001	0,01	1,15	0,049
460		0,028	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,043
376	0,04	0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045
284		0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045
217		0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045
159		0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045
51		0,03	0,003	0,001	0,001	0,01	1,00	0,045

FONTE: Autoria própria (2023).

A Tabela 8 exibe os resultados da aplicação do método de Cowan no córrego São João. É perceptível que existem dois trechos bastante distintos devido à canalização, que altera significativamente a rugosidade do canal. Vale ressaltar também que uma parte desse curso d'água está completamente coberta por edificações, como mostrado na Figura 26.

SEÇÕES	NO	N1	N2	N3	N4	М	RUGOSIDADE
393	0,018	0,000	0,000	0,001	0,000	1,000	0,019
348	0,018	0,000	0,000	0,001	0,000	1,000	0,019
271	0,018	0,000	0,000	0,001	0,000	1,000	0,019
187	0,028	0,003	0,002	0,001	0,010	1,000	0,044
72	0,028	0,003	0,002	0,001	0,010	1,000	0,044

TABELA 8 - RUGOSIDADE DO CÓRREGO SÃO JOÃO

FONTE: Autoria própria (2023).

Em virtude de sua ocupação restrita a eventos hidrológicos extremos e de estarem localizadas em áreas urbanizadas, definiu-se um valor padronizado de 0,03 para representar a rugosidade nas regiões adjacentes às margens do curso d'água. Esta decisão de uniformizar a

rugosidade nessas áreas reflete não apenas a sua ocupação esporádica, ocorrendo apenas durante eventos extremos, mas também leva em consideração as características urbanas dessas regiões, onde a presença de superfícies impermeáveis e elementos construídos influencia significativamente o comportamento hidráulico. Essa padronização proporciona uma simplificação coerente para a modelagem, permitindo uma representação mais eficiente e precisa das condições hidráulicas em situações extremas.



FIGURA 26 – VISTA AÉREA DO CÓRREGO SÃO JOÃO

FONTE: Autoria própria (2023).

6.4.4 Resultado da modelagem hidráulica

A modelagem hidráulica realizada nesta pesquisa foi conduzida utilizando os dados de entrada: A vazão proveniente dos modelos hidrológicos do rio Caratinga e do córrego São João; o modelo digital de elevação obtido através do aerolevantamento realizado pelo autor; e a rugosidade determinada predominantemente pelo método de Cowan, com contribuições adicionais provenientes da leitura do ADCP em 3 das 23 seções do rio Caratinga.

Como resultado do processamento do modelo hidráulico para os eventos selecionados, destaca-se que a vazão máxima registrada, atingindo 43,8 m³/s em 02 de novembro de 2010, teve impactos significativos no nível do rio Caratinga. Na seção 2452, observou-se um aumento impressionante de 4,59 metros em relação ao leito normal, enquanto na seção 710 a elevação foi de 4,52 metros acima do seu nível convencional. Mesmo em locais onde a elevação do nível, como na seção 1815, foi de 2,93 metros, a Figura 27 revela claramente que a vazão resultou no transbordamento da calha do rio, evidenciando a magnitude dos efeitos desse evento hidrológico extremo.



FIGURA 27 - SEÇÃO 1815 NO EVENTO DE 02/11/2010

Na análise da vista de planta (Figura 28) referente ao dia do maior evento do modelo, torna-se evidente que a vazão de 43,80 m³/s ocasionou uma série de pontos de inundação na malha urbana da cidade. Além das ruas Cel. Pedro Martins, Cel. Antônio da Silva, Av. Olegário Maciel e Praça da Estação, locais como a rodoviária, a sede da Funec, o Sesi e várias áreas particulares também foram afetados, refletindo a extensão abrangente dos impactos provocados pelo evento hidrológico extremo. Essa análise espacial destaca a vulnerabilidade de diferentes setores urbanos diante de vazões máximas.

A precipitação responsável por gerar essa vazão extrema totalizou 95,40 milímetros na estação meteorológica 1942048 (Santa Rita de Minas) e 42,70 milímetros na estação 83592, situada na sub-bacia do córrego Bertô. Esses valores substanciais de precipitação,

FONTE: Autoria própria (2023).

particularmente na estação de Santa Rita de Minas, indicam a intensidade significativa do evento climático que desencadeou a vazão máxima registrada.



FIGURA 28 – MODELO TRIDIMENSIONAL GERADO PELO HEC-RAS 02/11/2020

FONTE: Autoria própria (2023).

As Figuras 29, 30 e 31 ilustram os resultados dos eventos ocorridos nos dias 20/11/2019, 18/03/2007 e 21/03/2007, com precipitações correspondentes de 70,8, 78,9 e 32,8 milímetros na bacia de montante, respectivamente. É notável observar que, nestes casos, as vazões associadas ao mesmo evento *rx5day* apresentam precipitações consideravelmente distintas, entretanto, suas vazões quase se equiparam. Este fenômeno destaca a importância do índice *rx5day* na caracterização da resposta hidrológica, evidenciando que a intensidade e distribuição temporal da precipitação desempenham um papel fundamental na determinação das vazões, mesmo quando as quantidades totais de precipitação divergem.



FONTE: Autoria própria (2023). FONTE: Autoria própria (2023). FONTE: Autoria própria (2023).

O evento ocorrido no dia 01 de fevereiro de 2018 de 88,10 milímetros resultou em uma vazão de 16,3 metros cúbicos por segundo e, de acordo com o modelo, não causou inundação na cidade de Caratinga (Figura 32).

É crucial ressaltar que o evento ocorrido em 02 de novembro de 2010 foi precedido por uma precipitação de 11,40 mm no dia anterior. Esse episódio prévio de precipitação desempenhou um papel significativo ao potencializar a alcançar a vazão máxima registrada. Nesse contexto, é fundamental considerar que uma única precipitação isolada, mesmo que possua magnitudes similares, como é o caso do evento de 88,10 milímetros ocorridos no dia 01 de fevereiro de 2018, pode não resultar na mesma vazão observada durante eventos hidrológicos extremos. A interação complexa entre eventos climáticos consecutivos destaca a importância de abordagens integradas na análise de padrões hidrológicos e na compreensão dos fatores que contribuem para a magnitude das vazões em diferentes cenários meteorológicos.



FONTE: Autoria própria (2023).

Um ponto crucial que merece destaque é a ocorrência de inundações nos trechos subsequentes ao aumento de vazão proveniente da bacia do córrego São João. A Tabela 9 oferece uma visão comparativa das vazões antes e após o ponto de confluência entre os dois corpos hídricos. Essa análise das variações nas vazões destaca a influência direta da contribuição do córrego São João no sistema hidráulico do rio Caratinga, evidenciando a necessidade de uma gestão cuidadosa e estratégias de mitigação para lidar com os potenciais impactos dessas alterações no regime hídrico local.
BACIA MON	ANTE	BACIA SÃO J		
PRECIPITAÇÃO	VAZÃO	PRECIPITAÇÃO	VAZÃO	DATA
(mm)	(m³/s)	(mm)	(m³/s)	
70,80	30,40	58 <i>,</i> 60	3,00	18/03/2007
32,80	22,00	0,00	0,00	21/03/2007
95,40	43 <i>,</i> 80	42,70	1,90	02/11/2010
78,90	33,80	27,30	0,30	20/11/2019

TABELA 9 - PRECIPITAÇÕES E VAZÕES

FONTE: Autoria própria (2023).

Esses resultados ilustram de maneira expressiva o impacto das vazões máximas nos níveis de água e na capacidade de escoamento do rio Caratinga durante eventos críticos de precipitação, ressaltando a importância de estratégias de mitigação e planejamento urbano para lidar com eventos de precipitação extrema.

A conclusão do estudo revela que o modelo hidráulico se apresentou de maneira altamente satisfatória, refletindo com notável proximidade a realidade observada durante eventos de precipitação extrema. A correspondência entre os resultados modelados e os cenários reais destaca a utilidade e eficácia dessa abordagem na compreensão e previsão de situações críticas relacionadas ao comportamento hidráulico dos cursos d'água estudados.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os desafios inerentes à produção de modelos hidrológicos e hidráulicos estão intrinsecamente ligados à qualidade dos dados utilizados. A transição de dados entre diferentes programas ocorre tanto de forma manual quanto automática, dependendo do software empregado. Os modelos hidrológicos, apesar de sua avançada complexidade, ainda carecem de uma automação mais abrangente, o que resulta na incorporação manual de dados geográficos no modelo. Esse procedimento não apenas se revela tedioso, mas também aumenta consideravelmente o risco de erros durante a transferência de dados. Em contraste, o modelo hidráulico, como o HEC-RAS, apresenta uma maior integração entre os dados geotécnicos. Versões mais recentes do HEC-RAS, por exemplo, dispõem do Mapper, que utiliza Modelos Digitais de Elevação (MDE) para capturar informações da superfície e incorporá-las de forma mais automatizada ao modelo hidráulico.

A automação parcial presente no modelo hidráulico destaca a importância de avanços tecnológicos e integração eficiente com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para otimizar

a produção e a precisão dos modelos hidrológicos. Ainda assim, a necessidade de uma integração mais holística e aprimorada persiste, especialmente nos modelos hidrológicos, para garantir não apenas a eficiência na manipulação de dados, mas também a redução de potenciais fontes de erro. O enfrentamento desses desafios requer um comprometimento contínuo com o desenvolvimento de métodos e ferramentas que promovam uma integração mais eficaz entre dados geográficos e modelos hidrológicos, contribuindo assim para uma análise mais precisa e confiável dos sistemas hidráulicos e hidrológicos.

O presente estudo reflete não apenas a conclusão de uma pesquisa meticulosa, mas também a abertura de perspectivas promissoras para a gestão hidrológica em Caratinga. O modelo hidráulico desenvolvido ao longo desta pesquisa demonstrou consistência notável com as observações de campo, evidenciando sua capacidade em replicar de maneira precisa eventos hidrológicos extremos. Essa coerência entre o modelo e a realidade observada oferece uma base sólida para a utilização das informações geradas pelo modelo na implementação de um plano de alerta mais eficiente para o município.

Ao longo deste trabalho, a integração de diversas disciplinas se revelou fundamental para o sucesso da pesquisa. A aplicação de conhecimentos em topografia, hidráulica e hidrologia, e, sobretudo, a habilidade em integrar esses domínios, não apenas contribuíram para a precisão dos resultados obtidos, mas também apontaram para possibilidades de pesquisas futuras mais avançadas em termos de acurácia e compreensão dos fenômenos hidrológicos.

Destaca-se que o desdobramento dessa pesquisa abre caminhos para investigações mais aprofundadas, e sugere-se, como diretriz para futuras pesquisas, a aplicação de levantamentos topográficos com ainda mais precisão, complementados por um maior número de leituras utilizando o ADCP. Essa abordagem refinada pode contribuir significativamente para uma compreensão mais detalhada das características do leito do rio, melhorando a qualidade e a precisão dos dados para futuras modelagens hidráulicas.

A aplicação prática do modelo desenvolvido não se encerra com esta dissertação; ao contrário, ela marca o início de uma série de potenciais experimentações e aprimoramentos, especialmente para o rio Caratinga. O modelo, agora consolidado, representa uma ferramenta valiosa que pode ser continuamente refinada e validada com novos dados e observações de campo, consolidando-se como um recurso dinâmico para estudos futuros.

Em síntese, espera-se que este estudo, além de apresentar resultados significativos, também sinalize para uma trajetória de pesquisa contínua e progressiva na gestão de recursos hídricos em Caratinga. O modelo hidráulico aqui desenvolvido, representa, essencialmente,

uma base sólida para avanços futuros, marcando assim um capítulo importante na compreensão e gestão dos sistemas fluviais urbanos na bacia do rio Caratinga.

Como resultado do curso de mestrado no ProfÁgua, este autor desenvolveu uma proposta de diretrizes abrangentes para a criação de um plano municipal de drenagem urbana destinado a Caratinga e suas localidades vizinhas (Apêndice A). A elaboração do produto foi conduzida com a intenção de facilitar a compreensão por parte dos gestores municipais, sendo, portanto, abordada de maneira sucinta e objetiva para garantir a acessibilidade e clareza do documento.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Lizane; SERRA, Juan Carlos Valdés. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. *Revista da FAE*, v. 20, n. 1, p. 129–137, 2017. Disponível em: https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113>.

ALVES, Geovane Junqueira. *Aplicabilidade do método CN-SCS a uma bacia hidrográfica representativa dos latossolos no sul de MS*. 2016. 36–37 f. 2016. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/bitstream/1/12137/1/DISSERTAÇÃO_Aplicabilidade do método CN-SCS a uma bacia hidrográfica representativa dos latossolos no Sul de MG.pdf>.

ANCHIETA, Thomaz Felipe de Freitas *et al.* Flooding area simulation through hydraulic modeling in the urban channel: Case study Jatobá stream, in Belo Horizonte, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geografia Fisica*, v. 13, n. 3, p. 1348–1367, 2020.

ANGELO, Ana Carolina Sanches; FONTÃO, PedroAugusto Breda; SANTOS, Irani dos Santos. EXTREMO DE PRECIPITAÇÃO OCORRIDO NA SERRA DO MAR PARANAENSE Águas de Março : origin and exceptionality of an extreme precipitation event registered in the southern portion of Serra do Mar Águas de Março : origen y excepcionalidad de un evento de lluvia ex. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 31, p. 30, 2022.

ARCEMENT, George j.; SCHNEIDER, Verne R. *Guide for Selecting Manning*'s Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains United States Geological Survey Watersupply Paper 2339. [S.l: s.n.], 1989. v. 2339. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov/BRIDGE/wsp2339.pdf>.

BRIGHENTI, Tássia Mattos; BONUMÁ, Nadia Bernardi; CHAFFE, Pedro Luiz Borges. Calibração hierárquica do modelo swat em uma bacia hidrográfica catarinense. *Revista Brasileira de Recursos Hidricos*, v. 21, n. 1, p. 53–64, 2016.

CABRAL, Samuellson Lopes *et al.* Integração do sig, HEC/HMS e HEC/RAS no mapeamento de área de inundação urbana: Aplicação à bacia do rio granjeiro-ce. *Geociencias*, Nome: Tiago de Souza Alves, v. 35, n. 1, p. 90–101, 2016.

CARNEVALE, Igor *et al.* IMPACTO DOS PONTOS DE APOIO NA ACURÁCIA. *Revista Mackenzie de Engenharia e Computação*, p. 36–63, 2022. Disponível em: https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rmec/article/view/15240/11689>.

CASERI, A. *et al.* Generating precipitation ensembles for flood alert and risk management. *Journal of Flood Risk Management*, v. 9, n. 4, p. 402–415, 2016.

COSTA, M. G. AVALIAÇÃO DE ÁREAS DE RISCO Á INUNDAÇÃO NO PERÍMETRO URBANO DE CARATINGA - MG ATRAVÉS DO USO DE DADOS ALTIMÉTRICOS PROVENIENTES DO SENSOR AEROTRANSPORTADO LIDAR. monografia (baicharel em geografia) - Universidade Feredal de Viçosa. Viçosa-MG: [s.n.]., 2007

CUNHA, Stephanie *et al.* Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia /Evaluation of the SCS method for effective rainfall and flood hydrograph estimation. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 4, p. 837–848, 2015.

DINIZ, Jéssica Guimarães; SALIBA, Maia. Manning 's roughness coefficient for the Doce River. *Brazilian Journal of Water Resources*, p. 1–12, 2018.

EL BILALI, Ali; TALEB, Abdeslam; BOUTAHRI, Imane. Application of HEC-RAS and HEC-LifeSim models for flood risk assessment. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, v. 9, n. 4, p. 336–351, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1080/23249676.2021.1908183>.

FERREIRA, Renan Gon *et al.* Performance of hydrological models in fluvial flow simulation. *Ecological Informatics*, v. 66, n. September, p. 101453, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101453.

FIALHO, Ana Luisa Soares; NEVES, Fernando Lima. *Engenharia da Mobilidade*. . [S.l: s.n.]. , 2020

GONÇALVES, Rodrigo Costa *et al.* Modelagem Hidráulica De Cheias No Rio João Pinto Utilizando Autodesk Civil 3D E Hec-Ras Hydraulic Modeling of Floods in the João Pinto River , Using Autodesk Civil 3D and Hec-Ras. *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, p. 1–8, 2013.

GUPTA, Hoshin V. *et al.* Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, v. 377, n. 1–2, p. 80–91, 2009. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>.

HALLOUIN, Thibault; BRUEN, Michael; O'LOUGHLIN, Fiachra E. Calibration of hydrological models for ecologically relevant streamflow predictions: A trade-off between fitting well to data and estimating consistent parameter sets? *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 24, n. 3, p. 1031–1054, 2020.

JOSÉ, Gustavo Peplau; NEVES, Marllus Gustavo Passos. Urbanos Manning 'S Coefficient of Roughness Through Cowan 'S Method for the Purpose of Hydraulic Modeling in Urbans Channels '. *XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, p. 1–8, 2013.

LAURIANO, André Wilhiam *et al.* Universidade Federal De Minas Gerais Estudo De Ruptura Da Barragem De Funil: Comparação Entre Os Modelos Fldwav E Hec-Ras. *XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, p. 1–20, 2009.

LIMA, Fernando Neves. Dinâmica De Precipitações Extremas Em Eventos De Inundações Urbanas: Aspectos Espaciais E Hidrológicos. 2019. 2019.

LIMA, Fernando Neves; CAROLINA, Ana; FREITAS, Vasques. Climate Change Flood Risk Analysis : Application of Dynamical Downscaling and Hydrological Modeling. 2023.

LOUSADA, Sérgio António Neves. A Influência do Coeficiente de Rugosidade nos Fenómenos de Cheias – Bacia Hidrográfica da Ribeira de Machico, Ilha da Madeira, Portugal. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 24, n. 3, 2023.

LU, Miao *et al.* Effect of urbanisation on extreme precipitation based on nonstationary models in the Yangtze River Delta metropolitan region. *Science of the Total Environment*, v. 673, p. 64–73, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.413>.

LYRA, Guilherme B. *et al.* Manning roughness coefficient for Paracatu river, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*, v. 14, n. 4, p. 343–350, 2010.

MATTOS, Tiago Souza *et al.* Towards reducing flood risk disasters in a tropical urban basin by the development of flood alert web application. *Environmental Modelling and Software*, v. 151, n. March, 2022a.

MATTOS, Tiago Souza *et al.* Towards reducing flood risk disasters in a tropical urban basin by the development of flood alert web application. *Environmental Modelling & Software*, v. 151, p. 105367, 1 maio 2022b. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815222000731>. Acesso em: 16 abr. 2022. MULETA, Misgana K.; NICKLOW, John W. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. *Journal of Hydrology*, v. 306, n. 1–4, p. 127–145, 2005.

NETO, Diniz Ferrarezi *et al.* PARÂMETROS HIDRÁULICOS PARA QUANTIFICAÇÃO DE VAZÃO SÓLIDA EM ESCOAMENTOS FLUVIAIS, ESTUDO DE CASO NO RIO JUNDIAÍ, ESTADO DE SÃO PAULO. *XIV Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos*, n. 19, p. 1–8, 2020.

NKWUNONWO, U. C.; WHITWORTH, M.; BAILY, B. A review of the current status of flood modelling for urban flood risk management in the developing countries. *Scientific African*, v. 7, p. e00269, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00269>.

OLIVEIRA, Ulisses Costa De *et al.* Avaliação Do Uso Do Solo E Cobertura Vegetal Na Zona De Amortecimento Do Parque Nacional De Ubajara , Em Ubajara , Ceará. n. Figura 1, p. 1–5,

2019.

PONTES, PAULO *et al.* Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões / Hydrologic and hydraulic large-scale modeling with inertial flow routing. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 4, p. 888–904, 2015.

POOL, Sandra; VIS, Marc; SEIBERT, Jan. Evaluating model performance: towards a non-parametric variant of the Kling-Gupta efficiency. *Hydrological Sciences Journal*, v. 63, n. 13–14, p. 1941–1953, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1080/02626667.2018.1552002>.

SANTOS, E C K. Modelagem hidrológica hec-hms da bacia hidrográfica do ribeirão lavapés, botucatu-sp. 2017. 2017.

SANTOS, Milton. A urbanização brasileira. [S.l: s.n.], 1993.

SEJATI, Anang Wahyu *et al.* Quantifying the impact of industrialization on blue carbon storage in the coastal area of Metropolitan Semarang, Indonesia. *Applied Geography*, v. 124, p. 102319, 1 nov. 2020.

SILVA, Daniel Carneiro Da. Evolução da Fotogrametria no Brasil. *Revista Brasileira de Geomática*, v. 3, n. 2, p. 81–96, 2015.

SILVEIRA, ANDRÉ. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 1, p. 5–29, 2005.

SOUZA, Vera Queiroz De. MAGALHÃES DE ALMEIDA / MA MAPPING OF LAND USE AND COVERAGE IN THE MUNICIPALITY OF MAGALHÃES DE ALMEIDA / MA. p. 194–208, 2021.

TEIXEIRA, Carolina. *ESTUDO DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO RIO PARAGUAI COMPARAÇÃO ENTRE O USO DO ADCP E MÉTODOS CONVENCIONAIS*. 2018. 128 f. Universidade Federal do Paraná - UFPR, 2018. Disponível em: https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/58819/R - CAROLINE FERREIRA LEITE TEIXEIRA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

VALE, Clemeson Cardoso; SILVA, Antonia Lima. Classificação Supervisionada Dos Maciços Vegetais E Cobertura Do Solo No Aglomerado Urbano De São Raimundo Das Mangabeiras – Ma. *Acta Tecnológica*, v. 14, n. 1, p. 93–101, 2021.

VÉLEZ-NICOLÁS, Mercedes *et al.* Applications of unmanned aerial systems (UASs) in hydrology: A review. *Remote Sensing*, v. 13, n. 7, 2021.

APÊNDICE A – Produto

PROPOSTA DE DIRETRIZES PARA ELABORAÇÃO DO PLANO MUNICIPAL DE DRENAGEM URBANA DE CARATINGA E REGIÃO – PARECER TÉCNICO

A gestão eficiente das águas urbanas é imperativa para enfrentar desafios decorrentes do crescimento urbano e das mudanças climáticas. Considerando que o rio Caratinga possui uma capacidade máxima de escoamento estimada em cerca de 20m³/s, é crucial adotar medidas estratégicas para enfrentar o aumento da frequência de eventos climáticos extremos. Nesse contexto, apresenta-se um parecer técnico que consiste numa proposta para a implementação de um plano de drenagem urbana abrangente, contemplando diversas diretrizes.

Monitoramento Preciso:

Sugere-se a instalação de uma estação fluviométrica na bacia do córrego São João, especificamente na ponte da travessa Cel. Ferreira Santos, e a reativação da estação na ponte da Av. Catarina Cimini, atualmente inativa. Essas estações fornecerão dados precisos sobre a vazão efetiva do rio Caratinga na cidade, subsidiando decisões e ações emergenciais.

Medidas de Retardo Sustentáveis:

Aumentar o tempo de retardo é crucial. Na área urbana, incentiva-se a implementação de estratégias sustentáveis, como a captação de água de chuva pulverizada pela bacia, especialmente em grandes áreas cobertas. Na área rural, munido de estudos mais específicos, a introdução de barraginhas pode se mostrar uma alternativa eficaz.

Incentivo ao Plantio de Árvores:

O incentivo ao plantio de árvores é essencial, pois árvores ampliam a abstração inicial das precipitações, prolongando o trajeto das partículas de água até os rios. Essa prática não apenas melhora a qualidade ambiental, mas também contribui para a redução do risco de inundação.

Avaliação Cautelosa de Medidas Estruturais:

Medidas estruturais, como o aumento da capacidade das galerias pluviais, devem ser consideradas com cautela. Embora possam resolver problemas pontuais de alagamento, também aumentam o risco de inundação. Portanto, a abordagem deve ser equilibrada, priorizando soluções sustentáveis e não apenas estruturais.

Em conclusão, a adoção dessas diretrizes no Plano de Drenagem Urbana tem o potencial de reduzir significativamente o risco de inundação do rio Caratinga em Caratinga. Ressalta-se que estudos mais aprofundados continuarão a aprimorar a eficácia dessas medidas, tornando-as mais precisas e eficientes no futuro. O comprometimento com a implementação dessas diretrizes é fundamental para garantir uma gestão sustentável e resiliente das águas urbanas.

					(continua)
MÊS-	БАЛА	PRECIPITAÇ	ÃO (mm)	VAZÃO) (m ³ /s)
ANO	DATA -	1942048	83592	MONTANTE	SÃO JOÃO
	18/03/2007	70,80	58,60	30,40	3,00
5	19/03/2007	1,20	0,80	8,50	0,80
ar-(20/03/2007	0,00	0,20	1,70	0,20
W.	21/03/2007	32,80	0,00	22,00	0,00
	22/03/2007	0,00	0,00	6,10	0,00
	27/08/2008	0,00	0,00	0,00	0,00
-08	28/08/2008	0,00	0,00	0,00	0,00
-8 -	29/08/2008	0,00	0,00	0,00	0,00
Au	30/08/2008	0,00	0,00	0,00	0,00
	31/08/2008	35,70	20,80	11,90	0,80
	14/11/2008	0,00	12,60	0,00	0,40
8	15/11/2008	58,20	59,00	23,10	2,70
)-^(16/11/2008	0,00	0,00	6,50	0,70
No	17/11/2008	2,40	5,60	2,60	0,50
	18/11/2008	15,30	19,10	8,20	1,20
0	01/11/2010	11,40	0,40	2,70	0,00
	02/11/2010	95,40	42,70	43,80	1,90
V-1	03/11/2010	4,30	14,70	12,20	0,50
ž	04/11/2010	0,90	0,70	2,40	0,10
	05/11/2010	0,00	0,00	0,50	0,00
	24/11/2011	30,70	27,30	9,00	1,00
Ξ	25/11/2011	0,00	0,00	2,50	0,30
-v(26/11/2011	11,10	13,10	5,30	0,80
ž	27/11/2011	8,30	12,80	1,40	0,20
	28/11/2011	28,50	41,60	10,60	2,00
	12/10/2012	0,00	0,00	0,00	0,00
[7	13/10/2012	24,30	10,70	7,20	0,30
ct-]	14/10/2012	0,00	1,40	2,00	0,10
0	15/10/2012	12,20	7,70	5,40	0,30
	16/10/2012	0,00	0,00	1,50	0,10
	02/02/2013	13,60	0,00	3,60	0,00
13	03/02/2013	12,80	2,90	1,00	0,10
- b -]	04/02/2013	0,00	0,00	0,20	0,00
F	05/02/2013	4,20	58,00	1,40	3,00
-	06/02/2013	24,90	26,20	8,60	0,90

APÊNDICE B – Dados de precipitação e vazão utilizados nos modelos hidrológicos e hidráulico

(continua)

MÊS-	ЛАТА	PRECIPITAÇ	ÃO (mm) VAZÃO () (m ³ /s)
ANO	DAIA -	1942048	83592	MONTANTE	SÃO JOÃO
	07/04/2013	19,00	7,80	5,30	0,20
13	08/04/2013	1,00	0,00	1,50	0,10
Dr.	09/04/2013	2,60	3,40	0,80	0,10
A	10/04/2013	11,20	24,10	3,50	1,00
	11/04/2013	1,70	2,80	0,90	0,30
	03/10/2013	17,80	17,80	4,70	0,60
3	04/10/2013	0,00	0,00	1,30	0,20
ct-]	05/10/2013	35,00	21,40	15,40	1,10
Õ	06/10/2013	0,00	0,00	4,30	0,30
	07/10/2013	2,50	0,70	2,20	0,10
	22/03/2014	0,00	0,00	0,00	0,00
14	23/03/2014	12,30	39,10	3,20	1,70
ar-	24/03/2014	25,00	28,60	5,20	0,50
Ň	25/03/2014	0,80	0,60	1,40	0,10
	26/03/2014	9,30	5,80	3,70	0,30
	25/11/2014	0,60	0,10	0,00	0,00
4	26/11/2014	3,70	13,80	0,80	0,50
JV-]	27/11/2014	0,00	0,00	0,20	0,10
ž	28/11/2014	4,30	2,00	1,10	0,10
	29/11/2014	25,10	7,60	7,20	0,30
	05/05/2015	0,00	0,00	0,00	0,00
15	06/05/2015	29,90	45,70	9,40	2,10
ay-	07/05/2015	4,60	4,60	2,60	0,60
M	08/05/2015	7,60	7,70	1,80	0,30
	09/05/2015	0,00	0,00	0,50	0,10
	25/02/2016	0,00	0,00	0,00	0,00
16	26/02/2016	1,30	3,20	0,30	0,10
-q	27/02/2016	9,30	2,30	2,10	0,00
Ηe	28/02/2016	0,00	0,00	0,60	0,00
	29/02/2016	14,00	0,00	4,60	0,00
	26/04/2016	0,00	0,00	0,00	0,00
91	27/04/2016	0,00	0,00	0,00	0,00
0r-]	28/04/2016	0,00	1,20	0,00	0,00
AF	29/04/2016	17,70	22,80	4,90	0,80
	30/04/2016	9,50	8,10	1,40	0,20
	13/11/2016	1,00	0,70	0,20	0,00
9	14/11/2016	25,70	21,40	7,60	0,80
V-]	15/11/2016	19,00	28,60	2,10	0,60
Ň	16/11/2016	41,90	33,90	10,70	0,40
	17/11/2016	1,10	0,00	3,00	0,10

(conclusão)

MÊS-		PRECIPITAÇÃ	ÃO (mm)	VAZÃO (m ³ /s)		
ANO	DATA -	1942048	83592	MONTANTE	SÃO JOÃO	
	27/10/2017	0,00	0,00	0,00	0,00	
2	28/10/2017	11,60	5,40	3,00	0,20	
ct-]	29/10/2017	0,00	0,00	0,80	0,00	
Õ	30/10/2017	3,90	9,80	1,40	0,40	
	31/10/2017	5,20	10,00	0,80	0,10	
	01/02/2018	88,10	41,50	16,30	0,00	
8	02/02/2018	6,70	17,90	4,60	0,00	
- - qə	03/02/2018	11,50	11,00	3,30	0,00	
Ηe	04/02/2018	0,00	5,60	0,90	0,00	
	05/02/2018	35,00	39,40	20,70	1,40	
	24/05/2018	0,00	0,00	0,00	0,00	
18	25/05/2018	2,10	0,20	0,50	0,00	
ay-	26/05/2018	32,40	12,80	10,10	0,40	
Ň	27/05/2018	2,70	2,30	2,80	0,10	
	28/05/2018	0,00	0,00	0,60	0,00	
	24/10/2018	0,00	0,00	0,00	0,00	
8	25/10/2018	0,00	0,80	0,00	0,00	
ct-]	26/10/2018	31,50	22,40	10,10	0,80	
0	27/10/2018	0,80	3,60	2,80	0,20	
	28/10/2018	16,30	26,00	7,70	1,30	
	19/03/2019	14,40	2,10	3,80	0,10	
19	20/03/2019	0,00	0,00	1,10	0,00	
ar-	21/03/2019	21,10	17,20	8,20	0,60	
Μ	22/03/2019	5,00	3,90	2,30	0,20	
	23/03/2019	0,70	1,00	0,40	0,00	
	19/11/2019	8,70	26,60	2,20	1,00	
19	20/11/2019	78,90	27,30	33,80	0,30	
-70	21/11/2019	0,00	0,20	9,40	0,10	
Ž	22/11/2019	2,50	13,10	3,40	0,70	
	23/11/2019	7,50	3,20	4,10	0,20	

APÊNDICE C – Seções da vazão máxima simulada no modelo

Seção 2452 - Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 2412 – Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 2130 - Rio Caratinga



Seção 1946 – Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 1876 – Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 1815 – Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 1774 – Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 1700 - Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 1530 - Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 1375 - Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 1249 - Rio Caratinga



Seção 1132 – Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 1007 – Rio Caratinga



Seção 947 – Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 858 – Rio Caratinga



Seção 800 - Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 710 – Rio Caratinga



Seção 460 - Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 376 – Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 284 – Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 217 – Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 159 – Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

Seção 51 - Rio Caratinga



FONTE: Autoria própria (2023).

ANEXO A – Relatório de processamento do aerolevantamento

Agisoft Metashape

Processing Report 22 July 2023



Survey Data



Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	1,354	Camera stations:	1,354
Flying altitude:	121 m	Tie points:	1,589,587
Ground resolution:	3.96 cm/pix	Projections:	7,210,977
Coverage area:	0.896 km²	Reprojection error:	0.985 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
Test_Pro (4.5mm)	4000 x 2250	4.5 mm	1.77 x 1.77 µm	No

Table 1. Cameras.

Camera Calibration



1 pix

Fig. 2. Image residuals for Test_Pro (4.5mm).

Test_Pro (4.5mm)

1354 images

Type Frame		Resolution 4000 x 2250		Focal Length 4.5 mm			Pixel Size 1.77 x 1.77 μm					
		Value	Error	F	Сх	Су	К1	К2	КЗ	P1	P2	
	F	2984.34	0.49	1.00	-0.43	-0.33	-0.41	0.76	-0.85	-0.04	-0.10	
	Cx	-29.135	0.018		1.00	0.15	0.16	-0.31	0.35	0.77	0.05	
	Су	9.94147	0.013			1.00	0.13	-0.25	0.28	0.02	0.70	
	К1	-0.0393313	3.2e-05				1.00	-0.88	0.77	-0.01	0.04	
	К2	0.200161	0.00017					1.00	-0.98	-0.00	-0.08	
	кз	-0.218915	0.00025						1.00	0.00	0.09	
	P1	-0.000393418	1.9e-06							1.00	0.02	
	P2	-0.000473741	1.3e-06								1.00	

Table 2. Calibration coefficients and correlation matrix.

Camera Locations



Fig. 3. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape. Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	XY error (m)	Total error (m)
1.8208	3.15839	3.00757	3.64565	4.72612

Table 3. Average camera location error.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Ground Control Points



Fig. 4. GCP locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape. Estimated GCP locations are marked with a dot or crossing.

Count	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	XY error (cm)	Total (cm)
73	7.56879	12.9196	3.8728	14.9734	15.4662

Table 4. Control points RMSE.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
7	-0.99442	0.968472	-0.658878	1.53653	1.497 (4)
8	-0.459976	0.31712	-0.30145	0.634835	0.899 (9)
10	2.45826	-6.05505	0.527754	6.55631	1.641 (18)
11	10.7259	4.45015	2.3265	11.8432	2.202 (26)
12	-0.276424	-7.46637	-0.296861	7.47738	2.120 (15)
17	-22.9315	12.209	1.54299	26.0248	6.790 (15)
18	2.61641	-2.6775	-0.0545971	3.74401	1.990 (9)
19	8.42717	-8.37007	-0.0263405	11.8775	3.055 (15)
20	-1.20376	0.563878	0.138259	1.33645	0.994 (10)
22	3.58013	-1.87268	-0.178035	4.04425	1.980 (8)
23	-0.223193	-2.0479	0.548755	2.13186	1.902 (8)
25	0.512576	-0.167403	0.0734764	0.544203	0.857 (7)
27	0.398886	-1.35496	-0.23316	1.43157	0.985 (7)
33	-0.0141539	-3.63385	-0.451105	3.66177	2.656 (6)
38	0.0886188	-0.143223	0.487486	0.51576	1.405 (11)
39	3.43442	0.235145	0.108522	3.44418	2.252 (6)
40	5.40918	-2.67541	0.277073	6.04101	3.842 (6)
41	-3.16364	-5.94219	-3.4362	7.55815	2.420 (24)
43	3.92783	-10.6743	-3.61484	11.9347	3.034 (23)
45	20.5764	-30.2759	0.460886	36.6092	6.288 (26)
47	-3.31306	62.6972	-1.79752	62.8104	12.452 (22)
48	1.99844	2.25223	-1.56471	3.39332	2.821 (6)
49	1.67195	3.35488	-1.04924	3.8925	2.572 (7)
79	-6.57194	-12.8632	3.49763	14.8622	15.561 (4)
80	4.43992	11.7849	-2.70863	12.8816	10.917 (5)
81	6.63636	-20.2734	-0.0833702	21.3321	13.573 (7)
82	-1.80576	18.4204	-0.238999	18.5102	5.994 (14)
83	-7.3926	20.1351	-2.26272	21.5683	4.241 (24)
88	22.8007	-38.2062	6.35979	44.9447	5.941 (35)
90	-11.6105	3.14871	-0.334099	12.0345	2.324 (28)
91	-9.68715	7.86326	1.92851	12.625	2.527 (33)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
93	0.598538	-4.47894	2.01333	4.94699	1.652 (29)
95	-2.16262	-6.45867	9.31777	11.5418	3.847 (25)
96	10.0481	15.3128	-25.2257	31.1734	10.807 (25)
98	6.01691	-10.3177	2.10993	12.1289	1.482 (57)
102	-22.2061	23.8663	3.58296	32.7955	2.233 (64)
105	-2.10452	2.01832	2.72962	3.99417	1.381 (61)
112	2.6089	0.413566	-0.794104	2.75826	0.971 (45)
118	-7.30099	2.97317	2.13678	8.16762	1.626 (25)
119	3.16526	-1.83214	-0.564375	3.70056	1.512 (17)
121	2.40139	-2.14446	-2.15341	3.87331	1.329 (25)
122	0.984213	-0.965021	1.15648	1.79928	1.102 (25)
125	2.0782	1.88247	-0.862861	2.93379	1.603 (14)
126	0.654795	-0.950987	0.624725	1.31279	1.220 (10)
127	-3.20255	-1.08356	0.395626	3.40396	2.019 (10)
128	4.54303	-9.00079	2.37437	10.3581	2.243 (34)
129	10.0195	7.27946	3.26522	12.8079	3.809 (19)
131	0.129362	-6.00574	1.98204	6.32567	2.015 (27)
133	-7.11579	-11.1757	-1.30654	13.3131	2.800 (25)
136	7.4992	5.24515	-2.50552	9.48827	5.292 (7)
137	-2.28973	4.80934	-1.00209	5.42003	2.947 (20)
141	2.66096	4.05556	-0.304941	4.86017	1.733 (26)
144	-6.84847	3.13457	-1.73781	7.72962	1.339 (53)
145	-0.474517	-0.0844773	-1.75404	1.81905	1.119 (53)
146	4.01733	-1.99905	-0.463341	4.51108	1.553 (47)
147	-0.602258	1.66727	0.627283	1.88042	1.317 (29)
149	-4.97626	-37.7198	1.77292	38.0879	9.468 (15)
151	5.83882	4.69079	1.04212	7.56183	2.587 (13)
154	-8.10491	4.50034	-0.633369	9.29213	2.965 (13)
158	9.19228	-22.7188	1.99779	24.5893	6.099 (16)
159	-16.1759	-4.99857	-1.47474	16.9947	2.752 (28)
160	-13.9231	6.47825	-3.99815	15.8684	2.252 (32)
161	-7.47662	6.20109	-1.03336	9.76837	4.105 (9)

Label	X error (cm)	Y error (cm)	Z error (cm)	Total (cm)	Image (pix)
162	-8.47775	7.61538	-0.724308	11.4189	3.470 (13)
163	-0.388714	8.34415	-0.0542761	8.35338	3.123 (10)
164	0.681891	1.12242	0.286768	1.34426	1.065 (8)
165	0.241078	-2.32817	0.0142035	2.34067	1.336 (8)
166	-5.11438	7.96336	0.578481	9.48191	3.939 (10)
167	2.9859	7.30655	-1.62117	8.05788	4.037 (8)
169	2.25341	-0.382774	-0.547265	2.3503	2.110 (6)
170	8.20319	-2.53906	-1.98352	8.81326	2.361 (18)
171	7.44157	-2.48838	1.62759	8.01362	6.536 (4)
173	-5.36365	9.01859	12.0547	15.9819	7.757 (21)
Total	7.56879	12.9196	3.8728	15.4662	3.926

Table 5. Control points.

X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Digital Elevation Model



Fig. 5. Reconstructed digital elevation model.

Resolution:15.8 cm/pixPoint density:39.9 points/m²

Processing Parameters

General

Cameras Aligned cameras Markers Coordinate system Rotation angles **Point Cloud** Points RMS reprojection error Max reprojection error Mean key point size Point colors Key points Average tie point multiplicity **Alignment parameters** Accuracy Generic preselection Reference preselection Key point limit Key point limit per Mpx Tie point limit Exclude stationary tie points Guided image matching Adaptive camera model fitting Matching time Matching memory usage Alignment time Alignment memory usage Date created Software version File size **Depth Maps** Count Depth maps generation parameters Quality Filtering mode Max neighbors Processing time Memory usage Date created Software version File size **Dense Point Cloud** Points Point colors Depth maps generation parameters Quality Filtering mode Max neighbors Processing time

1354 1354 73 WGS 84 / UTM zone 23S (EPSG::32723) Yaw, Pitch, Roll 1,589,587 of 1,754,545 0.251225 (0.984953 pix) 0.759295 (50.0313 pix) 3.77881 pix 3 bands, uint8 No 4.87526 High Yes Source 60,000 1,000 6,000 Yes No No 11 minutes 56 seconds 1.95 GB 10 minutes 46 seconds 1.11 GB 2023:06:24 21:45:18 1.7.6.13524 172.10 MB 1354 Medium Mild 40 24 minutes 24 seconds 1.91 GB 2023:06:24 22:24:13 1.7.6.13524 1.10 GB 56,189,889 3 bands, uint8 Medium Mild 40 24 minutes 24 seconds

Memory usage

Dense cloud generation parameters

Processing time Memory usage Date created Software version File size

DEM

Size Coordinate system

Reconstruction parameters

Source data Interpolation Processing time Memory usage Date created Software version File size

Orthomosaic

Size Coordinate system Colors

Reconstruction parameters

Blending mode Surface Enable hole filling Enable ghosting filter Processing time Memory usage Date created Software version File size System Software name

Software version OS RAM CPU GPU(s)

1.91 GB

14 minutes 53 seconds 5.85 GB 2023:06:24 22:39:06 1.7.6.13524 823.85 MB

6,987 x 16,285 WGS 84 / UTM zone 23S (EPSG::32723)

Dense cloud Enabled 1 minutes 34 seconds 307.10 MB 2023:06:25 17:26:10 1.7.6.13524 139.70 MB

20,887 x 52,519 WGS 84 / UTM zone 23S (EPSG::32723) 3 bands, uint8

Mosaic DEM Yes No 10 minutes 31 seconds 2.28 GB 2023:06:25 17:37:14 1.7.6.13524 11.69 GB

Agisoft Metashape Professional 1.7.6 build 13524 Windows 64 bit 31.95 GB AMD Ryzen 7 5700X 8-Core Processor Radeon RX 570 Series (Ellesmere)