

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL – DEC**

BEATRIZ CREMA DUARTE

**ANÁLISE DE INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE RIO NEGRINHO SOB
INFLUÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NEGRO A PARTIR DE
MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA**

JOINVILLE

2023

BEATRIZ CREMA DUARTE

**ANÁLISE DE INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE RIO NEGRINHO SOB
INFLUÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NEGRO A PARTIR DE
MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pelo Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC).
Orientador: Prof. Dr. Leonardo Romero Monteiro.

JOINVILLE

2023

BEATRIZ CREMA DUARTE

**ANÁLISE DE INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE RIO NEGRINHO SOB
INFLUÊNCIA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO NEGRO A PARTIR DE
MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil pelo Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC).
Orientador: Prof. Dr. Leonardo Romero Monteiro.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leonardo Romero Monteiro
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

Prof. Dr. Franciele Maria Vanelli
Universidade do Estado de Santa Catarina

Me. Marina Refatti Fagundes
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Joinville, 28 de novembro de 2023.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Caroline, meu maior exemplo, pelo apoio incondicional, carinho e encorajamento, por tudo que fez e continua fazendo por mim e minhas irmãs, sua força e persistência moldaram a mulher que sou hoje. Ao meu pai Ulisses pelo apoio e carinho mesmo à distância. À minha irmã Isabela por ser minha melhor amiga, por sempre me incentivar e acreditar em mim e por estar ao meu lado durante o todo o desenvolvimento deste trabalho. Aos meus avós que fizeram parte da minha criação e continuam, até hoje, sendo como segundos pais para mim. Ao restante da minha família, em especial minhas tias, tios e primos, pelo apoio, compreensão e acolhimento. Ao meu namorado Pedro, por me ajudar sempre que precisei durante o desenvolvimento deste trabalho, pela paciência, carinho, amor e companheirismo.

A todos os professores que tive durante toda a minha vida, em especial ao professor Leonardo, por ter me aceito como bolsista e orientanda, pela sua amizade, disponibilidade e por compartilhar de maneira excepcional todo o conhecimento necessário para realização deste trabalho. Ao Laboratório de Ciência das Águas por sempre estar de portas abertas para mim quando necessitei, pelos amigos que me deu, pelas experiências enriquecedoras que me proporcionou, por fazer minhas manhãs e tardes mais engraçadas e pelas fofocas. À minha banca, composta por Franciele e Marina, por dedicarem seu tempo e conhecimento à análise e avaliação deste trabalho e pelas suas contribuições.

Aos amigos que tive o prazer de conhecer e que estiveram comigo em todos os momentos de aprendizado. Ao Batucão por me tirar da rotina, por fazer os meus dois últimos anos de graduação ainda mais especiais, pelas experiências, ensaios e grandes ritmistas que conheci.

À Universidade do Estado de Santa Catarina por proporcionar a estrutura, recursos e apoio necessários durante toda a minha graduação e para a conclusão deste trabalho. Ao município de Rio Negrinho por toda a hospitalidade, interesse e apoio financeiro durante os dois anos de trabalho.

RESUMO

Inundações são fenômenos naturais, inerentes à dinâmica dos rios, e de influência direta na sociedade. Quando essa influência é negativa, a inundação pode se tornar um desastre hidrológico. O município de Rio Negrinho possui registros de inundações que datam desde 1891, início da colonização da região. Para analisar e compreender melhor esse fenômeno, pode-se fazer uso de mapeamentos de inundação a partir de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos. Nesse sentido, o objetivo geral deste trabalho é analisar as inundações da área urbana do município de Rio Negrinho provocadas pela influência de parte da bacia hidrográfica do rio Negro, localizada à montante do exutório da bacia hidrográfica do rio Negrinho, por meio de modelagem hidrológica e hidrodinâmica. A metodologia deste trabalho consistiu na criação de um modelo hidrológico no programa HEC-HMS e um modelo hidrodinâmico no programa HEC-RAS, capazes de representar os processos e a interação entre as duas bacias hidrográficas para a obtenção de manchas de inundação provenientes de diferentes cenários com a aplicação de uma precipitação de projeto com tempo de retorno de 100 anos. Esses cenários se diferenciaram pela variação da bacia hidrográfica de aplicação das condições de contorno. A partir da análise dos parâmetros de extensão da mancha de inundação, profundidade média e máxima da inundação e velocidade média e máxima do escoamento determinou-se que existe a influência da parte da bacia hidrográfica do rio Negro nas inundações que ocorrem na área urbana do município de Rio Negrinho, mesmo para situações em que não há contribuição direta das suas bacias hidrográficas de contribuição.

Palavras-chave: Inundação; Mapeamento; Precipitação; HEC-HMS; HEC-RAS.

ABSTRACT

Floods are natural phenomena, inherent to river dynamics and with a direct impact on society. When this influence is negative, flooding can become a hydrological disaster. The municipality of Rio Negrinho has records of floods dating back to 1891, in the beginning of the region's colonization. To better analyze and understand this phenomenon, flood mapping can be generated using hydrological and hydrodynamic models. In this context, the general objective of this study is to analyze urban flooding in the municipality of Rio Negrinho caused by the influence of part of the rio Negro watershed, located upstream of the rio Negrinho watershed's outlet, through hydrological and hydrodynamic modeling. The methodology for this study involved creating a hydrological model using the HEC-HMS program and a hydrodynamic model using the HEC-RAS program, both capable of representing the processes and interactions between the two watersheds to obtain flood areas resulting from different scenarios with the application of a 100-year return period design precipitation. These scenarios differed due to the variation in the river basin in which the boundary conditions were applied. From the analysis of parameters such as flood extent, average and maximum flood depth, and average and maximum flow velocity, it was determined that the hydrographic basin of the rio Negro exerts an influence on the flooding that occurs in the urban area of the municipality of Rio Negrinho, even in situations where there is no direct contribution from its contributing hydrographic basins.

Keywords: Flood; Mapping; Precipitation; HEC-HMS; HEC-RAS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição temporal de Huff primeiro quartil.....	22
Figura 2 – Município de Rio Negrinho.....	30
Figura 3 – Bacia Hidrográfica do Rio Negro.....	32
Figura 4 – Sub-bacias Hidrográficas do Rio Negro para estudo.....	33
Figura 5 – Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho	34
Figura 6 – Área urbana e bacias hidrográficas de contribuição	34
Figura 7 – Área de modelagem do programa HEC-RAS.....	40
Figura 8 – Mancha de inundação do evento de 2004.....	42
Figura 9 – Análise taxa de variação de vazão.....	46
Figura 10 – Hidrograma e hietograma de projeto para BHRNMC.....	46
Figura 11 – Hidrograma e hietograma de projeto para BHRNhC.....	47
Figura 12 – Hidrograma e hietograma de projeto para BHSEC.....	47
Figura 13 – Hidrograma e hietograma de projeto para BHBUC.....	47
Figura 14 – Região de não preenchimento do Rio Serrinha.....	49
Figura 15 – Aproximação da região das margens do Rio dos Bugres C1.....	49
Figura 16 – Aproximação da primeira região do Rio Negrinho C1.....	50
Figura 17 – Aproximação da segunda região do Rio Negrinho C1.....	51
Figura 18 – Resultado de mancha de escoamento base C0.....	69
Figura 19 – Resultado da mancha de validação C1.....	70
Figura 20 – Resultado da profundidade de C2.....	71
Figura 21 – Resultado da velocidade de C2.....	72
Figura 22 – Resultado da profundidade de C3.....	73
Figura 23 – Resultado da velocidade de C3.....	74
Figura 24 – Resultado da profundidade de C4.....	75
Figura 25 – Resultado da velocidade de C4.....	76
Figura 26 – Sobreposição dos resultados.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações de tempo de concentração	24
Tabela 2 – Estações hidrometeorológicas	36
Tabela 3 – Dados iniciais das bacias hidrográficas de contribuição.....	37
Tabela 4 – Escoamento base mensal em m ³ /s	38
Tabela 5 – Média do escoamento base mensal em m ³ /s.....	41
Tabela 6 – Dados de precipitação para um tempo de retorno de 100 anos.....	45
Tabela 7 – Resultados dos parâmetros de análise.....	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACIRNE	Associação Empresarial de Rio Negrinho
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
BHBUC	Bacia Hidrográfica do Rio dos Bugres de Contribuição
BHRN	Bacia Hidrográfica do Rio Negro
BHRNh	Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho
BHRNhC	Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho de Contribuição
BHRNJ	Bacia Hidrográfica do Rio Negro à Jusante
BHRNMC	Bacia Hidrográfica do Rio Negro à Montante de Contribuição
BHSEC	Bacia Hidrográfica do Rio Serrinha de Contribuição
C0	Cenário 0
C1	Cenário 1
C2	Cenário 2
C3	Cenário 3
C4	Cenário 4
CEPED	Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center – River Analysis System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDF	Intensidade – Duração – Frequência
NSE	<i>Nash-Sutcliffe Efficiency Coefficient</i>
RHN	Rede Hidrometeorológica Nacional
SAMAE	Serviço Autônomo de Saneamento Básico de Rio Negrinho
SCS	<i>Soil Conservation Service</i>
SIGSC	Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina
SNIRH	Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UNISDR	<i>United Nations International Strategy of Disaster Reduction</i>
USACE	<i>United States Army Corps of Engineers</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	PRECIPITAÇÃO.....	18
2.1.1	Precipitações máximas	20
2.2	BACIA HIDROGRÁFICA	22
2.3	INUNDAÇÃO.....	24
2.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA.....	25
2.4.1	Modelagem Hidrológica	26
2.4.2	Modelagem Hidrodinâmica	27
3	MATERIAIS E MÉTODOS	30
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
3.1.1	Bacia Hidrográfica do Rio Negro	32
3.1.2	Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho	33
3.2	COLETA DE DADOS	35
3.3	MODELAGEM HIDROLÓGICA	36
3.3.1	Calibração e validação	38
3.3.2	Evento de projeto	39
3.4	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	40
3.4.1	Validação: cenário C1	42
3.4.2	Eventos de projeto: cenários C2, C3 e C4	43
3.5	PARÂMETROS DE ANÁLISE	44
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
4.1	MODELAGEM HIDROLÓGICA	45
4.2	MODELAGEM HIDRODINÂMICA	48
4.3	PARÂMETROS DE ANÁLISE	53
5	CONCLUSÃO	57
	REFERÊNCIAS	59
	APÊNDICE A – RESULTADOS DOS MAPEAMENTOS	69

1 INTRODUÇÃO

Inundações são fenômenos naturais, inerentes à dinâmica dos rios, e de influência direta na sociedade. Quando essa influência é negativa, a inundação torna-se um desastre hidrológico (Goerl *et al.*, 2017). Atualmente, as inundações são um dos desastres naturais mais comuns, afetando aproximadamente 250 milhões de pessoas em todo o mundo e causando aproximadamente US\$ 40 bilhões em perdas anualmente (Cirella; Iyalomhe, 2018).

O aumento na frequência e intensidade das inundações nas áreas urbanas é primordialmente atribuído ao avanço contínuo da urbanização e ao rápido desenvolvimento das sociedades (Silveira *et al.*, 2009). Esses processos têm como consequência a significativa impermeabilização do solo, resultando no aumento do escoamento superficial. Além disso, a canalização, retificação e estrangulamento dos cursos d'água, juntamente com a ocupação indiscriminada das várzeas dos rios, desmatamento e incorreto descarte de resíduos sólidos, desempenham um papel crucial ao diretamente contribuir para a ocorrência recorrente de inundações nos centros urbanos (Urbani *et al.*, 2023; Lopes *et al.*, 2022).

No Brasil, os principais desastres naturais são os hidrológicos, sendo as inundações os mais frequentes (Tasca *et al.*, 2010). De acordo com CEPED/UFSC (2013), no período compreendido entre 1991 e 2012, registrou-se um total de 4.691 inundações severas no país. As regiões mais afetadas por esses eventos foram o sudeste, nordeste e sul, representando respectivamente 34%, 25% e 22% das ocorrências totais registradas. O país ainda possui um elevado número de habitantes atingidos pelas inundações, que aumenta à medida que as áreas urbanas se expandem sem planejamento (CEPED/UFSC, 2013). Em Santa Catarina, no período entre 1980 e 2003, ocorreram 1.784 inundações, 1.229 graduais e 555 bruscas, essas foram responsáveis por centenas de milhares de desabrigados. Somente no mês de julho de 1983, foram registrados 197.770 desabrigados e 49 mortos (Hermann *et al.*, 2014).

O município de Rio Negrinho possui registros de inundações que datam desde 1891, início da colonização da região. Após essa, as mais graves e lembradas pelos moradores foram as que ocorreram em 1983, 1992 e 2014,

isolando diversas áreas do município, danificando e destruindo residências, comércios e a infraestrutura local (Dalagnol, 1999; Giglio; Kobiyama, 2011). Recentemente, a ocorrência das inundações no município tem se tornado mais intensa, podendo-se citar as de outubro de 2008, setembro de 2009 e janeiro e abril de 2010, junho de 2014, maio de 2019 e novembro de 2022 (Malutta; Kobiyama, 2011; Monteiro *et al.*, 2023).

Para compreender melhor esse fenômeno, pode-se fazer uso de mapeamentos de inundação a partir de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos (Urbani *et al.*, 2023). Diversos estudos análogos já foram realizados em Rio Negrinho com base nos dados de precipitação e vazão da bacia hidrográfica do rio Negrinho (Monteiro *et al.*, 2023; Giglio; Kobiyama, 2011; Malutta; Kobiyama, 2011; Goerl *et al.*, 2011). No entanto, ainda se nota a falta de estudos que relacionem esses dados com os da Bacia Hidrográfica do Rio Negro, na qual ela está inserida.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar as inundações da área urbana do município de Rio Negrinho provocadas pela influência da precipitação e vazão de parte da bacia hidrográfica do rio Negro, localizada à montante do exutório da bacia hidrográfica do rio Negrinho, por meio de modelagem hidrológica e hidrodinâmica.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Utilizar um modelo hidrológico capaz de representar a transformação da precipitação em vazão nas bacias hidrográficas do rio Negro e rio Negrinho;

- Utilizar um modelo hidrodinâmico capaz de representar a interação entre as bacias hidrográficas do rio Negro e rio Negrinho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PRECIPITAÇÃO

De acordo com Schiavetti e Camargo (2002), a precipitação é o principal mecanismo natural de restabelecimento dos recursos hídricos da superfície terrestre. Ela pode ser definida como a água proveniente do vapor de água presente na atmosfera que é depositada na superfície terrestre, nas formas de chuva, granizo, orvalho, neblina, neve ou geada. Sendo que o que as diferencia é o estado físico no qual a água se encontra (Pinto *et al.*, 1976).

A formação das precipitações ocorre a partir da condensação do vapor de água presente na atmosfera em torno das partículas microscópicas em suspensão, como poeira, fumaça e sais, gerando os núcleos de condensação (Miranda *et al.*, 2010). Ocorre então, o crescimento das gotículas de água das nuvens, porém nem todas as nuvens são capazes de gerar as precipitações. Para que essas precipitem é necessário que atinjam um tamanho e peso suficiente para que sua velocidade de queda seja superior às correntes de ar que as sustentam. Nessas condições, a água das nuvens precipita em formato de chuva para a superfície terrestre (Tucci, 1993; Schiavetti; Camargo, 2002).

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013), a chuva é caracterizada por medidas de altura, tempo de duração, intensidade e probabilidade de ocorrência. Essas medidas geralmente são coletadas em áreas pontuais por instrumentos de captação e medição de chuva, os pluviômetros e pluviógrafos, podendo também ser estimadas por radares meteorológicos e satélites. O pluviômetro armazena a água da chuva de modo que um determinado volume corresponda a 1 mm de chuva precipitado, e esses dados são coletados diariamente (Pinto *et al.*, 1976). Já o pluviógrafo, ou pluviômetro automático, consiste em um instrumento similar, porém os seus dados são armazenados de forma automatizada, diversas vezes ao dia. Isso permite analisar mais detalhadamente os dados de chuva e sua variação ao longo do tempo (Borges *et al.*, 2012).

A altura pluviométrica corresponde à espessura média da lâmina de água precipitada que cobriria uma região plana, horizontal e impermeável. Sua

unidade de medida é normalmente dada em mm, sendo que cada mm de lâmina de água corresponde a 1 l de água por m² (Júnior, 2022; Pinto *et al.*, 1976). O tempo de duração de uma precipitação é o período durante o qual a chuva cai, expresso em minutos ou horas (Tucci, 1993). A intensidade de uma chuva é dada pela relação entre a altura pluviométrica e o tempo de duração da chuva. É expressa geralmente em mm/h, mm/min ou mm/dia (Stein, 2022).

De acordo com Tucci (1993), a probabilidade de excedência ou tempo de recorrência de uma chuva corresponde ao “número médio de anos durante o qual espera-se que a precipitação analisada seja igualada ou superada”. Quanto maior a intensidade de uma chuva, menor sua probabilidade de excedência. No estudo de eventos intensos a variável utilizada é o tempo de retorno, que corresponde ao inverso da probabilidade de ocorrência indicado pela Equação (1) (Chow, 1988; Collischonn; Dornelles, 2013)

$$T_r = \frac{1}{p} \quad (1)$$

onde T_r é o tempo de retorno em anos e p a probabilidade de ocorrência.

A precipitação varia espacial e sazonalmente em função da circulação atmosférica e fatores locais. A variação espacial é representada por mapa de cores ou pelas isoietas, linhas de mesma precipitação sobre um mapa, que são obtidas pela interpolação dos dados obtidos pelos equipamentos. A variação sazonal é representada por hietogramas, gráficos que representam a variação da chuva em função do tempo (Chow, 1988).

Para o cálculo da chuva média em uma área, como uma bacia hidrográfica, pode-se fazer uso de métodos de interpolação, um deles é o método da interpolação ponderada pela inverso da distância ao quadrado. Conforme Collischonn e Dornelles (2013), considera-se que a chuva em um local (ponto central de uma célula), pode ser calculada como a média ponderada das chuvas registradas pelos equipamentos da região, conforme a Equação (2) e (3), fazendo com que os equipamentos mais próximos possuam um peso maior no cálculo da média. Para isso pode-se considerar

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i + x_j)^2 + (y_i + y_j)^2} \quad (2)$$

$$Pm_i = \frac{\sum_{j=1}^{NP} \frac{P_j}{(d_{ij})^2}}{\sum_{j=1}^{NP} \frac{1}{(d_{ij})^2}} \quad (3)$$

onde d_{ij} é a distância entre o ponto central da célula estudada e o equipamento, x_i e y_i são as coordenadas do ponto central da célula estudada, x_j e y_j são as coordenadas do equipamento, Pm_i é a precipitação média no ponto estudado i , NP é o número de equipamentos e P_j é a chuva observada no equipamento;

A análise de uma série temporal de precipitações deve ser feita em uma série ininterrupta. No caso dessa possuir períodos com falhas ou erros, deve ser feita uma nova análise e então seu tratamento estatístico. Esse tratamento consiste no preenchimento de falhas com dados registrados em equipamentos próximos. Para isso podem ser utilizados os métodos da ponderação regional, da regressão linear e o método da dupla massa (Tucci, 1983; Collischonn; Dornelles, 2013).

2.1.1 Precipitações máximas

Conforme Garcez e Alvarez (1998), as precipitações intensas correspondem ao conjunto de chuvas cuja intensidade ultrapassa um certo valor de chuva mínima, atrelada a uma probabilidade de ocorrência. O seu estudo auxilia na obtenção da vazão de inundação de uma bacia hidrográfica. A sua estimativa é feita para determinado local pelas curvas de intensidade, duração e frequência (curvas IDF), as quais permitem a estimativa da altura pluviométrica associada a intensidade, duração e frequência de excedência (Pimentel, 2022). De acordo com Tucci (1983), para a determinação de uma curva IDF “devem ser feitas observações das chuvas intensas durante um período suficientemente longo e representativo dos eventos extremos do local”.

Sua construção baseia-se na seleção das maiores precipitações para um determinado tempo de duração, de cada ano da série de dados. A partir dessa série, cria-se uma distribuição estatística das precipitações de acordo com cada

tempo de duração, ajustando-a para que represente a distribuição dos valores observados da melhor maneira. Então, dividindo-se a precipitação pelo seu tempo de duração, obtém-se sua intensidade e os resultados são resumidos na forma de um gráfico ou uma equação (Collischonn; Dornelles, 2013; Tucci, 1983; Villella *et al.*, 1975).

A Equação (4) é a representação genérica de uma equação IDF que permite sintetizar um conjunto de curvas IDF (Tucci, 1983). Segundo Villella *et al.* (1975), a intensidade decresce conforme o tempo de duração cresce, e o conjunto apresenta curvaturas com concavidade voltada para baixo. Os autores ainda explicam o acréscimo de uma constante t_0 no eixo das abcissas pode-se transformar essas curvas em retas, onde

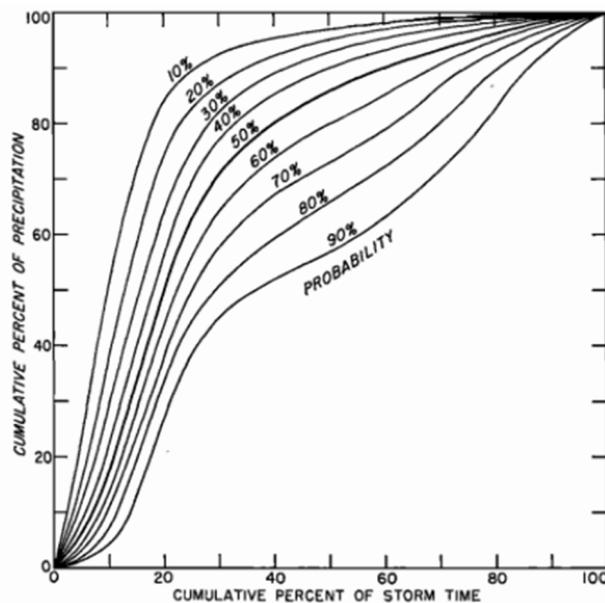
$$I = \frac{KT^m}{(t + t_0)^n} \quad (4)$$

onde I é a intensidade em mm/h, K , t_0 , m e n são os parâmetros locais, T é o tempo de retorno em anos e t é o tempo de duração da chuva em min e t_0 uma constante de tempo local.

O valor da intensidade da precipitação pode ser convertido em volume precipitado e distribuído temporalmente por meio de diversos métodos como o método de Huff (1976), método dos blocos alternados, método de Chicago, método do hidrograma triangular (Yen; Chow, 1980) e o método de Pilgrim e Cordery (Pilgrim; Cordery, 1975).

O método descrito por Huff (1967) classifica as precipitações em quatro categorias, com durações divididas em quatro partes iguais. O autor ainda observou que a maior parte dos picos de chuva ocorria em uma pequena parte da duração total da precipitação, independentemente da duração da tempestade e da área média de precipitação. Após isso, foram criadas curvas que relacionam os percentuais acumulados de precipitação com o percentual acumulado do tempo, a Figura 1 apresenta um exemplo da distribuição temporal probabilística de Huff para as precipitações que se comportam de acordo com o primeiro quartil.

Figura 1 – Distribuição temporal probabilístico de Huff primeiro quartil.



Fonte: Adaptado de Huff (1976).

2.2 BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia hidrográfica corresponde a uma área de captação natural de precipitação na qual converge o escoamento gerado para um único ponto de saída chamado exutório. A sua delimitação é feita através da identificação dos divisores de águas, que consiste em uma linha imaginária sobre o relevo que divide o escoamento das águas da chuva (Tucci, 1983; Collischonn; Dornelles, 2013). Segundo Villela (1975), a caracterização física de uma bacia hidrográfica permite o estabelecimento de relações e comparações entre suas características físicas e seus dados hidrológicos.

As áreas de bacias hidrográficas são normalmente medidas em km^2 e ha (Júnior, 2022). O curso de água principal de uma bacia hidrográfica corresponde ao mais longo caminho que a água pode percorrer dentro da bacia hidrográfica (Tucci, 1983). A declividade média da bacia hidrográfica e de seu curso de água principal são características determinantes para as suas características hidrológicas sendo fatores que influenciam na velocidade do escoamento superficial, e conseqüentemente, o tempo de concentração da bacia hidrográfica (Villela, 1975).

O tempo de concentração é o tempo necessário para que o escoamento ocorra do ponto mais remoto da bacia hidrográfica até seu exutório (Gribbin, 2014). Ou, como descrito por Silveira (2005), o tempo necessário para que toda a bacia esteja contribuindo na seção de saída ou de estudo. De acordo com Pimentel (2015), quanto menor o tempo de concentração de uma bacia hidrográfica, mais rápida será a resposta de ocorrência da vazão no exutório em decorrência de uma determinada precipitação. Bacias hidrográficas com tempos de concentração curtos tendem a apresentar maior tendência a ocorrência de inundações.

O tempo de concentração pode ser determinado a partir de inúmeras formulações, dependendo da localização e das características da bacia hidrográfica (Júnior, 2011). Em seu estudo, Silveira (2005), analisou 23 equações utilizadas para o cálculo do tempo de concentração em bacias hidrográficas para a zona rural e urbana, a partir dessa análise o autor pôde recomendar o uso das equações presentes na Tabela 1 em função do seu zoneamento e da sua área.

Tabela 1 – Equações de tempo de concentração.

Autor	Equação	Área (km ²)
Zona urbana		
Carter	$T_c = 0,0977 \times L^{0,6} \times S^{-0,3}$	< 1100
Schaake <i>et al.</i>	$T_c = 0,0828 \times L^{0,24} \times S^{-0,16} \times A_{imp}^{-0,26}$	< 62
Kirpich	$T_c = 0,0663 \times L^{0,77} \times S^{-0,385}$	< 2700
Desbordes	$T_c = 0,0869 \times A^{0,3039} \times S^{0,3832} \times A_{imp}^{-0,4523}$	< 5100
Zona rural		
<i>Corps Engineers</i>	$T_c = 0,191 \times L^{0,76} \times S^{-0,19}$	< 12000
Ven te Chow	$T_c = 0,160 \times L^{0,64} \times S^{-0,32}$	< 12000
Onda Cinemática	$T_c = 7,35 \times 0,03^{0,6} \times 35^{-0,4} \times L^{0,6} \times S^{-0,3}$	< 12000
Kirpich	$T_c = 0,0663 \times L^{0,77} \times S^{-0,385}$	< 12000

onde T_c é o tempo de concentração, L é o comprimento do curso de água principal em km, S é a declividade média do curso de água principal em m/m e A_{imp} é a área impermeável em km².

Fonte: Adaptado de Silveira (2005).

Segundo Dooge (1973), o coeficiente de armazenamento de uma bacia hidrográfica corresponde ao tempo de armazenamento da precipitação total que cai sobre a bacia antes de se tornar escoamento. Esse coeficiente é determinado com base nas características geológicas, topográficas e de uso e tipo de solo da bacia hidrográfica, as quais são representadas pela Equação (5)

$$K_c = 80,7 \times A^{0,23} \times S^{-0,7} \quad (5)$$

onde K_c é o coeficiente de armazenamento em h, A a área da bacia hidrográfica em km² e S é a declividade média do curso de água principal em m/m.

2.3 INUNDAÇÃO

Segundo a *National Disaster Education Coalition* (2004), uma inundação ocorre quando um fluxo de água é maior do que a capacidade normal de escoamento do rio ou canal, gerando excessivo escoamento superficial. Conseqüentemente, ocorre o transbordamento da água inundando a área circunvizinha (*Federal Emergency Management Agency*, 1981). As inundações graduais são aquelas em que a elevação do nível das águas e o conseqüente transbordamento ocorrem lentamente e geralmente são provocadas por chuvas intensas e persistentes (Goerl; Kobiyama, 2005). De acordo com Monte *et al.* (2016), os principais fatores naturais que propiciam a ocorrência de inundações são o relevo, intensidade da precipitação, cobertura vegetal, capacidade de drenagem, geologia, morfologia fluvial e extensão do canal e da planície de inundação, interação canal-planície de inundação e rugosidade.

A inundação é um fenômeno natural, intrínseco ao regime dos rios. Quando esse entra em contato com a sociedade de maneira danosa, passa a ser considerado como um desastre (Giglio, 2010). Assim, torna-se importante conhecer as características físicas dos fenômenos naturais possíveis de se tornarem desastres, como as inundações, a fim de se ter conhecimento para ser possível de reduzir, ou mesmo prevenir, possíveis danos causados à sociedade. Nas inundações, as características físicas principais são a altura, a velocidade e o tempo de duração (Goerl; Kobiyama, 2005).

Conforme Tucci (2005), existem medidas que podem ser tomadas para o controle das inundações, as chamadas medidas estruturais e não estruturais. A primeira envolve obras de engenharia, tais como barragens, diques, alargamento de rios e reflorestamento para contenção de cheias. A segunda envolve planejamento e gerenciamento, fazendo uso de sistemas de alerta, zoneamento ambiental e mapeamentos de áreas susceptíveis a inundação (Monteiro *et al.*, 2023; UNISDR, 2009).

O mapeamento de áreas susceptíveis a inundação, ou simplesmente, mapeamento de inundação, é uma medida que foca na prevenção, conservação e harmonia entre o meio ambiente e áreas urbanas (Tucci, 2007). É uma ferramenta de extrema importância para a redução ou prevenção de desastres hidrológicos devido à viabilidade econômica e utilidade para estudos de risco (Barbosa, 2006; Monte *et al.*, 2016).

De acordo com Monteiro e Kobiyama (2014), esse mapeamento pode ser realizado de duas formas. A primeira é partir de dados coletados durante uma inundação, ou a partir da recuperação de dados de registros do evento, como fotos e reportagens, porém impossibilita a criação de mapas com tempos de retorno pré-estabelecidos. Já, a segunda se dá a partir de modelos matemáticos ou físicos, que produzem aproximações capazes de representar diferentes cenários de inundação, para diferentes tempos de retorno, conforme a necessidade (Malheiros, 2018).

2.4 MODELAGEM HIDROLÓGICA E HIDRODINÂMICA

Como descrito por Mendes e Cirilo (2001), um modelo é a representação ou abstração de um sistema físico. Em outras palavras, um modelo é um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros para tentar representar um fenômeno de interesse (Meirelles *et al.*, 2007). Os modelos podem ser classificados de acordo com o tipo de variável utilizada, o tipo de relação entre essas as variáveis, a forma de representação dos dados, a existência ou não de relações espaciais e de dependência temporal (Meirelles *et al.*, 2007; Almeida; Serra, 2017). Os autores ainda indicam que a escolha de um

determinado tipo de modelo deve ser feita com base na aplicação destinada e na disponibilidade de dados.

2.4.1 Modelagem Hidrológica

Segundo Tucci (2010), um modelo hidrológico representa os processos que ocorrem na superfície terrestre dentro do ciclo hidrológico, transformando a precipitação em vazão em uma determinada seção de um rio. Ainda, de acordo com Meirelles *et al.* (2007), pode ser definido como “uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre”. O seu objeto de estudo é, portanto, a bacia hidrográfica, responsável por captar e despejar a água sobre um ou mais rios que desembocam em uma única saída (Wilderer, 2011).

O *Hydrological Engineering Center – Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), consiste em um programa com objetivo de simular os processos hidrológicos de bacias hidrográficas. O programa é capaz de representar uma bacia hidrográfica por meio de sub-bacias, junções, reservatórios, desvios, nascentes e sumidouros, de montante à jusante. O usuário pode utilizar diferentes métodos para o cálculo da perda de precipitação, da transformação da precipitação em escoamento superficial, do escoamento base, entre outros processos hidrológicos (USACE, 2022).

Um dos métodos disponíveis é o SCS Curve Number, que determina o volume aproximado do escoamento superficial, ou precipitação efetiva de um evento de chuva, levando em consideração o tipo e ocupação do solo local (USACE, 2022). Fundamenta-se na ideia de que a quantidade de escoamento superficial gerado durante um evento de precipitação é determinada pela altura total da precipitação acumulada e pelas perdas que se manifestam predominantemente devido à infiltração, interceptação vegetal e retenção em depressões do terreno (Tyagi *et al.*, 2008). Os autores indicam que o método se baseia nas equações (6), (7) e (8)

$$P = I_a + F + Q \quad (6)$$

$$\frac{Q}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (7)$$

$$I_a = \lambda \times S \quad (8)$$

onde P é a precipitação em mm, I_a é a abstração inicial em mm, F é a infiltração cumulativa em mm, Q é a altura da lâmina de escoamento em mm, S é a capacidade máxima de recarga da bacia em mm e λ é um coeficiente de valor igual a 0,2.

Outro método disponível é o Hidrograma Unitário de Clark, que converte a precipitação efetiva em escoamento superficial por meio de técnicas de convolução e adição de um hidrograma unitário que atua como representação do processo (Clark, 1945). Este método de transformação utiliza os parâmetros de tempo de concentração e coeficiente de armazenamento da bacia hidrográfica. Sua utilização considera que a chuva se distribui uniformemente sobre a bacia hidrográfica de modo que cada área será o volume de chuva precipitado nessa área (Santos, 2015).

O método constante ao mês (ou no inglês *Constant Monthly*) é um dos métodos disponíveis no HEC-HMS que permite especificar uma vazão de base constante para cada mês do ano. É utilizado para bacias hidrográficas onde a vazão de base varia pouco ao longo do ano. Assim, essa é acrescida ao escoamento direto, calculado pela precipitação em cada intervalo de tempo durante a modelagem (USACE, 2022).

2.4.2 Modelagem Hidrodinâmica

Os modelos hidrodinâmicos têm como objetivo representar o movimento dos fluidos, determinar o padrão das correntes na superfície livre de águas costeiras, baías, rios, lagoas, entre outros (Santos, 2015). Descrevem matematicamente os fenômenos das águas superficiais e subterrâneas, prevendo seu comportamento físico. Consideram as variações das condições de escoamento, podendo representar regimes permanentes e não-permanentes (Coutinho, 2015; Monteiro *et al.*, 2015).

O *Hydrological Engineering Center – River Analysis System (HEC-RAS)*, consiste em um programa que permite realizar modelagens hidrodinâmicas para canais naturais e artificiais. As modelagens podem ser unidimensionais de escoamento permanente, uni e bidimensionais de escoamento não permanente, transporte de sedimentos, cálculos de leito móvel e modelagem de temperatura e qualidade da água (USACE, 2022). De acordo com Pereira e Tucci (2006), os modelos hidrodinâmicos matemáticos são baseados nas equações de continuidade e momento de Navier-Stokes.

Para modelagens de rios e inundações, o programa utiliza o conjunto de equações chamado *Shallow Water Equations* (USACE, 2022). Essas podem ser deduzidas a partir das equações de Navier-Stokes, as quais descrevem o movimento de um fluido. Esse conjunto de equações é dado pela equação de conservação da massa, também chamada de Equação da Continuidade (9), e pela Equação da Conservação de Quantidade de Movimento (10) (Gobira, 2018)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\rho \frac{\partial w}{\partial t} + \rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = -\rho g - \frac{\partial \rho}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

onde g é a aceleração da gravidade em m/s^2 , ρ é a massa específica do fluido em kg/m^3 e μ é a viscosidade dinâmica do fluido em Pa.s.

Para realizar mapeamentos de inundação, os modelos hidrodinâmicos necessitam de dados topográficos, dados hidrometeorológicos, dados de uso e tipo de solo, entre outros (Monte *et al.*, 2016). Os dados topográficos podem ser obtidos de Modelos Digitais de Elevação (MDE), já os dados hidrometeorológicos, de vazão e precipitação para as condições de entrada, e de nível para as condições de saída, podem ser adquiridos de estações hidrometeorológicas ou modelagens hidrológicas e os dados de uso e tipo de solo de imagens de satélite. Os dados de uso e tipo de solo são traduzidos para

valores de coeficiente de Manning, porcentagem impermeável da área e coeficiente Curve Number (Monteiro *et al.*, 2023).

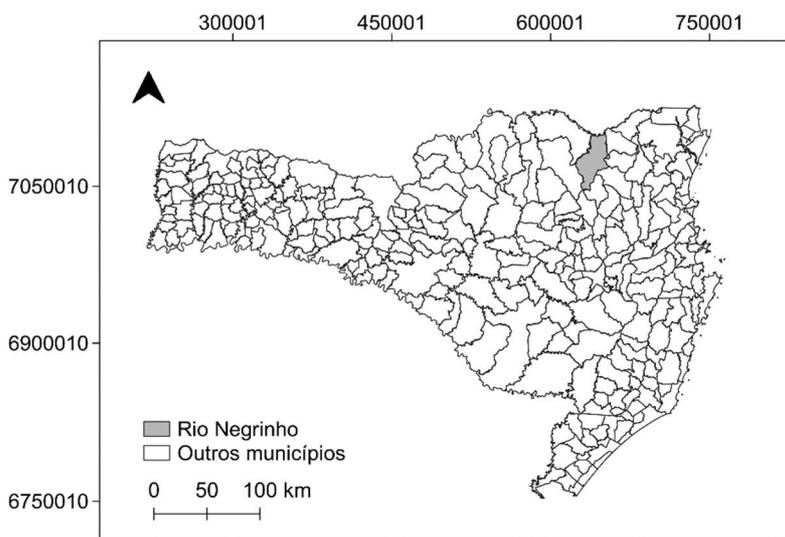
3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho inicialmente foi feita a caracterização da área de estudos que incluiu o município de Rio Negrinho e as bacias hidrográficas do rio Negro e rio Negrinho. Em seguida foi realizada a descrição da coleta dos dados necessários para este trabalho, que inclui dados pluviométricos e fluviométricos, de terreno, entre outros. Feitos esses procedimentos, descreveu-se então todos os demais procedimentos realizados durante a modelagem hidrológica e hidrodinâmica, assim como os métodos utilizados em cada uma. Por fim, foram descritos os parâmetros que foram analisados dos resultados obtidos a partir da modelagem hidrodinâmica.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Rio Negrinho localiza-se no planalto norte do estado de Santa Catarina entre as latitudes $26^{\circ}11'48''$ e $26^{\circ}42'05''$ S e as longitudes $49^{\circ}45'56''$ e $49^{\circ}26'17''$ O (Figura 2). Possui $907,4 \text{ km}^2$, sendo $33,4 \text{ km}^2$ urbanizados, e de acordo com os dados coletados pelo IBGE no censo de 2022, a população total do município é de 39.258 habitantes, resultando em uma densidade demográfica de $43,26 \text{ hab/km}^2$ (IBGE, 2022).

Figura 2 – Município de Rio Negrinho.



Fonte: A autora (2023).

Conforme a classificação climática de Köppen-Geiger, o município enquadra-se no tipo Cfb (Alvares, 2013; Kottek *et al.*, 2006). Este clima é caracterizado por ser temperado, úmido e mesotérmico, apresentando a temperatura média no mês mais frio abaixo de 18°C, com verões frescos e a temperatura média no mês mais quente abaixo de 22°C sem estação seca definida (Padolfo *et al.*, 2002). Este possui chuvas bem distribuídas, com precipitação total anual de 1.400 a 2.400 mm, temperatura média anual de 14 a 20 C° e a frequência média de geadas de 10 a 25 dias por ano.

O município está inserido em uma unidade geológica-ambiental do tipo “11 c”, ou seja, com intercalações de sedimentos arenosos, síltico argilosos e folhelhos e com colinas amplas e suaves. Esta unidade se caracteriza por solos residuais argilosos e de baixa consistência, com baixa capacidade de suporte, especialmente em áreas topográficas que favorecem a retenção de umidade. A permeabilidade do terreno é baixa a muito baixa, tornando-o suscetível à queda de blocos de rocha. Os aquíferos têm baixa potencialidade para água subterrânea devido ao domínio hidrogeológico de bacias sedimentares com baixa favorabilidade hidrogeológica, e as águas podem ser duras, com grande quantidade de sais de cálcio e magnésio (CPRM, 2007).

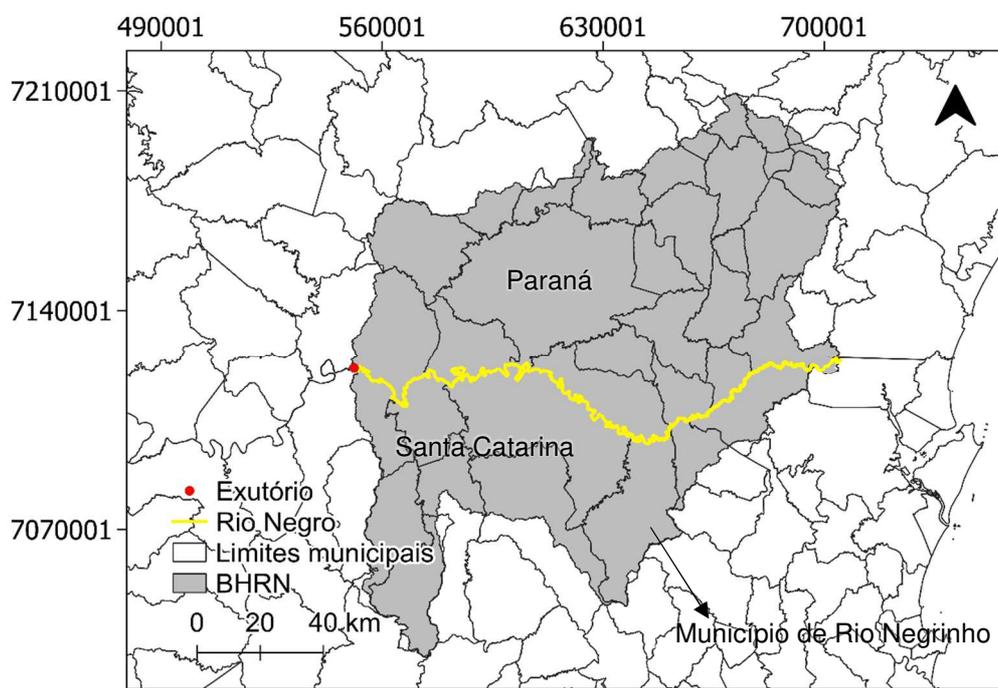
O solo predominante na região é do tipo Cambissolo Álico, de textura argilosa, apresentando um relevo suavemente ondulado a ondulado. A fertilidade natural é variável, devido a influência do relevo, pouca profundidade do solo e presença de pedras na sua composição. A floresta é do tipo subtropical perenifólia, resistente ao frio, rala e de coloração clara. É constituída principalmente pela araucária, imbuia, canela, cedro e outras espécies folhosas de grande porte; podocarpus, erva-mate, bracatinga, guaramirim e outras de médio porte; e por ervas, arbustos, fetos arbóreos e samambaias de pequeno porte (EMBRAPA, 2004; CPRM, 2007).

O município possui como rios principais o rio Negrinho, rio dos Bugres e rio Serrinha e está inserido na bacia hidrográfica do rio Negrinho, a qual está inserida na bacia hidrográfica do rio Negro.

3.1.1 Bacia Hidrográfica do Rio Negro

A bacia hidrográfica do rio Negro (BHRN) está localizada entre os estados do Paraná e Santa Catarina, entre as latitudes $26^{\circ}51'26''$ e $25^{\circ}13'17''$ S e as longitudes $50^{\circ}29'53''$ e $48^{\circ}58'01''$ O (Figura 3). A bacia possui 161.101 km^2 e como rio principal o rio Negro, que divide parte dos estados de Santa Catarina e do Paraná.

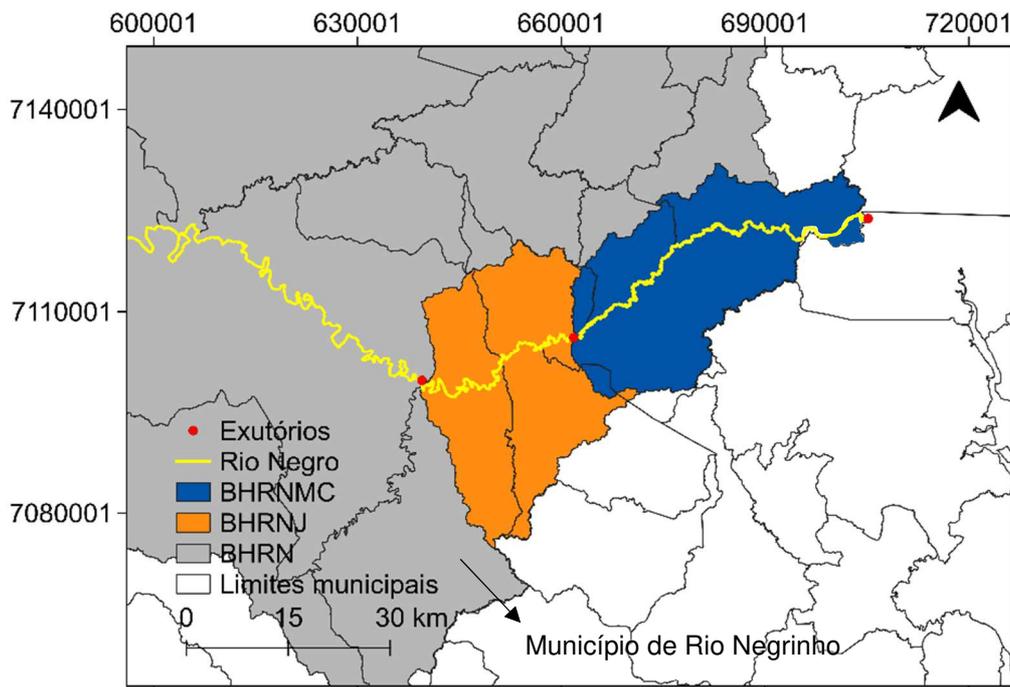
Figura 3 – Bacia Hidrográfica do Rio Negro.



Fonte: A autora (2023).

Para o presente trabalho considerou-se duas áreas dentro desta bacia (Figura 4), a primeira chamada de bacia hidrográfica do rio Negro a montante de contribuição (BHRNMC) foi definida com exutório na estação fluviométrica “Fragosos”, à montante da confluência entre o rio Negro e o rio Negrinho. A segunda chamada de bacia hidrográfica do rio Negro a Jusante (BHRNJ) é a área definida com exutório na estação fluviométrica “Rio Preto do Sul”, a jusante da confluência entre os rios, subtraindo-se a área anterior.

Figura 4 – Sub-bacias Hidrográficas do Rio Negro para estudo.



Fonte: A autora (2023).

A BHRNMC foi definida para ser utilizada na modelagem hidrológica, como área de contribuição para BHRNJ. A BHRNJ foi definida para ser utilizada na modelagem hidrodinâmica, visto que delimita a região de provável inundação de forma mais aproximada.

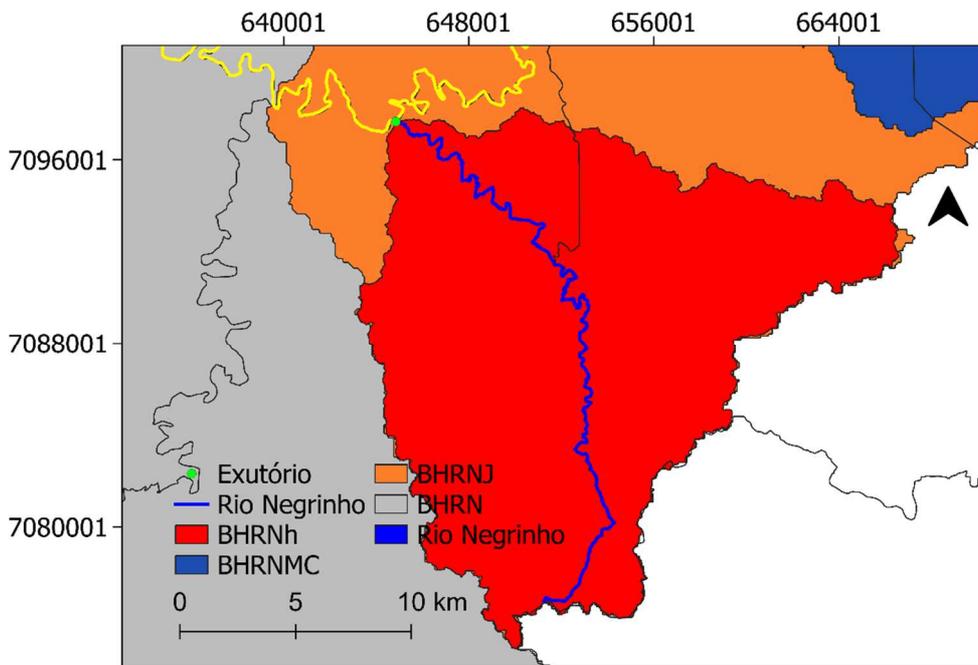
3.1.2 Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho

A bacia hidrográfica do rio Negrinho (BHRNh) está localizada no planalto norte do estado de Santa Catarina entre as latitudes $26^{\circ}14'45''$ e $26^{\circ}45'31''$ S e as longitudes $49^{\circ}19'59''$ e $49^{\circ}31'22''$ O (Figura 5). A bacia possui 195 km^2 e abrange os municípios de Rio Negrinho, Corupá e São Bento do Sul. Possui como rio principal o rio Negrinho, e afluentes principais o rio Serrinha e rio dos Bugres.

Para este trabalho foram consideradas quatro áreas inseridas na BHRNh. A área urbana do município e as áreas da bacia hidrográfica do rio Negrinho de contribuição (BHRNhC), bacia hidrográfica do rio Serrinha de contribuição (BHSEC) e bacia Hidrográfica do rio dos Bugres de contribuição (BHBUC) com

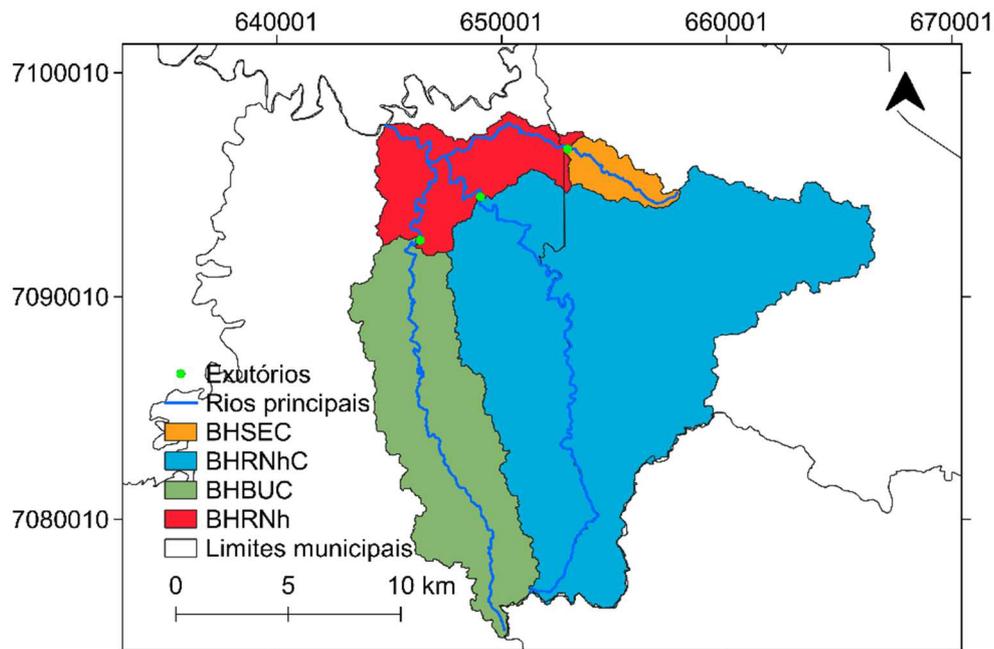
exutório no limite dessa área urbana (Figura 6). A área urbana, utilizada na modelagem hidrodinâmica, recebe a contribuição dessas bacias hidrográficas, utilizadas na modelagem hidrológica.

Figura 5 – Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho.



Fonte: A autora (2023).

Figura 6 – Área urbana e bacias hidrográficas de contribuição.



Fonte: A autora (2023).

3.2 COLETA DE DADOS

Os dados utilizados para o presente trabalho foram: dados pluviométricos e fluviométricos, Modelos Digitais de Elevação (MDE), registros históricos de inundações e dados levantados em campo.

Os dados pluviométricos e fluviométricos (Tabela 2) utilizados neste trabalho foram obtidos das estações hidrometeorológicas disponíveis no *HidroWeb*. Este recurso, é oferecido pelo Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), o qual oferece acesso ao banco de dados da Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), coordenada pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) (Hidroweb, 2023).

Os dados cartográficos constituem Modelos Digitais de Elevação (MDE) com resolução de 30 por 30 m, elaborados pelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) e adquiridos diretamente pelo Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC) (SDS/SC, 2023) e pelo programa QGIS através do *plugin OpenTopography DEM Downloader* (OpenTopography, 2023). Esses dados compreendem toda a área da bacia hidrográfica do rio Negro, e foram processados a partir do programa de geoprocessamento QGIS.

Os registros históricos utilizados para este trabalho compreendem aqueles citados no trabalho de Giglio (2010), além de levantamentos em campo para investigação direta da região, reuniões com representantes da Prefeitura de Rio Negrinho, da Associação Empresarial de Rio Negrinho (ACIRNE), da Defesa Civil de Rio Negrinho e conversas com a população local buscando obter conhecimentos e percepções diretamente dos residentes da região. Os dados levantados em campo foram medições de vazão do rio Serrinha utilizando o equipamento *FlowTracker 2* pelo método Doppler Acústico de Velocidade (SonTek, 2007) apenas para a compreensão do seu regime de escoamento base.

Tabela 2 – Estações hidrometeorológicas.

Nome	Código	Latitude S	Longitude O	Município
Estações pluviométricas				
Fragosos	2649073	26°09'17"	49°22'50"	Piên
Barra do Avencal	2649065	26°32'46"	49°28'48"	Rio dos Cedros
Rio Novo	2649064	26°24'35"	49°19'52"	Corupá
São Bento do Sul	2649062	26°14'00"	49°23'00"	São Bento do Sul
Campo Alegre	2649057	26°11'11"	49°16'24"	Campo Alegre
Corredeira	2649055	26°25'10"	49°34'23"	Rio Negrinho
Posto Rodrigues	2649048	26°13'00"	49°30'00"	Rio Negro
Piên	2649046	26°06'00"	49°26'00"	Piên
Campina dos Martins	2649045	26°07'00"	49°40'00"	Rio Negro
Rio Natal	2649033	26°20'00"	49°18'00"	São Bento Do Sul
Campo Alegre	2649022	26°08'00"	49°15'00"	Campo Alegre
Rio Preto do Sul	2649016	26°12'56"	49°36'13"	Mafra
Rio Negrinho	2649015	26°14'53"	49°34'48"	Rio Negrinho
Corupá	2649013	26°25'26"	49°17'33"	Corupá
Bateias de Baixo	2649011	26°04'00"	49°16'00"	Campo Alegre
Estações fluviométricas				
Rio Negrinho Montante	65093000	26°16'55"	49°29'00"	Rio Negrinho
Fragosos	65090000	26°09'17"	49°22'50"	Rio Negro
Rio Preto do Sul	65095000	26°12'56"	49°36'13"	Rio Negro

Fonte: A autora (2023).

3.3 MODELAGEM HIDROLÓGICA

A modelagem hidrológica foi feita por meio do programa HEC-HMS versão 4.11 e teve como objetivo obter as vazões de contribuição da BHRNMC, BHRNhC, BHSEC e BHBUC para a área utilizada na modelagem hidrodinâmica.

A modelagem foi realizada de acordo com os métodos escolhidos para o cálculo da perda de precipitação, da transformação da precipitação em escoamento superficial e do escoamento base. Para isso, foram empregados os métodos do *SCS Curve Number*, Hidrograma Unitário de Clark e Constante ao Mês, respectivamente, conforme utilizado por Monteiro *et al.* (2023).

Os métodos *SCS Curve Number* e do Hidrograma Unitário de Clark utilizaram os dados apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados iniciais das bacias hidrográficas de contribuição.

Parâmetro	BHRNMC	BHRNhC	BHSEC	BHBUC
Área de contribuição (km ²)	764,94	191,79	8,41	70,57
Taxa de área impermeável (%)	0,825	2,578	11,699	0,378
Comprimento do rio principal (km)	176,664	31,312	6,839	24,057
Declividade (m/m)	0,002	0,006	0,016	0,006
<i>Curve Number</i> *	84	84	84	84
Abstração inicial (mm)	0,368	1,183	3,193	1,206
Tempo de concentração (h)	34,336	7,290	1,917	6,047
Coeficiente de armazenamento (h)	48,394	15,544	3,779	12,183

*Valores determinados conforme de acordo com Tucci (1993).

Fonte: A autora (2023).

O método Constante ao Mês necessita de um valor fixo de escoamento base para cada mês do ano. Este valor foi determinado ao analisar as estações fluviométricas “Fragosos” para o rio Negro e “Rio Negrinho Montante” para o rio Negrinho, rio Serrinha e rio dos Bugres. Essa análise foi feita nos períodos coincidentes àqueles das estações pluviométricas com registros de precipitação de 0 mm, ou seja, dias sem a ocorrência de chuvas. A quantidade de dias sem chuvas para a análise das vazões de base devia ser suficientemente maior que o tempo de concentração da bacia hidrográfica em questão. O escoamento base da BHSEC e BHBUC foi obtido a partir de uma regionalização de vazão por área com a área de drenagem abrangida pela estação fluviométrica do “Rio Negrinho Montante”. Os valores utilizados para o escoamento base mensal são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Escoamento base mensal em m³/s.

	Rio Negro	Rio Negrinho	Rio Serrinha	Rios dos Bugres
Janeiro	19,13	1,287	0,056	0,474
Fevereiro	14,681	1,540	0,068	0,567
Março	19,522	1,681	0,074	0,619
Abril	14,081	1,431	0,063	0,527
Maio	9,893	1,072	0,047	0,395
Junho	12,23	1,859	0,082	0,684
Julho	12,181	1,928	0,085	0,709
Agosto	13,512	2,061	0,090	0,758
Setembro	12,478	1,300	0,057	0,479
Outubro	17,176	1,661	0,073	0,611
Novembro	16,709	1,268	0,056	0,467
Dezembro	19,243	1,487	0,065	0,547

Fonte: A autora (2023).

3.3.1 Calibração e validação

A calibração e validação dos modelos foram realizadas manualmente para diferentes eventos, partindo-se dos parâmetros iniciais atribuídos para abstração inicial e *Curve Number* e, então, alterando-se esses parâmetros até que se obtivesse o melhor desempenho de acordo com o método *Normalized Nash Sutcliffe* (NSE). Esse método é usado para previsão de processos hidrológicos, avaliando o quanto o hidrograma calculado se aproxima do observado por meio da regressão linear determinada pelo coeficiente de determinação, ou R^2 , que varia de 0 a 1. No entanto o coeficiente NSE pode variar de $-\infty$ a 1, no qual valores menores ou iguais a zero possuem resultados distantes dos valores observados (Nash, Sutcliffe, 1970). Esse coeficiente é determinado por meio da Equação (11)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (q_{0,i} - q_{s,i})^2}{\sum_{i=1}^n (q_{0,i} - q_{méd,i})^2} \quad (11)$$

onde $q_{0,i}$ são as vazões observadas em m^3/s , $q_{s,i}$ são as vazões calculadas em m^3/s e $q_{méd,i}$ são as vazões observadas avaliadas para o NSE em m^3/s .

A calibração dos modelos BHRNhC, BHSEC e BHBU considerou o período de 08/09/2004 a 22/09/2004 e do modelo da BHRNMC considerou o período de 23/04/1981 a 03/05/1981. Isto pois, nesses períodos as séries históricas de chuva e vazão são contínuas. Já, a validação dos modelos BHRNhC, BHSEC e BHBU considerou o período de 19/01/2003 a 29/01/2003 e do modelo da BHRNMC considerou o período de 13/08/1982 a 23/08/1982.

3.3.2 Evento de projeto

A equação IDF utilizada para a chuvas de projeto de tempo de retorno de TR100 anos para as bacias hidrográficas de contribuição do rio Negro, rio Negrinho, rio dos Bugres e rio Serrinha neste trabalho é a Equação (12), que foi desenvolvida pela CPRM (2014) utilizando os dados da estação pluviométrica “Rio Preto do Sul”

$$I = \frac{469,94 \times TR^{0,1926}}{(t + 6,69)^{0,6845}} \quad (12)$$

onde I é a intensidade da chuva em mm/h , TR é o tempo de retorno em anos e t é o tempo de duração da chuva em min .

Essa equação pode ser utilizada para chuvas com tempo de duração entre 240 e 1.440 min . Os tempos de duração da chuva foram determinados por meio da Equação (13)

$$t = T_c \times \alpha \quad (13)$$

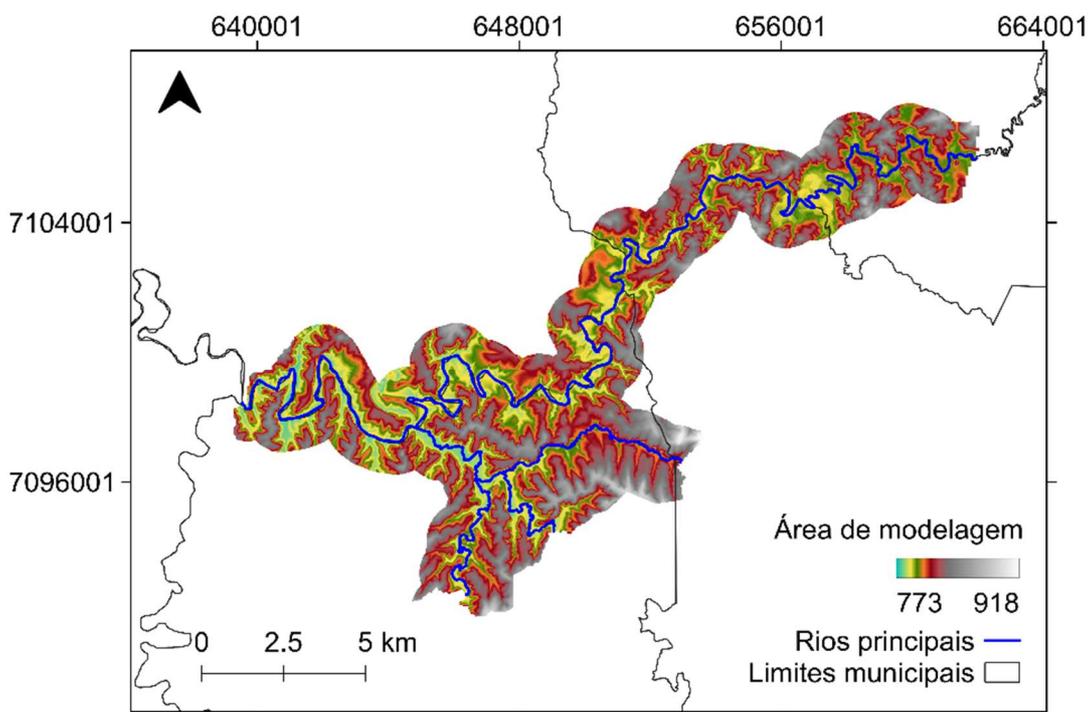
onde t é o tempo de duração da chuva em min , T_c é o tempo de concentração da chuva em min e α é o coeficiente analisado por Innocente *et al.* (2018), de valor igual a 3.

3.4 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

A modelagem hidrodinâmica foi feita por meio do programa HEC-RAS versão 6.4.1, considerando um escoamento não permanente e bidimensional, e teve como objetivo mapear a inundação da região urbana do município de Rio Negrinho. A modelagem foi realizada de acordo com os métodos escolhidos para o cálculo do escoamento. Essa modelagem permite obter com detalhamento espacial e temporal as características necessárias para análise da mancha de inundação criada (Monteiro *et al.*, 2023).

A área utilizada para o processamento da modelagem hidrodinâmica foi definida a partir de um *buffer* de 1,0 km a partir dos segmentos de fluxo representativos dos rios estudados no modelo hidrodinâmico (Figura 7). Em razão de ser uma modelagem bidimensional, foi necessária a criação de uma malha de células poliédrica de resolução de 30 por 30 m. Nos rios analisados, suas margens e na região de provável inundação a malha foi refinada com uma resolução de 10 por 10 m.

Figura 7 – Área de modelagem do programa HEC-RAS.



Fonte: A autora (2023).

As características de uso e ocupação do solo foram definidas manualmente a partir da separação entre as áreas não edificadas das edificadas e criando um polígono vetorial para ser inserido no programa. As áreas não edificadas receberam um coeficiente de Manning de 0,035, já as áreas edificadas receberam um coeficiente de Manning de 0,080 (Tucci, 1993).

A partir do modelo hidrodinâmico criado foram definidos cinco cenários de análise. Desses cenários, o primeiro foi criado com o objetivo de fornecer os dados de escoamentos base para os demais (C0), o segundo para a validação do modelo hidrodinâmico (C1), e os outros três cenários são os eventos de projeto (C2, C3 e C4), os quais utilizam a precipitação e vazão de projeto obtidos na modelagem hidrológica para um TR100, esses foram criados variando a bacia hidrográfica de aplicação das condições de contorno de precipitação e vazão.

Para a aplicação dos casos, foram determinadas as condições de contorno para cada cenário. As condições de contorno de entrada são a precipitação sobre toda a bacia hidrográfica, e a vazão de contribuição de cada rio a montante. A condição de contorno de saída é o nível do rio Negro a jusante, essa condição foi processada por dois métodos, o primeiro, utilizado para o C1, é o *Stage Hydrograph*, o qual recebe os valores observados de nível do evento para a condição de contorno, o segundo, utilizado para os demais cenários, é o *Normal Depth* que necessita apenas do valor de *Friction Slope*, que equivale à inclinação da linha de energia e pode ser estimada a medindo a inclinação do leito na região da condição de contorno em questão (USACE, 2022).

O cenário C0 utilizou a média dos valores de escoamento base de cada bacia hidrográfica de contribuição para a criação de um escoamento inicial para os demais cenários (Tabela 5).

Tabela 5 – Média do escoamento base mensal em m³/s.

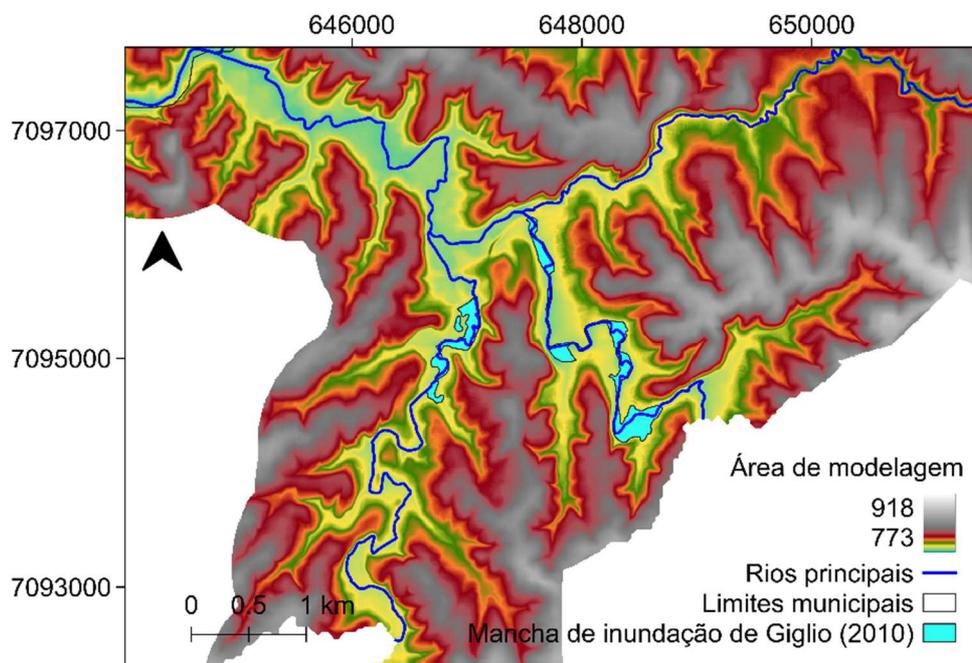
	Rio Negro	Rio Negrinho	Rio Serrinha	Rios dos Bugres
Média	15,654	1,548	0,068	0,570

Fonte: A autora (2023).

3.4.1 Validação: cenário C1

Para verificar se o modelo hidrodinâmico criado é representativo, esse deve ser capaz de reproduzir uma inundação já ocorrida (Monteiro *et al.*, 2023). Isso pode ser analisado verificando a extensão da mancha de inundação obtida e comparando-a com uma existente. Portanto, verificou-se o resultado da extensão da mancha de inundação obtida do C1 e comparou-se à mancha de inundação mapeada por Giglio (2010) apresentada na Figura 8.

Figura 8 – Mancha de inundação do evento de 2004.



Fonte: A autora (2023).

O evento C1 ocorreu entre os dias 07/10/2004 e 31/10/2004. Os dados de precipitação utilizados para esse período foram extraídos diretamente das estações pluviométricas mencionadas na Tabela 3 deste trabalho. Os dados de vazão para a BHRNMC foram extraídos da estação fluviométrica “Fragosos”, para a BHRNhC foram extraídos da estação fluviométrica “Rio Negrinho Montante”, já para a BHSEC e BHBUC os dados de vazão foram obtidos a partir de regionalização de vazão com a BHRNhC, visto que são sub-bacias hidrográficas dessa.

3.4.2 Eventos de projeto: cenários C2, C3 e C4

Após finalizada a validação do modelo hidrodinâmico, iniciou-se os mapeamentos de inundação para os eventos de projeto. Esses eventos incluíram os cenários C2, C3 e C4, descritos a seguir:

- O cenário C2 considerou que a precipitação de projeto foi aplicada apenas na área urbana do município de Rio Negrinho e a vazão de projeto, proveniente dessa precipitação aplicada apenas na BHRNhC, BHSEC e BHBUC. Ou seja, esse cenário considerou uma precipitação de projeto concentrada no município de Rio Negrinho, sem a influência de precipitações nas bacias hidrográficas a montante da BHRNhC, como a BHRNMC. Portanto, esse cenário considera a inundação resultante como uma função apenas das condicionantes locais.
- O cenário C3 considerou que a vazão de projeto foi aplicada apenas na BHRNMC. Ou seja, esse cenário considerou que a precipitação de projeto ocorreu na BHRNMC resultando em uma vazão de projeto, porém sem a ocorrência da precipitação de projeto diretamente na área urbana do município de Rio Negrinho ou em suas outras bacias hidrográficas de contribuição BHRNhC, BHSEC e BHBUC, as quais estão dentro da BHRNh. Portanto, esse cenário considera a inundação resultante como uma função apenas das condicionantes da região a montante.
- O cenário C4 considerou que a precipitação de projeto foi aplicada na área urbana e a vazão de projeto, proveniente dessa precipitação aplicada na BHRNhC, BHSEC, BHBUC, além da vazão de projeto da BHRNMC, proveniente de uma precipitação de projeto que ocorreu na BHRNMC. Ou seja, considera a junção dos cenários anteriores, para a potencialização do evento, considerando uma precipitação de projeto que abrange toda a BHRNh e a BHRNMC, resultando na aplicação das vazões para BHRNhC, BHSEC, BHBUC e BHRNMC. Portanto, esse cenário considera a inundação resultante como uma função das condicionantes locais e da região a montante.

3.5 PARÂMETROS DE ANÁLISE

A partir dos cenários definidos, foram feitas as análises da influência da aplicação das diferentes condições de contorno dos cenários de projeto nos resultados de: extensão da mancha de inundação, profundidade média e máxima da inundação e velocidade média e máxima de escoamento. Todos esses resultados de análise foram verificados diretamente através dos programas HEC-RAS e QGIS.

A extensão máxima da mancha de inundação foi verificada exclusivamente na área urbana do município de Rio Negrinho, nas regiões em que a água extravasa do rio Negrinho, rio Serrinha e rio dos Bugres. Desconsiderando os acúmulos de água gerados apenas pelas chuvas sem contato com os rios, como pequenas poças. Seu valor foi determinado a partir da área dos *rasters* das manchas de inundação obtidos da modelagem hidrodinâmica no momento de maior extensão da mancha de inundação, e apresentados na forma de mapas.

A profundidade média e máxima da inundação, assim como a extensão da mancha, foi verificada exclusivamente na área urbana do município de Rio Negrinho, nas regiões em que a água extravasa do rio Negrinho, rio Serrinha e rio dos Bugres. Esses valores foram determinados pontualmente analisando a mancha de inundação no programa HEC-RAS no momento de maior intensidade da inundação.

A velocidade média e máxima do escoamento, assim como os parâmetros anteriores, foi verificada exclusivamente na área urbana do município de Rio Negrinho, nas regiões em que a água extravasa do rio Negrinho, rio Serrinha e rio dos Bugres. Esses valores foram determinados diretamente no programa HEC-RAS no momento de maior intensidade da inundação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 MODELAGEM HIDROLÓGICA

Com relação aos procedimentos de calibração e validação, durante a calibração os modelos da BHRNhC, BHSEC e BHBUC, que considerou o período de 08/09/2004 a 22/09/2004, obtiveram um coeficiente NSE de -20,097. A otimização dos parâmetros indicou a alteração da abstração inicial para 5,17 e *Curve Number* para 50. Com a alteração dos parâmetros os modelos atingiram um coeficiente NSE de -0,362. A validação dos modelos obteve um coeficiente NSE de 0,734. Já, durante a calibração o modelo da BHRNMC, que BHRNMC considerou o período de 23/04/1981 a 03/05/1981, obteve um coeficiente NSE de -8,253. A otimização dos parâmetros indicou a alteração da abstração inicial para 5,0 e *Curve Number* para 60. Com a alteração dos parâmetros o modelo atingiu um coeficiente NSE de 0,350. A validação do modelo obteve um coeficiente NSE de 0,870. Ou seja, para ambos os casos as validações obtiveram valores melhores.

Após a calibração e validação dos modelos, foram determinados o tempo de duração e a intensidade da precipitação para um TR100, e obteve-se os valores da Tabela 6.

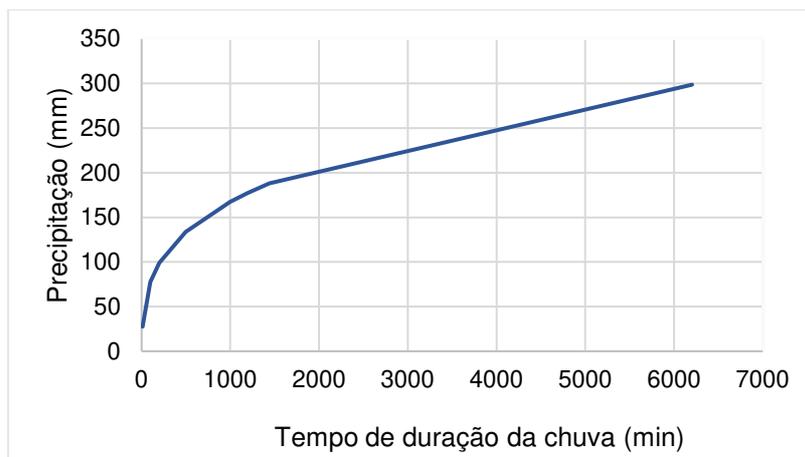
Tabela 6 – Dados de precipitação para um tempo de retorno de 100 anos.

	BHRNMC	BHRNhC	BHSEC	BHBUC
Tempo de duração (min)	6.180,5	1.312,1	345,1	1.088,4
Intensidade para TR100 (mm/h)	2,897	8,346	20,620	9,479

Fonte: A autora (2023).

A BHRNMC obteve um tempo de duração de chuva de cerca de seis vezes maior que o limite máximo estabelecido para a equação IDF, porém, devido à inexistência de outra equação possível de ser utilizada, desconsiderou-se tal limite. Utilizando a IDF, ao se analisar a taxa de variação da precipitação total resultante a partir do limite máximo, verificou-se que essa é de apenas 0,02326 mm/min, ou seja, um incremento pequeno em comparação com a intensidade para o tempo de duração necessário (Figura 9).

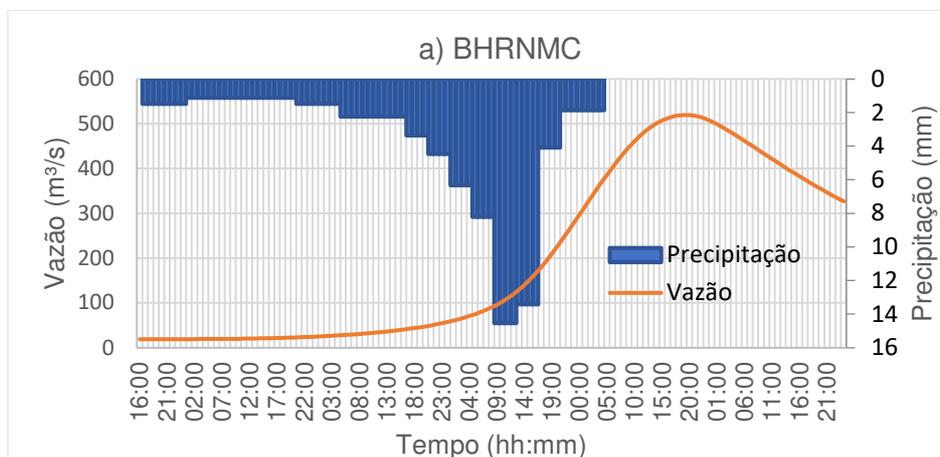
Figura 9 – Análise taxa de variação de Precipitação.



Fonte: A autora (2023).

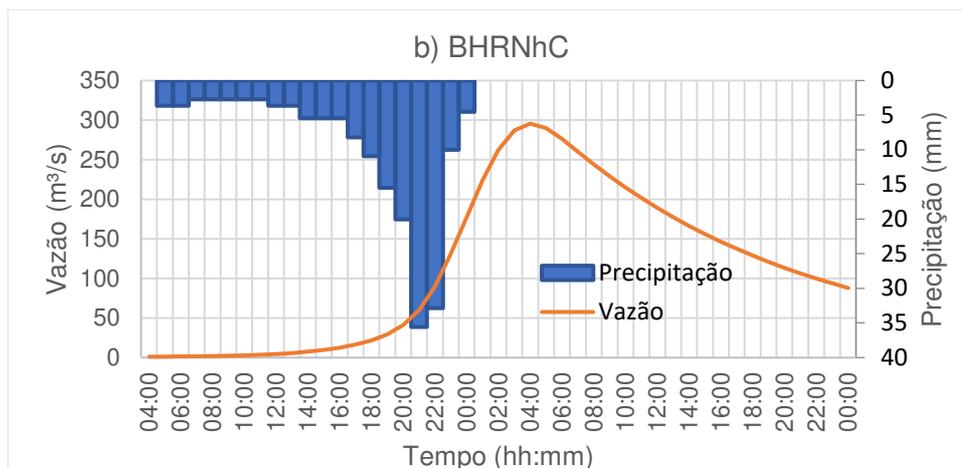
Fez-se então a distribuição temporal da intensidade da chuva a partir do Método do 4º Quartil de Huff (Huff, 1976), criando os hietogramas de projeto. A partir dessa distribuição, as séries temporais de precipitação de projeto foram aplicadas nos seus respectivos modelos hidrológicos, criando os hidrogramas de projeto (Figura 10, 11, 12 e 13). O hidrograma da BHRNMC (Figura 10) apresentou uma vazão máxima de 519,9 m³/s com 115h (4,8 dias) de precipitação de projeto. O hidrograma da BHRNhC (Figura 11) apresentou uma vazão máxima de 295,4 m³/s com 28h de precipitação de projeto. O hidrograma da BHSEC (Figura 12) apresentou uma vazão máxima de 17,5 m³/s com 9h de precipitação de projeto. O hidrograma da BHBUC (Figura 13) apresentou uma vazão máxima de 74,8 m³/s com 31h de precipitação de projeto.

Figura 10 – Hietograma e hidrograma de projeto para BHRNMC



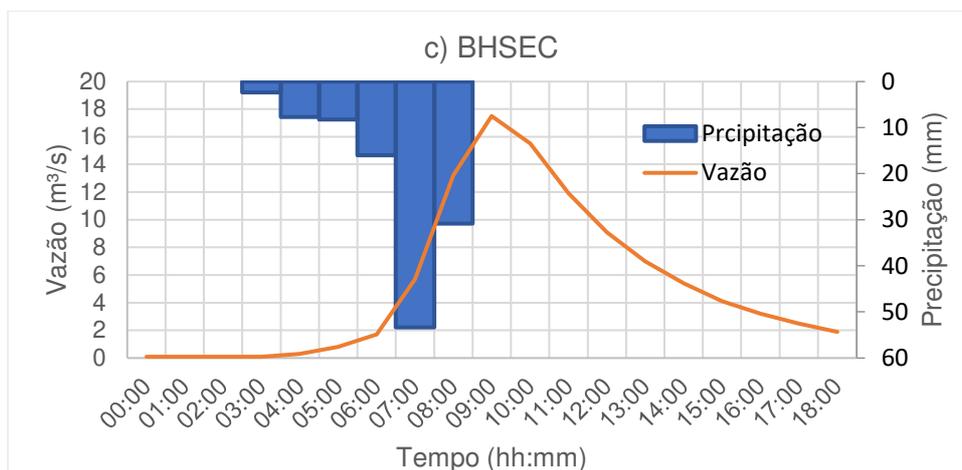
Fonte: A autora (2023).

Figura 11 – Hietograma e hidrograma de projeto para BHRNhC



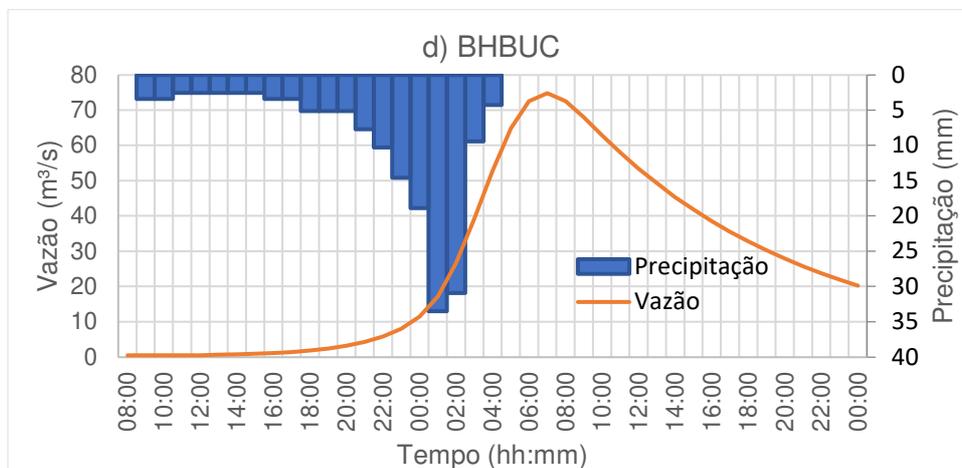
Fonte: A autora (2023).

Figura 12 – Hietograma e hidrograma de projeto para BHSEC



Fonte: A autora (2023).

Figura 13 – Hietograma e hidrograma de projeto para BHBUC



Fonte: A autora (2023).

4.2 MODELAGEM HIDRODINÂMICA

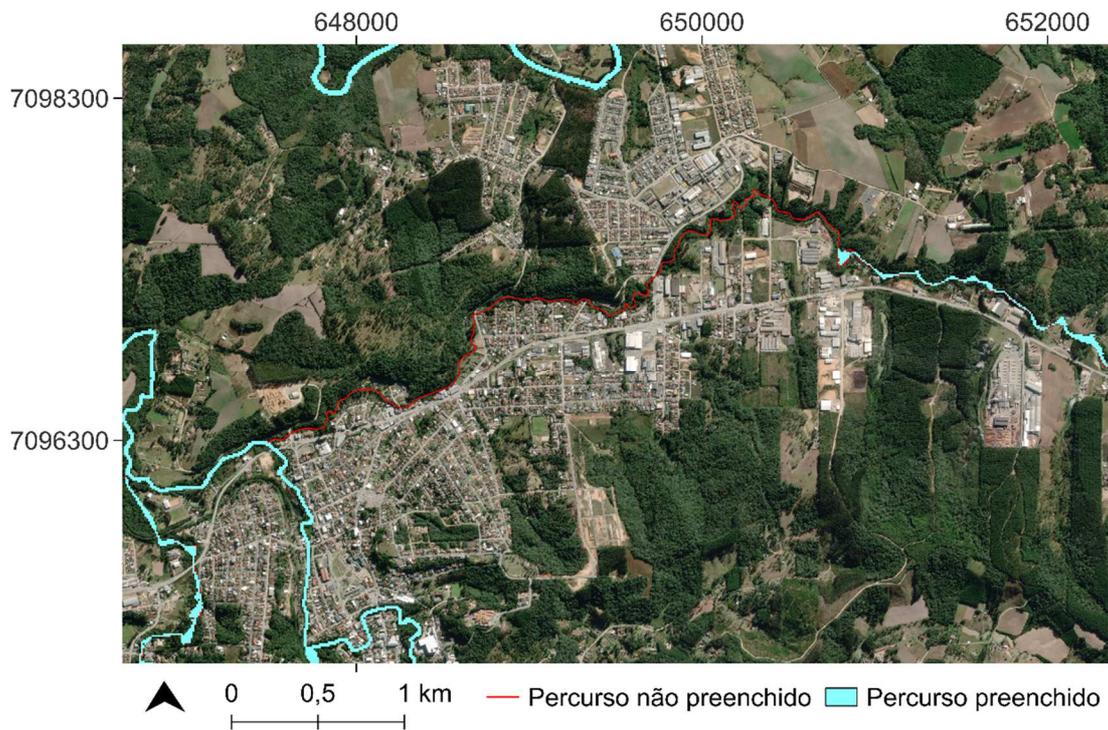
Com relação à modelagem hidrodinâmica, o trabalho obteve como resultados um modelo inicial de escoamento base C0 para aplicação nos demais e as manchas de inundação dos cenários C1, C2, C3 e C4. Conseqüentemente, a modelagem também forneceu todos os parâmetros necessários para as análises previstas, de extensão da mancha de inundação, profundidade máxima da inundação e velocidade máxima de escoamento.

O resultado obtido para o cenário inicial C0 (Apêndice A: Figura 18) apresentou a situação de escoamento base dos rios. Para isso, utilizou-se o valor médio dos escoamentos base de todos os meses do ano (Tabela 5), ou seja, dos rios em seu curso normal sem a contribuição de precipitação. Este cenário forneceu um arquivo para ser inserido nos outros cenários de validação e de projeto como condição inicial de escoamento dos rios, para que as modelagens não iniciassem com seus rios “vazios”. Nota-se que o escoamento gerado apenas preenche o caminho natural dos rios, exceto no rio Serrinha, no qual o escoamento não foi capaz de preencher seu percurso total (Figura 14), isto se deu pelo tempo de simulação da modelagem que possivelmente não foi suficiente. Porém, para o prosseguimento do trabalho tal fato foi desconsiderado, visto que o percurso inicial do rio Serrinha já estava preenchido e foi considerado suficiente.

O resultado obtido para o cenário de validação C1 (Apêndice A: Figura 19) foi satisfatório, ou seja, o modelo hidrodinâmico criado foi capaz de representar a realidade de um evento de inundação já ocorrido no município. Isto se dá, pois, ao analisar a extensão da mancha de inundação gerada, essa correspondeu com aquela apresentada por Giglio (2010), oriunda de um mapeamento de um evento real. Esta mancha apresentada por Giglio (2010) abrange áreas inundadas das margens do rio dos Bugres e rio Negrinho.

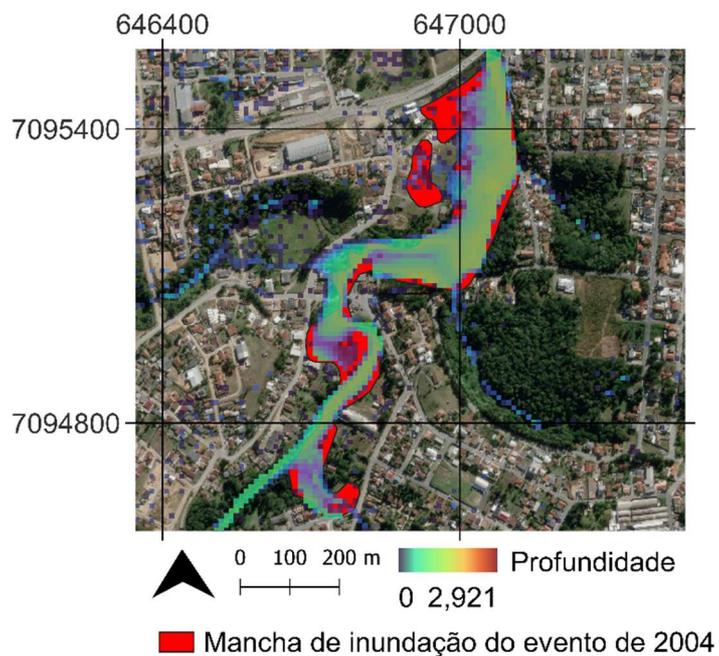
Às margens do rio dos Bugres (Figura 15), a mancha modelada também foi satisfatória e apresentou uma extensão bastante similar com a mancha real, com pequenas distorções que resultaram em uma extensão aproximadamente 16% maior que a real. Essa área da inundação se deu principalmente nos bairros Quitandinha, Vista Alegre e Jardim Hanstchel.

Figura 14 – Região de não preenchimento do rio Serrinha.



Fonte: A autora (2023).

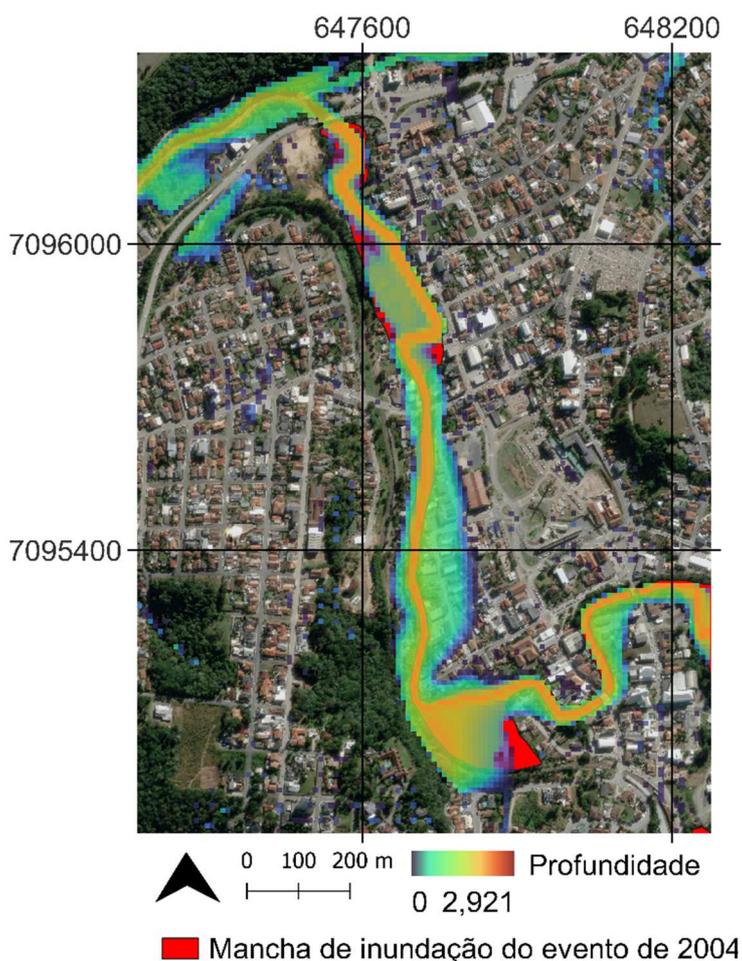
Figura 15 – Aproximação da região das margens do rio dos Bugres C1.



Fonte: A autora (2023).

Às margens do rio Negrinho, a mancha modelada foi satisfatória e apresentou uma extensão suficientemente similar com a mancha real, com exceção de duas regiões onde a inundação modelada obteve um comportamento diferente do real. A primeira região (Figura 16), localizada no bairro Centro, obteve uma mancha de inundação 101% maior que a real, devido a um extravasamento da água para a margem direita do rio, que não é considerado por Giglio (2010). Porém, como analisado por Monteiro *et al.* (2023), de acordo com os moradores da região e representantes da Prefeitura de Rio Negrinho, Defesa Civil e da ACIRNE, essa mancha de inundação de maior extensão é representativa, pois a região a direita do rio sofre com constantes inundações.

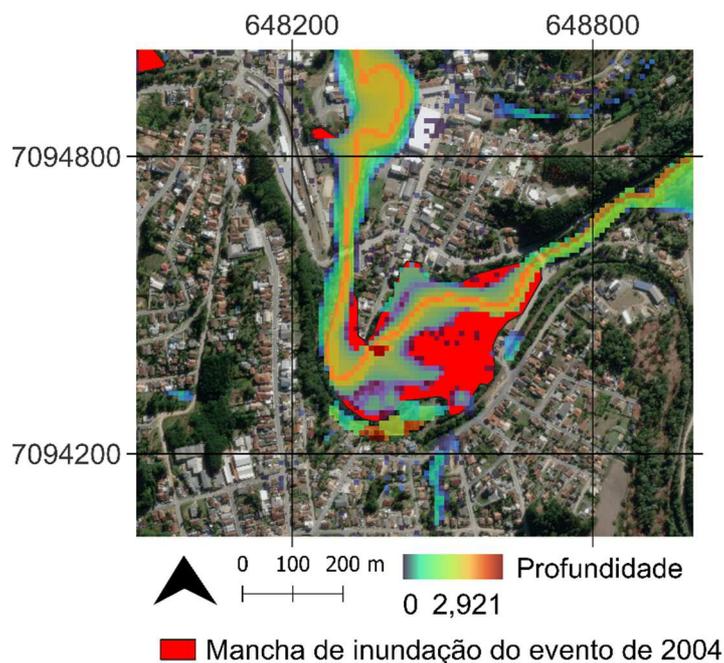
Figura 16 – Aproximação da primeira região do rio Negrinho C1.



Fonte: A autora (2023).

Já a segunda região (Figura 17), localizada no bairro Alegre, na Sociedade Esportiva Ipiranga, obteve uma mancha de inundação com uma extensão 9% menor que a real. Essa região também foi analisada por Monteiro *et al.* (2023) e que teve dificuldades para ser suficientemente preenchida na sua modelagem de validação desse mesmo evento.

Figura 17 – Aproximação da segunda região do rio Negrinho C1.



Fonte: A autora (2023).

O resultado obtido para o cenário de projeto C2 (Apêndice A: Figuras 20 e 21), que considerou que a precipitação de projeto foi aplicada apenas na área urbana do município de Rio Negrinho em conjunto à vazão de projeto, proveniente dessa precipitação aplicada apenas na BHRNhC, BHSEC e BHBUC, apresentou áreas de inundação principalmente nas ruas Senador Nereu Ramos, Paulo Boehm, Carlos Weber, José Zipperer Neto, Alfredo Sapucália, Martin Zipperer e Capitão Osmar Romão da Silva. Já o resultado obtido para o cenário de projeto C3 (Apêndice A: Figuras 22 e 23), que considerou que a vazão de projeto foi aplicada apenas na BHRNMC, apresentou áreas de inundação principalmente nas ruas Senador Nereu Ramos, Paulo Boehm, Carlos Weber e Capitão Osmar Romão da Silva. Por fim, o resultado obtido para o cenário de projeto C4 (Apêndice A: Figuras 24 e 25), que

considerou que a precipitação de projeto foi aplicada na área urbana e a vazão de projeto, proveniente dessa precipitação aplicada na BHRNhC, BHSEC, BHBUC, além da vazão de projeto da BHRNMC, proveniente de uma precipitação de projeto que ocorreu na BHRNMC, engloba todas as áreas de inundação dos cenários C2 e C3, além das ruas Willy Jung, Aleixo Zipperer, Avenida dos Imigrantes, Duque de Caxias, Luís Scholz, Arnaldo de Almeida Oliveira, Maria Scholz, Getúlio da Luz, Ewaldo Ritzmann e BR-280. A Figura 26 do Apêndice A mostra a sobreposição das manchas de inundação obtidas dos cenários de projeto e sua extensão.

Os três cenários de projeto apresentaram um grande extravasamento das águas do rio Negrinho, principalmente na região próxima ao seu exutório, ou seja, no seu ponto de confluência com o rio Negro. Isso se dá pelo remanso gerado no rio Negrinho causado pelo represamento de suas águas pelo rio Negro. Esse represamento resulta numa mancha de inundação com águas que fluem lentamente, ou até mesmo não fluem, implicando nas inundações a montante dessa região, ou seja, na área urbana do município de Rio Negrinho.

As manchas de inundação dos cenários C2 e C3 nas margens do rio Negrinho apresentaram um alcance aproximadamente semelhante. Isso permite concluir que mesmo em situações em que não há precipitação diretamente na BHRNhC, BHSEC e BHBUC, como é o caso do cenário C2, ainda há a possibilidade da ocorrência de inundações caso ocorra uma precipitação de intensidade e magnitude suficientemente alta na BHRNMC, como é o caso do cenário C3, capaz de gerar um escoamento no rio Negro que represe, ou até mesmo adentre, as águas do Rio Negrinho, servindo como uma contribuição contrária, intensificando a inundação.

Em relação aos mapas de profundidade e velocidade das áreas inundadas, observou-se que, além das maiores profundidades concentradas na área de confluência entre o rio Negrinho e o rio Negro, os três cenários revelaram outros locais com profundidades e velocidades elevadas na região urbana de Rio Negrinho, com foco especialmente nos bairros Centro e Alegre, próximos ao Serviço Autônomo Municipal de Saneamento Básico de Rio Negrinho (SAMAE) às margens do rio Negrinho e no bairro Quitandinha e Ceramarte às margens do rio dos Bugres.

Com relação às profundidades, no cenário C2 (Apêndice A: Figura 20), os maiores valores de profundidade na área urbana atingiram 6,40 m e 3,14 m, respectivamente. No cenário C3 (Apêndice A: Figura 22), as profundidades foram as menores entre os três cenários, de 3,62 m e 3,08 m, respectivamente. Já no cenário C4 (Apêndice A: Figura 24), as profundidades foram as maiores entre os três cenários, de 7,81 m e 3,24 m, respectivamente. Já para as velocidades, nos cenários C2 (Apêndice A: Figura 21), C3 (Apêndice A: Figura 23) e C4 (Apêndice A: Figura 25), os valores máximos das velocidades registrados nas regiões urbanas mencionadas foram os mesmos para os três cenários, atingindo aproximadamente 3,62 m/s e 3,24 m/s, respectivamente.

Na região próxima a SAMAE, existe uma instalação de réguas limnimétricas que servem como apoio para a população compreender como está a situação do rio Negrinho e se ele está em situação de possível inundação. Para o cenário C0, a cota do Rio Negrinho em seu regime de escoamento base foi de cerca de 1,85 m (altitude de 781,8 m), porém para os cenários C2, C3, e C4, como já mencionado, as cotas alcançaram cerca de 6,40 m (787,8 m), 3,62 m (786,4 m) e 7,81 m (788,7 m), respectivamente. Permitindo concluir que mesmo a uma distância de cerca de 9,0 km, da confluência entre os rios até a SAMAE, é possível observar que os efeitos causados pela influência do rio Negro são bastante expressivos.

4.3 PARÂMETROS DE ANÁLISE

Os resultados dos parâmetros de análise de extensão da mancha de inundação, profundidade máxima da inundação e velocidade máxima de escoamento obtidos por meio da modelagem hidrodinâmica para os cenários inicial e de projeto (C0, C2, C3 e C4) são apresentados na Tabela 7.

Com relação à extensão das manchas de inundação, o maior valor foi observado no cenário C4, devido à aplicação da precipitação de projeto que abrange toda a BHRNh e a BHRNMC e na aplicação das vazões para BHRNhC, BHSEC, BHBUC e BHRNMC. Conseqüentemente, seu valor foi 23,46% maior que a do cenário C2 e 82,08% maior que o cenário C3, evidenciando a influência direta das condições de contorno aplicadas para esse cenário. Nota-se também,

que ao comparar C0 e C3 há um aumento de 511,04% na extensão da mancha de água, apenas pela influência do escoamento do rio Negro, resultado da aplicação da vazão de projeto na BHRNMC. Este aumento de C3 com relação a C0 se deu principalmente na região a jusante do rio Negrinho no seu próprio percurso, sem a contribuição do aumento da extensão de seus rios tributários, que, como é possível observar nos mapas dos cenários C3 e C4, tiveram um aumento na sua extensão por consequência da precipitação representada no modelo hidrodinâmico.

Tabela 7 – Resultados dos parâmetros de análise.

	C0	C2	C3	C4
Extensão (km ²)	0,382	3,446	2,337	4,255
Profundidade média (m)	0,819	0,532	0,118	0,378
Profundidade máxima (m)	2,921	9,559	10,830	12,935
Velocidade média (m/s)	0,383	0,535	0,121	0,379
Velocidade máxima (m/s)	12,349	3,617	3,620	3,619

Fonte: A autora (2023).

Ainda com relação às manchas, percebe-se que no C2, tem-se que ela é maior a jusante do rio Negrinho, se comparado ao C3, entretanto é menor a montante. Assim, temos que a distribuição da mancha de inundação é altamente influenciada pela sua fonte (chuvas a montante ou represamento a jusante). Assim, a análise unicamente pelas réguas da SAMAE, como em alguns casos é realizada atualmente, pode não ser adequado para identificar as inundações na área urbana do município, necessitando de mais uma medição próxima a confluência dos rios. Com esta segunda medição, o município poderia se precaver mais adequadamente com relação as inundações provenientes do Rio Negro. Atualmente, os moradores se baseiam na estação de Fragosos e de Rio Negro e que estão a 9,0 km de distância da foz de rio Negrinho, podendo provocar erros de estimativa, principalmente proveniente da defasagem do pico da inundação.

Com relação à profundidade média, entre os cenários de projeto, o valor máximo foi observado no cenário C2, o qual foi 350,85% maior que o C3 e

40,74% maior que o C4. O baixo valor de C3 se deu devido ao espalhamento da mancha de inundação, proporcionando menor profundidade média com relação ao C2. No entanto, percebe-se que estes valores são menores que a profundidade média do cenário C0, ou seja, o cenário base. Isto se dá pois, com o extravasamento das águas dos rios, a profundidade dessas áreas extravasadas é baixa, diminuindo seu valor médio, porém, na situação de escoamento de base dos rios, sua distribuição está totalmente dentro de seu leito, à uma profundidade maior, sem espalhamento.

Já com relação à profundidade máxima, o maior valor foi observado no cenário C4, o qual foi 35,32% maior que o C3 e 19,44% maior que o C2. Este valor, assim como os demais máximos, está localizado região da confluência do rio Negrinho com o rio Negro, em que a profundidade vai desde 2,921 m em C0 até 12,935 m seu em C4, ou seja, tem um aumento de 343,14%. Esse resultado provém da combinação das condições de represamento do rio Negrinho e da contribuição das águas da precipitação sobre a área urbana.

Com relação à velocidade média, entre os cenários de projeto, o C2 obteve o maior valor, visto que esta foi a situação em que, devido à não aplicação da condição de contorno de vazão da BHRNMC, não houve um significativo represamento do escoamento das águas do rio Negrinho, permitindo que esse fluísse. No entanto, para os cenários C3 e C4, devido a este represamento, os valores foram significativamente menores, cerca de 342,98% e 29,06%, respectivamente. Já com relação à velocidade máxima, todos os cenários obtiveram valores muito próximos, permitindo concluir que, ao contrário da velocidade média, a velocidade máxima do escoamento para os diferentes cenários não foi influenciada significativamente pela precipitação ou represamento das águas. C0, por outro lado, obteve uma velocidade máxima consideravelmente alta em comparação as demais, provavelmente causado por um erro computacional durante o processamento dos modelos.

Ainda com relação à velocidade, notou-se que no rio Serrinha, nos cenários C2 e C4 a sua velocidade de escoamento se manteve mais alta em comparação com os outros rios principais do município. Analisando-o separadamente, obteve-se que sua velocidade média foi de 0,652 m/s (entre C2 e C4). Durante os levantamentos de campo no município, ao conversar com os

moradores das margens desse rio, esses comentaram que ali não ocorriam inundações propriamente ditas, mas sim, situações como “enxurradas”, o que pode explicar essa velocidade mais alta, e o seu comportamento diferente.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho realizou uma análise das inundações do município de Rio Negrinho sob a influência de parte da Bacia Hidrográfica do Rio Negro, localizada a montante do exutório da Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho a partir de modelagem hidrológica e hidrodinâmica. Essa análise foi feita a partir da definição de três cenários de projeto, que se diferenciaram pela variação da aplicação das suas condições de contorno de precipitação e vazão. Nesses cenários de projeto foram analisados os parâmetros de extensão da mancha de inundação, profundidade máxima da inundação e velocidade máxima de escoamento.

O modelo hidrológico utilizado para este trabalho foi capaz de representar a transformação da precipitação em vazão nas bacias hidrográficas do rio Negro e rio Negrinho. Portanto, o modelo hidrológico forneceu todos os hidrogramas de projeto necessários para aplicação nos cenários de análise do modelo hidrodinâmico. O modelo hidrodinâmico utilizado foi capaz de representar a interação entre as bacias hidrográficas do rio Negro e rio Negrinho. Esse modelo foi capaz de representar os cinco cenários, um inicial, um de validação e três de projeto, necessários para a análise das inundações, fornecendo todos os parâmetros necessários.

A análise da interação entre as bacias hidrográficas do rio Negro e rio Negrinho a partir dos parâmetros e mapeamentos obtidos na modelagem hidrodinâmica, permitiu constatar que a parte da Bacia Hidrográfica do Rio Negro localizada a montante do exutório a Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho possui grande influência nas inundações da área urbana do município de Rio Negrinho. Isso, tanto para as situações em que há precipitação nas duas áreas, quanto para as situações em que há precipitação somente na Bacia Hidrográfica do Rio Negro a montante. Essa influência é notada principalmente no aumento da extensão das manchas de inundação e da profundidade máxima do escoamento, e na diminuição da velocidade média de escoamento, que sofreram significativas alterações. Permitindo concluir que as inundações em questão são um produto tanto das condicionantes locais de montante e jusante, como de outras regiões.

Dessa forma, percebe-se que o mapeamento de inundação pode ser uma ferramenta importante de planejamento urbano e de definição de medidas de mitigação de inundações de acordo com as condicionantes locais e de outras regiões que possam ter influência na área em questão. Como é o caso do município de Rio Negrinho, que a partir de análises como essa, pode estabelecer critérios para a tomada de decisões com relação às inundações mesmo quando as precipitações não estão ocorrendo diretamente sobre sua área de contribuição, e sim nos municípios próximos, como Rio Negro, Piên, Agudos do Sul, São Bento do Sul e Campo Alegre, que podem gerar um escoamento forte o suficiente capaz que crie cenários como os analisados, de represamento ou contribuição com velocidades negativas, isto é, indo contrária a direção do escoamento usual do rio.

Portanto, uma das recomendações para trabalhos futuros é buscar a melhoria da precisão dos modelos para produção de mapeamentos de inundação, através da análise profunda da região de estudo e das suas áreas de contribuição e deságue. Também se recomenda o desenvolvimento de sistemas de alerta antecipado de inundação que usem modelos de previsão de inundação em tempo real, com base em dados não somente do rio Negrinho, como o que existe atualmente na SAMAE, mas também com a implantação de um sistema similar no próprio rio Negro, ou mais a jusante do rio Negrinho, e forneçam informações para a evacuação e ações de preparação.

REFERÊNCIAS

ABREU, G. de F.; SOBRINHA, L. A.; BRANDÃO, J. L. B. Análise da distribuição temporal das chuvas em eventos hidrológicos extremos. **Eng Sanit Ambient**, São Carlos, v.22, n. 2, p. 239-250, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/yXk5sJQYZNF6LgxTfZRDKwc/?format=pdf>. Acesso em: 10 outubro 2023.

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. **Revista da FAE**, Palmas, v. 20, n. 1, p. 129-137, 2017. Disponível em: <https://revistafae.fae.edu/revistafae/article/view/113>. Acesso em: 17 maio 2023.

ALVARES, C. Al.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: http://www.lerf.br/img/publicacoes/Alvares_etal_2014.pdf. Acesso em: 16 março 2023.

ANA. HidroWeb. Brasília, 2023. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/download>. Acesso em: 20 maio 2023.

BARBOSA, F. A. **Medidas de controle de inundações urbanas na bacia do Rio Mamanguape/PB**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5490/1/arquivototal>. Acesso em: 27 abril 2023

BORGES, É. B. M.; PINA, N. V. M.; NASCIMENTO, C. F.; LATUF, M. O. Confecção e Calibração de Pluviômetro como Subsídio à medição de Precipitação. In: Encontro Nacional de Geógrafos, 17., 2012, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos [...]** Belo Horizonte: Associação dos Geógrafos Brasileiros, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/261531592_Confeccao_e_calibracao_de_pluviometro_alternativo_como_subsidio_a_medicao_de_precipitacao. Acesso em: 17 março 2023.

CEPED/UFSC. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991-2012**. 2. ed. Florianópolis: CEPED/UFSC, 2013. Disponível em: https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2012/01/AMAZONAS_mioloWEB.pdf. Acesso em: 03 maio 2023.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. 1. ed. Columbus: McGraw-Hill International Editions, 1988.

CIRELLA, G.; IYALOMHE, F. Flooding conceptual review: sustainability – focalized best practices in Nigeria. **Applied Sciences**, [S.l.], v. 8, n. 9, p. 1558-1572, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/8/9/1558>. Acesso em: 13 abril 2023.

CLARK, C. O. Storage and the unit hydrograph. **Transactions of the American Society of Civil Engineers**, [S.l.], v. 110, n. 1, p. 1419-1446, 1945.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2015.

COUTINHO, Marlon Marques. **Avaliação do desempenho da modelagem hidráulica unidimensional e bidimensional na simulação de eventos de inundação em Colatina/ES**. 2015. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUBD-9ZDLZQ>. Acesso em: 26 abril 2023.

CPRM. **Mapa da geodiversidade do estado de Santa Catarina**. Brasília: CPRM, 2007. Escala 1:500.000.

DALAGNOL, E.F.N. **Caracterização e análise das enchentes em Rio Negrinho – SC no período de 1977 a 1995**. 1999. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

DOOGE, James. **Linear theory of hydrologic systems**. 1. ed. Washington, D.C.: Agricultural Research Service, 1973. Disponível em: https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AGU/31ea296c-2c70-4dad-ef-4681bc6a288/UploadedImages/Dooge_LinearTheoryHydrology.pdf. Acesso em: 18 abril 2023.

EMBRAPA. **Solos do estado de Santa Catarina**. 1. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/doc/964417/1/BPD-46-2004-Santa-Catarina-.pdf>. Acesso em: 23 abril 2023.

Federal Emergency Management Agency. **Design guidelines for flood damage reduction**. 1. ed. Lincoln: Nebraska Department of Natural Resources, 1981.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. C. **Hidrologia**. 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1988.

GIGLIO, J. N. **Caracterização das Áreas de Inundação em Rio Negrinho – SC**. 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/124510/231.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 16 abril 2023.

GIGLIO, J. N.; KOBIYAMA, M. Uso de registros históricos para análise de inundações: estudo de caso do município de Rio Negrinho. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., 2011, Maceió. **Anais eletrônicos [...]** Maceió: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2016. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=11417>. Acesso em: 04 abril 2023.

GOBIRA, A. K. M.; SILVA, A. G. R.; PEREIRA, F. J. S.; GONDIM, R. B.; COSTA, C. A. G. Análise da acurácia do Método Chuva-Deflúvio (SCS-CN) para a Bacia do Açude Edson Queiroz, Santa Quitéria, Ceará. In: Simpósio do Bioma Caatinga, 2., 2018, Petrolina. **Anais eletrônicos [...]** Petrolina: Embrapa Semiárido, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1108631/SDC287.pdf>. Acesso em: 16 março 2023.

GOERL, R. F.; KOBAYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 16., 2005, João Pessoa. **Anais eletrônicos [...]** Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2005. Disponível em: http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005_inundacoes.pdf. Acesso em: 18 março 2023.

GOERL, R. F.; MICHEL, G. P.; KOBAYAMA, M. Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo hand e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 69, n. 1, p. 61-69, 2017. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revista-brasileiracartografia/article/view/44032>. Acesso em: 13 abril 2023.

GOERL, R. F.; PELLERIN, J. R. G. M.; KOBAYAMA, M. Mapeamento de vulnerabilidade no Município de Rio Negrinho – SC: uma proposta metodológica. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 12, n. 40, p. 205-211, 2011. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/16405/9173>. Acesso em: 10 março 2023.

GRIBBIN, J. E. **Introdução a Hidráulica, Hidrologia e Gestão de Águas Pluviais**. 4. ed. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2014. Disponível em: <https://app.minha-biblioteca.com.br/#/books/9788522116355/>. Acesso em: 03 abril 2023.

HERRMANN, M. L. P. **Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina: Período de 1980-2010**. 2. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Daniel-Borini-Alves/publication/282668558_Geada/links/5617bb5d08ae353151bb11bd/Geada.pdf. Acesso em: 05 maio 2023.

HUFF, F. A. **Time distributions of heavy rainstorms in Illinois**. 1. ed. Illinois: State Water Survey Division, 2010. Disponível em: <https://www.isws.illinois.edu/pubdoc/C/ISWSC-173.pdf>. Acesso em: 10 outubro 2023.

IBGE. **Cidades: Rio Negrinho**. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/rio-negrinho/panorama>. Acesso em: 10 março 2023.

INNOCENTE, C.; CHAFFE, P. L. B.; MOTA, A. A.; GRISON, F.; KOBAYAMA, M. Análise do tempo de concentração em quatro bacias experimentais. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 12., 2016, Florianópolis. **Anais eletrônicos [...]** Florianópolis: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2016. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/60/PAP021962.pdf>. Acesso em: 18 março 2023.

JÚNIOR, A. R. B. **Elementos de hidrologia aplicada**. 1. ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 2022. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786555060812/>. Acesso em: 19 abril 2023.

JÚNIOR, J. E. F.; BOTELHO, R. G. M. Análise comparativa do tempo de concentração: um estudo de caso na bacia do Rio Cônego, município de Nova Friburgo, Rio de Janeiro. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., 2011, Maceió. **Anais eletrônicos [...]** Maceió: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011. Disponível em: <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=10916>. Acesso em: 17 março 2023.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift, Stuttgart**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006. Disponível em: https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Paper_2006.pdf. Acesso em: 17 março 2023.

LOPES, E. C.; SILVA, H. H. S.; SILVA, M. N.; LOPES, M. A.; SILVA, R. R. Os potenciais impactos gerados por enchentes e inundações: possíveis alternativas para minimização desses eventos sobre as estruturas da cidade de Jacobina-BA. **Ages**, Jacobina, [S.l.], 2022. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/25498>. Acesso em: 10 março 2023.

MALHEIROS, Caroline. **Mapeamento das áreas de inundação na sub-bacia do Rio Águas Vermelhas na cidade de Joinville**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Infraestrutura) – Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/188170>. Acesso em: 25 abril 2023.

MALUTTA, S.; KOBAYAMA, M. Análise do período de retorno das últimas inundações na bacia hidrográfica do rio negrinho – SC, Brasil. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., 2011, Maceió. **Anais eletrônicos [...]** Maceió: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011. Disponível em: <https://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/SBRH/Malutta%28SBRH%29.pdf>. Acesso em: 17 março 2023.

MEIRELLES, M. S. P.; CAMARA, G; ALMEIDA, C. M. de. **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. 1. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em recursos hídricos – princípios, integração e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH, 2001.

MIRANDA, R. A. C.; OLIVEIRA, M. V. S.; SILVA, D. F. Ciclo hidrológico planetário: abordagens e conceitos. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, v. 1, n. 21, p.109-119, 2010. Disponível em: <https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/down1461/1226>. Acesso em: 24 março 2023.

MONTE, B. E. O.; COSTA, D. D.; CHAVES, M. B.; MAGALHÃES, L. de O.; UVO, C. B. Modelagem hidrológica e hidráulica aplicada ao mapeamento de áreas inundáveis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 1, p. 152-167, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbrh/v21n1/2318-0331-rbrh-21-1-152.pdf>. Acesso em: 22 março 2023.

MONTEIRO, L. R.; FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; SCHETTINI, E. B. C. Simulação da onda superficial provocada pelo fechamento de comportas utilizando uma aproximação inercial da Equação de Saint-Venant. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 927-936, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/226130>. Acesso em: 13 março 2023.

MONTEIRO, L. R.; KOBAYAMA, M. Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 13-25, 2014. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/S>

GCv3/publicacao.php?PUB=2&ID=163&SUMARIO=4366. Acesso em: 20 março 2023.

MONTEIRO, L. R.; VANELLI, F. M.; DUARTE, B. C. **Mapeamento de risco à inundação da área urbana de Rio Negrinho e avaliação de ações prioritárias**. 1. ed. Joinville: [S.I.], 2023.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022169470902556>. Acesso em: 29 abril 2023.

NATIONAL DISASTER EDUCATION COALITION. **Talking about disaster: Guide for standard messages**. 1. ed. National Disaster Education Coalition, 2004. Disponível em: <http://lib.riskreductionafrica.org/bitstream/handle/23456789/1159/talking%20about%20disaster%20guide%20for%20standard%20messages.%202004.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 13 março 2023.

PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JR, V. P. da; MASSIGNAM, A. M., PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F.V. **Atlas climatológico digital do Estado de Santa Catarina**. 1. ed. Florianópolis: Epagri, 2002.

PEREIRA, R. S.; TUCCI, C. E. M. Modelo matemático baseado nas equações de águas rasas para solução de problemas tridimensionais. Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, [S.I.], 2006, Rio Grande. **Anais eletrônicos [...]** Rio Grande: Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica, 2006. Disponível em: <https://semengo.furg.br/images/2006/34.pdf>. Acesso em: 22 março 2023.

PIMENTEL, L. **Hidrologia – Engenharia e Meio Ambiente**. 1. ed. [S.I.]: Editora GEN LTC, 2015. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155510/>. Acesso em: 19 abril 2023.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia básica**. 18. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda., 1976.

QGIS. **Geographic Information System**, 2021. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/. Acesso em: 17 maio 2023.

SANTOS, K. A. dos. **Utilização de modelo hidrodinâmico para mapeamento de áreas inundáveis**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015. Disponível em: <https://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tede/5155>. Acesso em: 25 abril 2023.

SCHIAVETTI, A.; CAMARGO, A. F. M. **Conceitos de Bacias Hidrográficas: Teorias e Aplicações**. [S.l.], Ilhéus: Editora da UESC, 2002. Disponível em: http://www.uesc.br/editora/livrosdigitais2015/conceitos_de_bacias.pdf. Acesso em: 21 março 2023.

SDS/SC. **Sistema de Informação Geográfica**, 2021. Disponível em: <http://sigsc.sc.gov.br/>. Acesso em: 15 abril 2023.

SILVEIRA, A. L. L. da. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, [S. l.], v. 10, n. 1, p. 5-23, 2005. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=1&ID=29&SUMARIO=896>. Acesso em: 10 março 2023.

SILVEIRA, W. N.; KOBAYAMA, M.; GOERL, R. F.; BRANDENBURG, B. **História das inundações em Joinville 1851 – 2008**. 1. ed. Curitiba: Organic Trading, 2009.

SonTek. **FlowTracker Technical Manual**, 2007. Disponível em: https://www.uvm.edu/bwrl/lab_docs/manuals/Flow_Tracker_Manual.pdf. Acesso em: 27 maio 2023.

STEIN, R. T. et al. **Hidrologia e Drenagem**. [S.l.], Porto Alegre: Grupo A, 2022. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556902760/>. Acesso em: 19 abril 2023.

TASCA, F. A.; SOUZA, D. P. de; NAU, D.; S, G.; MARTINS, M. M. **Inundação Gradual**. 2. ed. Florianópolis: CEPED/UFSC, 2010. Disponível em:

https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2012/01/AMAZONAS_mioloWEB.pdf. Acesso em: 03 maio 2023.

TOMPOROSKI, A. A. et al. **Rio Negrinho em dados socioeconômicos – 2019/2020**. Mafra: Editora UnC, 2020. Disponível em: https://uni-contestado-site.s3.amazonaws.com/site/biblioteca/ebook/Rio_Negrinho_em_dados_socioeconomicos.pdf. Acesso em: 19 março 2023.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1993.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2005.

TYAGI, J. V.; MISHRA, S. K.; SINGH, R.; SINGH, V. P. SCS-CN based time-distributed sediment yield model. **Journal Of Hydrology**, Amsterdam, v. 352, n. 4, p. 388-403, 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169408000656>. Acesso em: 10 março 2023.

UNISDR. **Terminology on Disaster Risk Reduction**. 1. ed. Geneva: United Nations International Strategy for Disaster Reduction, 2009. Disponível em: https://www.preventionweb.net/files/7817_UNISDRTerminologyEnglish.pdf?_gl=1*1t8i9rf*_ga*MTA2Mjc2OTg5NS4xNjk4MDYyNjgz*_ga_D8G5WXP6YM*MTY5ODA2MjY5My4xLjAuMTY5ODA2MjY5My4wLjAuMA. Acesso em: 10 abril 2023.

URBANI, G.; GRACIOSA, M.; BRAMBILA, M. Delimitação de manchas de inundação na Bacia do Córrego do Ipiranga, São Paulo – SP, Brasil, com modelagem hidrológico-hidráulica. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, [S.l.], v. 20, n. 1, p. 13-34, 2023. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/OJS/index.php/REGA/article/view/740>. Acesso em: 10 março 2023.

USACE. HEC-HMS - User's Manual, 2023. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>. Acesso em: 30 abril 2023.

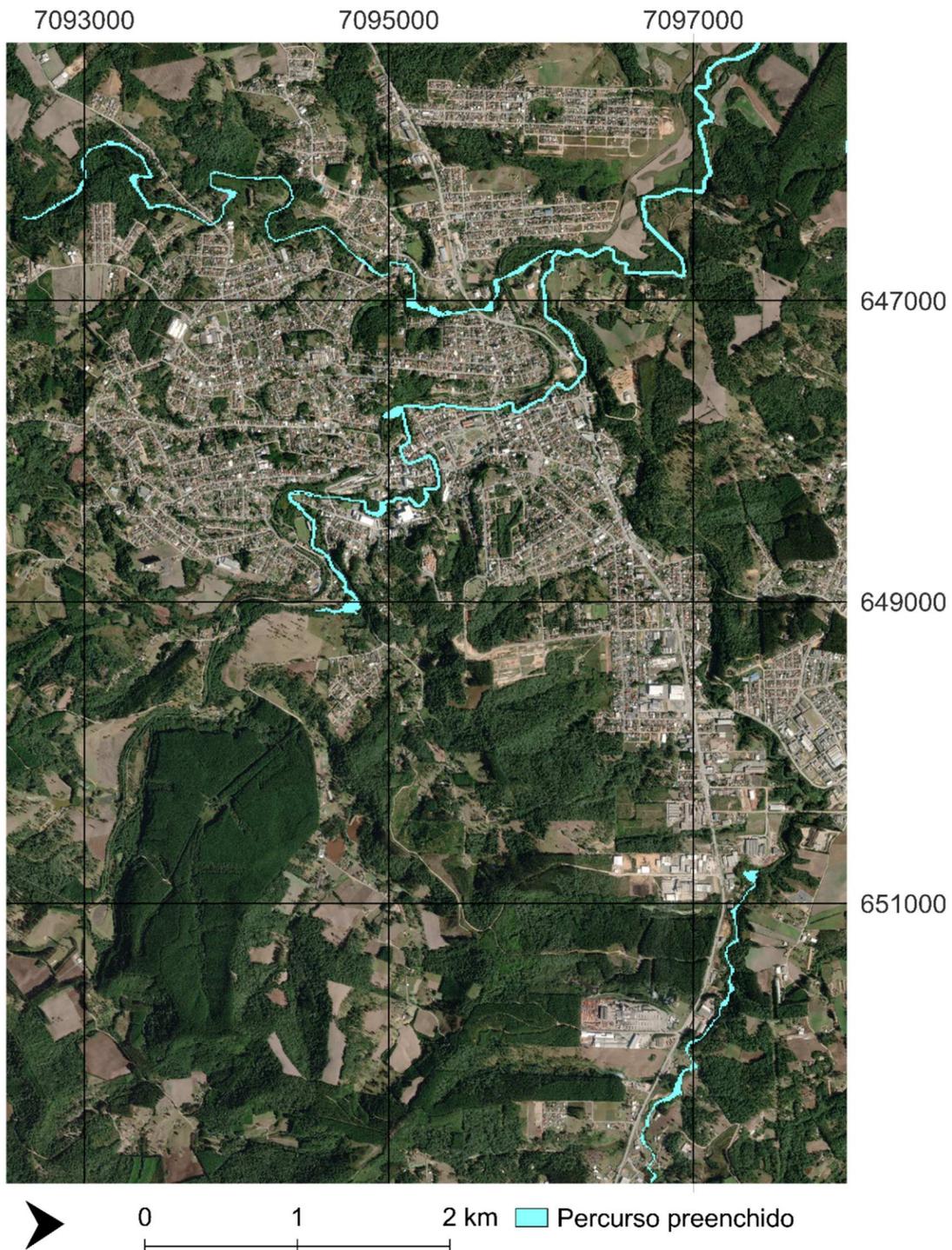
USACE. HEC-RAS - User's Manual, 2023. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>. Acesso em: 30 abril 2023.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

WILDERER, Peter. **Treatise on Water Science**. 1. ed. Amsterdam: Elsevier Science, 2011.

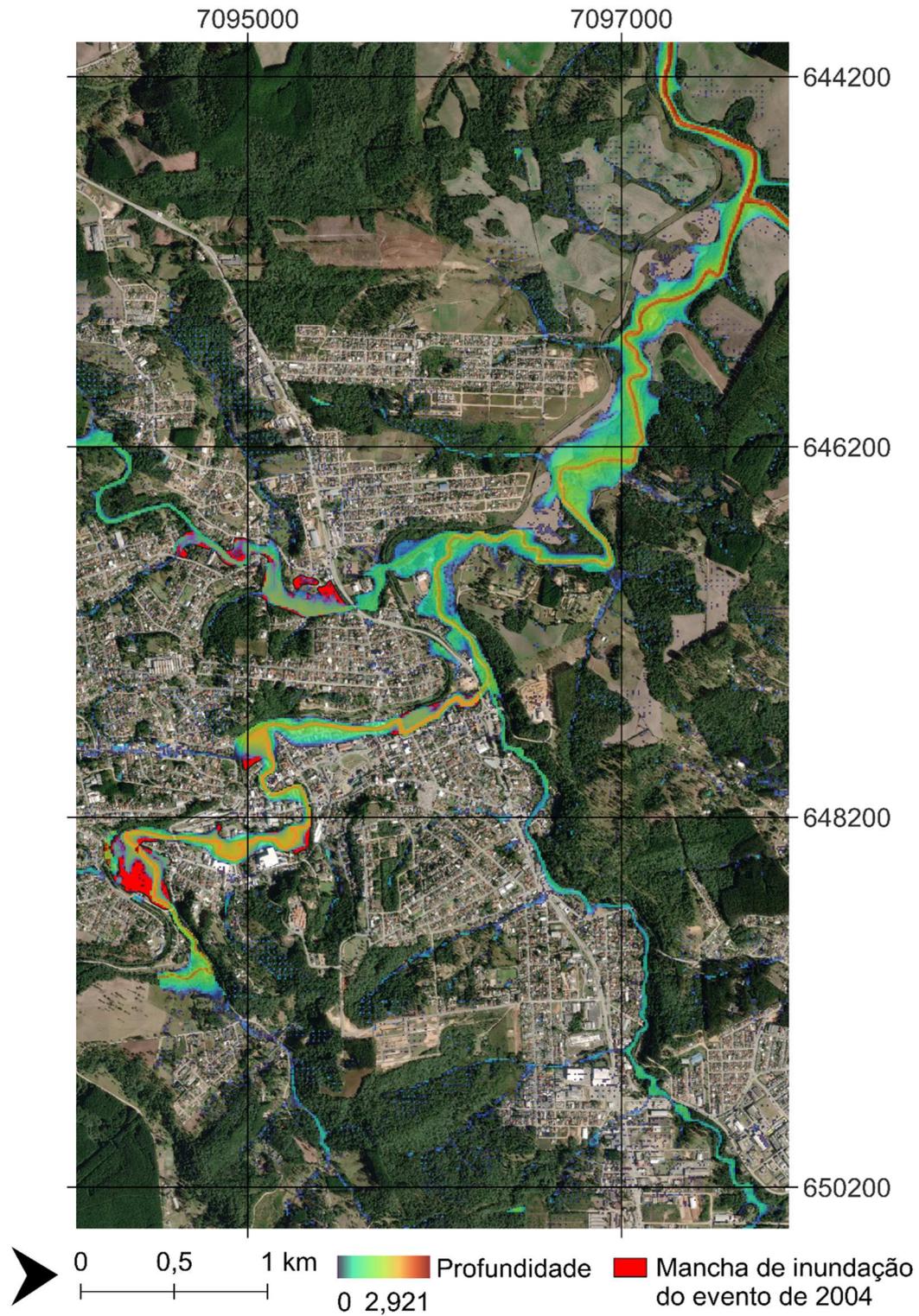
APÊNDICE A – RESULTADOS DOS MAPEAMENTOS

Figura 18 – Resultado da mancha de escoamento base C0.



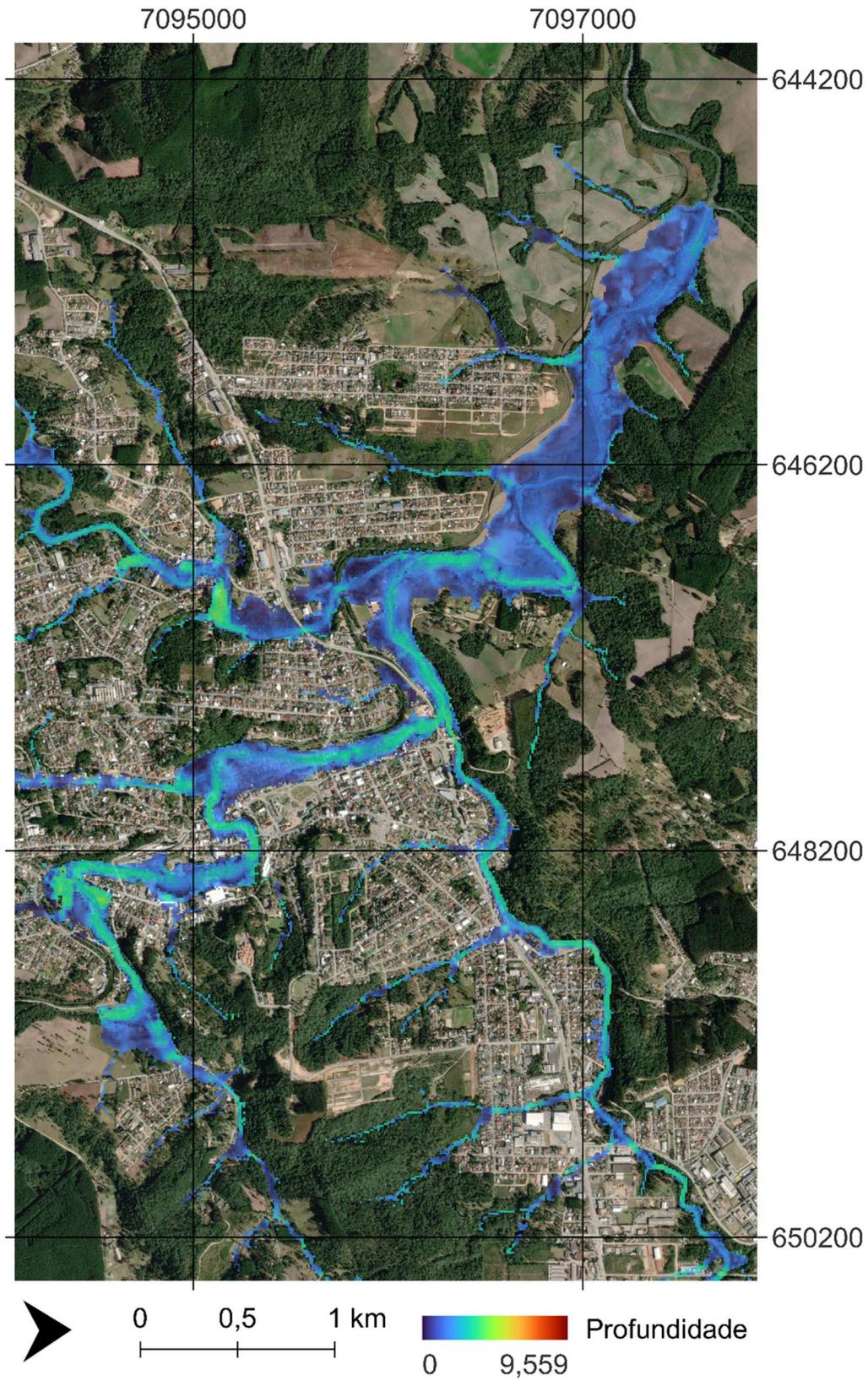
Fonte: A autora (2023).

Figura 19 – Resultado da mancha de validação C1.



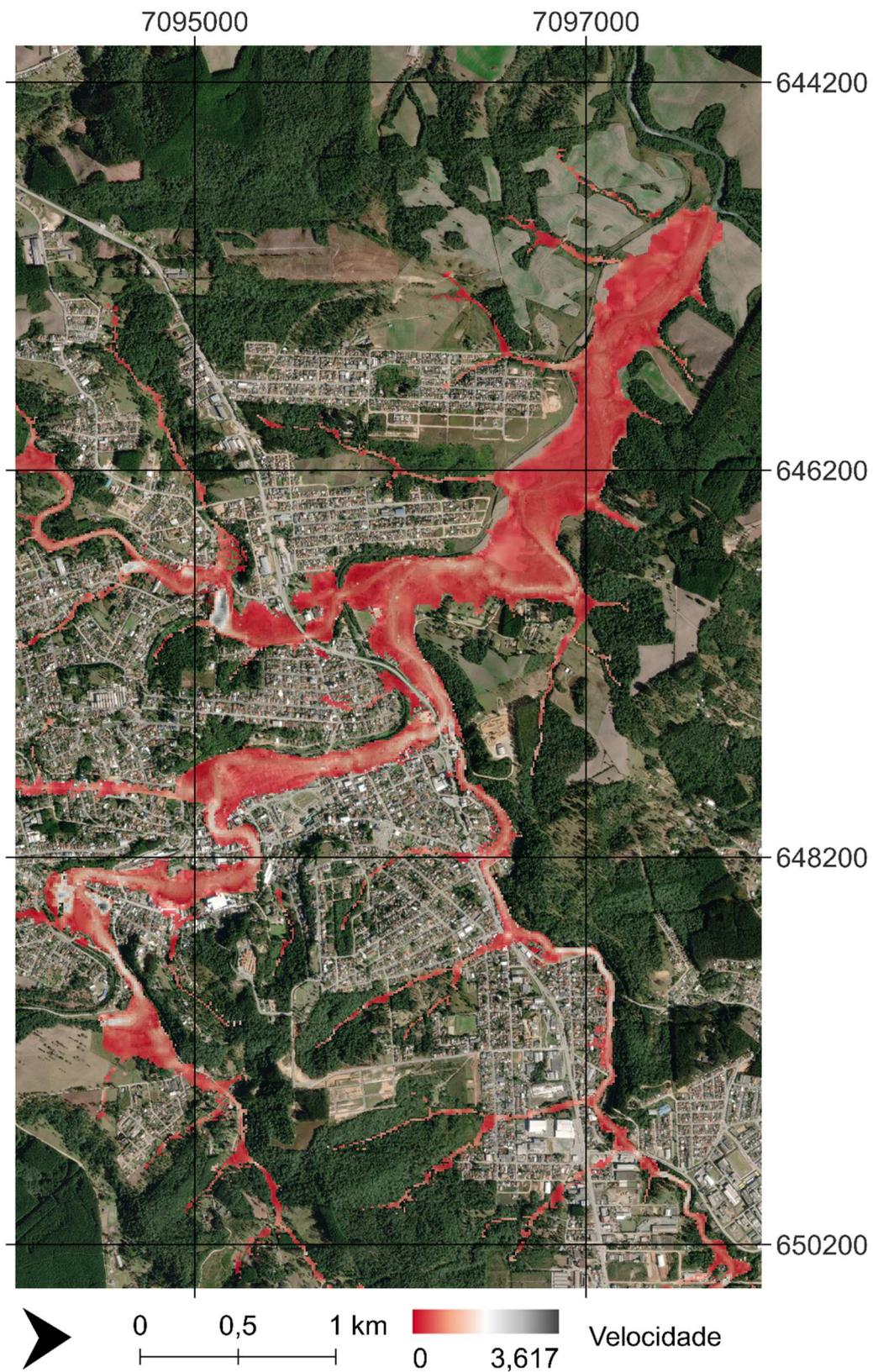
Fonte: A autora (2023).

Figura 20 – Resultado da profundidade de C2.



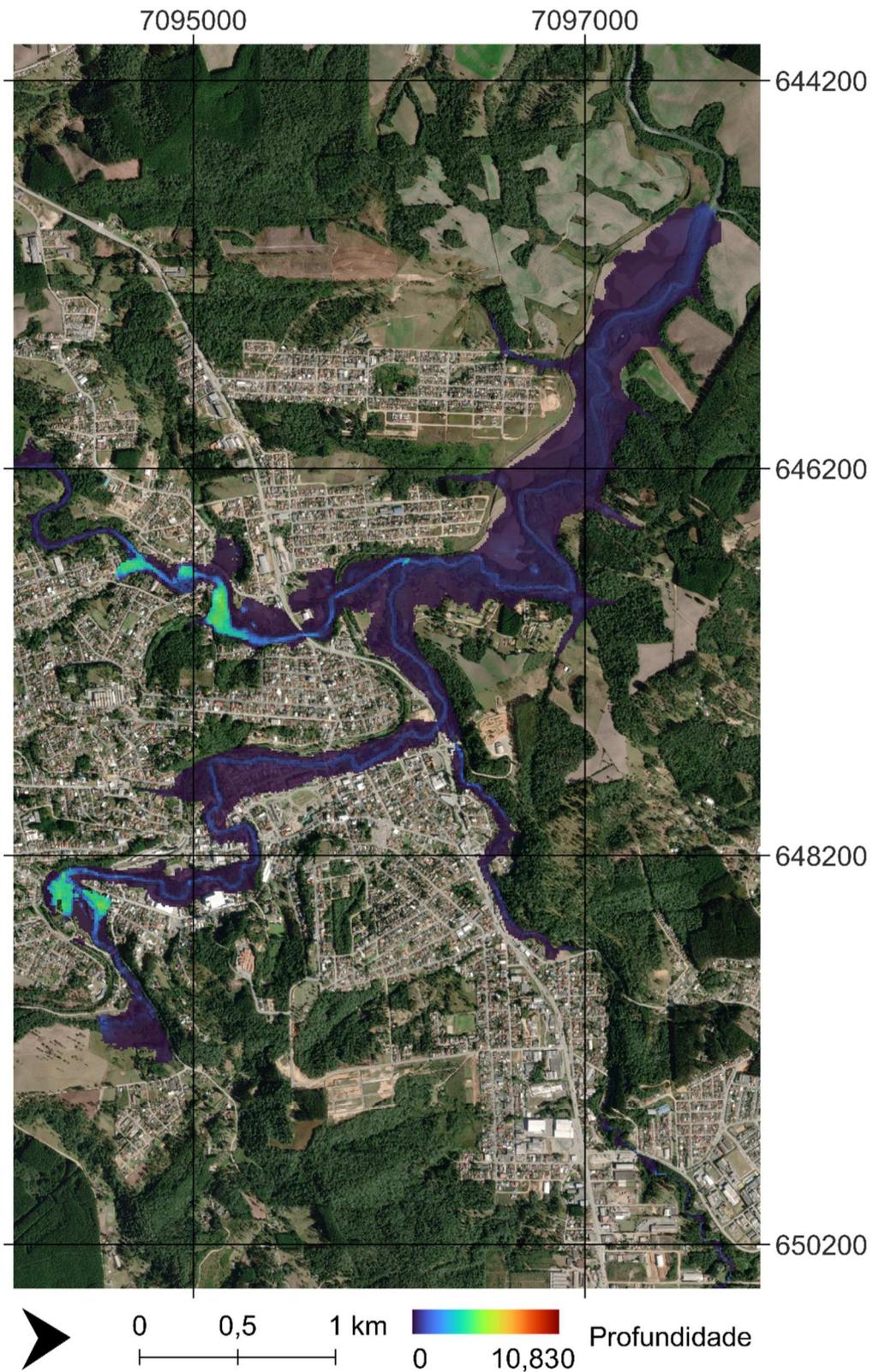
Fonte: A autora (2023).

Figura 21 – Resultado da velocidade de C2.



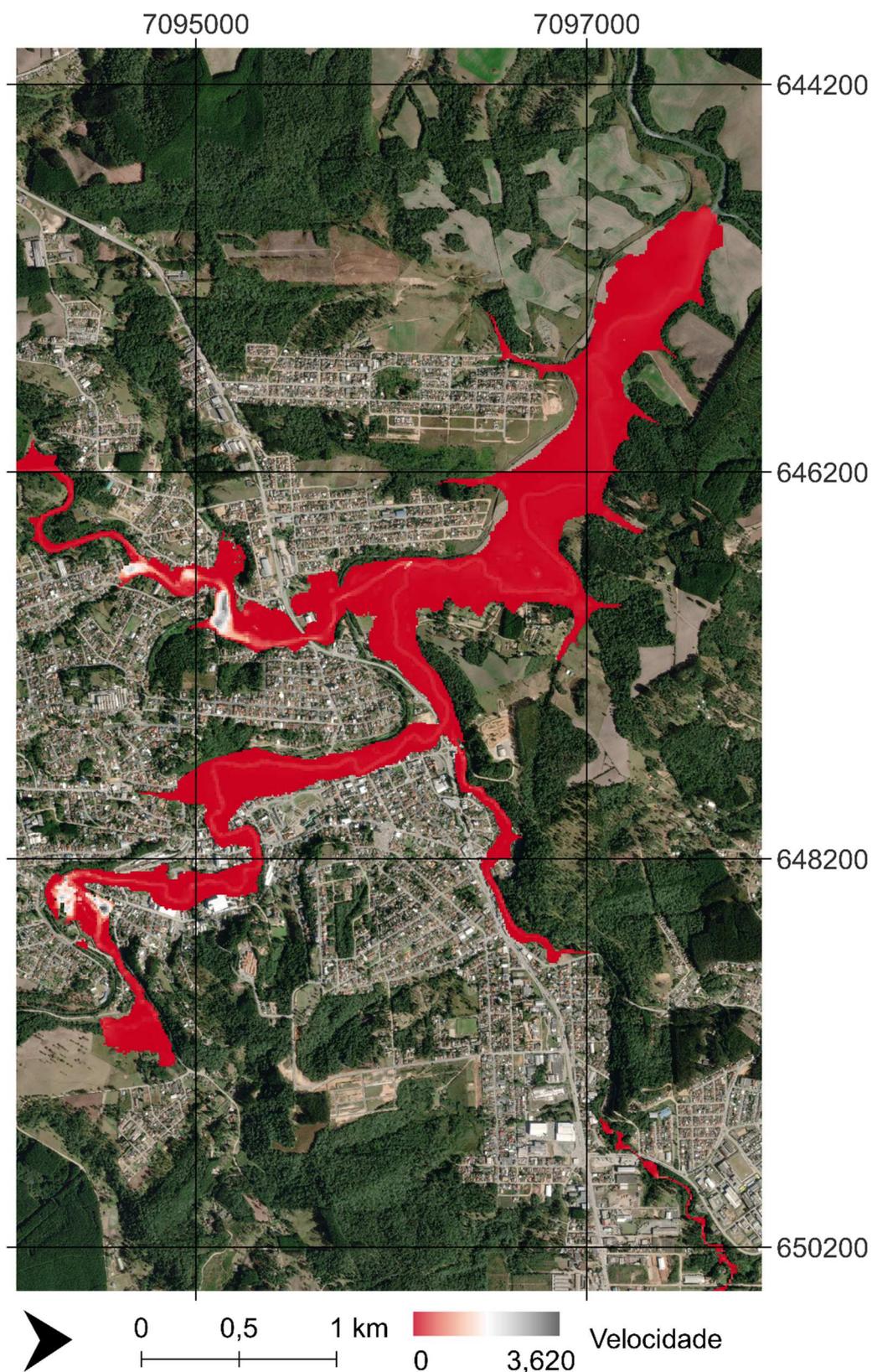
Fonte: A autora (2023).

Figura 22 – Resultado da profundidade de C3.



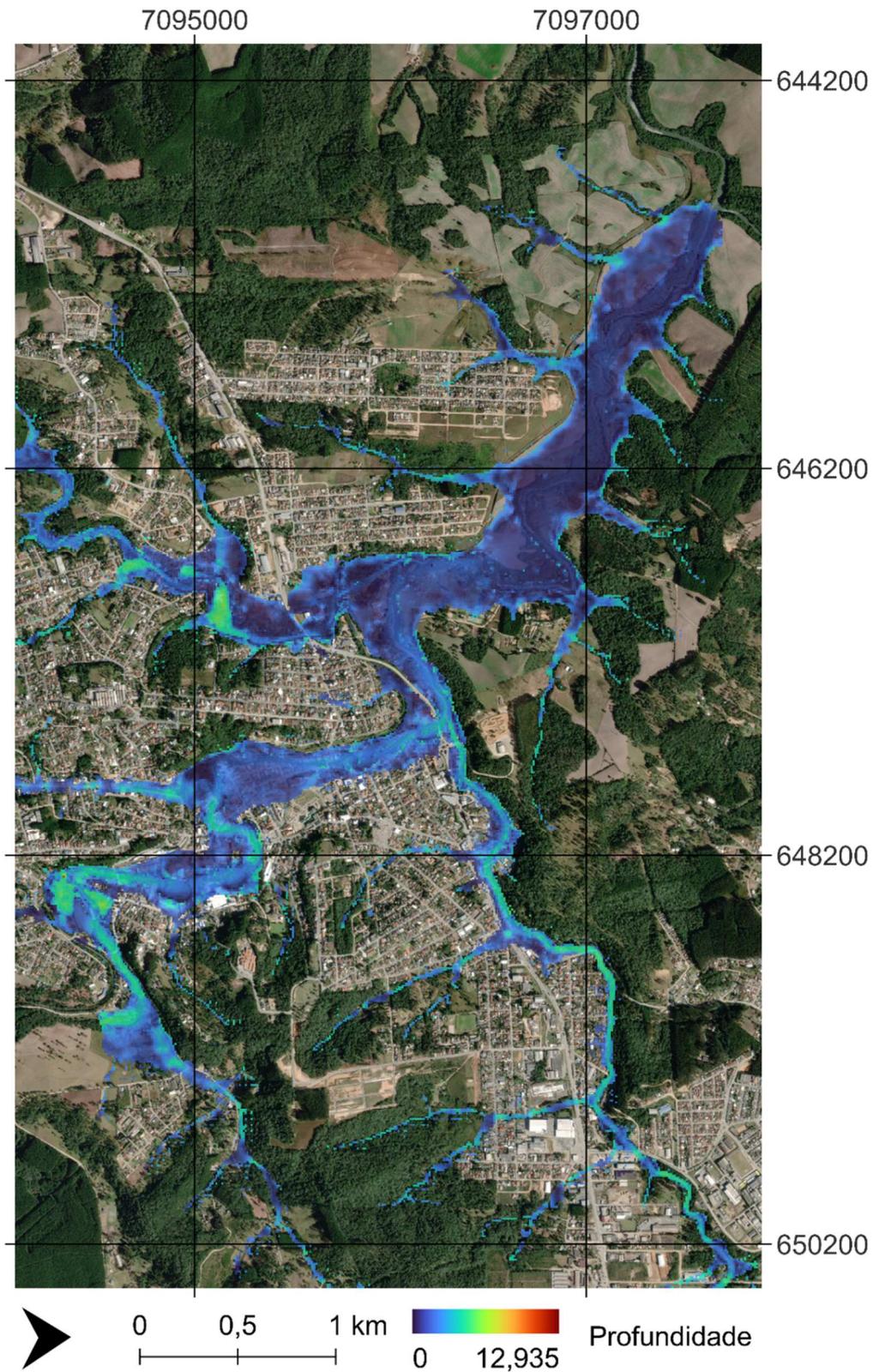
Fonte: A autora (2023).

Figura 23 – Resultado da velocidade de C3.



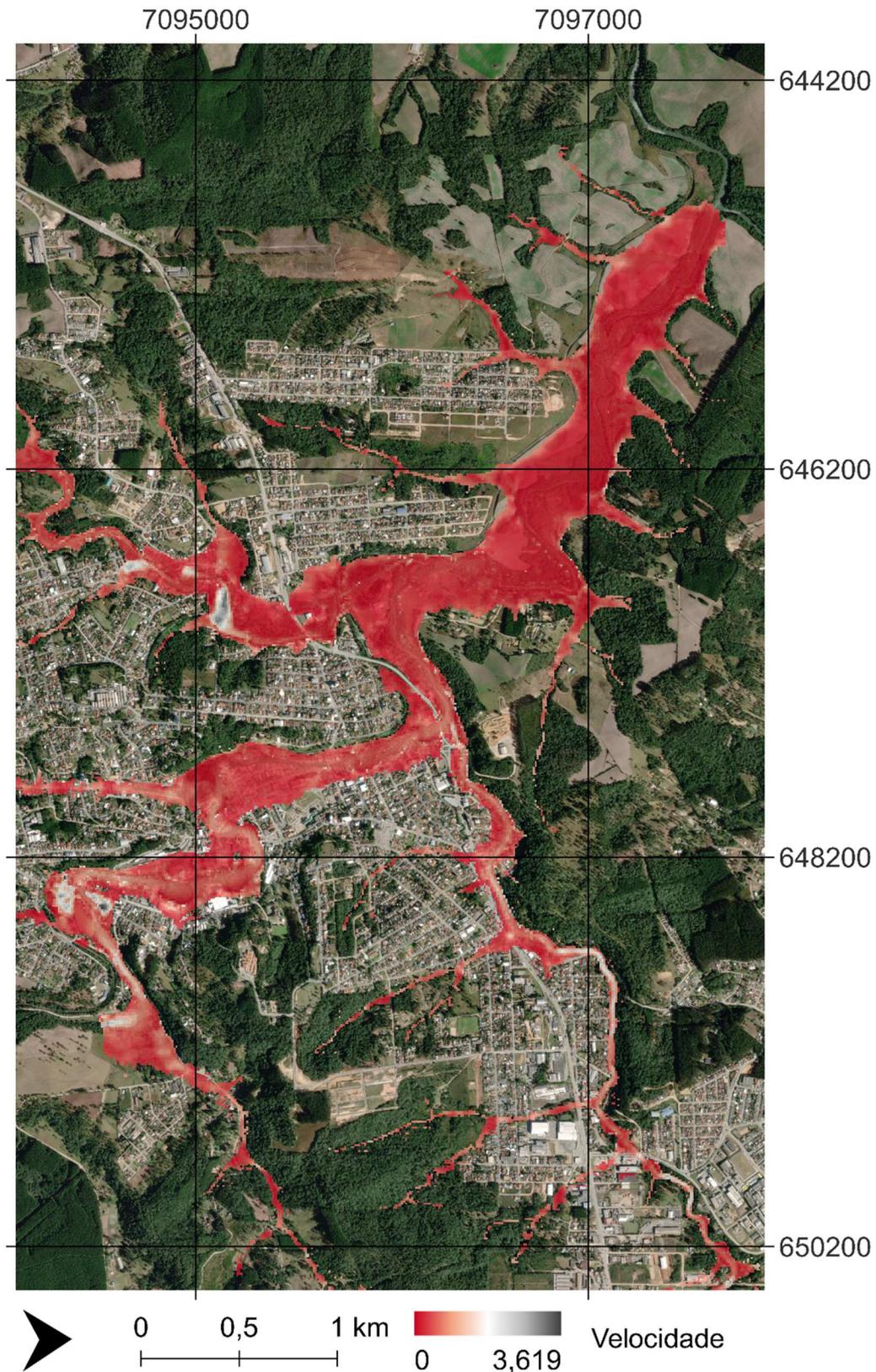
Fonte: A autora (2023).

Figura 24 – Resultado da profundidade de C4.



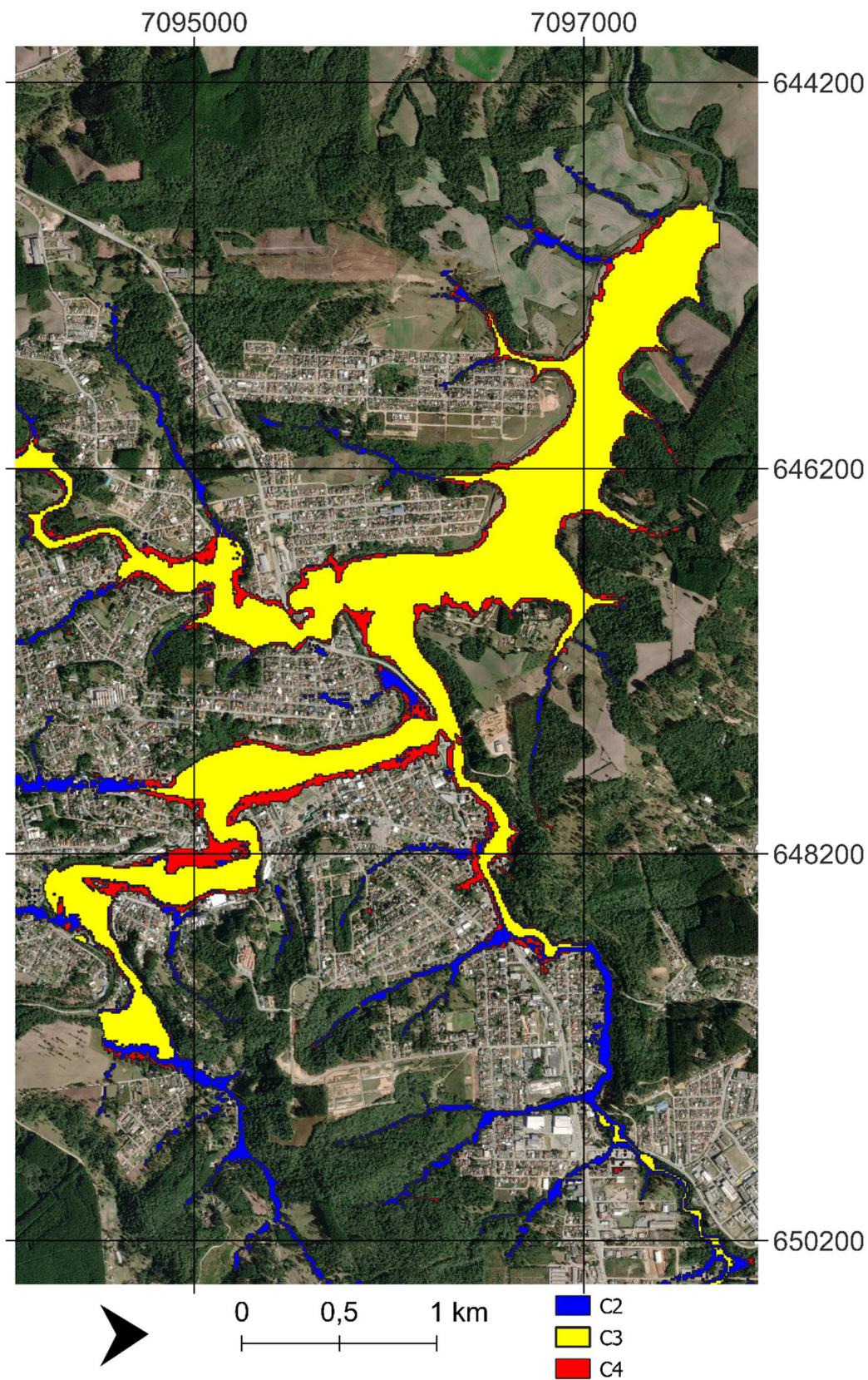
Fonte: A autora (2023).

Figura 25 – Resultado da velocidade de C4.



Fonte: A autora (2023).

Figura 26 – Sobreposição dos resultados.



Fonte: A autora (2023).