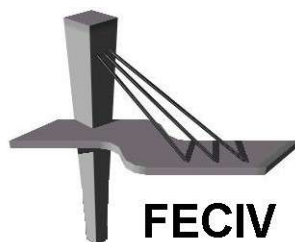


DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS VULNERÁVEIS AS  
ENCHENTES E INUNDAÇÕES EM ÁREAS  
URBANAS ATRAVÉS DE MODELOS  
TOPOGRÁFICOS E HIDRÁULICOS**

**PATRÍCIA ANTUNES DOS REIS**

**UBERLÂNDIA, 26 DE JUNHO DE 2015**



**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



**Patrícia Antunes dos Reis**

**IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS VULNERÁVEIS AS  
ENCHENTES E INUNDAÇÕES EM ÁREAS URBANAS  
ATRAVÉS DE MODELOS TOPOGRÁFICOS E  
HIDRÁULICOS**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos  
requisitos para a obtenção do título de **Mestre em**  
**Engenharia Civil**.

**Orientador: Prof. Dr. Márcio Augusto Reolon Schmidt**

Uberlândia, 26 de junho de 2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

S354i  
2015      Reis, Patrícia Antunes dos, 1981-  
            Identificação de áreas vulneráveis as enchentes e inundações em  
            áreas urbanas através de modelos topográficos e hidráulicos / Patrícia  
            Antunes dos Reis. - 2015.  
            25 f. : il.

            Orientador: Márcio Augusto Reolon Schmidt.  
            Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
            Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.  
            Inclui bibliografia.

            1. Engenharia civil - Teses. 2. Geotecnologia ambiental - Teses. 3.  
            Inundações - Teses. 4. Sistemas de Informação Geográfica - Teses. I.  
            Schmidt, Márcio Augusto Reolon. II. Universidade Federal de  
            Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III.  
            Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL



## ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**ATA Nº:** 147/2015

**CANDIDATO:** Patrícia Antunes dos Reis

**Nº. Matrícula:** 11312ECV013

**ORIENTADOR:** Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt

**TÍTULO:** "Identificação de áreas vulneráveis as enchentes e inundações em áreas urbanas através de modelos topográficos e hidráulicos"

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:** Engenharia Urbana, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

**LINHA DE PESQUISA:** Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental

**DATA DA DEFESA:** 13 de agosto de 2015

**LOCAL:** Sala de webconferência 03, bloco 5M.

**HORÁRIO DE INÍCIO E TÉRMINO DA DEFESA:** 09h00 às 12h03

Após avaliação do documento escrito, da exposição oral e das respostas às arguições, os membros da Banca Examinadora decidem que o candidato foi:

☒ APROVADO

☐ REPROVADO

OBS:

Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que está assinada pelos membros da Banca:

Professor Orientador: **Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt – FECIV/UFU**

Membro externo: **Prof.ª Dr.ª Luciene Stamato Delazari – PPGCG/UFPR**

Membro interno: **Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho – FECIV/UFU**

Uberlândia, 13 de agosto de 2015.

Dedico esta pesquisa à Deus, por conduzir minha vida.

À todos que me incentivaram e influenciaram na  
conquista dos meus conhecimentos.

# AGRADECIMENTOS

---

À Deus, primeiramente, por ser a luz em meu caminho, guiando e orientando cada passo nos momentos bons e difíceis vivenciados na vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcio Augusto Reolon Schmidt a quem tenho imensa admiração, pela sabedoria, humildade e atenção sempre, pela amizade, paciência e conselhos positivos e de grande incentivo que serão lembrados a vida toda.

Aos meus pais Josias e Vani, pelo amor incondicional, apoio e confiança diária. Aos meus irmãos Kennia, Aleandro, Érica, Reinaldo, e sobrinhos Amanda, Gabriel, Arthur e Lavínia, pelo carinho, ideias e a compreensão nos momentos de impaciência. Agradeço a esta família linda que me concedeu a vida e consiste em minha base para seguir em frente.

Aos meus grandes amigos iluminados Emiliano e Jaciane, por estarem sempre presentes, pela diversão constante, pelas viagens, pela compreensão, carinho e respeito. Juntos vivemos momentos inesquecíveis e construímos uma amizade sincera para durar muito além da vida.

À minha irmã de alma Aline Jamira, por tanto amor compartilhado nos diversos momentos, pelas dúvidas, soluções, ajudas de SIG e principalmente pela diversão e as orações partilhadas.

À querida Aline Martins e Larissa, pela companhia de sempre alegrando os momentos de descontração na UFU.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio financeiro e à Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Civil, por fornecer o apoio necessário para realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. José Eduardo Alamy Filho e Prof. Dr. Carlos Eugênio, pelos conselhos e pela prestatividade durante o mestrado.

À amiga Prof. Ms. Marisa Diniz Machado, minha sempre orientadora e incentivadora nas pesquisas.

Aos colegas Ademar Neto, Jorge Luiz e Anderson Medeiros pelo apoio, conhecimento compartilhado e soluções dos problemas com os softwares de GIS, sem a ajuda de vocês tenho certeza que muitos dos resultados não seria possível.

Ao Prof. Dr. Marco Hansen, à Prof<sup>a</sup>. Dra. Angélica Tedesco e à Joseline pelas dicas durante a realização do trabalho.

À Prefeitura Municipal de Patrocínio e Departamento Municipal de Água e Esgoto pelas informações cedidas para a pesquisa.

A todos aqueles que contribuíram de forma direta ou indireta na realização deste trabalho.

“Hoje em dia, o ser humano apenas tem ante si três grandes problemas que foram ironicamente provocadas por ele próprio: a superpovoação, o desaparecimento dos recursos naturais e a destruição do meio ambiente. Triunfar sobre estes problemas, vistos sermos nós a sua causa, deveria ser a nossa mais profunda motivação.”

(Jacques Yves Cousteau)



Reis, P. A. *Identificação de áreas vulneráveis as enchentes e inundações em áreas urbanas através de modelos topográficos e hidráulicos*. 125 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.

## RESUMO

---

O desenvolvimento da maioria das cidades brasileiras se deu ao longo dos rios, diante da necessidade de utilização das águas em distintas atividades. As ocupações ocasionaram diversos problemas que atingem diretamente a sociedade, dentre eles as enchentes e inundações urbanas. Uma das razões para tais eventos é que as expansões dos centros urbanos nem sempre são acompanhadas pela implantação de infraestrutura adequada e que é agravada pela não observância das características naturais dos ambientes ocupados. No Brasil, para ordenar as ocupações urbanas, existe o Plano Diretor que estabelece as diretrizes para a ocupação territorial e no qual é sugerido o uso das geotecnologias como ferramentas de análise e simulação, com destaque para o Sistemas de Informação Geográfica (SIG). A pesquisa apresenta a modelagem hidráulica associada a SIG, através da comparação de dois modelos de amplo uso, o HEC-RAS e os algoritmos inseridos no GRASS. Essas simulações de manchas de risco de inundação exigem o conhecimento de diversos dados comuns ao SIG, como modelos de terreno, cotas e curvas de nível, mas também dados históricos de precipitação, vazões de cheias, entre outros parâmetros hidráulicos. Dada a dificuldade de obter tais dados em pequenos municípios, em uma escala de tempo considerável para formar a série histórica, esta pesquisa propõe a avaliação dos modelos indicados que se utilizam de parâmetros topográficos, modelagem hidráulica e uso de SIG, na tentativa de modelar manchas de inundação em uma escala de microrregião, a partir da microbacia do Córrego Rangel, na cidade de Patrocínio, MG. Ao se comparar os produtos observou-se que cada modelo apresenta um resultado particular. A modelagem gerada pelo GRASS no QGIS, por avaliar as características topográficas em toda a dimensão da bacia, integrados aos dados de precipitação e infiltração do solo, detém informações de fluxo e acumulação de toda a bacia, sendo possível avaliar os efeitos da urbanização em toda a área de estudo. O modelo HEC-RAS analisa o sistema delimitado por meio das seções transversais, tendo a simulação restrita à área demarcada pelas seções e parâmetros construtivos. Com o estudo foi possível a criação dos mapas de riscos a enchentes e inundações na bacia do Córrego Rangel, composto por diferentes formas, a localização e profundidade das manchas de ocupação das águas em eventos intensos de chuva, o que evidencia a unificação e uso integrado dos dois modelos apresentados, nas tomadas de decisão.

**Palavras-chave:** Geotecnologias - Enchentes - Expansão Urbana - Modelagem hidráulica - Simulação

REIS, P. A. *Identification of vulnerable areas the floods and floods in urban areas through topographical and hydraulic models*. 125 pp. MSc Dissertation, College of Civil Engineering, Federal University of Uberlândia, 2015.

## ABSTRACT

---

The development of most Brazilian cities occurred along rivers, on the need to use water in different activities. The occupations have been causing several problems that directly affect society, including urban flooding. One reason for these events is that the expansion of urban centers are not always follow by the implementation of an appropriate infrastructure which is aggravated by the inobservance of the natural characteristics of occupied environments. In Brazil, the urban occupations should follow a Master Plan defined by municipalities and it establishes guidelines for territorial occupation. In this concerned legislation is suggested the use of geotechnologies as tools for analysis and simulation, especially the Geographic Information Systems (GIS). This research presents the hydraulic modeling associated with GIS, by comparing two models with extensive use, the HEC-RAS and algorithms inserted put into GRASS. These simulations of flooding risk areas require knowledge of several common to GIS data, such as terrain models, dimensions and contours, but also historical precipitation data, water flows, and other hydraulic parameters. Due to the difficulty on obtaining such data in small municipalities in considerable time scale to form the historical series, this research proposes the evaluation of indicated models that use topographic parameters, hydraulic modeling and use of GIS in an attempt to delimitating flooding risk areas on a micro scale, from the Córrego Rangel watershed in the city of Patrocínio, MG. Comparing the product of both models it can be noted that each model provides a particular result. The model generated by GRASS QGIS, for evaluating the topographical characteristics across the watershed, the integrated data of precipitation and soil infiltration holds information flow and accumulation of all basin, it being possible to evaluate the effects of urbanization across the study area. The HEC-RAS model analyzes the system defined by the cross sections, and the simulation restricted area demarcated by sections and constructive parameters. With the study it was possible the creation of risk maps floods and floods in the Ribeirão Rangel basin, composed of different ways the location and depth of the occupying spots of water in intense rainfall events, highlighting the integrated unification and use the integrated of two models presented in decision making.

**Keywords:** Geotechnology; Urban Floodings; Hydraulic Simulation

# SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

---

## SÍMBOLOS

<i>Aw</i>	- Clima do tipo tropical de altitude
$\phi$	- Coeficiente de retardamento
<i>CN</i>	- Curva Número
<i>C</i>	- Coeficiente de escoamento superficial
<i>cm</i>	- Centímetro
cota <i>Z</i>	- Cota altimétrica
<i>H</i>	- Altura
<i>h</i>	- hora
<i>i</i>	- Intensidade média máxima de precipitação
<i>km</i>	- quilômetro
<i>Km</i> <sup>2</sup>	- Quilômetro quadrado
<i>I</i>	- Intensidade média máxima de precipitação
<i>L</i>	- Comprimento
<i>m</i>	- Metro
<i>m</i> <sup>2</sup>	- Metro quadrado
<i>m</i> <sup>3</sup> / <i>s</i>	- Metro cúbico por segundo
<i>min</i>	- minuto
<i>mm</i>	- milímetro
<i>mm/ano</i>	- Milímetro por ano
<i>n</i>	- Coeficiente de Manning
<i>.prj</i>	- Arquivo de texto que descreve sistema de coordenadas/projeção
<i>Q</i>	- Vazão máxima de escoamento superficial
<i>tc</i>	- Tempo de retorno
<i>T</i>	- Tempo de duração da chuva
<sup>0</sup> C	- Grau Celsius
%	- Porcentagem
<i>S</i>	- Potencial máximo de retenção
$\Delta t$	- intervalo de tempo

## ABREVIATURAS

<i>Aw</i>	- Clima do tipo tropical de altitude
$\varphi$	- Coeficiente de retardamento
<i>CN</i>	- Curva Número
<i>C</i>	- Coeficiente de escoamento superficial
<i>cm</i>	- Centímetro
<i>cota Z</i>	- Cota altimétrica
<i>H</i>	- Altura
<i>h</i>	- Hora
<i>i</i>	- Intensidade média máxima de precipitação
<i>km</i>	- Quilômetro
<i>Km<sup>2</sup></i>	- Quilômetro quadrado
<i>I</i>	- Intensidade média máxima de precipitação
<i>L</i>	- Comprimento
<i>m</i>	- Metro
<i>m<sup>2</sup></i>	- Metro quadrado
<i>m<sup>3</sup>/s</i>	- Metro cúbico por segundo
<i>min</i>	- Minuto
<i>mm</i>	- Milímetro
<i>mm/ano</i>	- Milímetro por ano
<i>n</i>	- Coeficiente de Manning
<i>.prj</i>	- Arquivo de texto que descreve sistema de coordenadas/projeção
<i>Q</i>	- Vazão máxima de escoamento superficial
<i>tc</i>	- Tempo de retorno
<i>T</i>	- Tempo de duração da chuva
<i>°C</i>	- Grau Celsius
<i>%</i>	- Porcentagem
<i>S</i>	- Potencial máximo de retenção
<i>Δt</i>	- Intervalo de tempo

## SIGLAS

AMC	- Metodologia de Análise de Multicritério
-----	---

API	- Application Programming Interface
CEIWR-HEC	- Hydrologic Engineering Center
CSIRO	- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
D8	- Deterministic – 8 Node
DLR	- German Aerospace Center
Embrapa	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
GRASS	- Geographic Resources Analysis Support System
HEC-RAS	- Hydrologic Engineering Center's River Analysis System
HUSB	- Hidrograma Urbano de Santa Bárbara
IBGE	- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISDR	- International Strategy For Disaster Reduction
MDT	- Modelo Digital de Terreno
MDTHC	- Modelo Digital de Terreno Hidrologicamente Correto
NASA	- National Aeronautics and Space Administration
NOAA	- National Oceanic and Atmospheric Administration
ONU	- Organização das Nações Unidas
PD	- Plano Diretor
QGIS	- Software QuantumGis
QDF	- Quantidade/Duração/Frequência
SAD69	- South American Datum 1969
SI	- Sistema Internacional
SIG	- Sistema de Informações Geográficas
SGBD	- Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados
URH	- Unidades de Resposta Hidrológica
USACE	- U. S. Army Corps of Engineers
UTM	- Universal Transversa de Mercator
TIN	- Grade Irregular Triangular
USGS	- Serviço Geológico dos Estados Unidos
URH	- Unidades de Resposta Hidrológica
USACE	- U. S. Army Corps of Engineers
USDA	- United States Department of Agriculture
ZEE	- Zoneamento Econômico Ecológico

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

---

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ordem de uma rede de drenagem segundo classificação de Strahler. ....	34
Figura 2: Representação do Método D8.....	35
Figura 3: Malha de fluxo de acumulação. ....	35
Figura 4: Álgebra de mapas.....	37
Figura 5: Processo de reclassificação. ....	38
Figura 6: Mapa de localização do município de Patrocínio, MG. ....	52
Figura 7: Mapa de localização da área de estudo na cidade de Patrocínio, MG. ....	53
Figura 8: Mapa da hidrografia da cidade de Patrocínio, MG. ....	55
Figura 9: (a; b) Ocupação da área de entorno do curso fluvial canalizado, Patrocínio, MG. .....	56
Figura 10: (a; b; c) Inundações identificadas na bacia do Córrego Rangel, ao longo da Avenida Dom José André Coimbra. ....	57
Figura 11: (a; b; c; d) Danos causados pelas enchentes e inundações ao longo da Avenida Dom José André Coimbra. ....	58
Figura 12: (a; b) Vista frontal do Horto da Matinha.....	58
Figura 13: Vista superior do Horto da Matinha.....	59
Figura 14: Fluxograma de etapas de processamento. ....	60
Figura 15: Modelo Digital de Terreno Hidrologicamente Correto – MDTHC.....	62
Figura 16: Fluxograma de modelagem .....	64
Figura 17: Etapa de construção das camadas no HEC-GeoRAS.....	65
Figura 18: Fluxograma de construção no HEC-GeoRAS. ....	65
Figura 19: Fluxograma de construção no HEC-GeoRAS. ....	66
Figura 20: Procedimento de exportação dos arquivos no HEC-GeoRAS.....	67
Figura 21: Janela de apresentação das geometrias no HEC-RAS. ....	68
Figura 22: Fluxograma das etapas editadas no QGIS e GRASS.....	71
Figura 23: Fluxograma dos cenários simulados. ....	75
Figura 24: MDT representado em 3D.....	76
Figura 25: Representação do relevo da bacia hidrográfica. ....	78

Figura 26: Morfologia da bacia. ....	79
Figura 27: Perfis topográficos adjacentes ao Córrego Rangel, construído no HEC-RAS. ....	80
Figura 28: Representação no HEC-geoRAS (ArcGis). ....	81
Figura 29: Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do Córrego Rangel. ....	86
Figura 30: (a) Hietograma e (b) hidrograma de projeto resultante dos picos de vazão de 103,227 m <sup>3</sup> /s. (c) Hietograma e (d) hidrograma de projeto resultante dos picos de vazão de 79,23 m <sup>3</sup> /s. ....	87
Figura 31: Curvas de 1 metro combinadas com seções transversais com espaçamentos de 100 metros. ....	89
Figura 32: Curvas de nível com equidistâncias de 1 metros combinadas com seções transversais espaçadas de 100 metros, simuladas com a vazão de teste. ....	90
Figura 33: (a) Curvas de nível com equidistâncias de 1 metro combinadas com seções transversais com espaçamentos de 200 metros. (b) Curvas com equidistâncias de 1 metro combinadas com seções transversais com espaçamentos de 50 metros. ....	91
Figura 34: (a) Curvas de nível com equidistâncias de 10 metros combinadas com seções transversais espaçadas de 100 metros. (b) Curvas de nível com equidistâncias de 5 metros combinadas com seções transversais espaçadas de 100 metros. ....	92
Figura 35: Simulação das inundações no HEC-geoRAS e situação real das ocorrências (I). ....	94
Figura 36: Simulação das inundações no HEC-geoRAS com curvas de 10 metros e situação real das ocorrências (II). ....	95
Figura 37: Fluxo de direção da bacia hidrográfica do Córrego Rangel. ....	96
Figura 38: Fluxo de acumulação da bacia. ....	97
Figura 39: Simulação de inundação com curvas de nível de 1 metro de equidistância. ....	98
Figura 40: Simulação de inundação com curvas de nível de 5 metro de equidistância. ....	99
Figura 41: (a) Simulação de inundação com curvas de 5 metro de equidistância. (b) Simulação de inundação com curvas de 10 metro de equidistância. ....	100
Figura 42: Drenagem criada no GRASS. ....	103
Figura 43: Comparação entre os modelos HEC-RAS e GRASS. ....	106
Figura 44: Pontos de análise dos dois modelos: (a) Simulação no GRASS. (b) Simulação no HEC-geoRAS e HEC-RAS. ....	108
Figura 45: Detalhamento das áreas atingidas pela inundação na bacia do Córrego Rangel, no HEC-RAS. ....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Grupos de solo e características do solo.....	46
Tabela 2: Valores de CN da curva de runoff para bacias urbanas.....	47
Tabela 4: Quadro resumo das informações espaciais utilizadas no projeto.....	61
Tabela 5: Classes de declividade. ....	63
Tabela 6: Parâmetros utilizados nos programas. ....	73
Tabela 7: Determinação da vazão de projeto – Método do Hidrograma Urbano de Santa Bárbara. ....	84
Tabela 8: Determinação da vazão de comparação pelo método HUSB. ....	85
Tabela 9: Profundidade das inundações.....	104
Tabela 10: Diferenças na região do canal entre HEC-RAS X GRASS. ....	111



# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	16
1.1 JUSTIFICATIVA	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.2.1 Objetivo Geral	20
1.2.2 Objetivos Específicos	20
<b>2 EXPANSÃO DAS ÁREAS URBANAS E INUNDAÇÕES</b>	21
<b>3 FERRAMENTAS DE MODELAGEM ESPACIAL E HIDRÁULICA</b>	29
3.1 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	29
3.1.1 Modelo Digital de Terreno	32
3.1.2 Extração de informações hidrológicas em SIG	33
3.2 MODELAGEM HIDRÁULICA	38
3.2.1 Funcionalidades do pacote HEC	41
3.2.1.1 Método Santa Bárbara	45
3.2.2 Funcionalidades do GRASS	49
<b>4 IMPLEMENTAÇÃO DE MAPAS DE RISCO PARA PATROCÍNIO-MG</b>	52
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	52
4.2 METODOLOGIA DE INTEGRAÇÃO DO SIG E MODELOS HIDRÁULICOS	59
4.2.1 Construção dos dados base para simulação	60
4.2.2 Modelagem no HEC-RAS	63
4.2.3 Modelagem no QGIS/GRASS	70
4.2.4 Parâmetros utilizados nas análises	73
<b>5 RESULTADOS</b>	75
5.1 REPRESENTAÇÃO DA BACIA DO CÓRREGO RANGEL	76
5.1 MANCHAS DE INUNDAÇÃO CONFORME HEC-RAS	80
5.2 MANCHAS DE INUNDAÇÃO CONFORME GRASS	96
5.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS PRODUTOS FINAIS	102
<b>6 Conclusão</b>	114
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	117

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

Historicamente o desenvolvimento da maioria das cidades brasileiras se deu ao longo dos rios, diante da necessidade de utilização das águas como meio de transporte, consumo humano, disposição de dejetos e para fins de agricultura.

Essas ocupações ocasionaram diversos problemas que atingem diretamente a sociedade, dentre eles as enchentes e inundações urbanas. Uma das razões é que a expansão dos centros urbanos nem sempre é acompanhada do desenvolvimento de infraestrutura adequada, de forma a prejudicar os sistemas de drenagem locais. Esta situação é agravada pela não observância das características naturais dos ambientes ocupados e da antropização da área sem a devida racionalização do espaço. Isto impossibilita que as áreas próximas aos rios e córregos efetivem o seu papel de zonas de amortecimento e absorção das inundações.

Nos últimos anos, esse problema se intensificou com o expressivo aumento da população nas cidades, tornando áreas antes ocupadas pela vegetação nativa em ambiente construído, sem o devido planejamento territorial e políticas públicas de uso e ocupação do solo. São medidas fundamentais em áreas urbanas de forma a evitar a impermeabilização em áreas de infiltração das águas pluviais. Essa realidade, para Righetto (2009), produz sérios problemas na drenagem urbana, devido a eventos hidrológicos de alta intensidade, que afetam diretamente áreas próximas dos cursos d'água, em ocupação de calha secundária.

As enchentes e inundações são consequência das precipitações e o aumento das vazões de escoamento superficial nos ambientes construídos, devido à falta de capacidade de

transporte dos sistemas de drenagem urbanas, alagando faixas ocupadas pelas edificações (TUCCI, 2003).

As enchentes, de acordo com Pinheiro (2013), são fenômenos hidrológicos de elevação da vazão, tendo nas inundações um processo de escoamento da enchente pelo leito secundário. Segundo Valente (2009), esses são fenômenos naturais resultam de comportamentos naturais dos cursos d'água. Os alagamentos são ocasionados por acúmulos de água formados pelos escoamentos superficiais das chuvas intensas que, em ambientes mal planejados, impermeabilizados e com falta de infraestrutura de drenagem inadequada podem causar catástrofes irreversíveis.

Em ambientes urbanos estes fenômenos são consequências do aumento da impermeabilidade do solo, visto que, as áreas de entorno dos cursos d'água, onde a vazão extravasada nos períodos de chuvas deveria ser amortecida pela vegetação e condições de solo favoráveis à infiltração, se encontram pavimentadas e dotadas de infraestrutura de drenagem que, em muitos casos, não foram projetados para suportar o crescimento urbano, constituindo-se ineficientes.

Diante da impermeabilização das superfícies e a canalização do escoamento, faz-se necessário o controle na fonte das áreas de montante. Assim, para se evitarem impactos e conflitos, é de fundamental importância a instauração do controle de ocupações e implantação de uma legislação municipal regulamentadora (TUCCI, 2008).

Frente ao processo de expansão urbana, foi criada em 2001, a Lei do Estatuto da Cidade que estabelece o Plano Diretor (PD) de diretrizes para a ocupação urbana. A descrição do PD refere-se ao estabelecimento de áreas para usos e ocupações urbanos segundo critérios particulares de cada município. Entretanto, a sua exigência é para municípios acima de cinquenta mil habitantes. Segundo dados do Censo 2010 divulgado pelo IBGE (2010), isto significa que 5.037 dos 5.561 municípios brasileiros não tem exigência legal do PD. Na ausência destes, os danos e prejuízos ocasionados pelas enchentes são maiores, visto que, estudos que auxiliam a gestão urbana priorizam a estruturação das cidades, visando atenuar possíveis impactos negativos para a sociedade, tendo as decisões de uso e ocupação do

solo pautadas em requisitos técnicos, como forma de se evitar ocupações em áreas não adequadas.

Para a realização de estudos e definição dos critérios de ocupação do solo urbano, há técnicas que trabalham com a integração entre fatores sociais, econômicos e ambientais, de posse de ferramentas que auxiliam na representação de fenômenos naturais e artificiais, como as inundações, para os cálculos dos impactos gerados no ambiente por meio da ocupação populacional, chamados de mapas de risco.

Neste contexto, esta pesquisa apresenta a aplicação das geotecnologias como ferramentas de análise e simulação, com destaque para o Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Este atua no zoneamento ambiental das áreas suscetíveis a inundações, associando a análise espacial e a modelagem hidráulica, para determinação de mapas de risco de inundação.

Os SIG permitem estudos por meio do cruzamento e análises complexas de dados, úteis ao planejamento urbano, composto por informações detalhadas dos vários seguimentos que direcionam o processo de gestão administrativa. Esta análise espacial faz uso comparativo de multicritérios, na determinação de fatores favoráveis à ordenação e controle do uso do solo, conforme proposição do Estatuto da Cidade.

A modelagem hidráulica adotada nesta pesquisa compara duas ferramentas de amplo uso, HEC-RAS e os algoritmos de avaliação do GRASS. Essas simulações de manchas de inundação exigem o conhecimento de diversos dados comuns ao SIG, como modelos de terreno, cotas e curvas de nível, mas também dados de precipitação atuais e históricos, vazões de cheias, entre outros parâmetros hidráulicos. Dada a dificuldade de obter tais dados em pequenos municípios, em uma escala de tempo considerável de anos de coletas diárias para formar a série histórica, esta pesquisa propõe a avaliação dos modelos indicados que se utilizam de parâmetros topográficos, modelagem hidráulica e uso de SIG, na tentativa de modelar manchas de inundação, em uma escala de microrregião a partir de uma microbacia.

Como problema de pesquisa, tem-se o aumento da ocupação urbana em áreas de amortecimento de cheias de corpos hídricos, sem considerar a sua dinâmica nos PDs de pequenos e médios municípios. A hipótese é de que a modelagem hidráulica associada ao SIG, permita definir as áreas de risco em bacias hidrográficas como unidade de planejamento, para definição de áreas ocupáveis.

Esta pesquisa tem como área de estudo a cidade de Patrocínio, especificamente a simulação de enchentes e inundações nas áreas vulneráveis da Microbacia do Córrego Rangel, por meio de análise espacial e modelagem hidráulica, com o mapeamento dos pontos críticos a partir de características físicas naturais e artificiais do ambiente. A integração de modelos hidráulicos e SIG foram realizadas por meio do programa ArcGis, e a modelagem hidráulica, por meio do programa HEC-RAS e do QGis, pelo GRASS, ambos de licença livre.

## **1.1 JUSTIFICATIVA**

A pesquisa visa auxiliar no desafio apresentado para o planejamento municipal que é o de prever e controlar os impactos ambientais causados pela urbanização. Este processo altera a dinâmica dos recursos hídricos através das alterações das vazões e velocidades de escoamento superficial e infiltração da água no solo. Com isso, o processo de urbanização do meio natural altera as áreas e as cotas de inundação distribuídas em uma bacia hidrográfica.

Busca-se, com esta pesquisa, a delineação de uma metodologia de modelagem de dados espaciais, associada à aplicação de um modelo hidráulico robusto, como forma de permitir a estimativa das áreas suscetíveis a inundações e enchentes, mesmo frente à baixa disponibilidade de dados pluviométricos em uma escala regional e que considere a ocupação humana e impermeabilização do solo. Dessa forma, muitos desses impactos podem ser estimados com antecipação e se constituir em uma forma de minimizar transtornos e prejuízos à sociedade. A pesquisa objetiva a integração de recursos tecnológicos e a verificação dos efeitos da impermeabilização do solo, no aumento das enchentes nas áreas urbanas, visto que as alterações impostas ao espaço incorrem na redução do potencial natural de infiltração das águas da chuva.

O estudo tem a importância de destacar áreas de risco de enchentes e inundações na cidade de Patrocínio, MG, através da simulação desenvolvida com base em SIG e Modelagem Hidráulica, na Microbacia do Córrego Rangel.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Determinar a variação na estimativa das áreas de risco potencial à inundação e enchentes na bacia hidrográfica do Córrego Rangel, através da comparação de modelos a partir de um sistema de informações geográficas e uso de métodos hidráulicos e topográficos.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- a) Avaliar dois modelos hidráulicos integrados ao SIG;
- b) Realizar a modelagem de manchas de inundações usando dados topográficos da bacia do Córrego do Rangel através de um SIG com modelos pertencentes ao GRASS;
- c) Realizar a modelagem de manchas de inundação usando um modelo hidráulico HEC-RAS;
- d) Comparar com os valores obtidos nas modelagens pelo GRASS e HEC-RAS.

## **CAPÍTULO 2**

# **EXPANSÃO DAS ÁREAS URBANAS E INUNDAÇÕES**

As aglomerações urbanas representam uma das manifestações mais significativas da atividade humana, que, junto com seus impactos negativos, são o resultado de processos históricos e econômicos desencadeados ao longo do tempo (MOTA, 2011; TUCCI; BERTONI, 2003).

O Estatuto da Cidade implementado pela Lei nº10.257 de 10 de julho de 2001 estabelece fatores da política urbana e representa um grande avanço à prática do planejamento urbano (Reis Filho, 2012). A Lei delega o cumprimento da função social da cidade e da propriedade urbana para os municípios, com um conjunto inovador de instrumentos de intervenção sobre seus territórios e uma nova concepção de planejamento e gestão urbana (ROLNIK; JÚNIOR, 2001). Entre eles, a Lei traz um instrumento básico do ordenamento territorial urbano, no qual são definidos o uso e as características de ocupação de cada porção do território municipal, dando o devido cumprimento da função social a todos os imóveis (BARROS; CARVALHO; MONTANDON, 2010). Esta é uma nova estratégia de gestão com o objetivo de ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana, de forma a evitar a deteriorização das áreas urbanas, a poluição e degradação ambiental e a exposição da população a riscos de desastres (BRASIL, 2001).

Um dos principais instrumentos criados pelo Estatuto é o Plano Diretor no qual, cada município deve elaborar um instrumento de controle como planejamento municipal. Este é um importante instrumento urbanístico, tributário e jurídico responsável pelo estabelecimento da política urbana na esfera municipal, que garante efetividade ao Plano, e

dentre eles disciplina o uso e ocupação do solo e o zoneamento ambiental (BARROS; CARVALHO; MONTANDON, 2010; ROLNIK, 2002). O Plano Diretor deve abranger as áreas susceptíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos, abrangendo correlatos e estudos implantados (BRASIL, 2001).

A regulamentação desse instrumento deu-se pelo Decreto Federal 4.297, de 10 de julho de 2002, no qual são definidos os critérios para o Zoneamento Ecológico Econômico – ZEE do Brasil, previsto como instrumento de política urbana no Estatuto da Cidade. O Zoneamento de uma região tem por objetivo, definir os usos adequados ou não para suas diversas áreas, baseado no diagnóstico ambiental de cada bacia, no qual serão definidas as áreas mais indicadas para ocupação urbana e aquelas que deverão ser preservadas total ou parcialmente (MOTA, 2011). Mas o que se encontra na realidade da maioria das cidades brasileiras, é a falta de estrutura de planejamento para implantação de estudos mais elaborados que contemplem toda a caracterização da área, com abrangência de fatores tanto ambientais como sociais.

O processo de crescimento das cidades e urbanização de espaços naturais é o processo antrópico de maior impacto ao meio ambiente, devido ao conjunto de ações e modificações exercidas sobre o meio. O crescimento urbano nos países em desenvolvimento tem sido realizado de forma insustentável, de acordo com Barbosa (2006), visto que o planejamento urbano é feito apenas para áreas já ocupadas, tendo os locais destinados a população de baixa renda, estruturadas de forma irregular ou clandestina.

O processo de urbanização apresenta grande interferência nos ciclos naturais hidrológicos alterando ocorrências, intensidade e localização dos processos de precipitação, evapotranspiração, infiltração e escoamento superficial. O aumento das áreas impermeáveis em ambientes urbanos reduz drasticamente esses processos, conduzindo ao aumento do escoamento superficial e redução do tempo de concentração das bacias (BARBOSA, 2006). Como consequência, surgem erosões, assoreamentos e enchentes. Dentre os principais impactos apresentados pela urbanização no ambiente natural estão o aumento do escoamento superficial (vazão máxima dos hidrogramas) com antecipação dos picos, a redução da evapotranspiração do escoamento subterrâneo e lençol freático,



aumento na produção de material sólido e deterioração da qualidade das águas (TUCCI, 1997).

Os lugares estão subordinados à condição do homem em utilizar a paisagem, o que cria uma diversidade enorme de manifestações de estruturas no espaço, como as mudanças na bacia, a ocupação indisciplinada das áreas de várzeas, o que não afeta somente o local de atuação, mas toda a dimensão da bacia hidrográfica (SANTOS, 2007; CARDOSO NETO, 2008).

As enchentes e inundações são fenômenos naturais eventualmente ocorridos numa bacia hidrográfica, em decorrência do escoamento proveniente de intensos eventos de precipitação. As inundações ocorrem quando a água do rio, localizado na calha principal, sofre transbordo ocupando as planícies marginais. Nessas condições, quando a precipitação é intensa e o solo não tem capacidade de infiltrar, a maior parte do volume de água escoar para o sistema de drenagem, superando sua capacidade natural de escoamento, ocupando as áreas de várzea com o transbordo do curso do rio (TUCCI; BERTONI, 2003).

As enchentes são resultado de processos decorrentes da elevação dos picos de cheias, em virtude de maior volume do escoamento superficial direto, devido ao comportamento natural dos rios ou em decorrência da urbanização, na drenagem urbana, resultado do efeito da impermeabilização do solo, canalização ou obstruções ao escoamento (TUCCI; BERTONI, 2003; TUCCI; MENDES, 2006). Na medida em que o solo é impermeabilizado, o escoamento através de condutos e canais se acelera, o que faz com que o volume de água que adentra o sistema de drenagem passe a ser superior à capacidade de escoamento, quando comparadas às condições primeiras de superfícies permeáveis, dando origem às inundações (TUCCI; BERTONI, 2003).

Em resposta às ocupações urbanas irregulares, as enchentes aumentam a sua frequência e magnitude devido à impermeabilização do solo e à construção da rede de condutos pluviais, o que produz acréscimo na velocidade de escoamento, bem como diminuição dos tempos de concentração e de recessão. O desenvolvimento urbano pode também produzir obstruções ao escoamento, como aterros, pontes, drenagens inadequadas, intervenções ao

escoamento junto a condutos e assoreamento (TUCCI; BERTONI, 2003; TUCCI; MENDES, 2006).

De acordo com Tucci e Mendes (2006), à medida que a cidade se urbaniza ocorrem os seguintes impactos:

- Aumento das vazões máximas em até sete vezes e da sua frequência devido ao aumento da capacidade de escoamento pelos condutos e canais e impermeabilização das superfícies;
- Devido à forma desorganizada como a infraestrutura urbana é implantada, tais como: pontes e taludes de estradas que obstruem o escoamento, redução de seção do escoamento por aterros de pontes e para construções em geral, deposição e obstrução de rios, canais e condutos por resíduos sólidos e sedimentos, projetos e obras de drenagem inadequadas, com diâmetros que diminuem para jusante, drenagem ineficiente, entre outros.

Contudo, esta dinâmica de alteração da paisagem atua diretamente na própria inundação, tendo os efeitos uma transferência de lugar ou mesmo um aumento, passando a ocupar novas áreas. Tanto as inundações quanto as enchentes são problemas ambientais derivados de fenômenos ou perigos naturais, de caráter hidrometeorológico ou hidrológico, intensificados pelos efeitos negativos das ocupações urbanas e obras de engenharia inadequada (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009).

Para o zoneamento e caracterização da área de aplicação do plano, ferramentas de geoprocessamento são de fundamental importância como auxílio à elaboração do PD. Seu uso proporciona uma avaliação em âmbito espacial, no qual são representados os pontos de interesse e relacionados fatores importantes para a definição das áreas de ocupação. Por meio deste é possível estabelecer critérios para a expansão, visto que o objetivo do PD é ser instrumento na definição de uma estratégia para a intervenção imediata, com referencial espacial para o uso e ocupação do solo em concordância com as estratégias de políticas urbanas (ROLNIK, 2002).

Em âmbito internacional, diversas pesquisas têm focado na delimitação semiautomatizada de áreas suscetíveis à inundação por diversas abordagens diferentes. Pesquisas como Ballesteros et al (2011) sobre a calibração de modelos geomorfológicos e hidráulicos para simulação de inundações no Rio Alberche, Ribeiro; Lima (2011) realizou a modelagem de inundações urbanas com HEC-RAS e GIS; Santos et al. (2010) modelagem hidrológica e SIG aplicado em uma bacia hidrográfica ao Sul de Portugal; Sharma e Singh (2014) com estudos de modelagem do escoamento superficial e SIG, comprovam a atualidade do tema.

No que respeita aos perigos naturais, o risco é definido como a probabilidade de acontecimentos de uma determinada magnitude e uma determinada perda irá ocorrer. Perigo de inundação é definido como a probabilidade de excedência de situações de inundação potencialmente prejudiciais em uma determinada área e dentro de um determinado período de tempo (MERZ e THIEKEN, 2004). Segundo os autores, uma vez que essas consequências dependem, entre outros, sobre a intensidade da inundação, as advertências de perigo devem ultrapassar curvas de frequência de inundações, ou seja, eles devem fornecer informações sobre intensidade de inundações, tais como a profundidade de inundação.

Além do risco de inundação, a análise envolve as características dos elementos em risco. Elementos em risco são todos os elementos do sistema humano, o ambiente construído e o ambiente natural que estão em risco de inundação em uma determinada área, por exemplo, populacionais, edifícios e obras de engenharia civil, as atividades económicas, ecossistemas, entre outros. A extensão dos danos depende das características da inundação e a vulnerabilidade dos elementos afetados em risco. Pela mesma inundação, em termos de intensidade e probabilidade, uma área mais vulnerável experimenta danos de inundação mais elevados. Existem diferentes conceitos de vulnerabilidade e não há entendimento acordado deste termo (MERZ e THIEKEN, 2004).

O que se destaca dos trabalhos citados e recentes estudos têm mostrado é que o instrumento de avaliação das áreas suscetíveis à inundação, ou seja, o produto final da análise espacial, é um mapa de risco. Este consiste em um mapa com a localização, forma e tamanho das áreas de inundação, delimitadas pela cota de inundação, para cada situação prevista.

Os mapas de risco permitem avaliar a situação das cheias para regiões individualizadas e objetos como edifícios e infraestrutura. Eles são a base para as medidas de proteção contra as inundações locais e normalmente, são elaborados numa escala de 1: 2.000 a 1: 20.000. Essa projeção representa a área de risco com um nível de detalhe que possibilita a análise e os cálculos dos danos e riscos, por meio da estimativa de inundação da área atingida (MERZ; THIEKEN; GOCHT, 2007).

Neste contexto, o risco a inundação é conceituado por Deckers et al. (2010) como a probabilidade de uma ocorrência, avaliada através de análise estatística dos níveis de água, já atingidos no passado, e medidas de vazões. Primeiramente é calculada a posição, o período de retorno, ou período médio de tempo em que pode ocorrer um nível máximo de água particular e descarga. Maiores níveis de água e volumes de descarga correspondem a períodos mais longos de retorno. Calculada a probabilidade de ocorrência é realizada a estimativa, utilizando hidrogramas compostos, que são hidrogramas sintéticos integrados de Quantidade / Duração / Frequência (QDF) do evento.

O gerenciamento dessas áreas com risco de enchentes e inundações inicia-se por meio dos resultados gerados pela identificação dos riscos, ou seja, pelo mapeamento do evento, com o objetivo de reconhecer mais detalhadamente o cenário presente, num determinado espaço físico, de acordo com os diferentes processos previamente reconhecidos. Neste processo ainda há uma carência de material técnico disponível e técnicos habilitados, envolvidos em determinar faixas de risco ao meio como um todo (BRASIL, 2007).

Diante de uma perturbação na superfície terrestre, a resposta do ambiente pode ser bastante diferente em função das características locais naturais e humanas, tendo cada porção uma condição intrínseca que, em interação com eventos de impacto, resulta numa grandeza de efeitos adversos. O desastre é então o resultado de vários eventos adversos sobre um espaço vulnerável, sendo esta de origem natural ou induzida pelo homem. Sua medida se dá pela observação da interação entre a magnitude da interferência e do evento adverso (SANTOS, 2007).

As avaliações de risco incluem a compreensão quantitativa e qualitativa detalhada do risco, seus fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais como também as suas consequências.

O risco então pode ser definido como a probabilidade de consequências prejudiciais, ou perdas previstas (mortes, ferimentos, propriedade, meios de subsistência, interrupção de atividade econômica ou destruição ambiental) resultante das interações entre perigos naturais ou sociais e circunstâncias vulneráveis (ISDR, 2007; HORA, 2009).

Para composição do mapa de risco são necessárias informações inerentes aos acontecimentos que integrados obtém-se um resultado, que são as áreas com risco a enchentes e inundação. Contudo, para sua elaboração, existem dois fundamentos principais: o primeiro é a previsão, que possibilita a identificação das áreas de risco e a indicação dos locais onde poderão ocorrer acidentes, seguindo a definição espacial de localização, e que estabelece as condições e as circunstâncias para a ocorrência dos processos em âmbito temporal. A prevenção fornece a possibilidade de adotar medidas preventivas, visando impedir a ocorrência dos processos ou redução das magnitudes, minimizando seus impactos e agindo diretamente sobre edificações e/ou a própria população.

O mapeamento de risco é elaborado com informações como a distribuição espacial do evento, conteúdo (tipo, tamanho, forma), que indicam a probabilidade temporal e espacial, tipologia e comportamento do fenômeno, advertindo sobre a potencialidade de ocorrência do evento. Esses tipos de levantamentos são produzidos principalmente com uso de geotecnologias que proporcionam a integração necessária e representação espacial dos dados, capaz de analisar, examinar e interferir em modelos de distribuição espacial para o estudo dos impactos nos sistemas ambientais (CHAVES; FRANCA-ROCHA, 2006).

A maneira mais prática de se evitar os danos e prejuízos decorrentes dos eventos de riscos são, o planejamento de forma compatível com as características e limitações naturais do terreno, com implementação de medidas tecnológicas em apoio às intervenções. Neste contexto, as geotecnologias permitem uma abordagem integrada de todo o meio físico, associando-o aos aspectos sociais, econômicos e políticos, o que permite a localização das áreas críticas de concentração dos eventos (SANTOS, 2007; BARBOSA; OLIVEIRA; ALVES, 2011).

O monitoramento ambiental aplicado às áreas de risco é realizado através das ferramentas de análise e simulação das inundações que esboçam uma imagem próxima à realidade, capaz de nortear o processo de gestão do território de forma integrada.

# CAPÍTULO 3

## FERRAMENTAS DE MODELAGEM ESPACIAL E HIDRÁULICA

### 3.1 SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Identificar onde determinado fenômeno ocorre pode ser criticamente importante, visto que as decisões têm consequências geográficas, e neste contexto, os SIG são uma classe especial de sistemas de informações que controlam não apenas eventos e atividades, mas também a localização dessas ocorrências. O termo geoprocessamento refere-se então a informações temáticas referenciadas às posições na superfície terrestre, através da determinação de um sistema de coordenadas Geográficas ou UTM (LONGLEY et al., 2013).

O Sistemas de Informações Geográficas (SIG) podem ser definidos, segundo MIRANDA, (2005), como um sistema automatizado de coleta, armazenamento, manipulação e saída de dados cartográficos. O SIG se insere como facilitador na troca de dados georreferenciados com a finalidade de normatizar dados geoespaciais, que associados à realidade político-administrativa, aos aspectos ambientais e territoriais, e possibilita a gestão da informação e conhecimento.

Um SIG tem a capacidade de estabelecer relações espaciais topológicas entre elementos gráficos, nas quais se dá o estudo genérico dos lugares geométricos, com suas propriedades e relações. Estas funções descrevem a localização e a geometria das entidades do mapa, definindo suas relações de conectividade, contiguidade e pertinência, sendo possível o cálculo de áreas, estabelecendo comparativos e análises estatísticas (CÂMARA, et al., 2003; DRUCK, 2004). Entre os elementos que compõem o SIG, o dado utilizado para a

construção da análise é o material bruto que alimenta o sistema, permitindo gerar informações que são o significado atribuído aos caracteres da superfície analisada (ROSA, 2009).

A construção eficiente de sistemas de informação depende da criação de modelos conceituais que sejam representativos da porção modelada da realidade, integradas a uma estrutura mais ampla que as contenha e permita a investigação exaustiva de relações. Esta integração em SIG permite o armazenamento e gerenciamento eficiente desses dados, como parte do conjunto total das informações espaciais disponíveis e registradas, que consideram o ambiente como um sistema, uma entidade que tem expressão espacial a ser modelada segundo sua variabilidade taxonômica e a distribuição territorial das classes de fenômenos (CÂMARA; MEDEIROS, 1998; BLASCHKE; KUX, 2007; MEIRELLES; CAMARA; ALMEIDA, 2007).

O SIG utiliza de dados e informações gerais das características da região a ser analisada, para composição da base de estudo tais dados devem ser precisos de forma a obter resultados mais eficientes e de maior acurácia. No ambiente SIG são utilizados alguns termos base para a construção da interpretação, entre eles:

- a) **Dados:** São um conjunto de valores numéricos (ou não) de acordo com as características reais da área de estudo, oriundos de observações diretas ou indiretas, que podem ser a mensuração de atributos e a determinação de localização e forma de um objeto ou fenômeno (LONGLEY, 2013);
- b) **Informações:** Entendido por um conjunto de dados que possui um determinado significado para um uso ou aplicação em particular;
- c) **Atributos:** Qualquer informação descritiva como nomes, números, tabelas e textos, relacionada com um único objeto, elemento, entidade gráfica ou um conjunto deles, caracterizando um fenômeno geográfico (CÂMARA; MONTEIRO, 2001).

Os modelos utilizados para composição analítica do SIG são construídos a partir de dois tipos de dados, o formato matricial (*raster*) e vetor, que tem por objetivo reduzir



fenômenos geográficos a formas que possam ser codificadas em bases de dados. Os dados raster são caracterizados por representar a área em quadriculas de grades regulares ou em células (*pixels*) com tamanho e escala padronizadas para especificar atributos. Uma das formas mais comuns de informações representadas neste formato são as imagens de satélites que capturam informações transformadas neste modelo (LONGLEY et al., 2013).

Em uma representação vetorial, o fenômeno geográfico ou espacial é abstraído de três primitivas gráficas, sendo ponto (dimensão zero), linha (uma dimensão) e área (duas dimensões). Estes podem considerar a superfície (três dimensões) e o relacionamento espaço tempo, com quatro dimensões (MIRANDA, 2005).

Nos dados matriciais a representação é feita em grade e cada célula contém um valor de atributo. Esta matriz bidimensional é também chamada de plano de informação, no qual contempla informações individuais de temas diversos como uso do solo, cobertura vegetal, geologia, etc (MIRANDA, 2005; LONGLEY et al., 2013).

Uma estrutura matricial simples restringe cada nível a um atributo simples limitado a valores com intervalo entre 0 e 255, que no processamento das imagens digitais são denominadas bandas, referindo-se a uma faixa do espectro eletromagnético medido por satélites (MIRANDA, 2005).

Esta estrutura em matriz é fundamental para as análises em SIG, contemplando amplas áreas e informações que correlacionadas, dão origem a novos produtos e interpretações originárias dos mapas digitais, executadas de diferentes formas nos processadores de SIG (MIRANDA, 2005; LONGLEY et al., 2013).

Dentre os modelos e ferramentas utilizadas no SIG existem alguns fundamentais à caracterização do espaço real, fundamental para a representação da superfície, gestão e planejamento do território. O Modelo Digital de Terreno detém aspectos essenciais a construção do espaço representativo.

### 3.1.1 Modelo Digital de Terreno

O Modelo Digital de Terreno (MDT) consiste na representação matemática da distribuição espacial de características de fenômenos vinculada a uma superfície real topológica (CÂMARA; FELGUEIRAS, 2005). Sua criação constitui-se da extração de dados tridimensionais vinculados a posições conhecidas na superfície da Terra, com o objetivo de criar de uma superfície hipsométrica na escala e precisão compatível com a aplicação desejada e limitada pela precisão do dado. Em projetos de recursos hídricos são utilizados para identificar características de drenagens relacionadas a fundos de vale, cumes, redes de canais e padrões de drenagem, e quantificar bacias, como tamanho, comprimento e inclinação (GARBRECHT; MARTZ, 2000).

Outra forma de interpolar os dados altimétricos é por meio da interpolação de grade regular, que se assemelha a uma imagem. Nela os valores interpolados são arranjados em uma grade de distribuição regular e os valores são atribuídos a cada pixel da imagem. O MDT usa dados de elevação espaçados regularmente, quando transformados em raster, com células contendo um valor próximo da elevação, sendo possível a utilização de variáveis como a declividade e o aspecto, de forma a interpretar a taxa de variação da elevação do terreno. A escolha e coleta dos pontos juntamente com a quantidade de dados amostrados estão diretamente relacionados com a qualidade do produto final que é o MDT, que quanto maior o número de pontos amostrais, maior será o esforço computacional para representação (CÂMARA; FELGUEIRAS, 2005).

A ferramenta *Topo to raster*, presente no programa Arcgis, foi desenvolvida especificamente para interpolar superfícies hidrologicamente correta (MDTHC), a partir de dados de pontos, linhas e polígonos (ARCGIS, 2012). Na interpolação do MDTHC são impostas restrições ao processo de interpolação, como por exemplo dados de lagos, rede de drenagem, condições de fronteira, sumidouros, pontos cotados, etc (AGUAYSIG, 2011). Este método propõe uma melhor representação hidrológica do espaço, visto que, o tipo de estrutura de dados utilizada para representação superficial, geralmente possuem desvantagens, no qual grades retangulares não representam mudanças abruptas de elevação, e o espaçamento da malha da grade afeta diretamente os resultados na eficiência computacional (RENNÓ; SOARES, 2003).

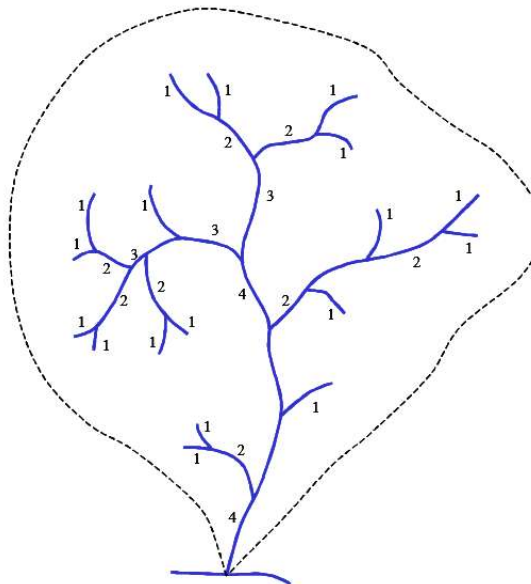
O MDTHC é melhor aplicado nas análises hidrológicas, visto que este contempla informações como curva de nível, no qual consta a altimetria do terreno, os pontos cotados adquiridos do IBGE, a hidrografia local e o limite da área de pesquisa, delimitando assim a região de interesse de modo a permitir que o MDT expresse mudanças abruptas no terreno, como as provocadas por rios e lagos. Consiste em um MDT com linhas de quebra nos corpos hídricos e suavização dos picos e vales extremos que podem apresentar erros de representação.

### **3.1.2 Extração de informações hidrológicas em SIG**

A criação do Modelo Digital de Terreno é fundamental para a simulação hidrológica, que juntamente com o avanço tecnológico dispostos nos programas de SIG, tornou-se possível a representação de ambientes com maior nível de detalhes, com precisão e confiabilidade, tendo a declividade medida com uma resolução espacial particular (LONGLEY, 2013). Este tornou-se um aliado fundamental à análise hidrológica que possibilita diferentes produtos como, a extração automática de drenagem, delimitação de bacias, mapeamento do sentido e fluxo de drenagem e cálculo do volume acumulado por precipitações. Contudo, ao se usar um MDT como base, deve-se ater a algumas correções no modelo, fundamentais para a exata representação como, correções de depressão, áreas de drenagens internas e vazias ou outros eventuais erros do MDT (SANTOS, 2013).

A extração da rede de drenagem por meio do SIG é baseada na classificação proposta por Strahler, no qual, a ordem dos cursos d'água segue a hierarquização dos canais fluviais de contribuição, considerando rios de primeira ordem todos aqueles que não possuem nenhum tributário, representados pelo número 1. Quando dois rios se encontram dão origem aos rios de segunda ordem; quando dois rios de segunda ordem se encontram originam um rio de hierarquia 3, e assim consecutivamente, como ilustra a Figura 1 (RENNÓ; SOARES, 2003; RIBEIRO, 2007).

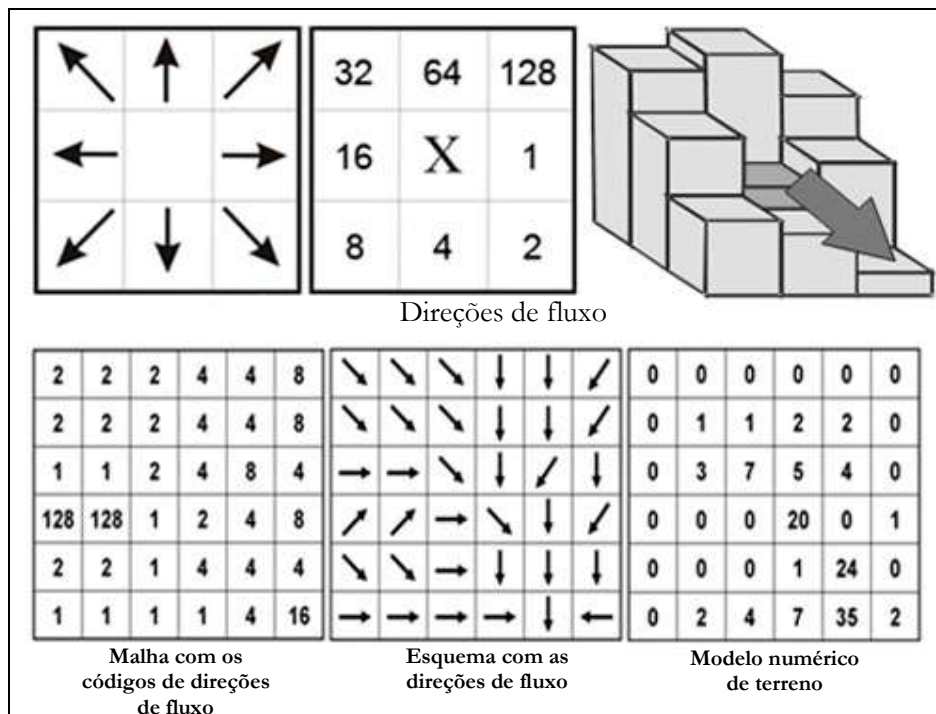
Figura 1: Ordem de uma rede de drenagem segundo classificação de Strahler.



Fonte: RENNO; SOARES (2003).

A definição das direções de escoamento a partir do MDT e delimitação automática de cursos d'água utilizam comumente o método D8 (Deterministic - 8 Node). Este método identifica o trajeto de escoamento mais íngreme entre cada célula do MDT e seus oito vizinhos, definindo o caminho como um único trajeto determinado pela diferença de nível ponderada pela distância entre eles, como mostra a Figura 2. Este método é vulnerável para determinação da drenagem quando há presença de depressões na superfície, áreas planas ou bloqueios de fluxo, produzidos por erros de interpolação e produção sistemáticas ou de dados (GARBRECHT; MARTZ, 2000).

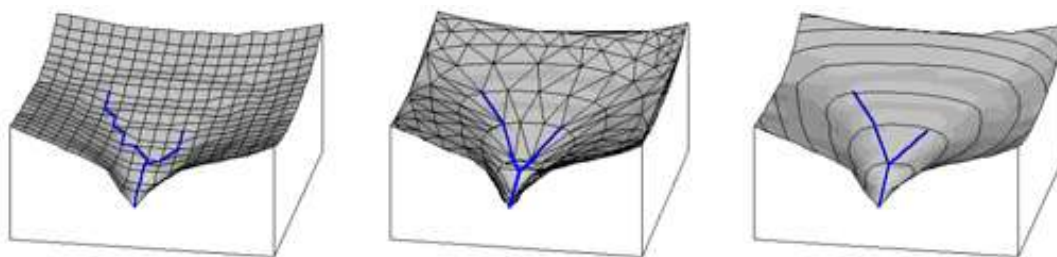
Figura 2: Representação do Método D8.



Fonte: RUHOFF (2010), adaptado pela autora.

A malha de fluxo de acumulação é desenvolvida com o objetivo de determinar os possíveis caminhos de fluxo superficial, através da ligação das células de centro a centro, seguindo-se a direção de fluxo obtida para cada célula. Por meio dessa ferramenta são calculados os conjuntos de células ascendentes e descendentes que dará origem a uma imagem raster, ou seja, seguindo as direções de fluxo, obtém-se a quantidade de células a montante que drenam para cada uma das células a jusante, originando as redes de drenagem (SANTOS, 2013; RUHOFF, 2010), de acordo com a Figura 3.

Figura 3: Malha de fluxo de acumulação.



Fonte: RUHOFF (2010).

Para uma melhor representação dos dados hidrológicos existem fatores adicionais que melhoram a qualidade e precisão dos resultados obtidos. Dentre eles, a taxa de escoamento superficial (Runoff), representado pelo fator CN – Curva Número, que combina analiticamente o mapa de solo e uso do solo como forma de identificar o potencial de escoamento de uma dada superfície de análise.

Dada a quantidade de elementos e dados requeridos na composição dos modelos hidrológicos e hidráulicos, o desenvolvimento de ferramentas integradas ao SIG permite facilitar a obtenção e melhorar o manejo na análise e interpretação dos resultados (FERRERO, 2004).

Nas análises espaciais, as informações de terreno, rede de drenagem, uso e ocupação do solo são organizadas em camadas no formato matricial, e dessa forma cada célula das diferentes camadas contém somente um valor único para a posição. A análise multicriterial é justamente a determinação dos critérios de combinação de cada camada de informação com as demais, no sentido de representar adequadamente o cenário inicial e cada uma das alternativas de solução (REIS FILHO, 2010; LONGLEY et al., 2013).

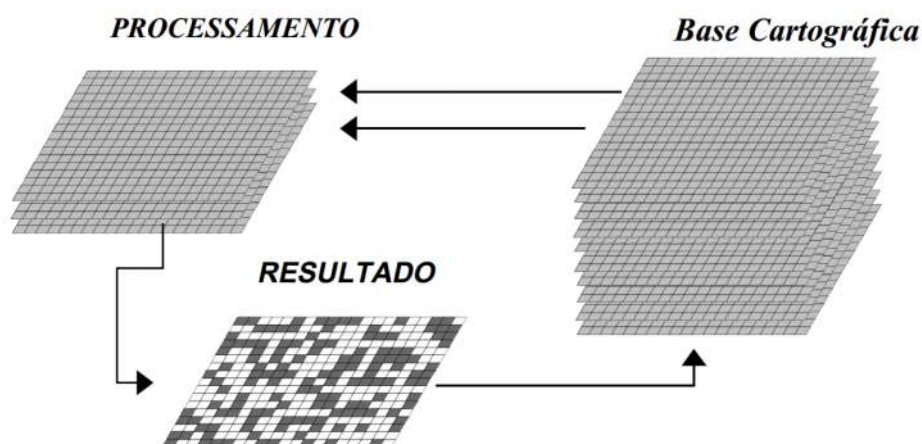
Uma das formas de avaliação de multicritério é definida por meio da álgebra de mapas, que inclui um amplo conjunto de operadores matemáticos e lógicos aplicados na combinação de diferentes camadas raster, atuando individualmente na célula ou por zonas, para a construção de uma ou várias camadas de saída. Este processo é semelhante à álgebra tradicional, em que operadores primitivos como a adição, subtração e exponenciação são logicamente sequenciados com variáveis para se formar uma equação (SOARES FILHO, 2000).

Na álgebra cartográfica, ou álgebra de mapas, os mapas representam as variáveis e o procedimento analítico envolve operações de processamento digital, no qual uma sequência lógica, coerente para o desempenho da análise, envolve a conexão dos mapas da base de dados (SOARES FILHO, 2000). Os dados de entrada representam vários mapas que, ao serem processados, terão como resultado um ou vários mapas combinados de acordo com a expressão matemática determinada. Esta ponderação pode ser isolada ou

servir como modelo de entrada de outros modelos, como no caso dos modelos hidráulicos HEC-RAS e GRASS.

Assim é possível expressar qualquer modelo na forma de uma série de funções de processamento e compilar uma sequência dessas num script, possibilitando a execução repentina do comando. A única restrição é que as entradas e saídas do modelo devem estar em formato matricial, como mostra a Figura 4. As equações são calculadas pixel a pixel de forma que o resultado é um novo mapa que deve representar a solução do problema ou um novo dado para a próxima análise (LONGLEY et al., 2013).

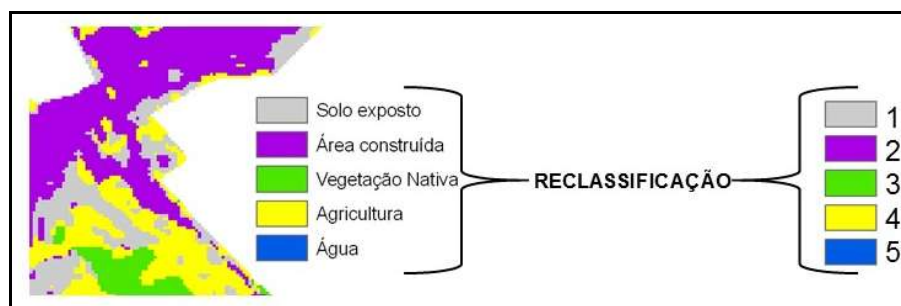
Figura 4: Álgebra de mapas.



Fonte: SOARES FILHO, 2000.

Para tal, os dados de entrada devem ser convertidos em raster e os atributos com suas informações associadas a um valor numérico, por meio da reclassificação, para que os operadores matemáticos façam a ligação entre um dado e outro. A reclassificação consiste em associar cada valor representado no dado a uma classe temática (CORDEIRO; BARBOSA; CAMARA, 2001), como mostra a Figura 5.

Figura 5: Processo de reclassificação.



Fonte: Autora.

Os resultados obtidos nos processos são uma combinação ponderada de mapas que, para se adequar a uma escala específica, deverão ser reclassificados de acordo com o interesse do estudo. Após esse procedimento é construída a expressão algébrica que objetiva o resultado proposto. Nessa linguagem, um símbolo se refere a uma camada raster, de forma que o comando  $A = B + C$  toma os valores em cada célula das camadas  $B$  e  $C$ , soma-os e armazena o resultado como a camada  $A$  (LONGLEY et al., 2013). O usuário precisa apenas especificar as operações espaciais a serem usadas, os nomes dos planos fontes e o resultado, o programa aplica a operação a todas as células no plano, no qual os valores das células da mesma grade são logicamente selecionados, adicionados, subtraídos ou manipulados por qualquer método matemático que seja permitido para o tipo de dado em questão (MIRANDA, 2005).

Portanto, o problema a ser abordado é a determinação adequada das ponderações entre as diversas camadas dos mapas para a determinação das áreas com risco à inundação em um contexto específico.

### 3.2 MODELAGEM HIDRÁULICA

As simulações hidráulicas dos sistemas fluviais são importantes na exploração do papel ecológico dos rios, para verificar o risco na planície de inundação em fluxos intermediários, bem como o risco e o impacto das ondas de cheias e como atenuá-los (Pasquale et al, 2013).



Um fator importante é o alcance da modelagem do processo hidrológico. Esses modelos se apresentam como uma ferramenta para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. Conforme estudos de Rennó e Soares (2003), os modelos podem ser definidos como uma representação matemática do fluxo de água e seus constituintes sobre uma parte da superfície e/ou subsuperfície terrestre.

Em estudos hidrológicos voltados à drenagem urbana, devido a carência de dados fluviométricos, são adotados os modelos matemáticos para definição dos hidrogramas de projeto, executados com dados das características hidráulicas e geomorfológicas da bacia, suas condições de impermeabilização, tempos de concentração, bem como as precipitações e vazões máximas (CANHOLI, 2005).

No histórico de desenvolvimento, os modelos inicialmente tinham a função de integração, de forma a obter variáveis intermediárias e de saída da bacia, como por exemplo a vazão. O conhecimento era fragmentado pela análise de cada critério. Ao final da década de 90, estes foram discretizados, denominados de Unidades de Resposta Hidrológica (URH), tendo o escoamento a representação em minibacias, definidos de acordo com o relevo, o tipo de solo, seu uso e geologia (TUCCI, 2010).

A confiabilidade dos modelos numéricos hidráulicos depende de vários fatores, entre eles o modo de como a calibração é executada. Idealmente requer o uso de coeficientes de rugosidade, dependente de fluxo, a fim de responderem adequadamente ao papel de submersão. No entanto, a capacidade de encontrar um único coeficiente de rugosidade que funciona ao longo de várias descargas, também é importante porque simplifica as operações numéricas (TUCCI, 2010).

Os métodos de calibração podem ser classificados em dois grandes grupos: os tradicionais, que dependem de medições de campo (por exemplo, a profundidade da água, velocidade e área inundada), e por técnicas baseadas em imagens de sensoriamento remoto. Ambos os métodos são fundamentados em critérios de saída, utilizado para determinar parâmetros de rugosidade do leito do rio. Para um controle confiável do processo de calibração, recomendam-se medições de campo, em diferentes escalas espaciais e temporais. Técnicas

de trabalho de campo e de sensoriamento remoto são duas metodologias que completam um ao outro de forma eficiente em estudos de modelagem hidrodinâmica numéricos de escala de campo. (Pasquale et al, 2013)

Dentre os modelos hidrológicos, existem os de base física, no qual apresentam caráter determinístico, que tentam representar os processos físicos observados em ambiente real, recorrendo aos princípios da hidrologia. E tem-se os modelos estocásticos que fazem uso da teoria das probabilidades e de outras técnicas destinadas a lidar com eventos com caráter aleatório (TUCCI, 2005). Estes modelos são utilizados para calcular dados essenciais à simulação de inundação, dentre elas a vazão de projeto.

A vazão máxima é entendida como a maior vazão que ocorre numa seção de um rio num período definido, e representa as condições de inundação do local. A vazão média de enchente é a média através das vazões máximas anuais, valor este característico das inundações do local, onde representa, em média, uma ocorrência de cerca de 2 anos. A vazão que delimita o leito maior ou o vale de inundação corresponde geralmente a um risco da ordem de 100 anos, variando em função dos condicionantes geológicos (TUCCI; MENDES, 2006).

Na ausência de dados ou mesmo quando a série de informações é pequena, pode se utilizar a regionalização de vazões máximas ou as precipitações. Esta permite estimar a vazão máxima em locais sem dados com base em postos da região no qual são registradas as informações. As precipitações máximas são transformadas em vazões pelos modelos matemáticos, sendo um método útil principalmente para bacias que sofreram modificações.

Para Tucci e Mendes (2006), a regionalização é utilizada em hidrologia quando há a transferência de informações de um local para outro dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante, se apresentando na forma de uma variável, função ou parâmetro. Visto a amplitude de informações relacionadas para definição e análise dos efeitos hidrológicos em ambiente urbano, existem alguns modelos hidrológicos que propiciam a integração de dados SIG, sendo fundamental para estudos de gestão de bacias.

O objetivo dos modelos dinâmicos em SIG, de acordo com Pedrosa e Câmara (2001) é o de realizar a simulação numérica de processos dependentes do tempo, no qual simulam o fluxo e transporte de água. Tais estudos possibilitam a antecipação de eventos, simulando os efeitos da urbanização em uma bacia antes que ela ocorra, para assim elaborar medidas preventivas a favor de eventos como enchentes, impactos nas alterações de rios, entre outros (TUCCI, 2005). Para fins desta pesquisa foram avaliados alguns dos programas disponíveis e foram selecionados o HEC-RAS e o GRASS.

### **3.2.1 Funcionalidades do pacote HEC**

O HEC-RAS foi desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica dos Estados Unidos, como o HEC\_GeoRAS, o HEC\_GeoHMS e o HEC\_GeoDozer, disponibilizados pela internet gratuitamente. Com o objetivo de simular os efeitos de eventos hidrológicos em uma bacia hidrográfica, a criação e desenvolvimento de ferramentas capazes de subsidiar a gestão dos recursos e impactos ambientais são de interesse relevante para a comunidade acadêmica e profissional.

O U.S. Army Corps of Engineers (USACE), foi criado em 1964 para institucionalizar o conhecimento técnico conhecido como Engenharia Hidrológica, no qual, dentro da Divisão de Engenharia criaram o Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC), iniciando o desenvolvimento do que mais tarde tornou-se a ser conhecida família de software CEIWR-HEC. O CEIWR-HEC é organizado por três divisões: Hidrologia e Hidráulica Tecnologia; Sistemas de Recursos Hídricos; e Sistemas de gestão da água, apoiando diretamente na gestão dos recursos hídricos com capacidade técnica no planejamento e gestão.

O interesse pelos programas se deu devido o Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS) desenvolver ferramentas como forma de integração com o SIG, por meio de extensões disponíveis no Programa ArcGis.

O HEC\_GeoDozer foi desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas de Sistemas Ambientais para dar suporte ao Centro de Engenharia Hidrológica, fornecendo ferramentas para edição de modelos de terreno e visualização a rede de drenagem, com funções bem limitadas.

O “Geospatial Hydrologic Modeling Extension” (HEC-GeoHMS), foi criado como uma ferramenta hidrológica geoespacial para engenheiros e hidrólogos com experiência GIS, para modelagem hidrológica. Por meio do MDT transforma as vias de drenagem e limites das bacias hidrográficas em uma estrutura de dados hidrológicos que representa a rede de drenagem, permitindo aos usuários visualizar informações espaciais, características das bacias hidrográficas, realizar análise espacial, e delimitar sub-bacias e rios. O único modelo matemático para simulação de inundações utilizado por este é o Método do Hidrograma Unitário (HEC, 2014).

O HEC\_GeoRAS consiste numa ferramenta disponível na plataforma GIS da ESRI, o ArcGis, e apresenta ferramentas aplicáveis à modelagem hidráulica. Este foi o escolhido para desenvolvimento da pesquisa por sua integração com o SIG e modelagem geoambiental. A ferramenta apresenta uma série de procedimentos e utilitários para o processamento de dados geoespaciais, disponíveis na própria janela de manipulação do Arcgis, disposto com uma interface gráfica de usuário que permite a preparação de dados geométricos para a importação no HEC-RAS, e pós-processamento dos resultados da simulação.

Trata-se de um modelo 1D que resolve as equações de Saint-Venant completas, por aplicação do método de diferenças finitas, permitindo simular o escoamento em superfície livre em regime permanente e em regime transiente (FERNANDEZ; MOURATO; MOREIRA, 2013). A ferramenta é usada para criação da geometria do rio (leito, margens, etc), tidas a partir de informações de imagens de satélite e cartas cartográficas, e as vazões máximas provenientes do modelo hidrológico para simulação no HEC-RAS conforme os parâmetros exigidos para execução (LIMA NETO; TAVARES, 2013).

Com base no Modelo Digital de Terreno, o usuário gera uma série de temas pertinentes ao desenvolvimento da linha de dados geométricos para o HEC-RAS, como linhas de centro, fluxo, canal, secção transversal, uso do solo, dique, áreas ineficazes e áreas de armazenamento. As camadas de informações criadas são editadas e definidos os limites de cada item de análise, sendo úteis ao mapeamento de várzea, aos cálculos dos danos e delimitações de inundações, restauração do ecossistema e alerta de cheias (HEC, 2014).

O mapeamento das áreas inundáveis se dá a partir dos resultados obtidos pelas simulações hidráulicas no HEC-RAS e o traçado da área de inundação é realizado utilizando-se das alturas d'água, como resultados das análises hidráulicas, nas seções transversais. Por meio do MDT e das alturas d'água, o HEC-geoRAS determina os limites e profundidades das inundações, que, posteriormente passam por uma interpretação detalhada para identificar a proximidade do ambiente real (LIMA NETO; TAVARES, 2013).

O modelo HEC-RAS é um modelo hidráulico mais comum usado para delimitação de áreas inundáveis, permitindo simular o escoamento em superfície livre em regime permanente e em regime variável. A lei de resistência aplicada é a Equação de Manning-Strickler e a seção transversal de escoamento considera uma seção composta, tendo o canal definido pelos dados topográficos interpolados por meio da criação de um modelo digital de terreno, e delimitado pelas alturas calculadas no sistema (FERNANDEZ; MOURATO; MOREIRA, 2013).

Este modelo permite a integração com o SIG, através do software HEC\_geoRAS instalado no ArcGis, por onde são gerados os dados de dimensionamento. O programa utiliza-se de diversos parâmetros para a delimitação das áreas de inundação, dentre eles a identificação das margens de rios, sentido do fluxo, contribuições tributárias (afluentes), características do entorno como uso e ocupação do solo, coeficiente de Manning e vazão. Estes parâmetros são delimitados e construídos criteriosamente, levando em consideração o sentido do fluxo, comprimento e espaçamento de seções e o modelo digital de terreno.

Os parâmetros objetivam a calibração do modelo hidráulico, baseado nos coeficientes de resistência de Manning na zona de entorno, caracterização física e dimensionamento hidrológico, uma vez que o sistema utilizado pelo HEC-RAS é integrado por ferramentas de análise de canais projetados para uso interativo em um ambiente multitarefa e multiusuário (FERNANDEZ; MOURATO; MOREIRA, 2013; LIMA NETO; TAVARES, 2013).

De acordo com Fernandez, Mourato e Moreira (2013), a maior limitação apresentada pelo modelo é o fato deste oferecer caráter unidimensional, mantendo a cota da superfície livre

constante nas seções transversais da linha de água, tendo como resultado irregularidades acentuadas.

O sistema funcional do HEC-geoRAS calcula automaticamente as dimensões na modelagem, limitadas pelas seções transversais, por meio dos planos de informação criados no próprio banco de dados ao executar a ferramenta. Esses dados correspondem dimensões como comprimento do talvegue, distâncias entre seções, coeficientes de Manning distribuídos de acordo com o mapeamento de uso e ocupação do solo, etc.

Para o georreferenciamento das informações, o HEC-RAS possui a ferramenta RAS- Mapper que necessita das definições do sistema de projeção, para assim executar da simulação no sistema georreferenciado. Esse arquivo é gerado pela interface do HEC\_geoRAS com o SIG, e transmitido através das exportações dos arquivos. A inexistência de georreferenciamento das seções transversais implica em problemas de integração com as bases SIG, que, apesar de apresentar resultados corretos hidraulicamente, perde-se a espacialização dos dados (CAMPOS, 2011).

As informações inerentes às condições de contorno e fluxos são definidas no próprio programa HEC-RAS, no qual os parâmetros de declividade, escoamento, profundidade e vazão de projeto são inseridos de acordo com cada situação. Os fluxos são normalmente definidos no local mais a montante de cada rio ou afluente, e em junções, sendo cada fluxo um perfil diferente dentro do programa. A análise permanente onde se tem o regime supercrítico definido deve ser selecionado pelo usuário de acordo com os critérios hidráulicos (CAMPOS, 2011; MERWADE, 2012).

Após toda a estruturação dos parâmetros definidos no HEC-RAS, estes são exportados e importados novamente no HEC-geoRAS, afim de ter a simulação e definição das zonas de risco de inundação na bacia. Esta relação espacial definida pelo SIG e HEC-RAS são demonstradas na metodologia de forma a salientar a importância que cada um apresenta para formulação de técnicas mais eficazes na representação dos impactos ambientais urbanos.

### 3.2.1.1 Método Santa Bárbara

Para a elaboração dos projetos de drenagem faz-se necessário conhecer, à priori, a vazão de escoamento e assim determinar todos os parâmetros necessários ao funcionamento do sistema. Esta é estabelecida por meio de cálculos baseados em modelos hidrológicos, que requerem informações das características físicas e hidráulicas da bacia hidrográfica em questão.

Dentre os modelos hidrológicos mais usados tem-se o Método do Hidrograma Urbano de Santa Bárbara (HUSB), que consiste num método determinístico, com o objetivo de obter o hidrograma de uma precipitação para uma determinada bacia, por meio de cálculos da vazão de projeto. É um método com uma escala de detalhes aceitável, no qual é possível a obtenção do hidrograma de projeto a partir da chuva excedente, ocasionado por um hietograma, com a obtenção da vazão de pico e em intervalos de tempo de uma determinada bacia (TOMAZ, 2012; 2013; ZUFFO; LEME, 2005).

Dentre os parâmetros usados para o cálculo tem-se o tempo de concentração, que mede o espaço de tempo médio que uma precipitação uniforme, contribua no escoamento superficial produzido na bacia, medido numa determinada seção de controle por meio da metodologia California Culverts Practice (equação 1) (TOMAZ, 2012).

$$tc = 57 \times \frac{L^{1,155}}{H^{0,385}} \quad (1)$$

O tempo de concentração tende a diminuir com a ocupação urbana da bacia, com ocorrência de redução nas perdas por infiltração, uma vez que há aumento na impermeabilização do solo, retificam-se os canais, alteram os revestimentos dos leitos e margens de rios (ZUFFO; LEME, 2005). A velocidade do escoamento se dá em função do comprimento do talvegue e o tempo de concentração calculado.

A vazão produzida numa bacia, com o passar do tempo, aumenta até chegar num pico, quando começa a diminuir novamente até atingir vazões naturais, formando uma curva de representação denominado hidrograma, tendo a vazão de contribuição da bacia em função

do tempo. A variação temporal da chuva denomina-se hietograma. Assim, quanto mais impermeável for a bacia ou quanto maior o tamanho da bacia, maior será o pico de vazão no hidrograma. Esse critério também define uma das vantagens do HUSB, levando em consideração as áreas impermeáveis para definição da vazão de projeto (TOMAZ, 2012).

Para o método Santa Bárbara desconsidera a parte da chuva que evapora, que empoça ou infiltra no solo, sendo calculada somente a chuva que produz as enxurradas, ou seja, o volume de chuva que escoar pela bacia hidrográfica, chamada de chuva excedente ou *runoff*. Um dos métodos para se calcular o *runoff* é o método da curva número (CN) adotado pelo Soil Conservation Service do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, tabelado para diferentes tipos de cobertura da superfície. No método é tido o coeficiente de retardo por meio do tempo de concentração e intervalo de tempo calculado. O potencial máximo de retenção na bacia é determinado pela equação padrão, baseada no valor do CN estipulado para a bacia. O CN utiliza a combinação de características de tipo de solo (tabela 1) e uso e ocupação do solo da bacia (tabela 2), no qual pode-se determinar o percentual de água escoada e retida (TOMAZ, 2012).

Tabela 1: Grupos de solo e características do solo.

GRUPO DE SOLO	CARACTERÍSTICA DE SOLO
A	Solos que produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração. Solos arenosos profundos com pouco silte e argila.
B	Solos menos permeáveis do que o anterior, solos arenosos menos profundo do que o tipo A e com permeabilidade superior à média.
C	Solos que geram escoamento superficial acima da média e com capacidade de infiltração abaixo da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo.
D	Solos contendo argilas expansivas e pouco profundos com muito baixa capacidade de infiltração, gerando a maior proporção de escoamento superficial.

Fonte: TUCCI (2013).



Tabela 2: Valores de CN da curva de runoff para bacias urbanas.

Utilização ou cobertura do solo	Grupos de solo			
	A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo	72	81	88	91
Zonas cultivadas: com conservação do solo	62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições	68	79	86	89
Baldios em boas condições	39	61	74	80
Prado em boas condições	30	58	71	78
Bosques ou zonas com cobertura ruim	45	66	77	83
Floresta: cobertura boa	25	55	70	77
Zonas comerciais e de escritórios	89	92	94	95
Zonas industriais	81	88	91	93
Zonas residenciais				
Lotes de (m <sup>2</sup> )	% média impermeável			
<500	65	77	85	90
1000	38	61	75	83
1300	30	57	72	81
Parques de estacionamento, telhados, viadutos, etc.	98	98	98	98
Asfaltadas e com drenagem de águas pluviais	98	98	98	98
Paralelepípedos	76	85	89	91
Terra	72	82	87	89

Fonte: TUCCI (2013), adaptado pela autora.

Método da curva CN:

$$C = (\Delta t) / (2 \cdot t_c + \Delta t) \quad (2)$$

C = coeficiente de retardo

t<sub>c</sub> = tempo de concentração (segundos)

Δt = intervalo de tempo

$$S = (25.400 / CN) - 254 \quad (3)$$

S = Potencial máximo de retenção

CN = Tabelado (de acordo com o tipo de solo e uso e ocupação do solo)

A chuva excedente acumulada será calculada por meio da equação 4:

$$Q = [(P - 0,2 \cdot S)^2] / (P + 0,8 \cdot S) \quad (4)$$

Q = runoff ou chuva excedente (mm)

P = precipitação (mm)

S = Potencial máximo de retenção após começar o runoff (mm)

A equação do valor de Q é válida quando a precipitação  $P \geq 0,2S$ . Quando o valor da precipitação  $P < 0,2S$ , o valor de Q será igual a zero (TOMAZ, 2012; TUCCI, 2013).

As ordenadas I da hidrograma são calculadas com unidades consistentes, afim de se evitar erros, seu seja, utiliza-se o Sistema Internacional (SI) de Unidades como padrão. A Equação 5 descreve a obtenção do das ordenadas do hidrograma (TOMAZ, 2012; TUCCI, 2013).

$$I = [i \cdot d + i_e \cdot (1.0 - d)] \cdot A \quad (5)$$

I = entrada para o reservatório. São as ordenadas do hidrograma em m<sup>3</sup>/s

i = precipitação total da chuva no intervalo  $\Delta t$  em m/s. Na área impermeável é o runoff

$i_e$  = escoamento da chuva excedente (runoff) na área permeável no intervalo  $\Delta t$  em m/s

d = fração da área impermeável em relação a área total

A = área total de drenagem em m<sup>2</sup>

O runoff do hidrograma  $Q_{(j)}$  de saída pode ser obtido com a constante de armazenamento usando o tempo de concentração ( $t_c$ ) na bacia, descrito conforme equação 6 (TOMAZ, 2012; TUCCI, 2013).

$$Q_{(j)} = Q_{(j-1)} + k_r \cdot (I_{(j-1)} + I_{(j)} - 2 \cdot Q_{(j-1)}) \quad (6)$$

$t_c$  = tempo de concentração em segundos

$\Delta t$  = intervalo de tempo em segundos

$K_r$  = coeficiente de retardo (número adimensional)

Para a definição da chuva de projeto existem vários métodos e procedimentos, escolhido de acordo com as informações disponíveis. Dentre estes está o método do bloco de tormentas, onde se identifica o volume máximo de chuva num determinado tempo de retorno (TOMAZ, 2012; TUCCI, 2013).

A área da bacia de drenagem é obtida por meio do SIG. Para a simulação do nível da água nos canais foi considerado o regime de fluxo permanente, no qual a velocidade e a pressão em determinado ponto não variam com o tempo, sendo constante em cada ponto imóvel do espaço (TUCCI, 2013).

### 3.2.2 Funcionalidades do GRASS

O GRASS-GIS (Geographic Resources Analysis Support System) é um Sistema de Informações Geográficas (SIG), com módulos para processamento e georreferenciamento de imagens multiespectrais, manipulação de dados em formato raster e vetorial, com interfaces para bancos de dados PostgreSQL, MySQL, SQLite, DBF, e ODBC, além de poder ser conectado a outros programas como UMN/Mapserver, R-stats, gstat, Matlab, Octave, Povray, Paraview e outros (GRASS, 2015).

A estrutura dos comandos do GRASS, chamada de módulo, é conduzida individualmente, o que faz do GRASS um SIG bem estruturado e robusto. Além disso, como apenas os módulos necessários estão em execução, os recursos do computador são preservados, e garantem um melhor desempenho do sistema. Ele inclui um grande número de módulos para gestão, processamento, análise e visualização de dados georreferenciados. No total são mais de 400 módulos de análise espacial em diversas temas como análise topográfica, hidrologia, entre outros (Grohman, 2008).

Entretanto, o Grass apresenta uma interface relativamente complicada. Por isso, foi desenvolvida uma integração com o QGIS. O programa QGIS apresenta como vantagem a programação de código aberto, com licença livre e criação em uma rede de usuários voluntários no mundo todo em diversas áreas de pesquisas. Sua base propicia um enfoque unificado para o tratamento da informação geográfica, com princípios baseados em interface de menus e ferramentas com recursos personalizados, possibilitando a geração de

produtos a partir de ferramentas e gerenciamento de dados (LONGLEY et al., 2013; QGISBRASIL, 2015).

Ao contrário da maioria dos SIG's, o GRASS fornece acesso completo à sua estrutura interna e algoritmos, no qual os usuários avançados podem criar seus próprios módulos e desenvolver seus códigos, utilizando o *Application Programming Interface* (API) (GRASS, 2015). Ele foi desenvolvido pelo Exército dos EUA, Engenharia de Construção Research Laboratories (EUA-CERL), uma filial do Corpo de Engenheiros do Exército, como uma ferramenta para gestão da terra e planejamento ambiental por militares. Este ao passar dos anos, evoluiu para um utilitário composto por uma vasta gama de aplicações, e atualmente é utilizado em ambientes acadêmicos e comerciais em todo o mundo, bem como agências governamentais como, a NASA, NOAA, USDA, DLR, CSIRO, o National Park Service, os EUA Census Bureau, USGS (GRASS, 2015).

A funcionalidade do GRASS está distribuída em ferramentas de execução com resultados eficientes na interpretação de ações em âmbito espacial e ambiente multiusuário. As interfaces de análises hidrológicas são aplicadas ao gerenciamento de bacia, com suporte a diferentes tipos de análise e delimitação (GRASS, 2015; GROHMANN, 2008). Entre as ferramentas disponíveis, destacam-se as aplicadas nesta pesquisa que são:

- r.fill: usada para corrigir eventuais erros e depressões no Modelo Digital de Elevação.
- r.watershed: criação de bacias e direção de fluxo.
- r.mapcalculator: utilizada para delimitação de hidrografia automática, baseado na direção de fluxo calculada anteriormente.
- s.slope.aspect: usada para criação do mapa de declividade, aspecto e as derivadas X e Y, base para a definição das áreas de inundação. Derivadas parciais são usadas para determinar a magnitude e direção da velocidade do fluxo de água.
- r.sim.water: é utilizado para simulação do escoamento superficial, no qual o fluxo de água superficial é descrito pela forma de duas variáveis de equações de Saint Venant.

A solução numérica baseia-se no conceito de dualidade entre a representação de campo e a quantidade de partículas de modelado. A função método de Monte Carlo de Green, usada

para resolver a equação, fornece robustez necessária para as condições espacialmente variáveis e altas resoluções (MITAS; MITASOVA, 1998). Os insumos calculados anteriormente são inseridos no modelo e incluem ainda a taxa de excedente de chuvas, o coeficiente de rugosidade dada por  $n$  de Manning, a intensidade de precipitação, taxa de infiltração que depende de propriedades do solo e cobertura da terra, a razão de permeabilidade que definem a probabilidade de partículas passem através da estrutura (os valores serão 0 -1), a profundidade da água em metros e a descarga de água em  $m^3/s$ . Todos esses dados são inseridos como rasters, calculados no próprio Grass, ou incluídos os valores de referência. Estes parâmetros variam no espaço e no tempo. O resultado é o mapa de ocupação das manchas de inundação e a profundidade distribuída (GRASS, 2015).

Tanto o modelo GRASS como HEC-RAS trabalham com o escoamento superficial da água como um processo distribuído, e correspondem a uma aproximação unidimensional na modelação do escoamento na linha de água, no qual a velocidade e a profundidade variam na direção longitudinal, no tempo e no espaço. Os modelos são calculados por meio das equações de Saint-Venant, que permitem calcular a taxa de escoamento e o nível de água como funções do tempo, utilizando-se do método da onda cinemática para propagar a cheia. Essas equações traduzem os princípios físicos da conservação de massa e da conservação da quantidade de movimento, onde o modelo de ondas cinemáticas considera a declividade da linha de energia igual à declividade da superfície do solo, assumindo assim uma seção transversal média de escoamento. Neste contexto o escoamento varia gradualmente ao longo do canal, podendo-se desprezar as acelerações verticais e considerar a distribuição da pressão segundo a vertical hidrostática. Os efeitos de deposição e destacamento do fundo não influenciam devido ao baixo declive, e é aplicável o coeficiente de rugosidade proveniente da Equação de Manning para os quantificar (LANÇA, 2000; GUIMARÃES, 2009; BARRETTO, 2010; GRASS, 2015).

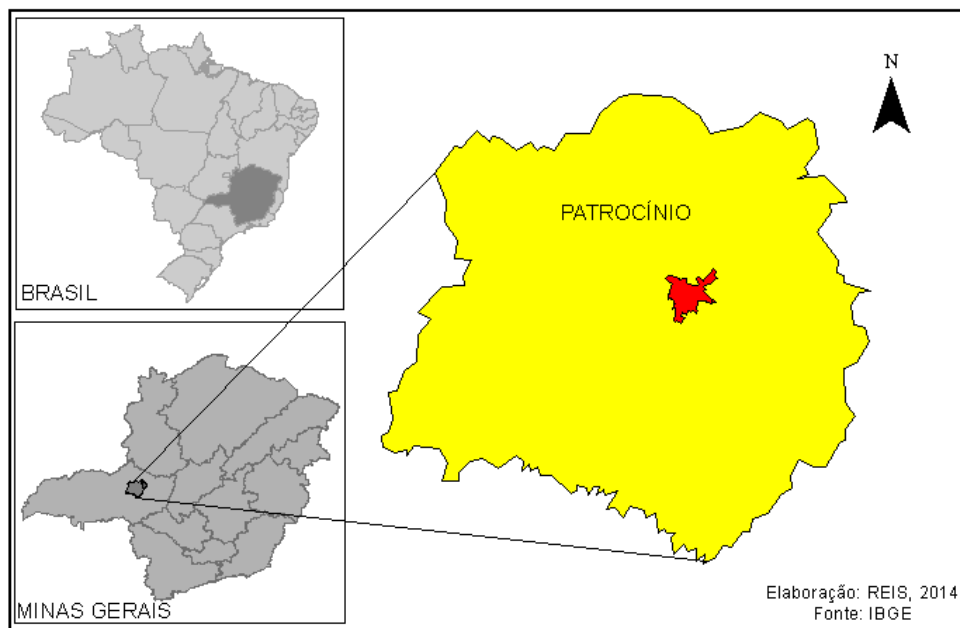
## CAPÍTULO 4

# IMPLEMENTAÇÃO DE MAPAS DE RISCO PARA PATROCÍNIO-MG

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Patrocínio está localizado na Mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba, Estado de Minas Gerais, conforme Figura 6, compreendido pelas coordenadas geográficas centrais 18°56'25"S e 46°59'36"W, com 2.874,344 km<sup>2</sup> de área de abrangência e 87.178 habitantes, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014). O município faz limites com os municípios de Coromandel, Monte Carmelo, Iraí de Minas, Perdizes, Serra do Salitre, Cruzeiro da Fortaleza, Guimarães.

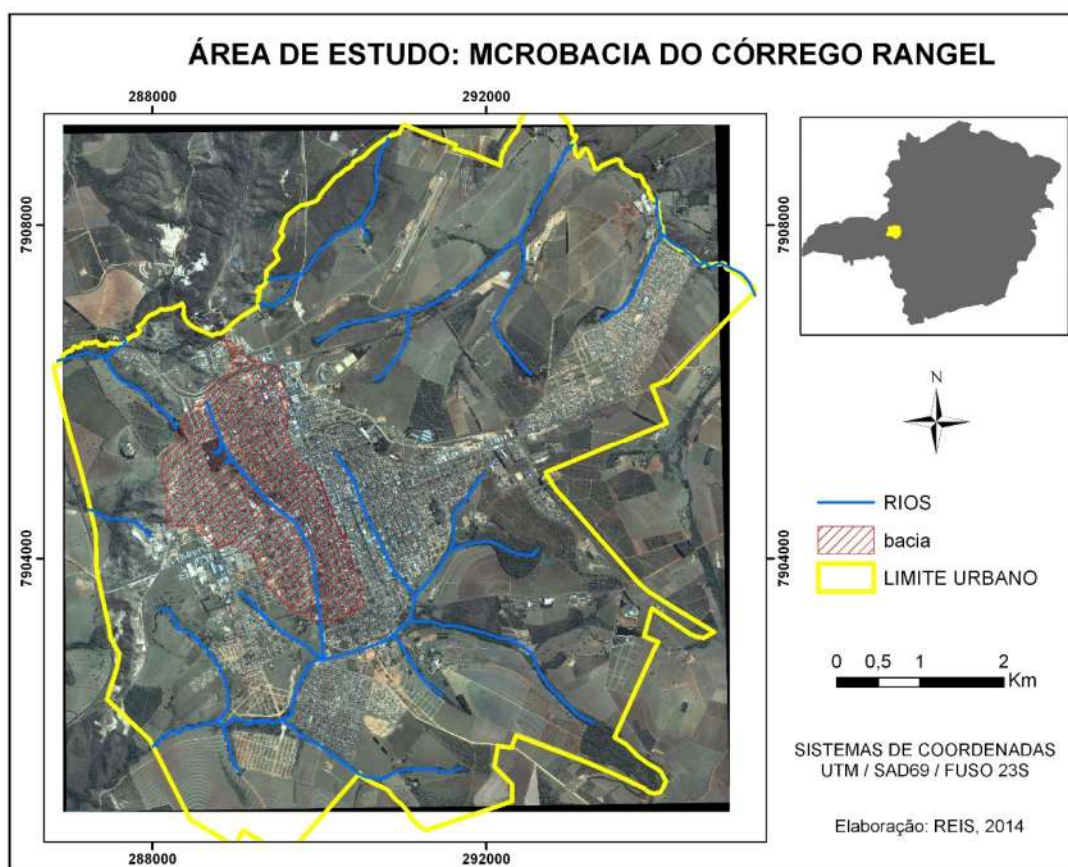
Figura 6: Mapa de localização do município de Patrocínio, MG.



Fonte: Autora.

A área de estudo se localiza na Microbacia do Córrego Rangel, como mostra a Figura 7, o qual cobre grande parte do perímetro urbano de Patrocínio, e contempla uma área de 4,46 km<sup>2</sup>. A escolha da área foi devida esta apresentar sérios problemas com enchentes e inundações provenientes das precipitações, e pelo fato da disponibilidade dos dados da bacia com relação a levantamento topográfico e imagens, fundamental à implantação do modelo de avaliação.

Figura 7: Mapa de localização da área de estudo na cidade de Patrocínio, MG.



Fonte: Autora.

De acordo com Machado (2001), a expansão da fronteira agrícola na década de 70 e introdução da cultura cafeeira, proporcionaram mudanças significativas nos setores ambiental, econômico, social e cultural do município. As mudanças ambientais se concentram na retirada do cerrado em decorrência da expansão urbana, que representa um dos impactos mais significativos provocados pelo homem no ambiente urbano. Na área econômica o crescimento se deu mais concentrado nas atividades vinculadas ao cultivo

agropecuária e comercial, quanto às transformações sociais, Patrocínio passou por significativa imigração, proveniente da demanda de serviços nas colheitas de café (MACHADO, 2001).

Com relação ao clima, esta região está inserida, segundo classificação de Köppen, no tipo tropical de altitude (Aw), com um índice pluviométrico de 1.544 mm/ano, sendo inverno seco e verão altamente chuvoso, ocasionado pelos sistemas intertropicais e polares (SILVA; MALVINO, 2005). Entre maio e agosto predomina a estação seca e os meses de abril, setembro e outubro são de transição. A umidade do ar oscila entre níveis de 90% a 15% e as temperaturas médias máximas são em torno de 27°C e mínimas de 15°C, sendo a média de 19°C.

Os solos locais, de acordo com levantamentos feitos pela Embrapa Solos, apresentam variações de Cambissolos, Latossolo Vermelho-Amarelo, Latossolos Vermelho-Amarelo e Latossolo. A exposição de rochas em trechos mais acidentados e íngremes expressa o tipo de solo poucos espessos (cambissolos) ou quase inexistente. O material detrítico é pouco profundo em média 10 cm de espessura, tendo logo abaixo rochas do tipo micaxistos, filitos e predominância de quartzitos (MACHADO, 2001; BERNARDES, 2010).

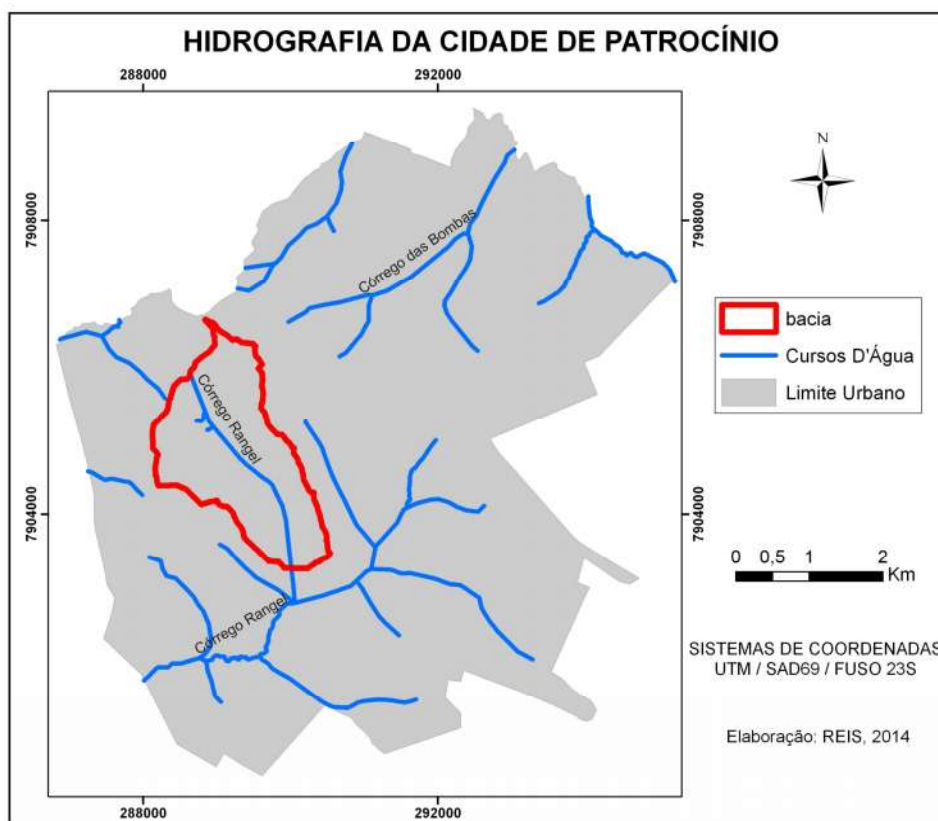
A cobertura vegetal da área apresenta basicamente três formações, típicas do bioma Cerrado, que podem ser identificadas em sua distribuição espacial, apresentando estreita correlação da paisagem fitogeográfica com a topografia, e variações mais sutis nos aspectos fisionômicos da vegetação estão associadas à divergência pedológica. Nos topos de morro a vegetação é características de formações herbáceas, e nos vales tem ocorrência de vegetação arbórea com espécies variadas do cerrado, tendo nas áreas de declives suaves e planas, desde campo sujo a cerradão. A mata ciliar concentrada ao longo dos rios funciona como um filtro natural, responsável pela retenção dos poluentes e sedimentos que chegariam ao curso d'água e fundamental para o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos (MACHADO, 2001).

Patrocínio se encontra inserido dentro de uma área geologicamente do Arco da Canastra que serve de separação entre as bacias do São Francisco e do Paraná, com altitudes por volta de 1.100 metros noroeste/sudeste. O município é um grande divisor de águas entre os



rios Quebra Anzol e Paranaíba, com vertentes situadas no perímetro urbano, sendo o Rio Quebra Anzol o mais influente. A hidrografia possui características que reflete toda a estrutura litológica existente, com drenagem do tipo dentrítica, com riachos fluindo para rios maiores. Os rios presentes nas áreas limite do relevo dissecado possuem vales mais abertos, dando condições para instalação urbana e da agricultura (MACHADO, 2001). Na Figura 8 é apresentada a hidrografia da cidade de Patrocínio.

Figura 8: Mapa da hidrografia da cidade de Patrocínio, MG.



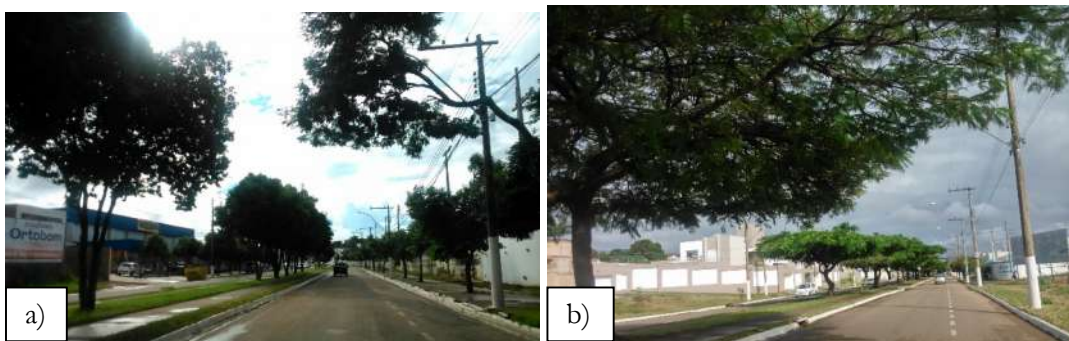
Fonte: Autora.

A Bacia do Córrego Rangel possui um elevado grau de impermeabilização do solo, devido à proximidade da região central da cidade, sendo 75% de áreas impermeáveis, e as margens da calha canalizada do rio ocupadas por infraestrutura concentrada na parte superior do curso (montante), e loteamentos abertos na parte baixa da bacia (jusante), o que propicia o direcionamento rápido do fluxo para o exutório da bacia.

A área compreende dezesseis bairros, sendo o Centro, São Vicente, Marciano Brandão, Olímpio Nunes, Santa Terezinha, Amir Amaral, Por do Sol, Santo Antônio, São Cristóvão, Matinha, São Francisco, Manuel Nunes, Congonhas, Cruzeiro da Serra, Belvedere e Industrial. Todos apresentam cobertura asfáltica, rede de esgoto e distribuição de água tratada instalada. Ao longo dos anos observou-se um adensamento nesses bairros, identificados na pesquisa de Reis; Schmidt (2013).

O Córrego Rangel, na área de estudo, é totalmente canalizado, formador da Avenida Dom José Coimbra, uma via arterial de fluxo rápido que faz a ligação entre vários bairros, inclusive o centro da cidade. A ocupação da bacia se deu tanto por estabelecimentos comerciais quanto por residências, com presença de prédios, sendo a área da avenida projetada com dimensões que obedecem aos critérios de ocupação descritas no PD. Um desses critérios é a exigência de afastamento de 20 metros para as construções ao longo da avenida, evitando o adensamento da via. A Figura 9 ilustra a área de ocupação ao longo do curso canalizado.

Figura 9: (a; b) Ocupação da área de entorno do curso fluvial canalizado, Patrocínio, MG.



Fonte: Autora.

Ao longo da avenida existem pontos críticos, localizados em interseções das avenidas em que há maior acúmulo de água, devido a impermeabilização das vias de ligação que faz com que a água precipitada, escoe com maior fluidez pelo canal, chegando ao exutório mais rapidamente e com maior intensidade. A Figura 10 apresenta os pontos de interseção e os danos causados pelas enchentes e inundações.

Figura 10: (a; b; c) Inundações identificadas na bacia do Córrego Rangel, ao longo da Avenida Dom José André Coimbra.



Fonte: Autora; Patrocínio Online (2014).

A Figura 11 apresenta os danos causados pelos problemas de drenagem na bacia como o carregamento de veículos, a retirada da cobertura asfáltica, afundamento de parte das vias pelo colapso do solo e o carregamento de detritos de topo tipo.



Figura 11: (a; b; c; d) Danos causados pelas enchentes e inundações ao longo da Avenida Dom José André Coimbra.



Fonte: Autora.

Restam somente algumas áreas de vegetação conservada, localizada pontualmente ao longo da bacia, como o Horto da Matinha, Figuras 12 e 13, com implicações diretas nas inundações das áreas mais baixas. Localizada na parte superior do curso, esta área verde amortece parte da água que precipita na região oeste da bacia.

Figura 12: (a; b) Vista frontal do Horto da Matinha.



Fonte: Autora.

Figura 13: Vista superior do Horto da Matinha.



Fonte: Google Earth (2015).

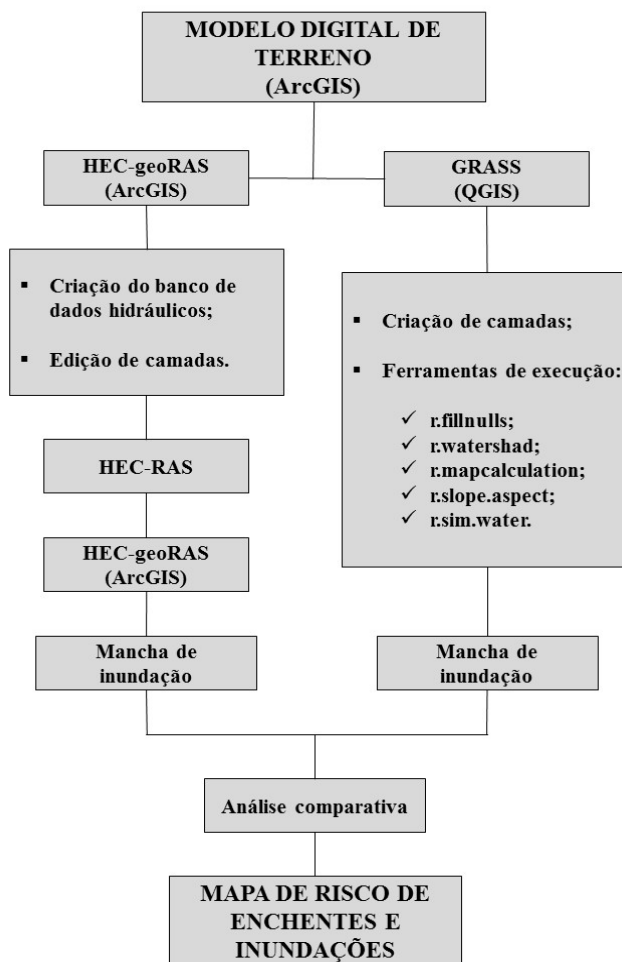
Entretanto, essas áreas tendem a desaparecer com a consolidação da ocupação urbana sem planejamento adequado, o que proporciona problemas de interesse social, econômico e ambiental. Sendo fator determinante no aumento das cheias nos córregos, o crescimento urbano impacta diretamente as características naturais da superfície ao implantar a cobertura impermeável, que reduz ou mesmo bloqueia o potencial de infiltração do solo. Esses fatores acarretam no escoamento direto da água da chuva em maior intensidade. Por isso, é sugerido o conhecimento do comportamento desses fenômenos e dentre as técnicas está o uso de modelos de simulação topográficos e hidráulicos integradas a análise espacial por meio de geotecnologias, proposto nesta pesquisa, e apresentado a seguir.

## 4.2 METODOLOGIA DE INTEGRAÇÃO DO SIG E MODELOS HIDRÁULICOS

A metodologia utilizada para análise e delimitação das áreas de risco as enchentes e inundações seguem o seguinte fluxo de etapas descritos na Figura 14. As etapas se iniciam com a construção do Modelo Digital de Terreno que posteriormente é analisado pelos programas de SIG e modelagem hidráulica (ArcGis, QGIS, HEC-RAS e GRASS), afim de

se ter a delimitação das áreas de risco às enchentes e inundações na área da bacia hidrográfica do Córrego Rangel.

Figura 14: Fluxograma de etapas de processamento.



Fonte: Autora.

#### 4.2.1 Construção dos dados base para simulação

Para análise dos dados são estabelecidos os critérios que melhor definem as áreas ocupadas pelas enchentes e inundações. Estes critérios constituem planos de informações que são elaborados com base na representação que cada característica estabelece na construção da modelagem espacial, no qual definem parâmetros essenciais na interpretação. Os critérios são definidos de acordo com pesquisas publicadas, entre elas estudos de Hansen (2008) no

qual são propostos métodos para determinação de eventos de inundação. No estudo foram definidos os seguintes planos de informações contidos na Tabela 4:

Tabela 3: Quadro resumo das informações espaciais utilizadas no projeto.

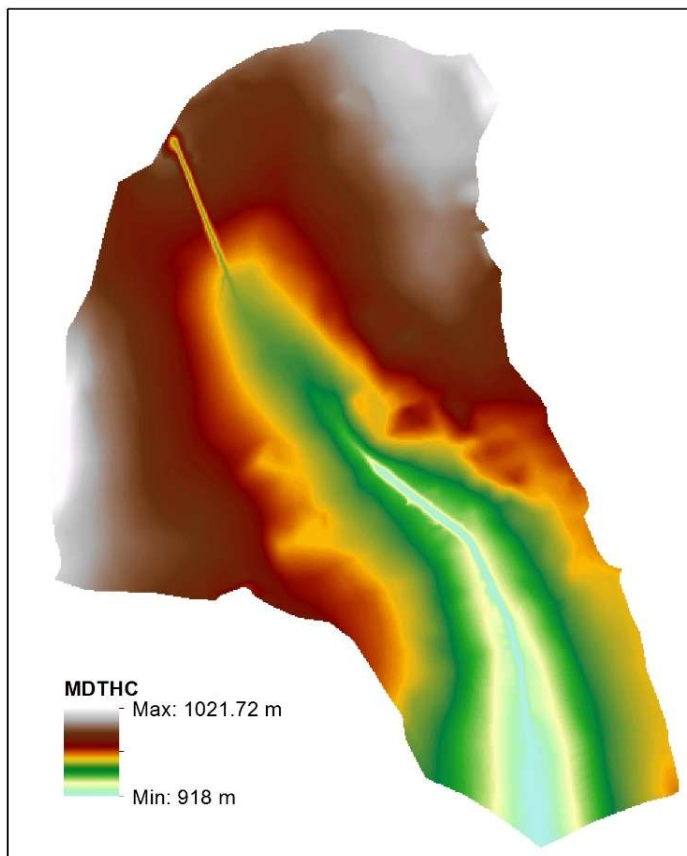
CAMADA	TIPO	DESCRIÇÃO
Altimetria (Curvas de nível)	Vetor (linhas)	Dados de altitude da área
Hidrografia	Vetor (Linha e Polígono)	Limite compreendido por rios, lagos e represas
Bacia do Rio Rangel	Vetor (Polígono)	Delimitação da área da bacia
Uso e ocupação do solo	Vetor (polígono)	Caracterização do uso e ocupação das terras
Tipos de solo	Vetor (polígono)	Levantamento da EMBRAPA Meio Ambiente
Imagem de satélite	Raster	Imagem da bacia hidrográfica

Fonte: Autora.

Para a simulação da mancha de inundação em ambos os programas (ArcGis/HEC-RAS e QGIS/GRASS) a primeira etapa é criar o Modelo Digital de Terreno, construído a partir do programa ArcGis, por meio da base cartográfica altimétrica, disponibilizada pela Prefeitura Municipal de Patrocínio, em escala de 1:20.000, confeccionado através do levantamento dos pontos situados nos quarteirões em toda a área da bacia, com equidistância de 1 metro. O MDT fornece uma base para predição do escoamento da água sobre a superfície, caracterizando assim muitas propriedades hidrológicas (LONGLEY, 2013).

À priori foram testadas duas ferramentas para elaboração do MDT, sendo a construção do TIN e através da interpolação *topo to raster*. O TIN apresentou erros definitivos para a simulação da mancha de inundação, sendo assim, definiu-se o uso do MDTHC - Modelo Digital de Terreno Hidrologicamente Correto, proveniente do *topo to raster*, que utiliza além dos dados de altimetria, a drenagem afim de adequar o modelo a eventuais depressões e variações na superfície caracterizadas pelos recursos hídricos. A altitude na área da bacia varia de 918 a 1.022 m e o MDT está representado na Figura 15.

Figura 15: Modelo Digital de Terreno Hidrologicamente Correto – MDTHC.



Fonte: Autora.

Com base no MDT gerado são confeccionados os mapas de elevação e declividade. Na representação do MDT as áreas de maior declividade apresentam alta densidade de pontos nas zonas mais abruptas.

O mapa temático de declividade (*slope*) das vertentes, tem por objetivo evidenciar a distribuição das inclinações de uma superfície do terreno, em relação a um eixo horizontal. Consiste num plano de informação de importância significativa, visto que as declividades dos terrenos influenciam diretamente no controle do escoamento superficial. É definida, de acordo com Felgueiras (1998), por um plano tangente a aquela posição da superfície modela pelo MDT, e é composta por duas componentes: o gradiente que é a razão de variação da cota  $Z$ , e a exposição que é a direção dessa variação da cota.



Na definição dos critérios de declividade, após a construção do MDT, é gerado o mapa de declividade seguindo a dada classificação proposta pela EMBRAPA (1979), mais utilizada nas pesquisas brasileiras, e que representa de forma concisa o relevo, descrita na Tabela 5, como mostra a Figura 11. Como a área de estudo não apresenta relevo superior a 75%, enquadrado pela EMBRAPA como relevo escarpado, este não consta na reclassificação estabelecida para possibilitar as análises de multicritério, reclassificando-os em 5 classes, criando assim o slope reclassificado.

Tabela 4: Classes de declividade.

CLASSES DE RELEVO	CLASSES DE DECLIVIDADE (%)	RECLASSIFICAÇÃO
Plano	0-3	5
Suave Ondulado	3-8	4
Ondulado	8-20	3
Forte Ondulado	20-45	2
Montanhoso	45-75	1

Fonte EMBRAPA, 1979, adaptado pela autora.

Para cada atributo da camada foi dado um valor de referência, o qual reclassifica a amostra de forma padronizar a análise dos resultados. De posse do modelo topográfico são criadas as simulações de enchentes e inundações.

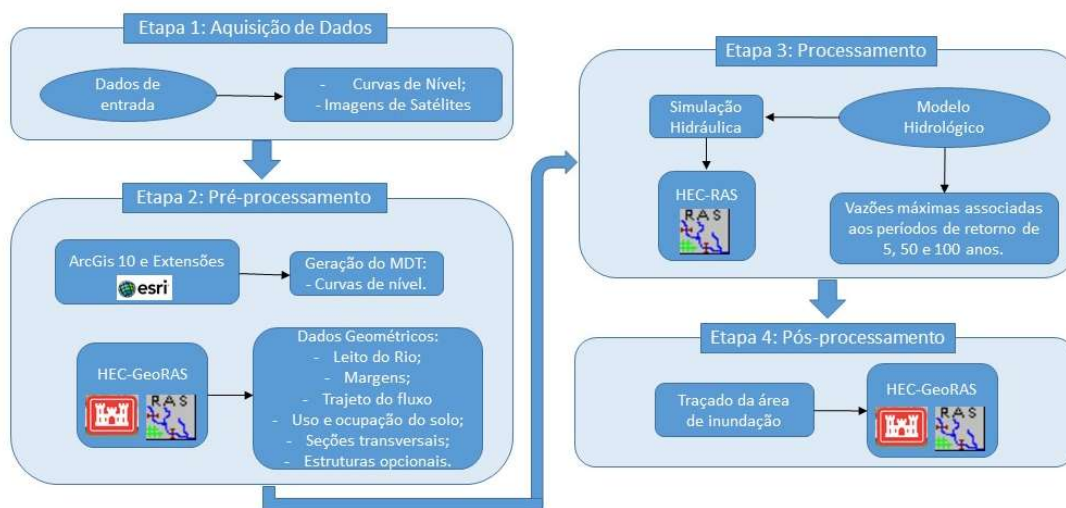
#### 4.2.2 Modelagem no HEC-RAS

Para a simulação das inundações um dos parâmetros utilizados é a série histórica de precipitação, visando a obtenção da chuva máxima de projeto para a região de análise. Neste contexto, seguindo estudos de Tucci (2013), a precipitação máxima é determinada com base no risco ou tempo de retorno escolhido para o projeto, que para a modelagem de inundação, geralmente são utilizados 100 anos. Tendo em vista a escassez de dados pluviométricos da área de estudo os dados de precipitação considerados foram os da Estação Charqueada, que detém informações do ano de 1966 a 2014 (48 anos). Deste período foi usado o valor de precipitação de 133,5 mm, que corresponde à chuva mais intensa ocorrida para os cálculos da vazão de projeto, registrada em 25 de dezembro de 2007. E escolhido a precipitação de 104,3 mm, registrada em 01 de março de 1971, para

comparação dos resultados. Estes valores foram registrados ao longo de 24 horas e distribuídos ao longo do tempo através do Hietograma de Huff, tendo como referência 1º Quartil.

O dimensionamento hidráulico da bacia foi realizado por meio do estudo da água que escoar superficialmente pela área, sem adentrar ao sistema de drenagem presente, ou seja, somente a água que escoar superficialmente pela bacia. A modelagem foi realizada, mediante a criação de um banco de dados com informações necessárias aos cálculos e simulação, componentes do pré-projeto, no qual integram dois programas: o Arcgis, com a ferramenta HEC-GeoRAS e o HEC-RAS. Na Figura 16 é apresentado o fluxograma do esquema de desenvolvimento da modelagem no HEC-GeoRAS até sua integração com o HEC-RAS.

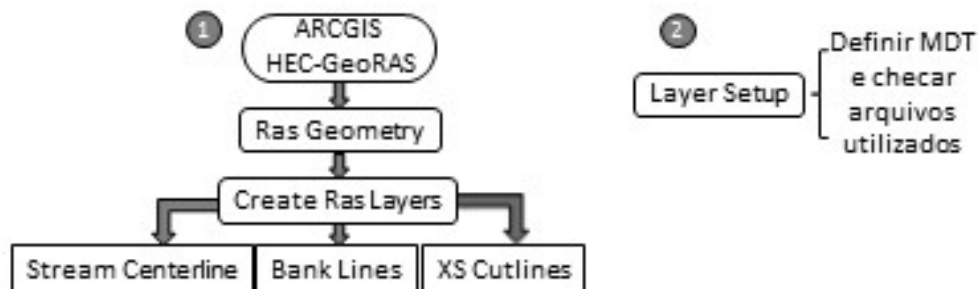
Figura 16: Fluxograma de modelagem



Fonte: NETO; TAVARES (2013), adaptado pela autora.

No HEC-geoRAS são definidas áreas restritas em pontos do rio fundamentais a simulação do modelo, criadas a partir de shapes integrados ao banco de dados e editados de acordo com as regras estabelecidas para a correta descrição. De posse do MDT, construído anteriormente, realiza-se a obtenção das malhas de informações do HEC-geoRAS, conforme itens 1 e 2 da Figura 17. As camadas são inseridas automaticamente, em branco, no projeto para assim serem editadas e construídas seguindo as características locais.

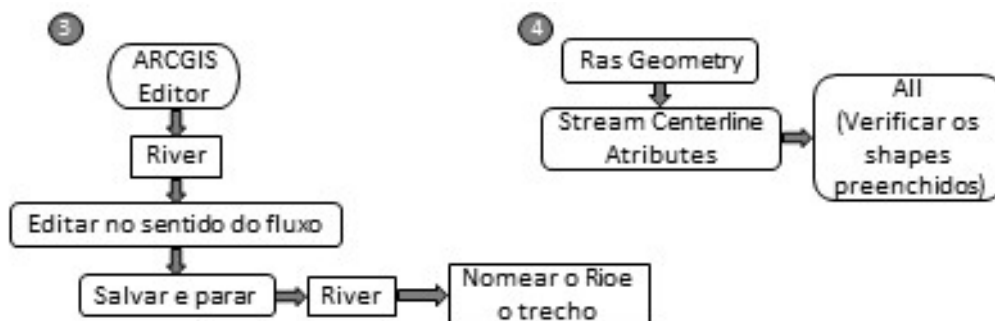
Figura 17: Etapa de construção das camadas no HEC-GeoRAS.



Fonte: FRANÇA; RIBEIRO (2013), adaptado pela Autora.

Primeiramente foi editado e delimitado o centro do rio, que define a calha principal do curso d'água e seus afluentes, sendo que o traçado obedecendo o sentido de montante para jusante. Este procedimento se deu por meio do mapeamento dos cursos d'água disponibilizado pelo IBGE. Após a delimitação, cada canal é nomeado e são inseridas as informações de comprimentos dos cursos automaticamente por meio da ferramenta, de acordo com os itens 3 e 4 descritos na Figura 18.

Figura 18: Fluxograma de construção no HEC-GeoRAS.

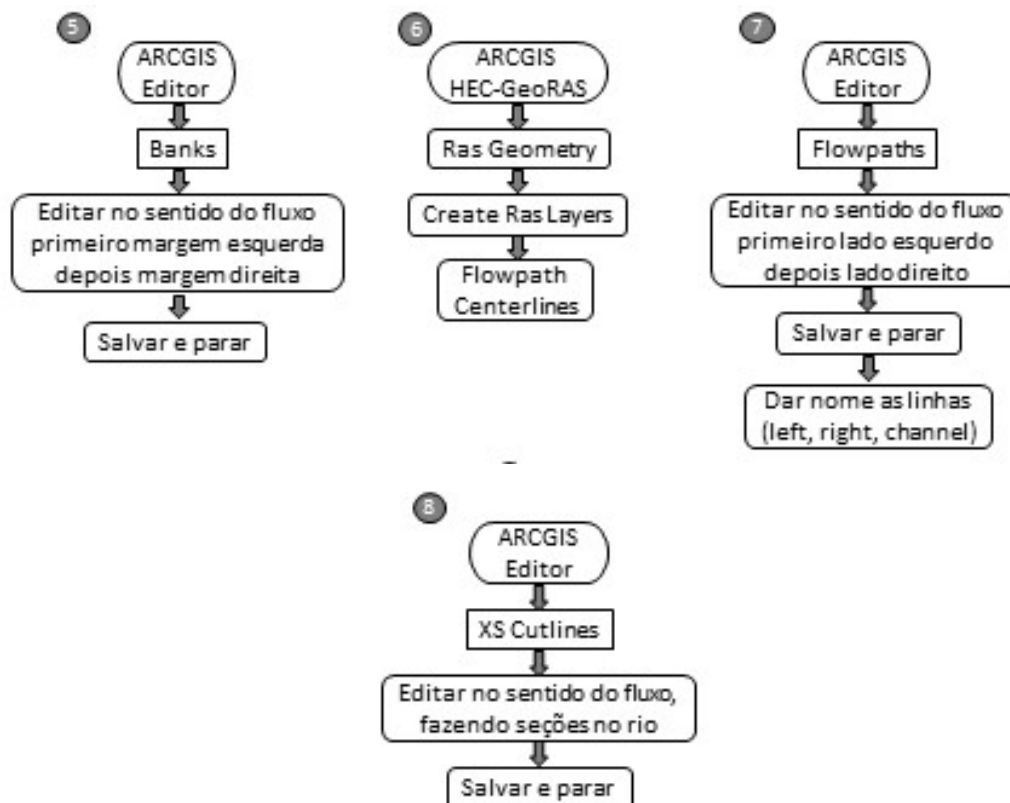


Fonte: FRANÇA; RIBEIRO (2013), adaptado pela Autora.

Posteriormente, foi editada a camada *Banks* representando as margens de ocupação do rio, utilizando-se imagens de alta definição, disponibilizadas pela Prefeitura Municipal de Patrocínio, visando melhor resultado e precisão dos dados. A edição se dá do lado esquerdo primeiro e depois o lado direito, sempre de montante para jusante. O fluxo de escoamento (*flowpaths*) é usado para definir os fluxos e direções ao longo da faixa provável de inundação e enchente. Este é editado construindo-se a linha central equivalente ao caminho do rio, e lado direito e esquerdo traçados dentro da várzea do rio. A camada

*XS\_Cutline* é editada para delimitar um conjunto de perfis transversais com informações da altimetria distribuídos ao longo do rio, sendo digitalizada sempre da esquerda para a direita com o devido cuidado de percorrer perpendicularmente toda a calha do rio. O padrão de inserção dos dados é de forma a evitar eventuais erros no processamento. A Figura 19 apresenta as etapas 5, 6, 7 e 8 de edição em cada camada.

Figura 19: Fluxograma de construção no HEC-GeoRAS.



Fonte: FRANÇA; RIBEIRO (2013), adaptado pela Autora.

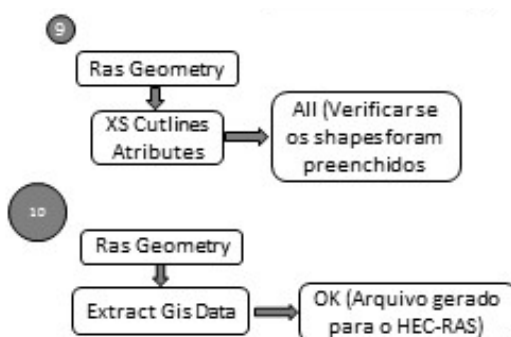
Foram definidas para testes, diferentes combinações entre equidistâncias das curvas de nível e distância entre as seções transversais. As curvas de 1 metro foram modeladas com seções com 50, 100 e 200 metros de distância. As curvas de 5 metros e de 10 metros foram modeladas com seções transversais traçadas de 100 metros. Essa metodologia visa comparar os efeitos sobre os níveis de detalhamento da área de forma a identificar a que represente sem incoerências.

Para composição do modelo são necessárias informações dos valores do coeficiente de rugosidade de Manning ( $n$ ) para cada tipo de material constituinte da área da bacia. Este se dá por meio do mapeamento de uso e ocupação do solo, no qual são definidas as diferentes coberturas da superfície e assim, sendo possível a distribuição dos coeficientes ao longo da bacia hidrográfica, inserida na tabela de atributos da camada. O parâmetro  $n$  é critério obrigatório para delimitação das áreas de inundação. O mapa de uso e ocupação do solo então foi criado por meio das imagens do Google Earth, disponibilizado gratuitamente e classificadas de acordo com cinco classes representativas do local, sendo vegetação densa, vegetação baixa, solo exposto, asfalto e superfície impermeável. Estas foram vetorizadas no Arcgis buscando maior detalhe da área de estudo.

Para cada componente criado são preenchidas as tabelas de atributos com as informações obrigatórias a execução do modelo de forma sequencial, atentando para todos os detalhes de preenchimento automático dessas tabelas. Essas informações são a base para simulação e composição no HEC-RAS.

Após a construção dos dados de acordo com o procedimento obrigatórios, os arquivos finais são exportados para a utilização no HEC-RAS e assim se dar a simulação das enchentes e inundações na bacia do Córrego Rangel, conforme itens 9 e 10 (Figura 20).

Figura 20: Procedimento de exportação dos arquivos no HEC-GeoRAS.



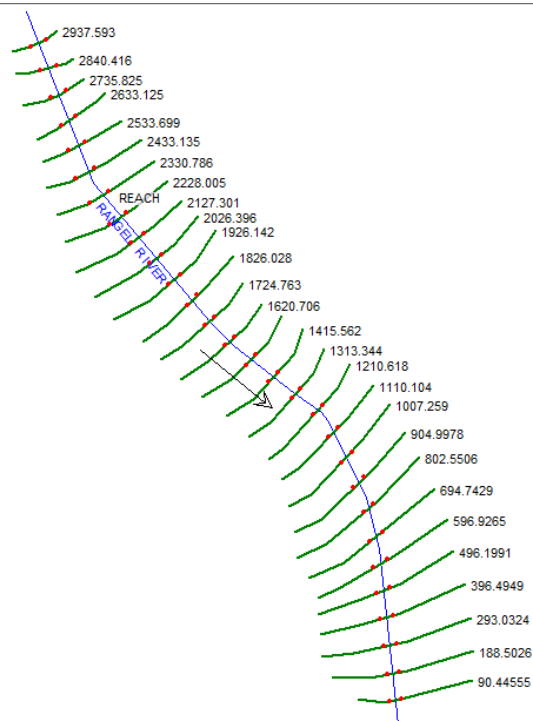
Fonte: FRANÇA; RIBEIRO (2013), adaptado pela Autora.

Diante das informações construídas no HEC-GeoRAS, os arquivos são importados na plataforma do HEC-RAS. Os componentes necessários a simulação da inundação são a

forma, o fluxo/vazão ou nível de água e as condições de entorno, para que se possa obter o cálculo e dimensionamento da superfície da água em regime permanente.

Ao se criar o projeto, o arquivo de projeções é gerado e mantém o georreferenciamento dos dados processados no programa. Todas as linhas de fluxo e seções transversais são inseridas no banco. No software HEC-RAS, é mantido o Sistema de unidades *US Customary units*, de modo a permitir a representação da rede de drenagem e os demais elementos em projeção UTM e Datum SAD69, assim como o cálculo da vazão em  $\text{m}^3/\text{s}$ . Em testes utilizando o Sistema SI de unidades verificou-se que o mesmo perdia as informações de georreferenciamento da camada de análise. Para importação dos arquivos no HEC-RAS faz-se necessário a observação e conferência de todas as linhas de fluxo e seções transversais, geradas no HEC-geoRAS, se estas estão devidamente preenchidas, de forma a evitar eventuais erros na simulação. Após esse procedimento, os dados são devidamente importados e apresentados conforme Figura 21

Figura 21: Janela de apresentação das geometrias no HEC-RAS.



Fonte: Autora.

Nesta etapa são corrigidas as geometrias que eventualmente apresentem erros, por meio da ferramenta de edição. Para cada seção transversal é aceito o limite de 500 pontos de elevação, sendo 20 referências de número de Manning cada. Caso as geometrias apresentem valor superior é necessário que se faça a adequação antes de prosseguir com a modelagem. A verificação é uma boa prática de qualidade dos dados para garantir que nenhuma informação incoerente seja transmitida.

Seguindo as recomendações de Merwade (2012), a seção transversal poderá ter no máximo 500 pontos de elevação e 20 valores de Manning. Como não é necessário grande número de pontos, pois podem ocorrer alguns redundantes, através do filtro de seção transversal esse número é reduzido para 300, visando minimizar o impacto das mudanças na área da seção, e os valores de  $n$  aglomerados para não exceder o limite.

Os fluxos são normalmente definidos no local a jusante de cada rio e em junções, denominado exutório da bacia, no qual são estabelecidos o ponto de controle (PC) para cálculo da vazão de projeto. Na pesquisa foi definido como PC o ponto de saída da bacia (exutório), visando adequar a área de contribuição a montante para o modelo hidrológico escolhido, haja vista que o mesmo não apresenta afluente que necessite a implantação de novo PC. A partir da definição da área de contribuição é calculada a vazão de projeto que caracteriza a área de entorno da bacia hidrográfica.

No HEC-RAS o perfil é caracterizado nas condições de contorno. Estes são definidos na inserção dos dados de fluxo, no qual são inseridas as vazões máximas no Córrego Rangel e as condições de contorno, como por exemplo a declividade do terreno. As condições de fluxo ideal são compostas por todas as condições possíveis, descritos os cursos superior, médio e inferior. Cada perfil detém uma situação diferente, tendo a vazão de projeto calculada pelo modelo hidrológico baseado no tempo de retorno estabelecido.

Para a obtenção das vazões máximas na Microbacia do Córrego Rangel, foram avaliados dois métodos de cálculos, o Método Racional e o Método Santa Barbara. Devido ao nível de detalhe e seu resultado mais próximo ao valor real da vazão, foi escolhido o Método do Hidrograma Urbano de Santa Bárbara (HUSB) por possibilitar a obtenção do hidrograma

de projeto a partir da chuva excedente. A área de contribuição da bacia hidrográfica é obtida por meio do SIG.

Nas condições de entorno é determinada a condição de declividade normal (0,001) para as dimensões do talude, de acordo com as orientações de Merwade (2012) e Nania; Molero (2007), com *dowstream / known WS* igual a 2, equivalente a 1 metro de coluna de água. O regime supercrítico é utilizado para simulação, visto que, para o mesmo, a profundidade é relativamente pequena, de modo que a velocidade é grande.

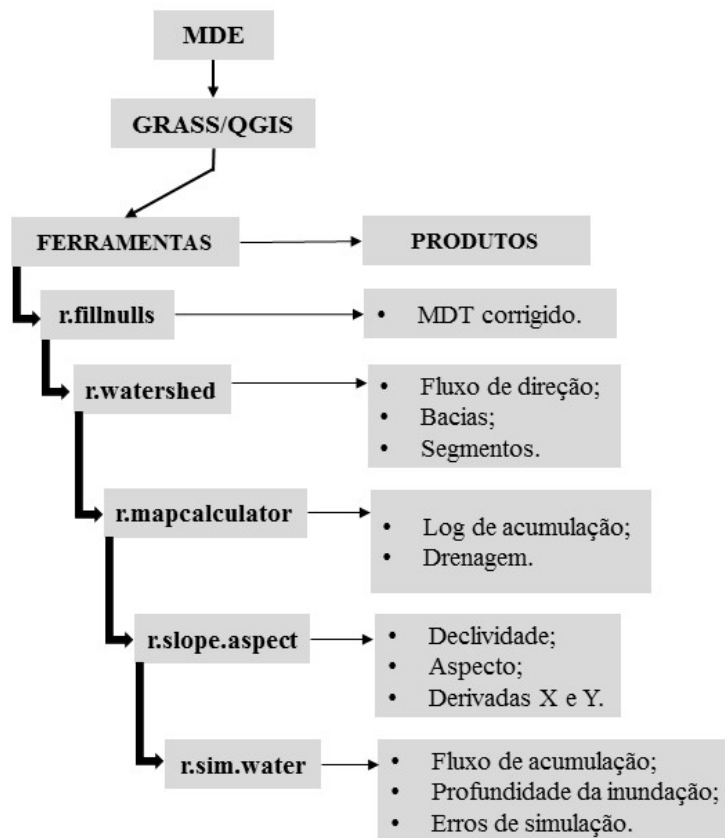
Os dados obtidos através da simulação hidráulica utilizando a vazão máxima calculada é processada sobre o MDTHC e as outras informações da bacia, e são exportados novamente para o ArcGis, permitindo assim a visualização da extensão das áreas de alagamento. No HEC\_GeoRAS os dados são inseridos no banco de dados, no qual é gerado um polígono delimitador da extensão da inundação e enchentes, ligando os terminais de seções. Por meio da ferramenta de mapeamento da mancha são geradas as superfícies de água. Após essa etapa é criado o GRID que delimita o polígono de inundação. Todos os arquivos, inclusive o GRID deve estar num mesmo sistema de referência, para que não haja incoerência ou deslocamento dos dados.

#### 4.2.3 Modelagem no QGIS/GRASS

As simulações realizadas no QGIS utilizaram o GRASS através da biblioteca *simlib*, que inclui funções com módulos exclusivos para simulação de fluxos, sendo nessa pesquisa usado o *r.sim.water* para águas superficiais. No programa QGIS todas as etapas são processadas em etapa anterior e inseridas nas ferramentas de análise hidrológicas disponíveis no GRASS. A Figura 22 apresenta as etapas de processamento no QGIS e GRASS.



Figura 22: Fluxograma das etapas editadas no QGIS e GRASS.



Fonte: Autora

Primeiramente foi corrigido o MDT retirando eventuais erros presentes no modelo, com o objetivo de ponderar pontos com valores fora do relevo em função de erros de registro ou de interpolação. Estes pixels são caracterizados por altos picos ou mesmo grandes depressões, que impedem a formação da estrutura morfológica da bacia de forma adequada. Esses erros são provenientes de escala, amostragem ou mesmo da própria interpolação.

O segundo passo é criar o mapa de fluxo de direção do escoamento, ou seja, delimitar qual o sentido de escoamento da água da chuva na bacia. Esta consiste numa das principais informações geradas, visto que, por meio dele se dá as outras análises hidrológicas.

O fluxo de direção é determinado a partir das alturas contidas nas células do MDTHC através do algoritmo D8. O resultado é a representação da malha de direção de todo o fluxo

superficial da bacia hidrográfica, em que cada célula é conectada a uma de suas oito células vizinhas. A água flui apenas em direção a célula vizinha, cuja declividade seja mais íngreme que as demais do entorno imediato, sendo atribuída uma cor e número representativo de direção de escoamento em cada quadrante na base 2. As cores preto e azul escuro representam respectivamente sentido leste (1) e sudeste (2), o verde é sentido sul (4), o vermelho é sudoeste (8), azul claro oeste (16), mostarda é noroeste (32), o roxo é norte (64) e o azul médio representa sentido nordeste (128). A progressão de acumulação da água precipitada na área da bacia, é calculada a partir das direções de fluxo, e é gerado o mapa de fluxo de acumulação da bacia hidrográfica.

As informações do MDT também foram usadas para construção do mapa de aspecto, que expressa o ângulo formado entre o fluxo de escoamento e o norte geográfico, e o de declividade. Por meio deste também são geradas as derivadas parciais de primeira ordem  $dz/dx$  e  $dz/dy$ , de modo a definir o gradiente de superfície de elevação, determinando a direção e magnitude do fluxo de água. O escoamento superficial é dado com base nas derivadas parciais influenciando o fluxo de água, definidas pelas equações de simulação, Equação da continuidade, com termo de difusão, que permite o fluxo de água superar depressões, elevações ou obstáculos presentes na superfície

A área de inundação foi definida com base nos valores dos pixels que representam o fluxo de acumulação, no qual foi possível a construção das manchas e profundidade da inundação. Na configuração da ferramenta são inseridos os valores de coeficiente Manning, estimada com base no mapa de uso e ocupação do solo, utilizando-se dos valores publicados para vários tipos de superfícies. Diferente do sistema atribuído ao HEC-RAS, no GRASS a inserção é realizada através da imagem de satélite classificada por técnicas de classificação multiespectral e cujas classes definidas tem os seus valores indicados na tabela calculada de CN.

Dentre os parâmetros utilizados são contemplados os dados de excesso de chuvas, em que a intensidade da precipitação e a taxa de infiltração é considerado fator obrigatório. Os dados de chuva foram adquiridos pela estação climatológica e o percentual de infiltração calculado pelo HUSB, calculado anteriormente para uso no HEC-RAS. Os produtos finais

gerados neste módulo são a profundidade da água, dada em metros, e a descarga de água em  $\text{m}^3/\text{s}$ , em arquivos do tipo raster.

#### 4.2.4 Parâmetros utilizados nas análises

Tanto o modelo HEC-RAS quanto o GRASS utilizam parâmetros comuns como particulares. Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros de entrada utilizados em cada programa:

Tabela 5: Parâmetros utilizados nos programas.

PARÂMETRO	MODELO 1	MODELO 2
	HEC-GEORAS (ARCGIS) + HEC-RAS	GRASS (QGIS)
MDT	X	X
Direção de fluxo	X	X
Orientação de vertente	-	X
Derivada parcial $dX/dZ$	-	X
Derivada parcial $dY/dZ$	-	X
Precipitação (mm/h)	X	X
Área da bacia ( $\text{m}^2$ )	X	X
Comprimento do talvegue (m)	X	-
Vazão de escoamento ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	X	-
Área impermeável (%)	X	-
Runoff infiltração (mm/h)	X	X
Manning	X	X
CN	X	X
Coefficiente de permeabilidade	-	X
Tempo de operações	-	X
Constante de difusão de água	-	X
Profundidade da lâmina de água	X	X
Seções transversais	X	-
Delimitação de margens	X	-

Fonte: Autora.

Na elaboração dos mapas de escoamento superficial são efetuados cálculos baseados na solução numérica para obtenção da profundidade e localização das inundações. Os dois modelos utilizam-se de mesma solução numérica em que equacionam o escoamento superficial num processo distribuído, no qual baseado em Lança (2000), Guimarães (2009), Barretto (2010) e tutoriais do GRASS (2015), correspondem a um sistema unidimensional onde são trabalhadas as variações na direção horizontal e velocidade constante, calculadas por meio das equações de Saint-Venant em que o escoamento varia gradualmente ao longo do canal, constituindo-se o regime transiente.

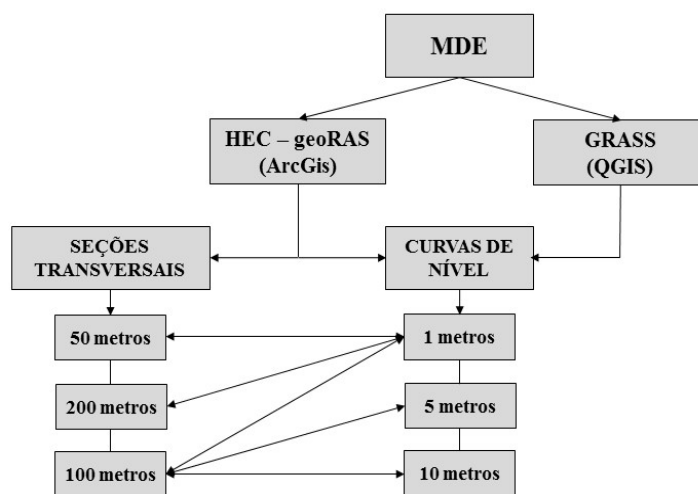
A partir da definição de todo o conjunto de dados necessários espera-se obter o mapa de localização e profundidade das enchentes e inundações, exposto no capítulo 5, que traz os resultados obtidos na pesquisa.

## CAPÍTULO 5

# RESULTADOS

Os resultados obtidos estão apresentados em três etapas. A primeira etapa descreve a simulação por meio da integração entre a ferramenta HEC-geoRAS (ArcGis) e programa HEC-RAS, conduzindo a uma análise espacial e hidráulica do modelo, com simulações integradas a distância das seções transversais e equidistância das curvas de nível. A segunda etapa é a análise e simulação das enchentes e inundações por meio das ferramentas de hidrologia do QGIS e GRASS, no qual foram avaliadas as mesmas equidistâncias entre as curvas de nível. E a terceira etapa consiste na análise integrada entre os resultados obtidos pelo GRASS e pelo HEC-RAS, visando definir as diferenças identificadas entre as simulações. A Figura 23 apresenta o fluxograma das etapas construídas entre cada interface dos programas, para elaboração dos cenários simulados para geração dos mapas de risco de inundação e enchentes.

Figura 23: Fluxograma dos cenários simulados.



Fonte: Autora.

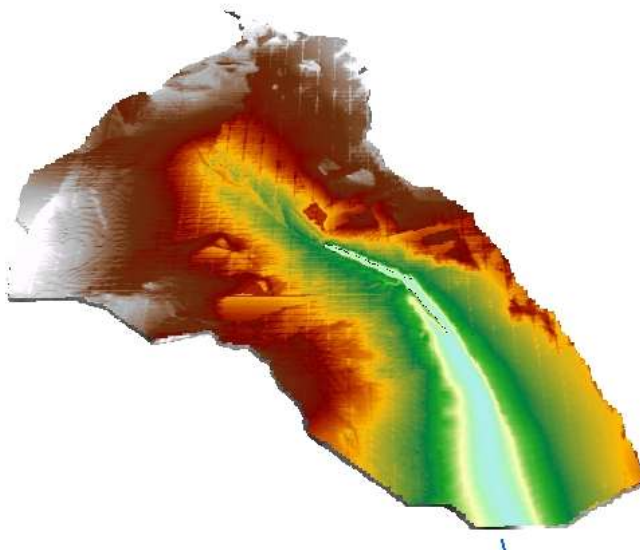
Com base na metodologia apresentada foram feitos os processamentos e obtidos os seguintes produtos:

- Mapa de representação da bacia do Córrego Rangel;
- Mapa de declividade;
- Mapa de representação do Modelo Digital de Terreno;
- Perfil topográfico do canal;
- Mapa de uso e ocupação do solo da bacia;
- Hidrograma e Hietograma de projeto;
- Mapa de direção de fluxo;
- Mapa de Fluxo de acumulação da bacia;
- Mapa de drenagem automática;
- Mapas de Risco elaborados no HEC-geoRAS / HEC-RAS;
- Mapas de Risco elaborados no GRASS/QGIS.

## 5.1 REPRESENTAÇÃO DA BACIA DO CÓRREGO RANGEL

De posse das informações e dados obtidos da bacia hidrografia, foi possível a apresentação do MDT em versão tridimensional para visualização e representação do relevo da área. A Figura 24 descreve a área da bacia em terceira dimensão, no qual é possível averiguar a calha de formação do córrego Rangel.

Figura 24: MDT representado em 3D.



Fonte: Autora.

A diferença altimétrica apresentada na área da bacia é de cerca de 100 metros, demonstrada em diferentes cores para melhor visualização. Pelo mapa de elevação pode-se observar que a área compreendida pela bacia tem perfil de formação de calha, caracterizada a vertente de passagem do Córrego Rangel.

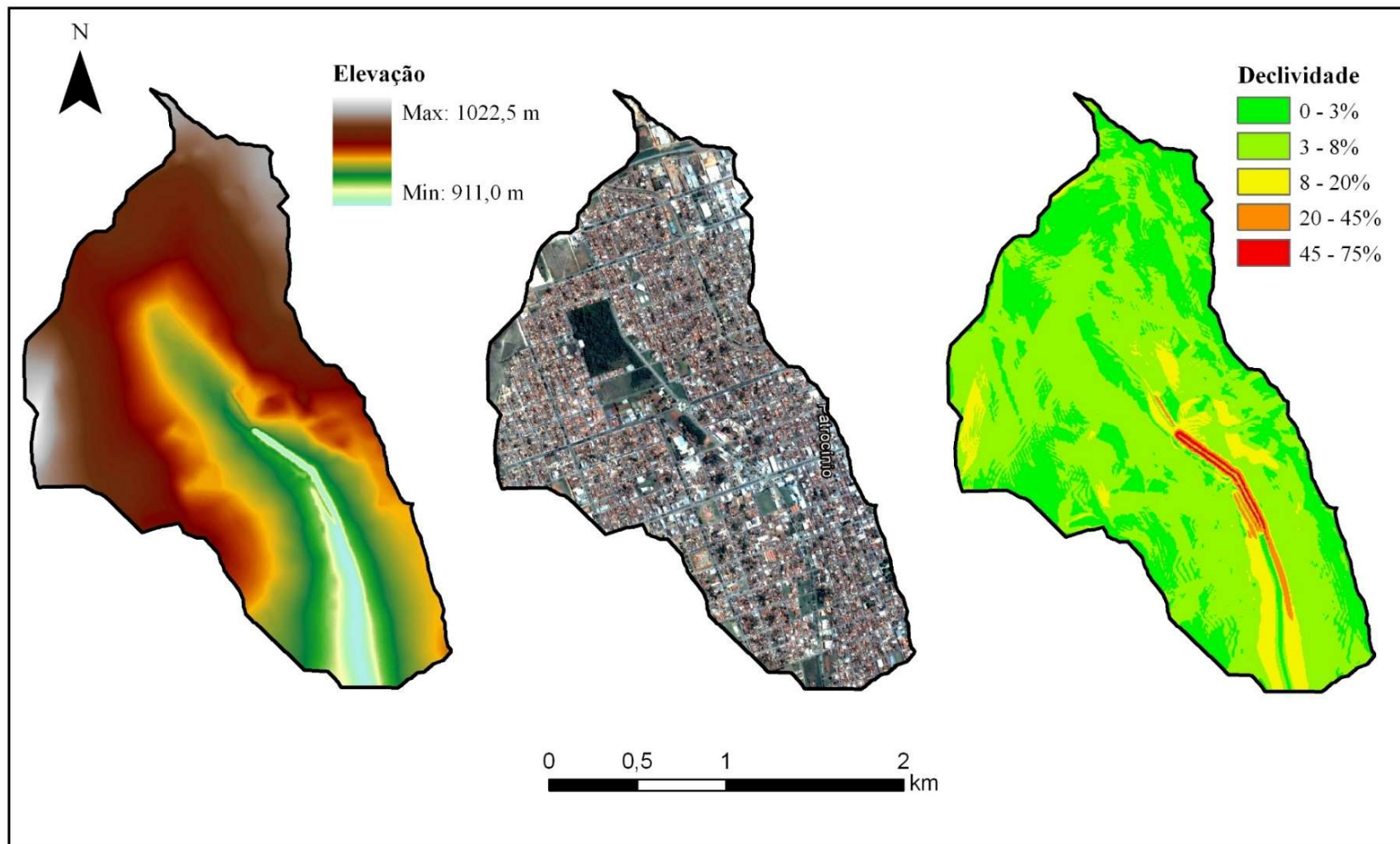
Por meio do estudo pode-se observar que, devido às características do relevo da bacia, sendo o córrego um canal encaixado, a mancha de inundação tende a ser mais estreita, proporcionando a velocidade de escoamento mais rápido. A superfície gerada em formato grade representa de forma contínua a variação da altitude do terreno.

Os dados também proporcionaram a criação do mapa de declividade da bacia, haja vista que esta é uma característica que atinge diretamente o balanço hídrico da bacia, tendo áreas de maior declividade um potencial para escoamento das águas da chuva, enquanto ambientes mais planos de menor declividade, mais propício a infiltração e acumulação de água. Quanto mais íngreme é o terreno mais rápido é o escoamento superficial, e o tempo de concentração será menor com picos de enchentes menores. Na representação cartográfica da declividade, os pontos representados em vermelho mostram situações de maior declividade, enquanto as porções em verde escuro e verde claro, compreendem as áreas mais planas.

Em se tratando de planejamento urbano e ordenamento territorial, as classes de declividade superior a 45%, que na área de estudo são pouco presentes ou quase inexistentes, de acordo com o Novo Código Florestal Brasileiro (BRASIL, 2012), são definidas como área de preservação permanente, sendo imprópria qualquer intervenção, exceto em caso de utilidade pública, o que previne em muitos casos a ocupação desordenada do território em local de risco.

A Figura 25 expressa essas características morfológicas do terreno em que o escoamento superficial flui sentido Córrego Rangel, e pela imagem do satélite Google Earth é ilustrada a área da bacia e a ocupação urbana, comparado aos mapas de declividade e altitude do relevo.

Figura 25: Representação do relevo da bacia hidrográfica.

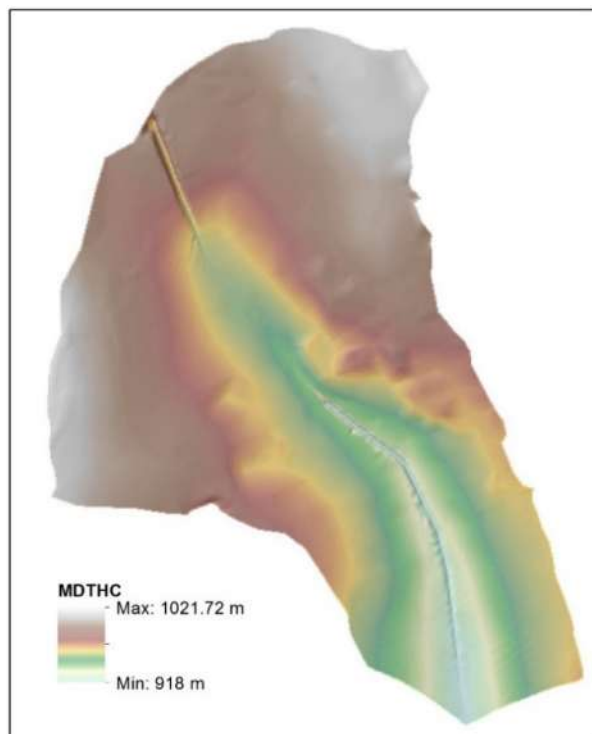


Fonte: Autora.



O modelo de sombra do terreno, foi gerado de forma a ilustrar a área de estudo dando ênfase nas características morfológicas da superfície, como mostra a Figura 26. Pode-se observar o divisor topográfico, condicionado pela topografia, que fixa a área da bacia da qual provém o deflúvio superficial direto. A calha formada na vertente da bacia fica exposta para visualização dos detalhes do canal do rio, mesmo sendo este de canal edificado e fechado atualmente.

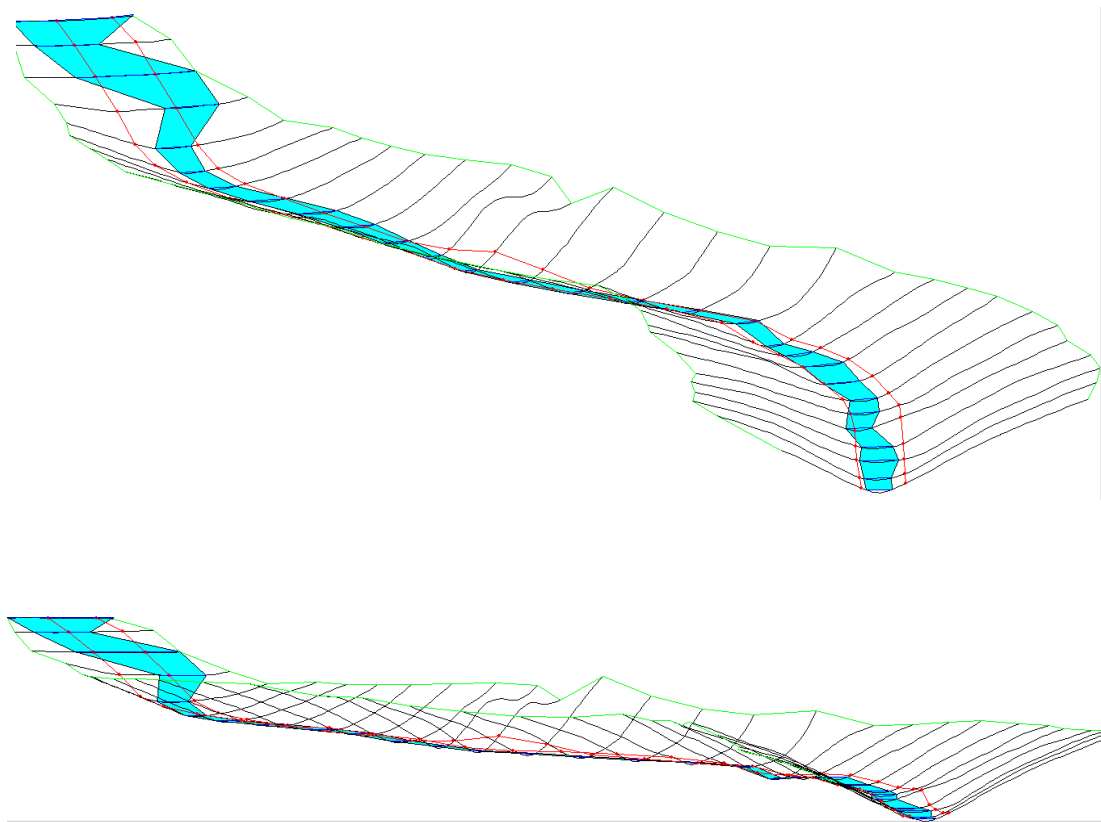
Figura 26: Morfologia da bacia.



Fonte: Autora.

O detalhamento das características físicas da bacia proporciona o conhecimento de suas variações no espaço e tempo, de modo a modelar e identificar os elementos do regime hidrológico, visto que são elementos fundamentais para determinação da resposta hídrica da bacia hidrográfica. No programa HEC-RAS foi feito o perfil topográfico do canal, desde a jusante até a montante do curso, a partir dos dados altimétricos da bacia, como mostra a Figura 27, de forma a reconhecer as feições e desnível do terreno em função do comprimento do talvegue.

Figura 27: Perfis topográficos adjacentes ao Córrego Rangel, construído no HEC-RAS.



Fonte: Autora.

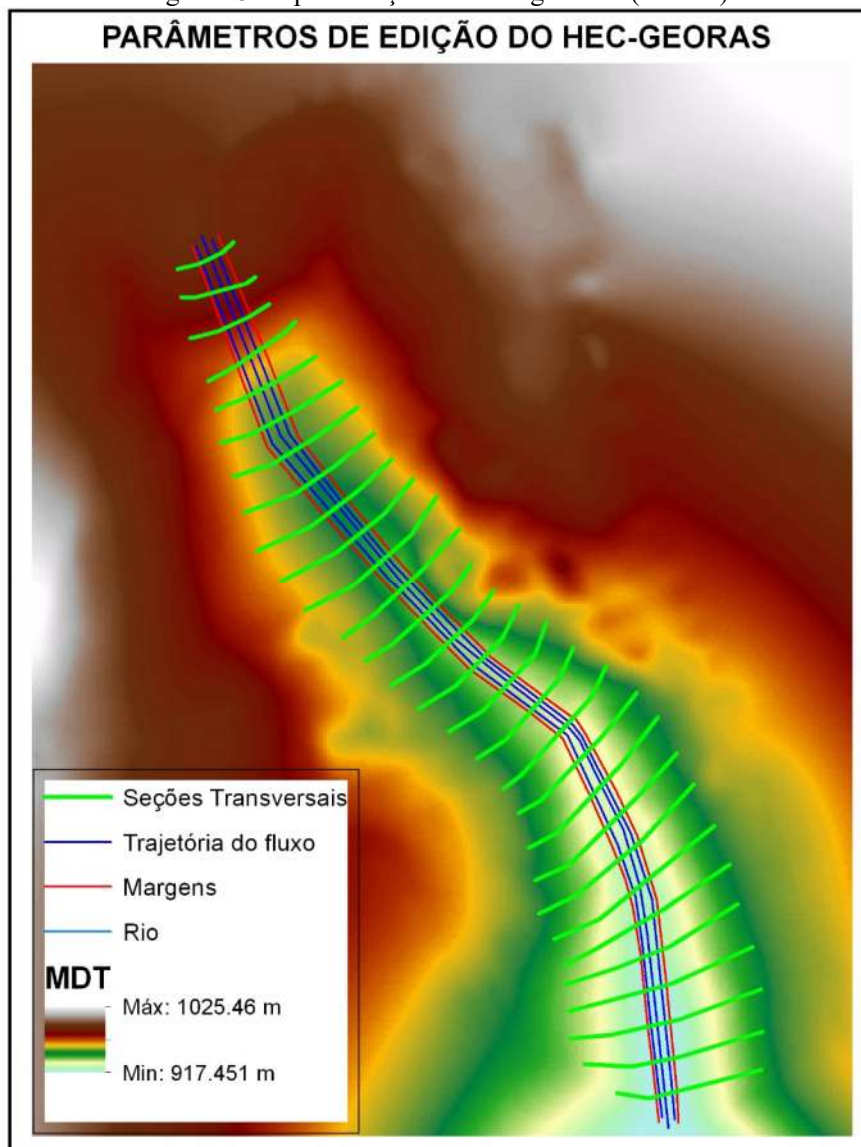
## 5.1 MANCHAS DE INUNDAÇÃO CONFORME HEC-RAS

Com base na metodologia estabelecida para desenvolvimento da pesquisa, foram feitas simulações com diferentes equidistâncias de curvas de nível e distâncias entre as seções transversais, de forma a avaliar a representatividade e escala de detalhamento dos dados exigidos para a modelagem.

### a) Construção e edição do projeto no HEC-geoRAS:

Foram editados e calculados os dados necessários para construção do projeto no Hec-geoRAS (ArcGis), como delimitação de linhas de fluxo que determinam a trajetória percorrida pela água da chuva no trecho avaliado, áreas de várzeas demarcadas pelas margens, seções transversal e perfil topográficos sobre o mapa hipsométrico, de acordo com a Figura 28.

Figura 28: Representação no HEC-geoRAS (ArcGis).



Fonte: Autora.

O modelo digital de terreno, criado para a bacia, esboça as características e feições do relevo, fundamentais para o estudo de escoamento da água da chuva na bacia. A modelagem hidráulica expressa as dimensões do leito e região de entorno para a simulação de ocupação das inundações, em um talvegue de 3,073 km de comprimento. Esses parâmetros geométricos foram obtidos diretamente no HEC-geoRAS, bem como posicionamento das seções transversais, dimensionamento de margens e sentido de fluxo. A metodologia de estimação dos parâmetros através do SIG serviu de base para definição da análise hidrológica.

Para a obtenção das vazões máximas na Microbacia do Córrego Rangel, utilizou-se o Método Santa Bárbara, por meio do hidrograma a partir da chuva excedente ocasionado por um hietograma, com a obtenção da vazão de pico e em intervalos de tempo. Para definição da chuva de projeto, a técnica empregada foi a alternada de três blocos, utilizando-se o evento de precipitação para um período de retorno de 50 anos. Nesta definição, o hietograma se aproxima do hidrograma de Huff com 50 % de probabilidade e para o 1º Quartil, definidos quando há precipitações intensas de curta duração, normalmente de maior interesse para os projetos de drenagem urbana, devendo a fração de chuva ser no total igual a 1. O tempo de concentração foi calculado de acordo com o método Califórnia Culverts Practice, devido sua fácil obtenção dos dados, definido um resultado de 34,9 minutos.

Além da precipitação máxima de 133,5 mm, foi dimensionada simulação para a vazão de 104,3, segunda maior vazão identificada na Estação de Charqueada em 50 anos, usada como comparativo de resultados. Foi admitido para os cálculos uma chuva com tempo de 2 horas, distribuídos em intervalos de 10 minutos para o dimensionamento, seguindo orientados de estudos já publicados que se aproximam da realidade da bacia de estudo, proposto por Tomaz (2012) e Tucci (2013).

Os cálculos e resultados obtidos pelo método estão descritos nas tabelas 7 e 8, no qual expressa cada item exigido no modelo. A precipitação acumulada (P acum.) é distribuída de acordo com Huff, descritos na coluna 6. Na coluna 7 tem-se o valor da chuva excedente calculada pelo método da curva CN do SCS, com total de 104,74 mm, que provocará o escoamento superficial (runoff). A chuva excedente acumulada por faixa está definida na coluna 8. A coluna 9 (f) registra a infiltração no solo, calculado pela diferença entre o precipitado por faixa na coluna 5 com a chuva excedente por faixa na coluna 8, não sendo considerada a evaporação nos cálculos, conforme determina o Método Santa Bárbara.

Uma das principais funções do HUSB é considerar superfícies impermeáveis e permeáveis como influencia no cálculo da vazão. Assim, na coluna 10 (i), são definidas as velocidades de escoamento em milímetros por hora na região impermeabilizada, tendo cada linha a precipitação por faixa dividido pelo intervalo de tempo em horas. Na coluna 11 (i<sub>c</sub>), toma-se a chuva excedente (coluna 8) dividido pelo tempo em horas.

De posse dos valores de runoff na área impermeabilizada  $i$  e da área permeável  $i_e$ , com base nas áreas de drenagem e a fração impermeável obtém-se os valores das coordenadas da hidrograma, onde tem-se o valor de  $93,77 \text{ m}^3/\text{s}$  para a primeira linha da coluna 12. A coluna 13 ( $i_{(1)} + i_{(2)}$ ) é a soma de duas linhas da coluna 12.

Na coluna 14 ( $Q_{(1)}$ ) tem-se a aplicação da equação de definição da vazão, e na coluna 15 ( $Q_{(2)}$ ) o hidrograma de projeto. O caudal máximo obtido foi de  $103,227 \text{ m}^3/\text{s}$  calculados entre as seções de montante para jusante, por meio do Hidrograma Urbano de Santa Bárbara para a vazão de projeto, e o valor de  $79,231 \text{ m}^3/\text{s}$  para a vazão de comparação.

Tabela 6: Determinação da vazão de projeto – Método do Hidrograma Urbano de Santa Bárbara.

<b>Precipitação (mm):</b>	133.5
<b>S (mm):</b>	28.22
<b>P ≥ 0,2xS (mm):</b>	5.64
<b>Variação tempo (h):</b>	0.1667
<b>Variação tempo (s):</b>	600

<b>d (%):</b>	0.72
<b>A(km²):</b>	4.11
<b>A(m²):</b>	4110000.00
<b>H (m):</b>	103.00
<b>L (km):</b>	3.07

<b>tc (min):</b>	34.96048
<b>tc (s):</b>	2097.629
<b>C (Kr):</b>	0.125124

Ordem	Tempo		HUFF 1.Q 50% P	Precip. Total P	Prec. Acum. P acum.	Chuva exc. acum. Q acum.	Chuva exc. por faixa Q	Infilt. f	Área Imperm. (i)	Área Perm. (ie)	I	I <sub>(1)</sub> + I <sub>(2)</sub>	Q <sub>(1)</sub>	Q <sub>(2)</sub>
	min	h	%	mm	mm	mm	mm	mm	mm/h	mm/h	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
1	10	0.167	0.132	17.62	17.62	3.57	3.57	14.05	105.74	21.43	93.77	93.77	0	11.7323
2	20	0.333	0.274	36.58	54.20	30.71	27.14	9.44	219.48	162.86	232.48	326.24	11.7323	49.61702
3	30	0.5	0.208	27.77	81.97	55.73	25.01	2.75	166.61	150.09	184.94	417.41	49.61702	89.4287
4	40	0.667	0.116	15.49	97.46	70.23	14.50	0.98	92.92	87.02	104.20	289.13	89.4287	103.227
5	50	0.833	0.071	9.48	106.93	79.22	8.99	0.49	56.87	53.96	64.00	168.20	103.227	98.44025
6	60	1	0.053	7.08	114.01	85.98	6.76	0.32	42.45	40.54	47.86	111.86	98.44025	87.80186
7	70	1.167	0.046	6.14	120.15	91.87	5.89	0.25	36.85	35.34	41.59	89.44	87.80186	77.02134
8	80	1.333	0.028	3.74	123.89	95.47	3.60	0.14	22.43	21.57	25.33	66.92	77.02134	66.1202
9	90	1.5	0.024	3.20	127.09	98.56	3.09	0.12	19.22	18.53	21.73	47.06	66.1202	55.46191
10	100	1.667	0.024	3.20	130.30	101.65	3.09	0.11	19.22	18.56	21.73	43.46	55.46191	47.02053
11	110	1.833	0.016	2.14	132.43	103.71	2.06	0.07	12.82	12.39	14.49	36.23	47.02053	39.78687
12	120	2	0.008	1.07	133.50	104.74	1.03	0.04	6.41	6.20	7.25	21.74	39.78687	32.55091
			1.00	133.50			104.74						32.55091	0
			<i>Soma</i>	<i>Precip. Total</i>			<i>Chuva exc.</i>	<i>Infiltração</i>						

Fonte: TUCCI (2013), adaptada pela autora.

Tabela 7: Determinação da vazão de comparação pelo método HUSB.

<b>Precipitação (mm):</b>	104.3
<b>S (mm):</b>	28.22
<b>P ≥ 0,2xS (mm):</b>	5.64
<b>Variação tempo (h):</b>	0.1667
<b>Variação tempo (s):</b>	600

<b>d (%):</b>	0.72
<b>A(km²):</b>	4.11
<b>A(m²):</b>	4110000.00
<b>H (m):</b>	103.00
<b>L (km):</b>	3.07

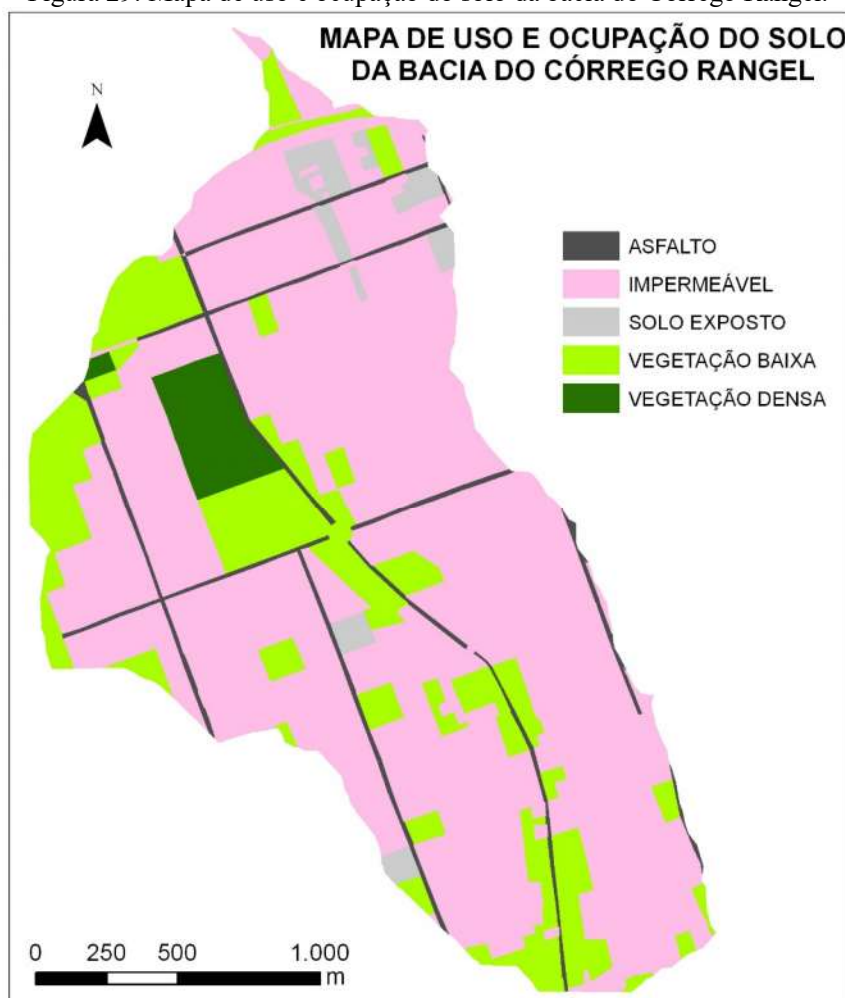
<b>tc (min):</b>	34.96048
<b>tc (s):</b>	2097.629
<b>C (Kr):</b>	0.125124

Ordem	Tempo		HUFF 1.Q 50% P	Precip. Total P	Prec. Acum. P acum.	Chuva exc. acum. Q acum.	Chuva exc. por faixa Q	Infilt. f	Área Imperm. (i)	Área Perm. (ie)	I	I <sub>(1)</sub> + I <sub>(2)</sub>	Q <sub>(1)</sub>	Q <sub>(2)</sub>
	min	h	%	mm	mm	mm	mm	mm	mm/h	mm/h	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)	(m³/s)
1	10	0.167	0.132	13.77	13.77	1.82	1.82	11.95	82.61	10.91	71.39	71.39	0	8.932677
2	20	0.333	0.274	28.58	42.35	20.75	18.94	9.64	171.48	113.62	177.27	248.66	8.932677	37.81098
3	30	0.5	0.208	21.69	64.04	39.38	18.62	3.07	130.17	111.74	142.72	319.99	37.81098	68.38769
4	40	0.667	0.116	12.10	76.14	50.35	10.97	1.13	72.60	65.84	80.72	223.44	68.38769	79.23154
5	50	0.833	0.071	7.41	83.54	57.19	6.84	0.56	44.43	41.06	49.65	130.37	79.23154	75.7162
6	60	1	0.053	5.53	89.07	62.35	5.16	0.37	33.17	30.94	37.16	86.80	75.7162	67.62966
7	70	1.167	0.046	4.80	93.87	66.85	4.50	0.29	28.79	27.03	32.30	69.46	67.62966	59.39634
8	80	1.333	0.028	2.92	96.79	69.60	2.75	0.17	17.52	16.52	19.68	51.99	59.39634	51.03742
9	90	1.5	0.024	2.50	99.29	71.97	2.37	0.14	15.02	14.20	16.88	36.57	51.03742	42.84116
10	100	1.667	0.024	2.50	101.80	74.34	2.37	0.13	15.02	14.23	16.90	33.78	42.84116	36.34699
11	110	1.833	0.016	1.67	103.47	75.93	1.58	0.08	10.01	9.50	11.27	28.16	36.34699	30.77531
12	120	2	0.008	0.83	104.30	76.72	0.79	0.04	5.01	4.76	5.64	16.91	30.77531	25.18913
			1.00	104.30			76.72						25.18913	0
			<b>Soma</b>	<b>Precip. Total</b>			<b>Chuva exc.</b>	<b>Infiltração</b>						

Fonte: TUCCI (2013), adaptada pela autora.

Para a parametrização do modelo hidrológico detalharam-se as características da bacia, tendo para o cenário de análise o CN igual a 90, definido como padrão, baseado na distribuição do mapa de uso e ocupação do solo, visto que cada tipo de uso apresenta um valor de CN diferente, como apresentado na figura 29.

Figura 29: Mapa de uso e ocupação do solo da bacia do Córrego Rangel.



Fonte: Autora.

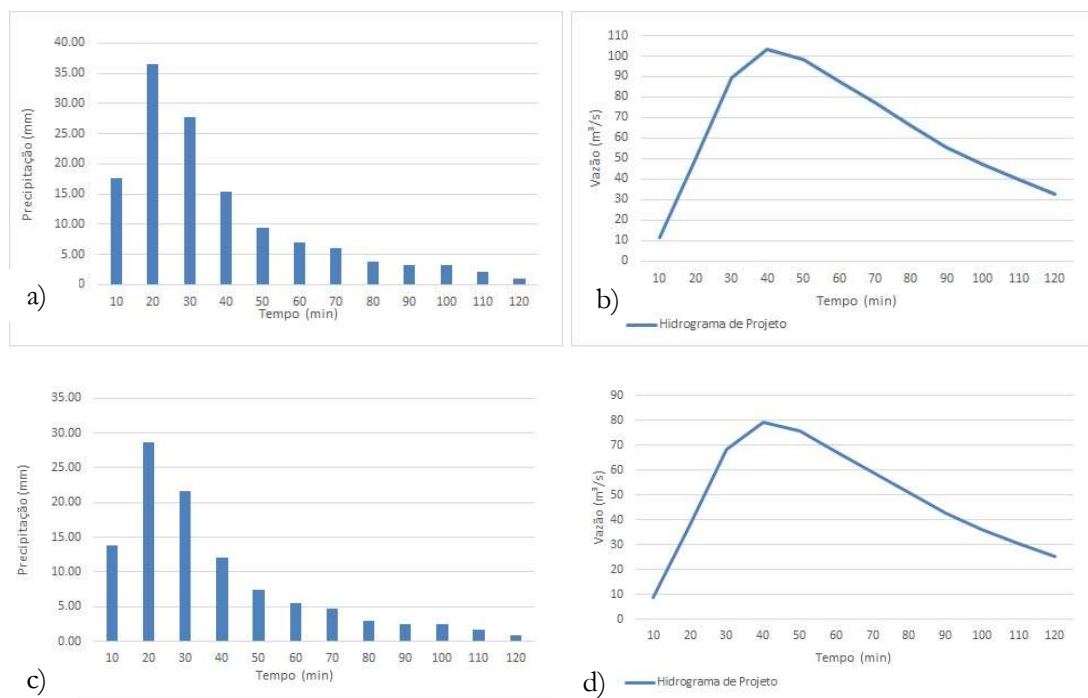
As formas de ocupação da bacia são variadas, desde a áreas densamente construídas composta por superfície impermeável, como áreas de loteamentos abertos com vegetação nativa presente. Essas áreas são futuras ocupações e deve-se observar o tipo de ocupação que adentrará nesses pontos. As áreas de montante são urbanizadas, contendo o parque da Matinha como reserva natural, e alguns lotes abertos próximos à avenida Dom José André Coimbra, que consiste no leito do Córrego Rangel. Essas áreas representam fator



importante para infiltração da água precipitada, reduzindo assim o escoamento para jusante.

De posse dos dados e cálculos realizados, obteve-se o potencial máximo de retenção hídrica da bacia, através do método SCS. Para a data chuva de análise de 133,5 mm e de 104,3 mm, tem-se hietogramas e hidrogramas de projetos resultantes dos picos de vazão, demonstrado na figura 30, no qual o momento de maior precipitação é averiguado no tempo de 20 minutos e em consequência, o pico de vazão ocorre em 40 minutos após o início da chuva.

Figura 30: (a) Hietograma e (b) hidrograma de projeto resultante dos picos de vazão de 103,227 m<sup>3</sup>/s. (c) Hietograma e (d) hidrograma de projeto resultante dos picos de vazão de 79,23 m<sup>3</sup>/s



Fonte: Autora.

#### b) Representação preliminar do projeto no HEC-RAS:

De posse dos dados da bacia obtidos por meio da simulação hidráulica no HEC-RAS e as características do entorno, importados no HEC-geoRAS, estes foram processados sobre o MDT, no qual se deu a construção preliminar do projeto de delimitação de áreas de risco de inundação e enchentes nesta primeira etapa.

Para as análises, foram simuladas combinações entre equidistâncias das curvas de nível em 1, 5 e 10 metros e as distâncias entre as seções estabelecidas em 50, 100 e 200 metros. As combinações têm por objetivo avaliar o nível de detalhe exigido para um resultado, favorável à construção das manchas de inundação na área da bacia hidrográfica. Como forma de comparação das manchas de inundação foi simulado também o cenário com vazão de teste de  $79,23\text{m}^3/\text{s}$ , utilizando a estrutura com curvas de 1 metro e seções transversais com 100 metros de espaçamento, haja vista a necessidade de se dimensionar a ocupação das áreas de risco na bacia do Córrego Rangel. A vazão de teste representa um evento ocasionado pela segunda maior precipitação registrada no período de 50 anos analisado.

As Figuras 31, 32, 33 e 34 mostram a comparação das manchas de inundações do modelo calibrado conforme a metodologia apresentada.

Figura 31: Curvas de 1 metro combinadas com seções transversais com espaçamentos de 100 metros.

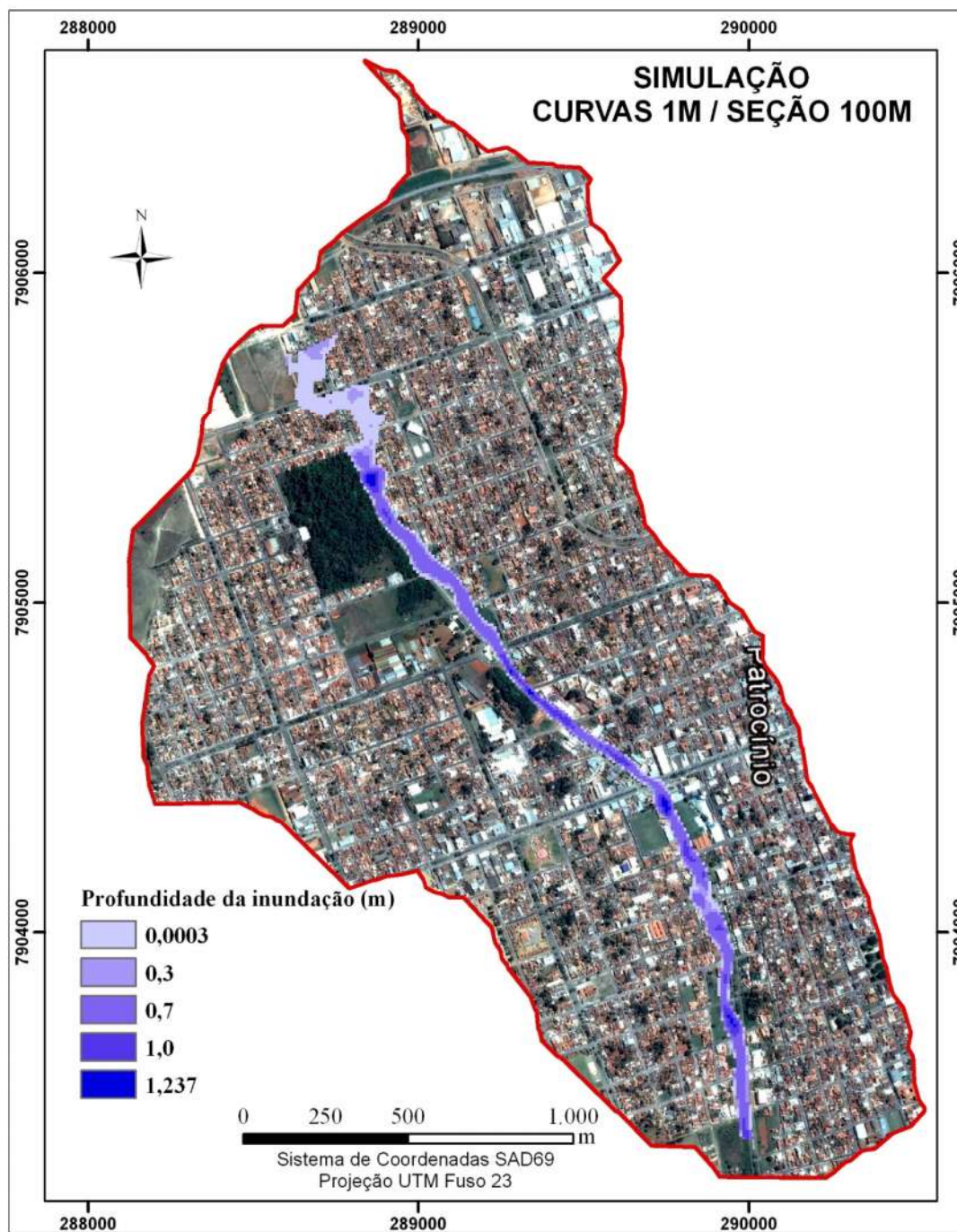
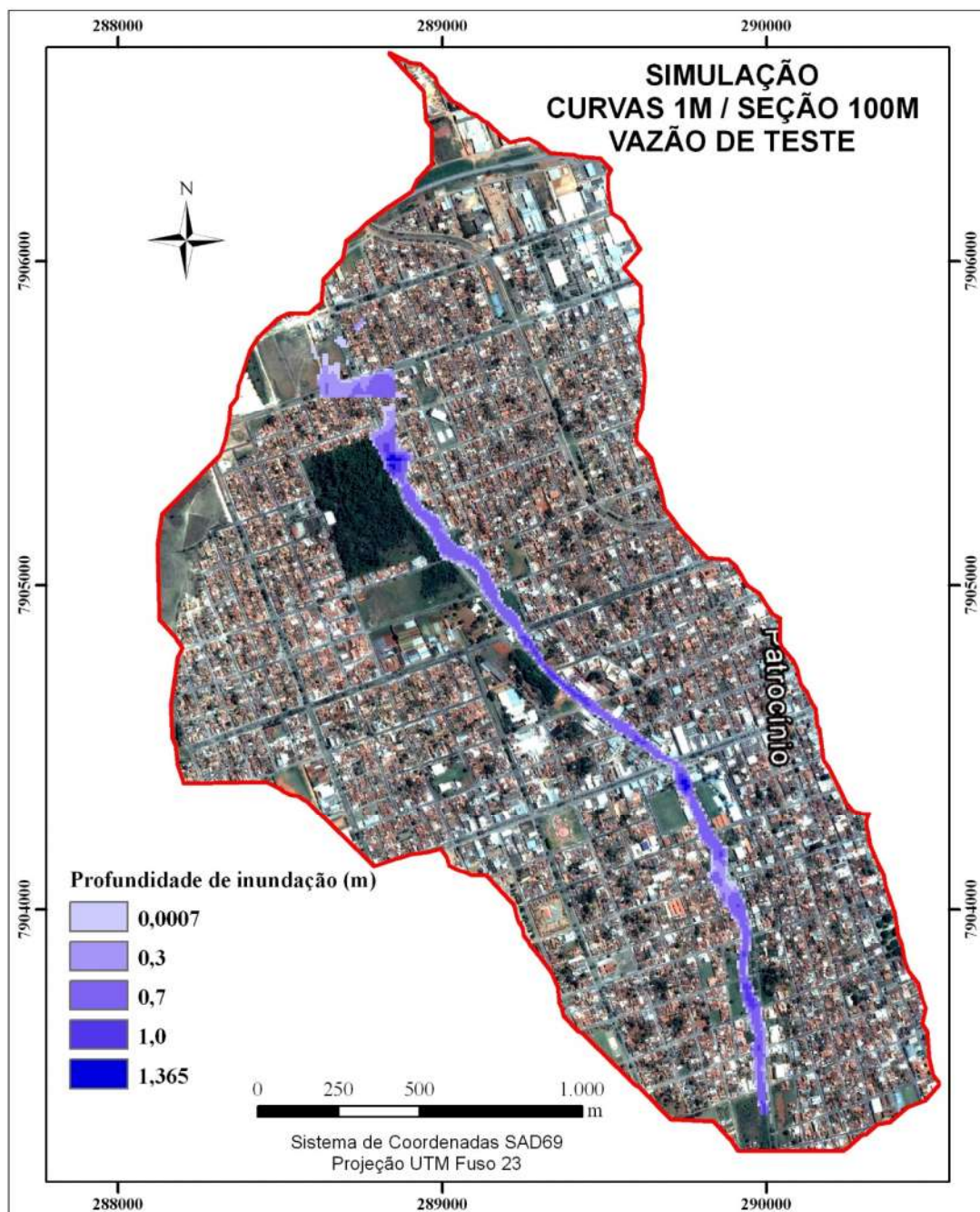


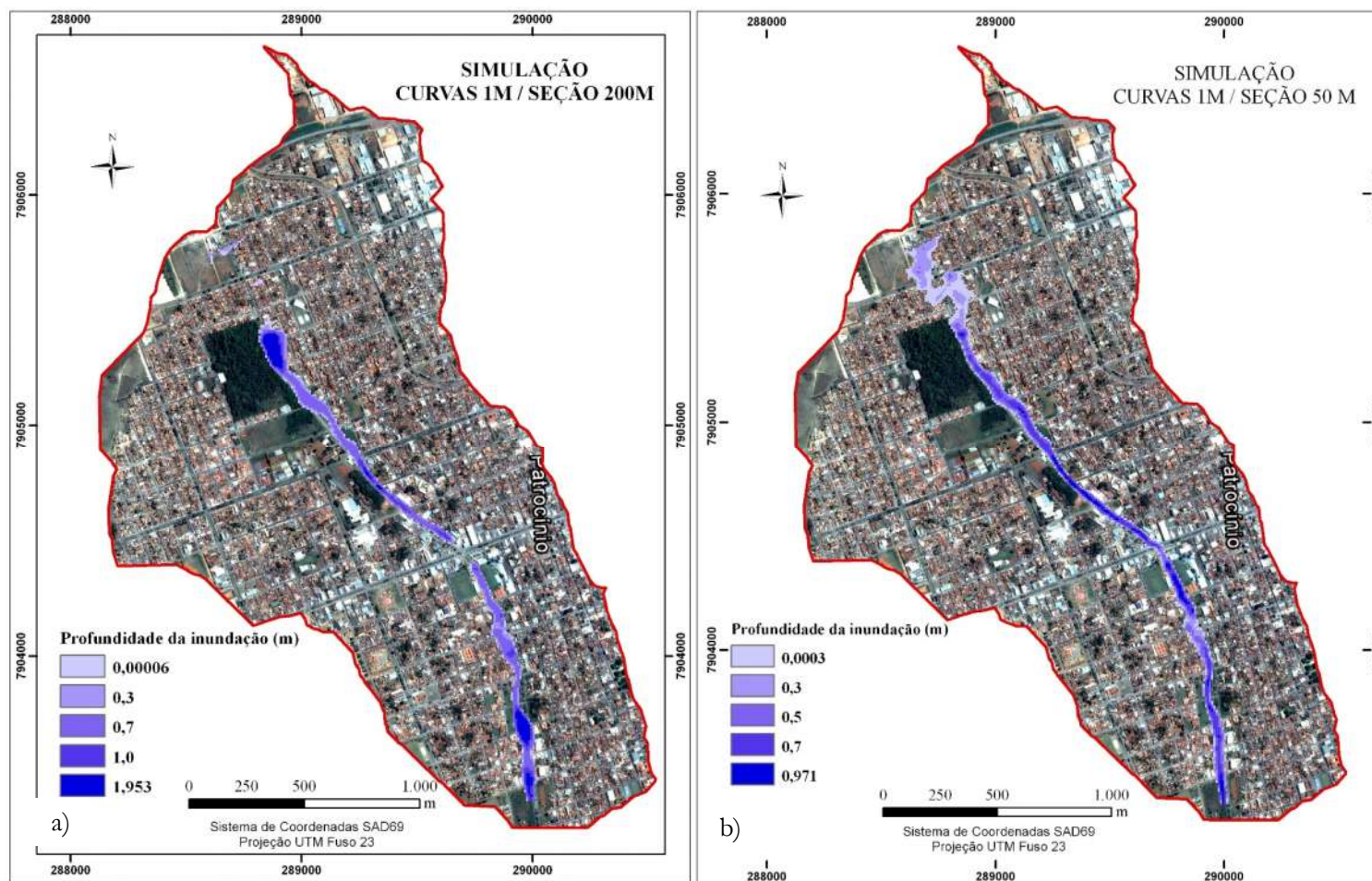
Figura 32: Curvas de nível com equidistâncias de 1 metros combinadas com seções transversais espaçadas de 100 metros, simuladas com a vazão de teste.



Fonte: Autora.

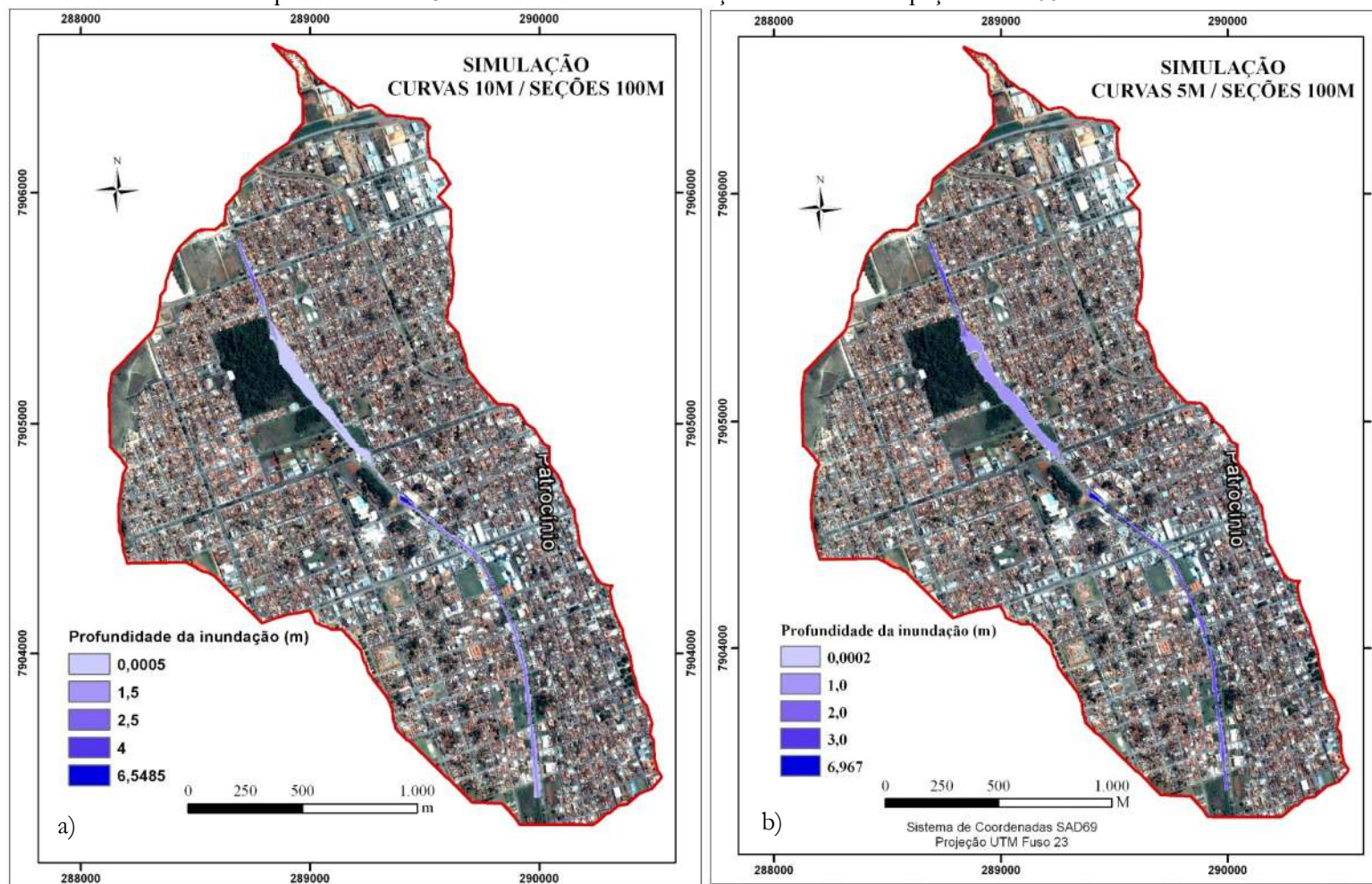


Figura 33: (a) Curvas de nível com equidistâncias de 1 metro combinadas com seções transversais com espaçamentos de 200 metros. (b) Curvas com equidistâncias de 1 metro combinadas com seções transversais com espaçamentos de 50 metros.



Fonte: Autora.

Figura 34: (a) Curvas de nível com equidistâncias de 10 metros combinadas com seções transversais espaçadas de 100 metros. (b) Curvas de nível com equidistâncias de 5 metros combinadas com seções transversais espaçadas de 100 metros.



Fonte: Autora.

É essencial analisar diferentes cenários que podem interferir no resultado da simulação, visto que o nível de detalhe das amostras demonstrou diferenças nas manchas, com resultados apresentando descontinuidade no polígono delimitador da inundação, o que pode caracterizar falta de dados ou incoerência nos dimensionamentos.

As áreas em cor azul mais escuro apresentam maior profundidade de água. As áreas inundáveis apresentam um desvio quanto à localização do leito do rio em alguns trechos. Seguindo orientações de Lima Neto e Tavares (2013), isso se deve ao fato do modelo hidráulico não apresentar ajustes em sua geometria computacional e devido ao fato de o curso se encontrar canalizado, tendo uma avenida instalada sobre o leito e as curvas de nível não apresentam as modificações provenientes das construções.

Com relação à distância entre as seções transversais, a simulação com 100 metros apresentou o nível de detalhe mais adequado para análise, próximas do real, visto que com essa escala de detalhes foi possível a representação da mancha e identificar os pontos de maior risco as inundações. O cenário simulado com 50 metros de distância também representou bem a mancha, tendo poucas diferenças de 100 m, se concentrado mais à montante, próximos as áreas de nascentes. No entanto, não há necessidade de tal detalhamento para se chegar ao resultado proposto.

O cenário com seções transversais projetadas em 200 metros de distância foi a que concentrou maior número de inconsistências, com descontinuidade no polígono delimitador da mancha de inundação e enchentes, sem detalhamento da área de nascente. Isso se deve ao fato de não abranger áreas suficiente para caracterizar a superfície física do entorno do canal, dificultando a modelagem pelo modelo hidráulico em seu dimensionamento da inundação. Neste aspecto, o perfil topográfico sofre mudanças abruptas devido as dimensões serem coletadas em distâncias superiores as condições de modelagem, representando então uma característica fundamental para a modelagem, tendo como exigência um detalhamento maior das seções transversais.

Ainda com relação as seções, o programa HEC-RAS é limitado a 500 pontos de elevação para cada seção delimitada, tendo 20 referências de número de Manning cada. Durante a calibração foi feita essa correção, sendo que os pontos são filtrados e corrigidos

automaticamente em todas as seções, evitando futuros erros durante o processamento. São detalhes que influenciam diretamente a caracterização limite da mancha de inundação, não sendo possível quando ultrapassado este o valor.

A simulação com curvas de nível de 5 metros e 10 metros demonstraram ser ineficientes para caracterizar o fluxo de deslocamento na bacia, visto que detalhes foram ocultados nos polígonos de inundações, com representação falha da resposta da bacia quando comparada a situação real vivenciada na cidade de Patrocínio.

Estes modelos têm alguns pontos de risco demarcados corretamente, como é o caso da região próxima ao Parque da Matinha e Rotatória do Posto São Francisco (figura 35), no qual são constantes as áreas atingidas. Mas em se tratando de todo o contexto de escoamento da água, pontos de extrema importância como no cruzamento da Avenida Dom José André Coimbra com a rua Elmiro Alves (figura 36), onde são notificados um intenso volume de água, não foi evidenciado na modelagem, sendo representado a variação da profundidade, mas não o alcance da lâmina de água. São detalhes que podem estar diretamente envolvidos com os dados altimétricos utilizados na modelagem, haja visto que são ocultos detalhes da infraestrutura urbana, desenho das ruas que influenciam diretamente na formação das manchas de inundações, tendo as curvas traçadas obedecendo pontos de coletas determinados pela topografia.

Figura 35: Simulação das inundações no HEC-geoRAS e situação real das ocorrências (I).



Fonte: Autora



Figura 36: Simulação das inundações no HEC-geoRAS com curvas de 10 metros e situação real das ocorrências (II).



Fonte: Autora

Esta ocorrência também pode estar relacionada com alguns parâmetros utilizados no modelo, ou o nível de detalhe efetuado na análise. Dentre os parâmetros estão a localização da seção transversal, o levantamento topográfico e o maior detalhe do mapa de uso e ocupação do solo que define a área de infiltração, fundamentais na caracterização das zonas de interesse.

Referente a simulação projetada com a vazão de teste, este se mostrou representativo de acordo com a realidade, ocupando as áreas que oferecem mais riscos a população, conforme exposto na simulação com a vazão de projeto. Na variação das profundidades, o modelo com a vazão de projeto variou de 0,0003 a 1,237 metros, enquanto que o cenário produzido pela vazão de teste variou de 0,0007 a 1,365 metros. A menor vazão, a de teste, apresenta índices de profundidade maior. A área de montante do curso possui a maior variação entre as duas simulações, sendo que a de vazão de projeto ocupa maior área devido a quantidade maior de água na superfície.

O modelo HEC-RAS calcula várias alturas de água ao longo de perfis transversais ao rio e por meio da interpolação efetua as previsões nas zonas entre as seções, e de acordo com estudos de Fernandez; Mourato; Moreira (2013), é o que determina a variação da profundidade ao longo do curso, definida pelas cores em azul. O tom de azul mais escuro indica maior profundidade e o mais claro a branco, profundidades rasas. Esta função define um fator importante na interpretação das imagens, pois quanto mais profundo se apresenta

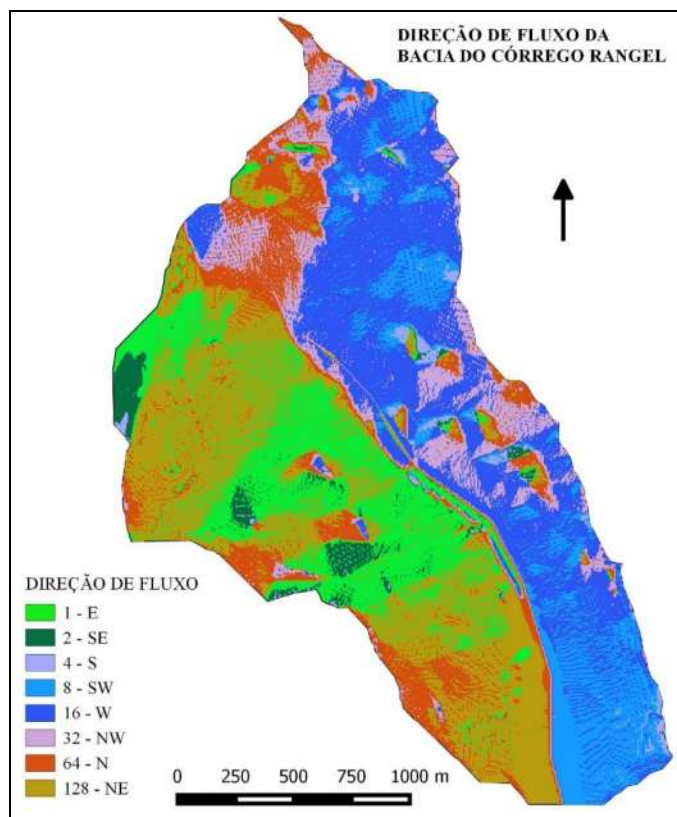
a inundação, maior os danos causados, tendo a água um potencial de arraste maior ao longo do caminho percorrido.

## 5.2 MANCHAS DE INUNDAÇÃO CONFORME GRASS

As simulações realizadas no GRASS trazem consigo particularidades da análise espacial que incorrem em diferentes resultados do modelo anterior. A orientação das vertentes define a direção de fluxo que em áreas próximas do canal ela é descontínua, sendo curtas em diferentes direções e estendendo-se maiores nas bordas da bacia.

A Figura 37 apresenta o mapa de direção de fluxo da área da bacia, com informações da direção e sentido realizado pelas águas das chuvas. Por meio deste é possível observar que as áreas de inundações e enchentes seguem a direção dos fluxos da vertente, recebendo fluxo de diferentes direções, além da drenagem principal, com alguns pontos com fluxo direcionado para sistemas secundários.

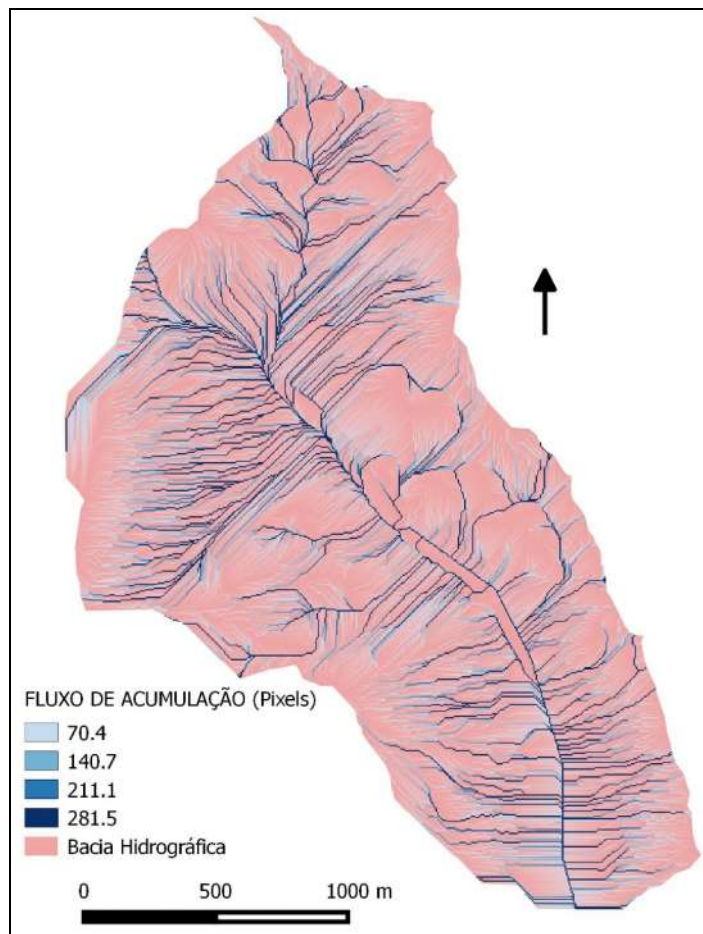
Figura 37: Fluxo de direção da bacia hidrográfica do Córrego Rangel.



Fonte: Autora.

Para a modelagem hidrológica no GRASS, foi feita a acumulação de fluxo da bacia, que permite analisar o volume de acumulação escoada do ponto mais distante da bacia ao exutório, no qual o valor absoluto de cada célula é o valor do escoamento superficial que atravessa a célula, representado pelo número de montante mais um, sendo representado em cores (Figura 38).

Figura 38: Fluxo de acumulação da bacia.

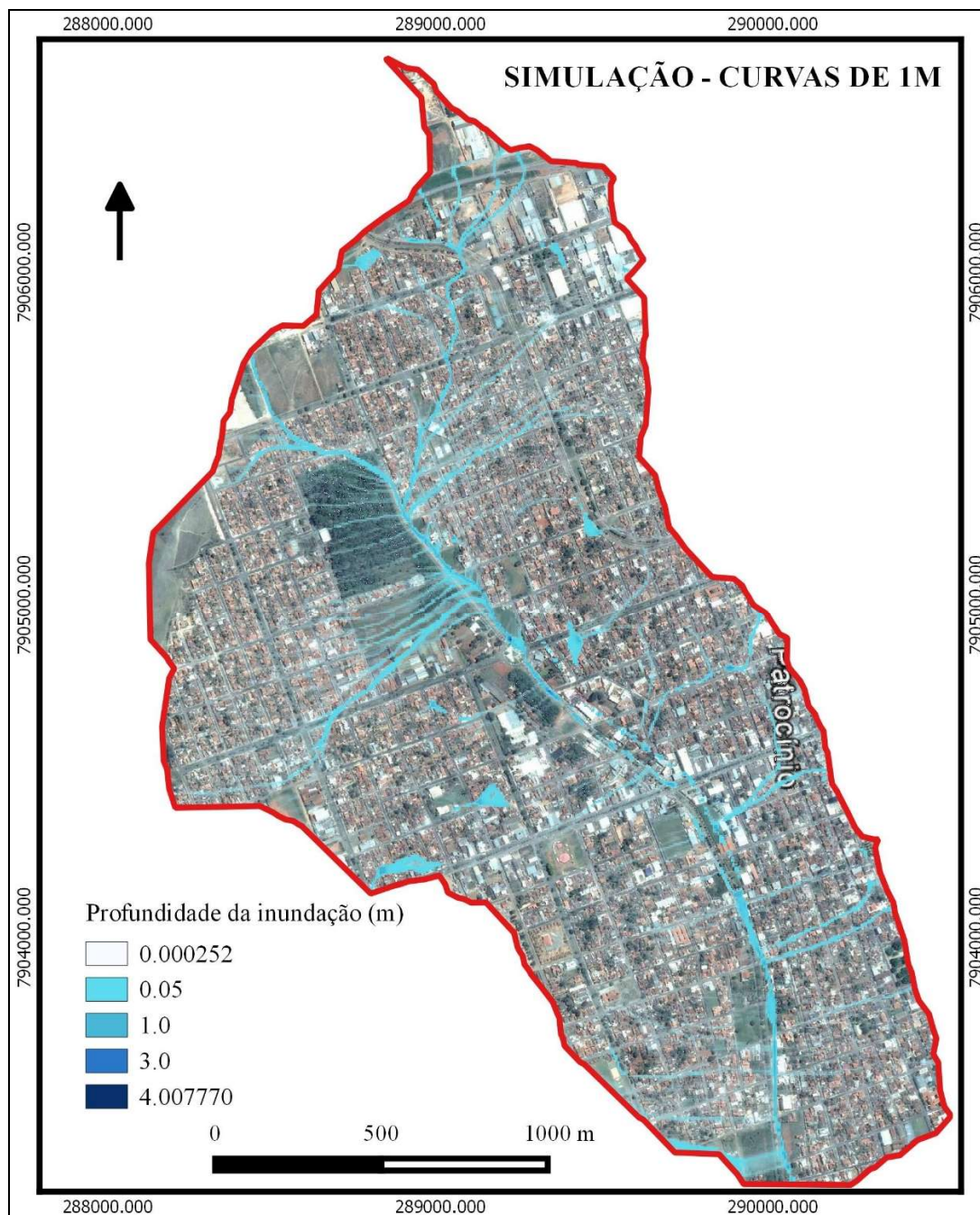


Fonte: Autora.

De posse dos parâmetros exigidos para a simulação, foram definidos os polígonos delimitadores e raster de profundidade das manchas de inundação e enchentes na bacia do Córrego Rangel. A simulação no GRASS acompanhou os mesmos critérios de comparação utilizados no HEC-RAS, sendo criado o MDT com curvas com equidistância de 1, 5 e 10 metros, e uma modelagem com a vazão teste.

Nas Figuras 39, 40, 41 e 42 são apresentados os produtos gerados no GRASS e avaliadas as áreas de abrangência das inundações, conforme parâmetros hidrológicos utilizados.

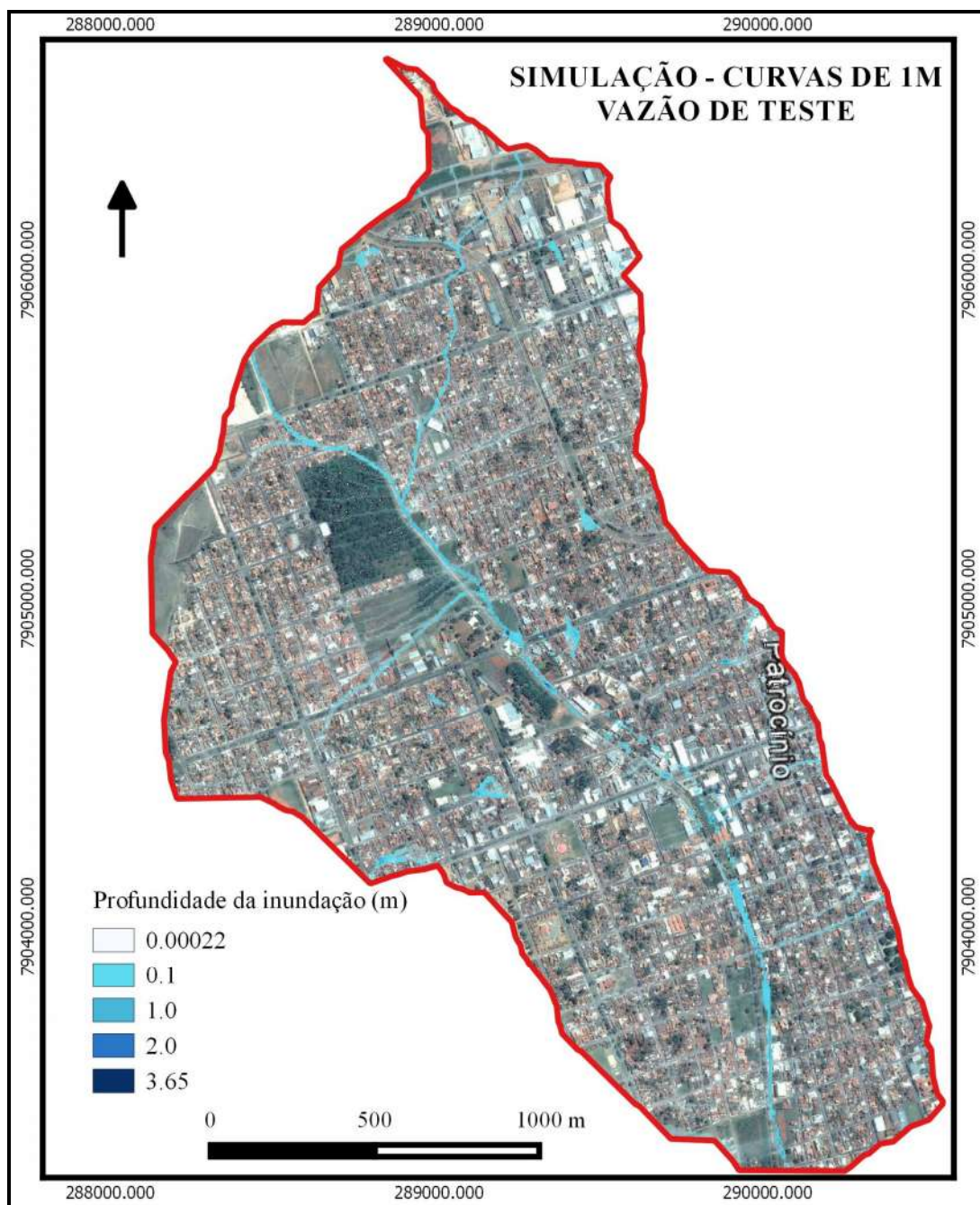
Figura 39: Simulação de inundação com curvas de nível de 1 metro de equidistância.



Fonte: Autora.

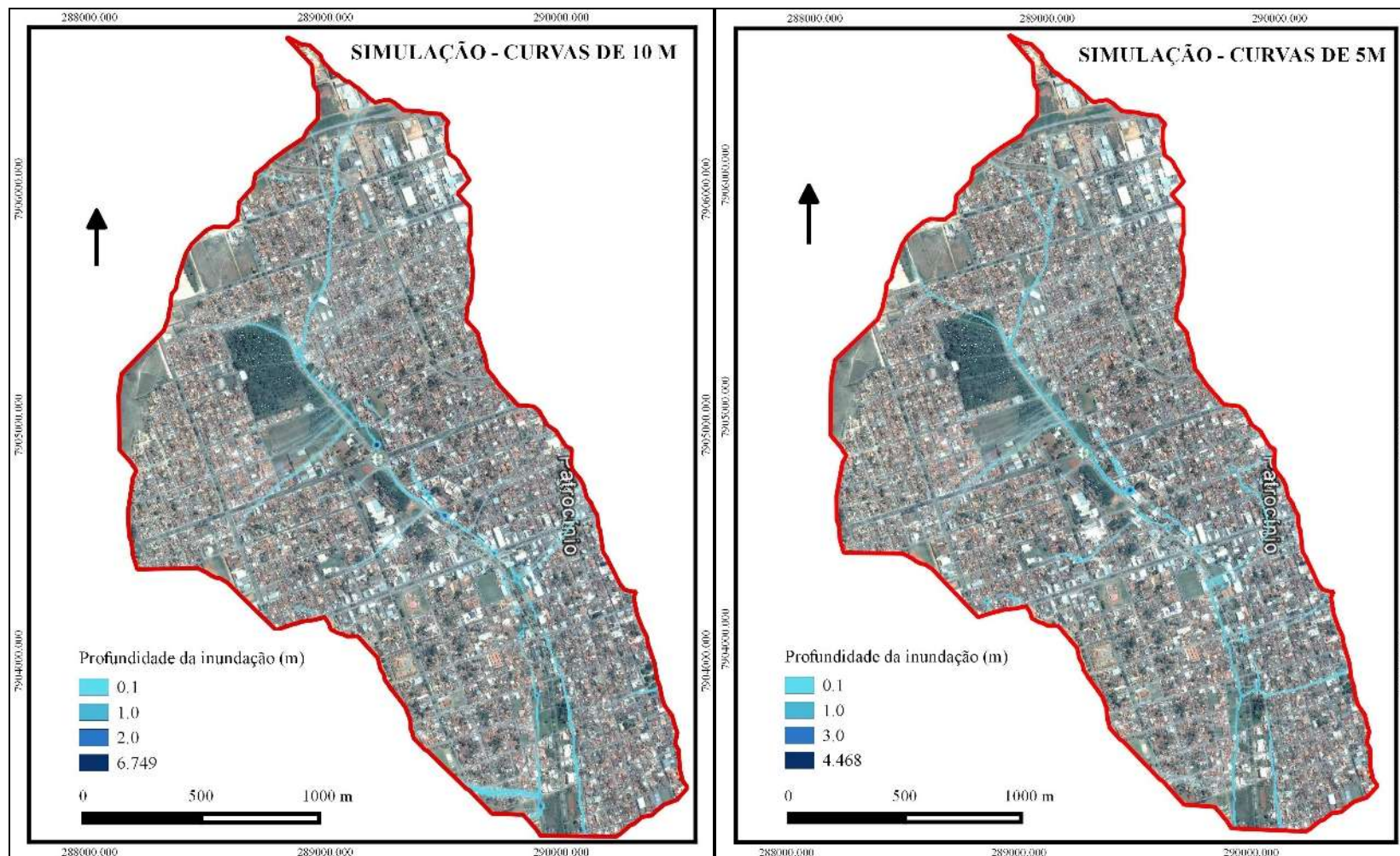


Figura 40: Simulação de inundação com curvas de nível de 5 metro de equidistância.



Fonte: Autora.

Figura 41: (a) Simulação de inundação com curvas de 5 metro de equidistância. (b) Simulação de inundação com curvas de 10 metro de equidistância.



Fonte: Autora.

As manchas de inundação ocuparam faixas distintas nas três simulações, sendo a que apresentou detalhamento mais próximo do real a constituída pelo MDTHC produzido com curvas de 1 metro de equidistância. A simulação pelo modelo do GRASS apresenta o detalhamento de toda a bacia, com manchas ocupando áreas distantes da calha principal. Nas imagens, pode-se averiguar inclusive a demarcação das nascentes presentes na parte alta da bacia, modeladas de acordo com o relevo presente.

Os resultados simulados não expressam claramente a intensidade e dimensão da mancha de inundação, no entanto, a localizada das áreas de maior risco das enchentes diagnosticada na simulação de 1 metro, está definida de acordo com a situação vivenciada nos pontos de interesse da pesquisa. Há lacunas e desvios nas manchas delimitadas com relação ao leito do córrego e trecho canalizado. Seguindo estudos de Lima Neto e Tavares (2013), este é o resultado devido o modelo ser gerado com base nas curvas de nível, que representam o terreno em grande parte sem as modificações provenientes da infraestrutura instalada.

As amostras de 5 e 10 metros, nas áreas de jusante da bacia, apresentam desvio quanto ao curso natural do córrego, atual avenida onde ocorrem as inundações. Isso se deve ao fato do baixo nível de detalhe dos dados analisados que não conduzem a uma análise coerente dos fatos, visto que o modelo simulado com curvas de 1 metro não apresenta tais interferências, sendo a calha delimitada corretamente pela vertente. No modelo construído em 1 metro com a vazão de projeto as profundidades da inundação variam de 0.05 a 4 metros, sendo distribuída na maior parte da representação por uma lâmina de água de 0,5 a 1 metro, enquanto que no cenário de 1m com a vazão teste as profundidades tiveram registro de 0,0002 a 3,65 metros.

Ao se comparar as simulações realizadas com vazões de projeto e de testes, os resultados são similares, haja vista que os modelos foram calibrados com os mesmos parâmetros variando somente a vazão de escoamento. Na representação é possível avaliar o acréscimo na mancha de inundação no modelo de projeto para um evento de maior intensidade. Na modelagem de vazão de projeto percebe-se uma maior concentração de lâmina de água em profundidades de 5 centímetros, ou seja, um maior escoamento superficial por parte da maior precipitação.

A modelagem topográfica é bem representativa e define as áreas de acumulação do fluxo, direcionando os resultados adquiridos. É importante salientar que o modelo se mostrou eficaz na descrição dos fluxos da bacia, sendo útil analisado em conjunto com os resultados obtidos no HEC-RAS.

### 5.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS PRODUTOS FINAIS

Tanto o modelo apresentado pelo GRASS/QGIS, quanto o HEC-RAS/ArcGIS possibilitaram a representação e delimitação das áreas de enchentes e alagamentos por meio dos mapas de risco, conforme proposto na pesquisa.

São muitas as diferenças apresentadas pelos programas avaliados, mesmo estes utilizando os mesmos parâmetros para simulação. O modelo HEC-RAS é hidráulico, com a ferramenta HEC-geoRAS que dá todas as características espaciais e de análise, faz uma analogia num contexto centralizado ao longo das seções transversais que ditam os dados a serem integrados. O Sistema do GRASS por meio do QGIS apresenta uma análise espacial mais integrada às formas topográficas, tendo os resultados da interpretação não só na parte da calha, mas em toda a composição da bacia hidrográfica em questão.

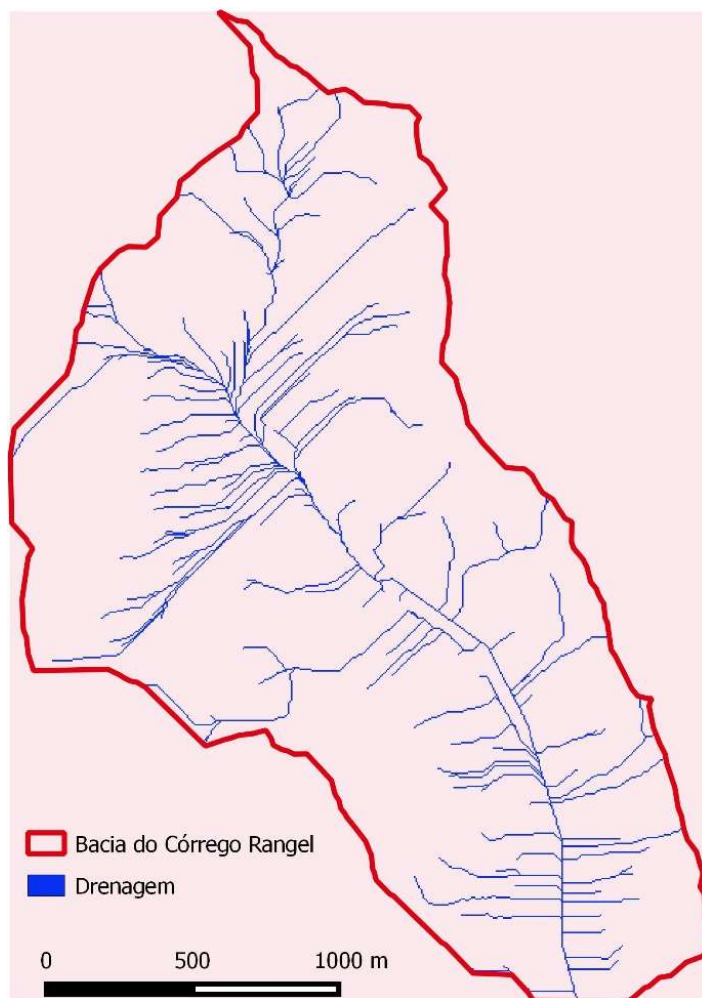
Partindo do mesmo MDT, obtém-se representações diferentes com resultados individualizados, o que mostra o potencial de unificação entre as duas avaliações para um produto final, que represente de forma mais adequada a realidade dinâmica do efeito de enchentes e inundações.

Diante dessa forma diferenciada, a fase inicial de cada programa e suas ferramentas tem a ordenação de informações, dados necessários e calibração individual para cada modelagem. O QGIS por meio do GRASS apresenta em sua base de ferramentas a construção automática de vetores que definem a drenagem, figura 40, possível através do raster de direção de fluxo e álgebra de mapas que delimitam os cursos fluviais presentes na bacia. Já o programa HEC-RAS e a ferramenta HEC-geoRAS não apresentam essa funcionalidade, sendo o mesmo construído manualmente na edição do rio (*river*) e indicação de direção de fluxo.



Para a definição mais detalhada da drenagem criada automaticamente deve-se passar por um filtro a fim de definir a calha principal e seus afluentes, visto que o mesmo ocupa áreas possíveis de drenagem, e com algumas correções no modelo é possível se ter a drenagem correta da bacia hidrográfica. Como referido por Monteiro et. al (2008), os dados provenientes do SIG no dimensionamento dos parâmetros iniciais, podem reduzir bastante a incerteza associada a valores de outros escolhidos aleatoriamente.

Figura 42: Drenagem criada no GRASS



Fonte: Autora

No resultado, os dois programas apresentam como produtos a profundidade da inundação em formato raster, tendo como resolução espacial (tamanho do pixel da imagem de saída) de 5 metros. Essa característica permite a comparação entre os produtos gerados, possibilitando a análise e interpretação de cada detalhe apresentado.

Para cada cena obteve-se uma profundidade diferente, tanto na modelagem no GRASS quanto no HEC-RAS. Observou-se uma variação nos valores de profundidades relacionados com o nível de detalhe das amostras. Quanto menor o nível de detalhe dos dados, maior variação entre os resultados mínimos e máximos de profundidades da inundação. A Tabela 9 apresenta a variação das profundidades expressas nas representações.

Tabela 8: Profundidade das inundações.

SIMULAÇÕES	PROFUNDIDADE MÍNIMA (m)	PROFUNDIDADE MÁXIMA (m)
<i>Modelo 1 (GRASS):</i>		
1 metro	0,0025	4,0077
5 metros	0,0005	4,4680
10 metros	0,0006	6,7490
Vazão de teste	0,00021	3,65
<i>Modelo 2 (HEC-RAS):</i>		
Curvas 1 m / Seções 50 m	0,0003	0,9708
Curvas 1 m / Seções 100 m	0,0003	1,2300
Curvas 1 m / Seções 200 m	0,0001	1,9530
Curvas 5 m / Seções 100 m	0,0002	6,9942
Curvas 10 m / Seções 100 m	0,0005	6,5740
Vazão de teste	0,0007	1,365

Fonte: Autora.

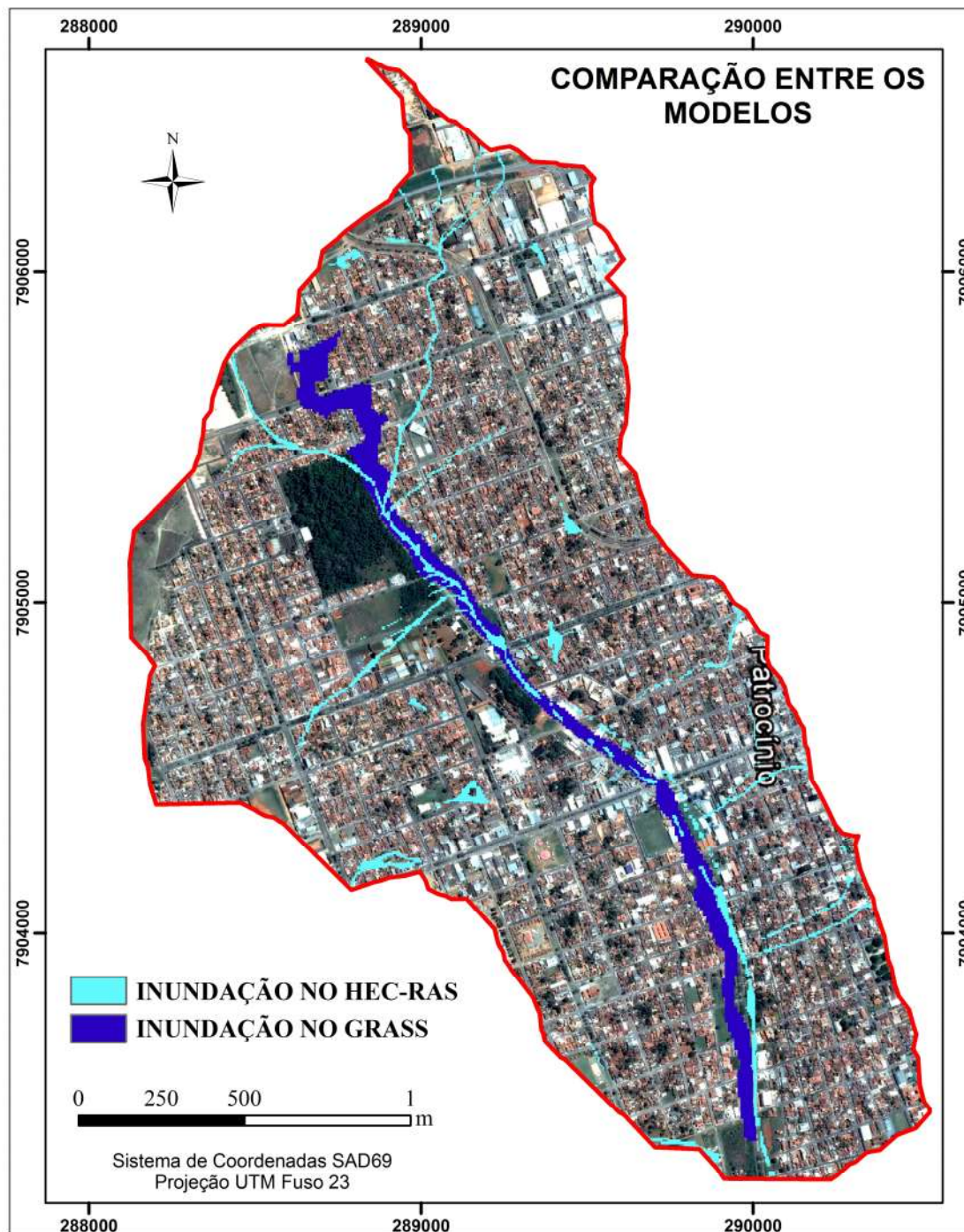
Ao se avaliar o resultado das profundidades, observa-se a consistência nos valores apresentados pelo modelo 1 do GRASS, no qual varia de 4 a 6,74, enquanto que o modelo 2 do HEC variou mais, com resultados de 0,97 a 6,9 metros. As profundidades mínimas em todas as amostras ficaram abaixo de 5 milímetros, mostrando uma lâmina de água pouco representativa de inundação, caracterizando o escoamento natural da água. Quanto aos níveis máximos, o modelo 2 apresentou nível superior na escala de 6,9 metros, enquanto dados processados pelo GRASS identificou um limite máximo de 6,7 metros para a simulação feita com curvas de 10 metros de equidistância. Estas variações concordam com pesquisas realizadas por Lima Neto; Tavares (2013), isso está relacionado à qualidade dos

dados de entrada, que influenciam diretamente o resultado final. Baseado em estudos de Fernandez; Mourato; Moreira (2013), é importante um levantamento preciso da topografia do canal, visto que é fundamentado nesses dados de cada seção transversal ao longo do curso que são calculados os níveis de água que determinam a mancha de inundação. Assim, o nível de detalhamento proveniente de dados de alta resolução é, sem dúvidas, essencial para o resultado coerente da simulação.

A variação da distância das seções transversais influencia diretamente na composição final do resultado, visto que pelo HEC-RAS a seção demarca as características da superfície, onde se registra os parâmetros inseridos no modelo. Por se tratar de um cálculo unidimensional, em cada seção transversal é definida uma única altura de água (nível), sendo importante a definição de distância compatível que registre as variações bruscas do canal no escoamento principal.

A etapa 3 de análise propôs uma comparação entre os resultados obtidos no modelo 1 do GRASS e no modelo 2 do HEC-RAS. Os dois modelos foram aplicados na mesma bacia do Córrego Rangel, no qual tem sido registrado eventos de inundação e enchentes causadoras de risco e danos a sociedade. A cada modelo foi aplicada a calibração equivalente de forma a aproximar o método de análise e uso dos dados e, mediante a criação de cenários avaliativos obteve-se os resultados para tais comparações. A Figura 43 mostra a sobreposição dos resultados para análise e identificação dos pontos divertentes.

Figura 43: Comparação entre os modelos HEC-RAS e GRASS.



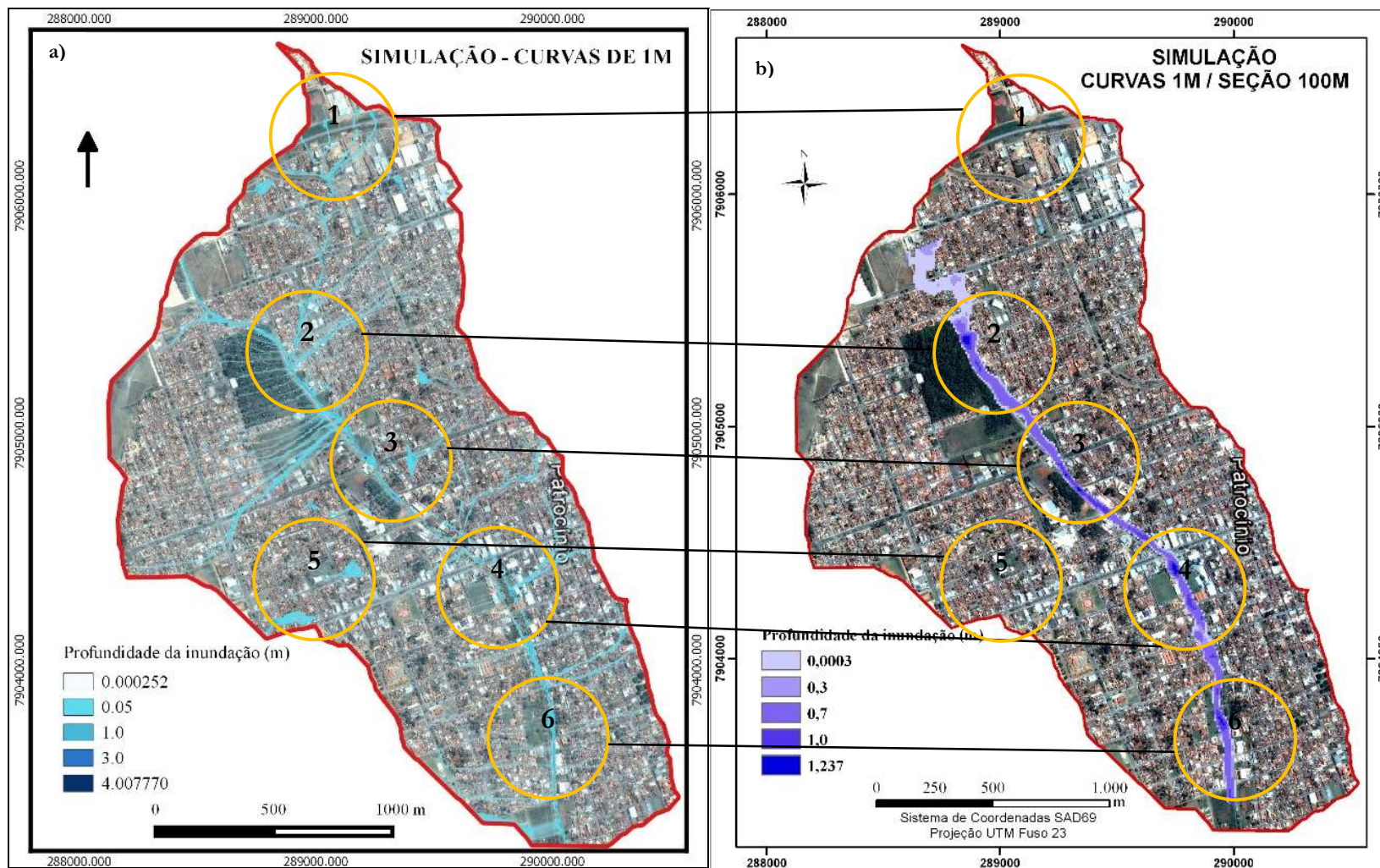
Fonte: Autora.

Ao observar os resultados obtidos pelos dois modelos percebe-se que estes apresentam uma identidade própria, no qual os parâmetros são interpretados e integrados de forma a se ter o produto único. Este resultado expõe a ideia de que a forma de como cada programa

reage e obtém seus resultados, os tornam aliados na construção de um mapa de risco, tendo cada sistema suas particularidades e um modelo complementando o outro. A Figura 44 apresenta um comparativo entre os resultados obtidos do modelo HEC-RAS e do GRASS referente as profundidades e localização das inundações. Foram definidos seis pontos críticos para análise, que serão avaliados a seguir.



Figura 44: Pontos de análise dos dois modelos: (a) Simulação no GRASS. (b) Simulação no HEC-geoRAS e HEC-RAS.



Fonte: Autora.

Nota-se que as áreas de inundações se concentram ao longo da calha principal, próxima ao Córrego Rangel. O fato da mancha se concentrar ao longo da calha é devido as características físicas de formação em vale encaixado, tendo a mancha uma forma mais estreita moldada pelas margens e declives.

Em análise, o item 1 define as áreas de nascentes da bacia, a montante do curso principal do córrego, no qual o programa GRASS caracterizou detalhadamente as possíveis acumulações nesta região, enquanto no HEC-RAS não há descrição desta imediação. Esse detalhe se deu devido a forma de avaliação dos programas, visto que pelo GRASS há uma interpretação de todo o fluxo da bacia, sendo possível a definição em diferentes pontos além da calha central do córrego, o que diferentemente se apresenta no HEC-RAS, um modelo hidráulico no qual são inseridas as informações e avaliadas somente a área de abrangência das seções transversais. É devida esta forma de avaliação que se dão as diferenças entre as calhas simuladas, com pontos onde a ocupação da inundação preenche trechos mais abrangentes e pelo modelo do GRASS, o mesmo trecho com calha mais estreita.

No item 2 são detalhadas as áreas de entorno do Horto da Matinha, a mancha de inundação criada no HEC-RAS corresponde à percepção da realidade do local, visto que nesta região há acúmulo de volume representativo de água, controlada pela barreira de vegetação que o Horto constitui. O modelo GRASS define a percolação das águas e origem de algumas nascentes que realmente se encontram dentro da reserva, como pequenos alagados. Neste contexto há necessidade de uma análise integrada da resposta dos dois modelos, tendo um conduzindo o resultado para a resposta da bacia em delimitar os fluxos provenientes da precipitação, e o outro na modelagem da zona de inundações determinando a ocupação das águas percoladas.

Os itens 3 e 4 representam o encontro de importantes vias em que há sérios problemas com as chuvas. No item 3 é o encontro entre a Avenida Dom José André Coimbra, onde há o Córrego Rangel canalizado, e a Avenida Jacinto Barbosa, no qual há fluxo intenso de água proveniente das regiões mais alta à noroeste da bacia. O que define esta área de forma mais adequada como um local de alto risco é a simulação feita pelo HEC-RAS, no qual a profundidade da inundação alcança os picos máximos de 1,23 metros preenchendo as

margens do canal e adentrando as vias de acesso que interceptam perpendicularmente. Neste local, pelo GRASS, identificaram-se pontos de pico de profundidade de 4 metros e o espalhamento da zona de inundação, mas, no entanto, este não é contínuo, descaracterizando a realidade.

No item 4 as águas das chuvas fluem do sentido leste-oeste e sentido oeste-leste na Avenida Faria Pereira, caracterizando a vertente de formação do córrego. A região é densamente urbanizada com solo impermeável, que em conjunto com a declividade do terreno geram fluxos intensos com maior velocidade. O sistema de drenagem instalado nesses pontos deve conduzir o fluxo e ter toda a capacidade instalada para que a água possa adentrar a microdrenagem e conduzir o fluxo para a macrodrenagem, onde possa escoar naturalmente. Mas, erroneamente, o que se vê na realidade é um sistema inadequado em que a água superficial escoar pela via causando danos e prejuízos à população, e uma gestão pública pouco interessada em adequar e investir em melhorias.

O item 5 dos mapas demonstram áreas exteriores à calha do córrego, definidas como fonte de inundação devido as áreas de infraestrutura e relevo. São regiões identificadas no modelo GRASS, visto que este possibilita uma análise de toda a área da bacia, de forma integrada, mediante o modelo de terreno e cálculo do direcionamento dos fluxos. Esses resultados salientam a importância do planejamento e implantação do sistema de drenagem urbano, visto que eventos de chuva podem causar danos locais ocasionados por fenômenos regionais distribuídos.

O item 6 é a parte mais baixa da bacia, onde há maior concentração de água proveniente dos fluxos escoados na bacia. É onde estão localizadas as declividades mais acentuadas, e neste ponto também há forte arraste de material, comprovado pelas imagens dos danos causados a superfície pavimentada. Por meio da modelagem do GRASS foi possível conhecer os regimes de escoamento verificados nas linhas de água presente nesta região.

Os modelos obtiveram resultados divergentes ao delimitar a calha do rio, de modo que, faz-se necessário a identificação das diferenças nas regiões do canal. A tabela 10 expressa essas diferenças presentes entre o modelo simulado pelo GRASS e o modelo do HEC-



RAS. Os produtos avaliados foram criados com base na vazão de projeto, que necessariamente representa um evento com pico de intensidade de chuva em 50 anos.

Tabela 9: Diferenças na região do canal entre HEC-RAS X GRASS.

Área destacada	Diferenças na região do canal entre HEC-RAS X GRASS			
	Largura (m)	Área (x 100m em m <sup>2</sup> )	Profundidade (m)	Vazão de Projeto (m <sup>3</sup> )
1	23,0	2.300	0,05	103,277
2	69,0	6.900	0,5	103,277
3	8,0	800	0,3	103,277
4	50,0	5.000	1,15	103,277
5	70,0	7.000	0,05	103,277
6	35,0	3.500	0,1	103,277

Fonte: Autora.

A tabela avaliou os seis pontos de destaque ao longo do canal, apresentados anteriormente, e para cada um foi obtido a largura média da mancha de inundação, tendo como área de abrangência uma estimativa de alcance de 100 metros e profundidade média no dato ponto avaliado. A estação base são os marcos de cada área destacada demarcada por um par de coordenadas UTM, posicionada no sistema de referência SAD69, fuso 23.

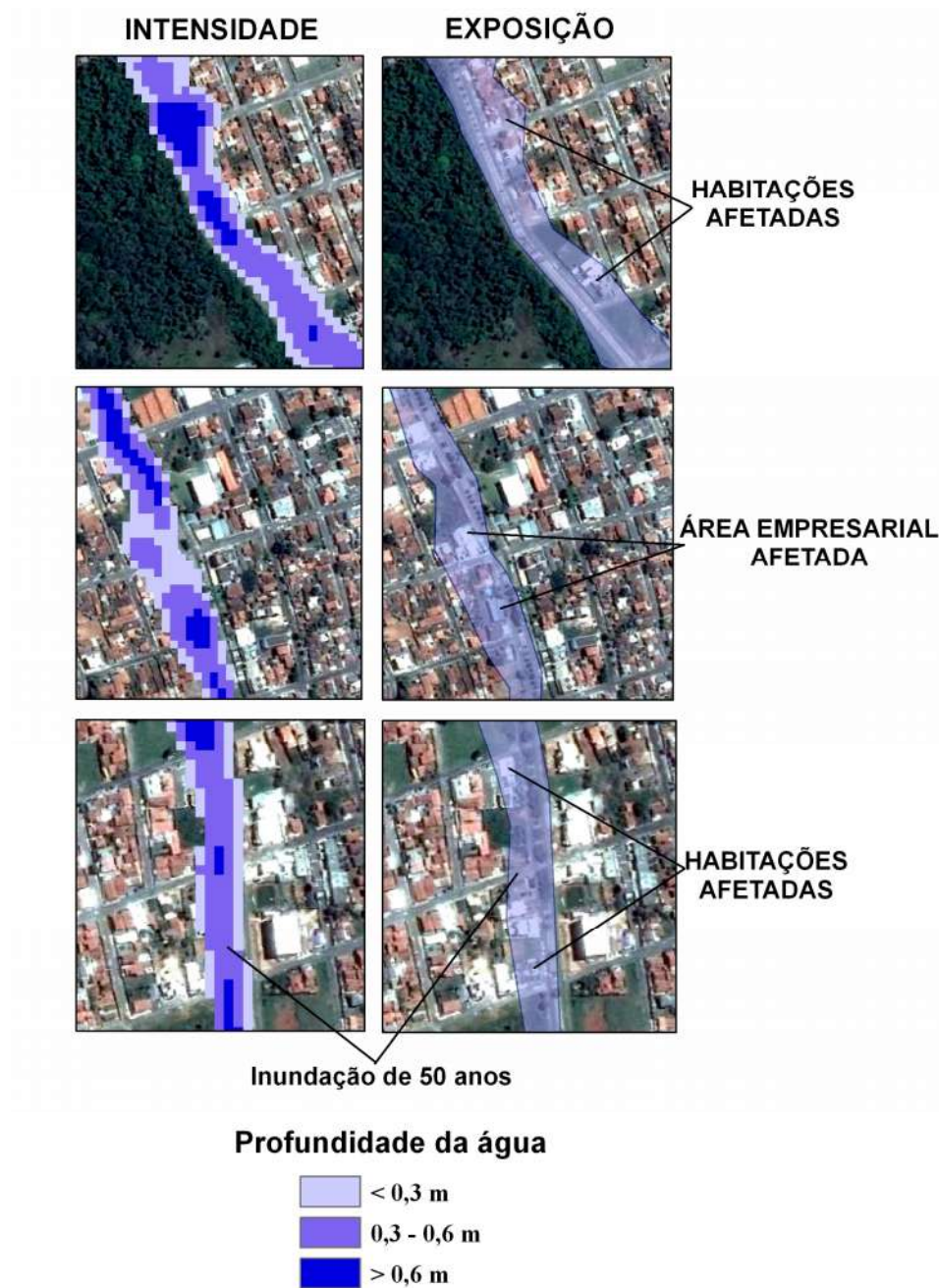
O ponto 3 é o que expressa menor diferença entre as modelagens e os pontos 2, 4 e 5 os de maior variação, em que há presença da inundação não devidamente identificada pelo modelo GRASS. A diferença de profundidade mais intensa é no ponto 4, com o valor de 1,15 metros, sendo considerada expressiva para a simulação.

Os aspectos físicos identificados na bacia do Córrego Rangel favorecem a formação da enchentes e inundações em períodos de precipitação intensa. Efeitos estes são potencializados pela impermeabilização cada vez mais acelerada da bacia e descaracterização do leito principal da calha do curso de água.

Tendo em vista a importância do conhecimento da resposta da bacia hidrográfica aos eventos de chuva, e seus efeitos na sociedade, alguns locais foram considerados críticos a ocorrência de inundação pela presença de residências e estruturas urbanas significativas a população, inclusive áreas empresariais, destacadas para análise da abrangência das manchas, de modo a salientar o quanto é destrutível o não planejamento do solo urbano.

Por meio da pesquisa, procuram-se identificar possíveis áreas edificadas atingidas pelas inundações ao longo de 50 anos de análise. Na Figura 45 são mostrados trechos representados as profundidades e zonas de abrangência das inundações nas áreas urbanizadas.

Figura 45: Detalhamento das áreas atingidas pela inundação na bacia do Córrego Rangel, no HEC-RAS.



Fonte: Autora.

Os três pontos de destaque representam respectivamente os cenários 2, 4 e 6 mostrados anteriormente. Nestes pontos, as áreas residenciais e de importância econômica para a cidade, tem potencial para serem diretamente atingidos pelos efeitos das inundações na bacia no caso de recorrência de cinquenta anos.

## CAPÍTULO 6

### CONCLUSÃO

A pesquisa revelou que o SIG é uma poderosa ferramenta na estimativa de parâmetros para todos os algoritmos compreendidos no modelo de bacia, sendo fundamental na ausência de dados de escoamento e dimensionamento hidráulico do canal. O estudo realizado evidencia o planejamento de recursos hídricos como uma prática positiva, no qual o poder público necessita ter acesso a tais ferramentas de modelação, adequadas a situações de riscos como a identificada.

A modelagem computacional hidráulica da bacia requer ajustes, provenientes muitas vezes da simplificação dos modelos com calibrações básicas. Os parâmetros de entrada (dados modelados em SIG) devem ser avaliados e livres de erros para o bom funcionamento dos modelos, sempre atento aos dados de origem desconhecida e sistema base de referência. Entre esses parâmetros estão a base topográfica, imagens de referência, dimensões do canal, histórico de precipitações, etc.

A metodologia proposta de comparação dos modelos foi satisfatória em oferecer uma avaliação dos parâmetros de entrada dos modelos, através da variação das principais condições de entrada dos dados, e obtendo uma percepção da robustez dos modelos testados. É essencial que se faça a modelagem considerando diferentes cenários em termos de ocupação e recorrência de chuvas, visando analisar as diferentes condições e níveis de detalhes dos dados para proposição da base mais consistente.

Os modelos avaliados se mostraram de forma representativa as áreas de risco de inundação em suas diferentes formas de análise. O HEC-RAS apresenta o detalhamento do perfil do canal principal e o GRASS a representação dos fluxos da bacia hidrográfica. Diante desses

resultados observou-se uma análise consistente da área da bacia e em sistemas mais complexos de áreas de contribuição podem exigir a integração de modelos, atribuindo a funcionalidade a cada um dos modelos de forma a se ter o melhor aproveitamento do resultado.

Com o estudo foi possível a criação dos mapas de riscos as enchentes e inundações na bacia do Córrego Rangel, apresentando-se de diferentes formas a localização e profundidade das manchas de ocupação das águas em eventos intensos de chuva, o que evidencia a unificação e uso integrado dos dois modelos apresentados, nas tomadas de decisão. Essas informações são essenciais no planejamento territorial, como apoio ao poder público na correção dos problemas urbanos e criação de novas áreas de ocupação.

De acordo com o Estatuto das Cidades, todo Plano Diretor deve contemplar em seu relatório a definição de que os novos loteamentos devem exigir, a implantação e/ou conservação de áreas verdes que atendam aos padrões recomendados pela ONU (Organização das Nações Unidas). Isso deve ser obrigatoriamente estabelecido, visto que por meio das áreas permeáveis e vegetação há a redução do volume de água escoado, sendo essas áreas pontos de infiltração das águas das chuvas e barreiras naturais de controle do escoamento superficial. A preservação e a construção de novas áreas verdes são medidas de controle, que permitem a retenção da água da chuva em uma área urbana, de forma a estabelecer o controle pluvial nas aglomerações urbanas.

Como resultado, avaliou-se que no modelo HEC-RAS é feito a simulação ao longo do canal, delimitado pelas informações de contorno e seção transversal, o que restringe a análise a nível de bacia hidrográfica. As variações de distâncias das seções transversais influenciam diretamente em sua composição final do resultado, sendo assim, há necessidade de maior detalhamento das seções para que se tenha a representação mais próxima do real. O programa é limitado a calibração das informações, o que dificulta a abrangência da análise.

A modelagem no GRASS possibilitou a representação de toda a bacia hidrográfica, identificando áreas fora do contexto do leito principal, que são identificadas como de risco as inundações. A simulação caracterizou os fluxos de drenagem superficial, modeladas de

acordo com o relevo da bacia, com indicações de nascentes, mas, no entanto, não se obteve o detalhamento do canal principal. Devido a modelagem utilizar-se de curvas de nível, evidenciou-se áreas divergentes com o leito principal do rio que se encontra canalizado, isso porque o GRASS não considera elementos urbanos como barreiras impostas. Referente aos dados de entrada para simulação, estes são necessariamente em formato raster, o que exige mais tempo na construção dos parâmetros. Identificou-se que a análise feita pelo GRASS expressa resultados positivos para bacias hidrográficas localizadas em áreas rurais, sem interferência da infraestrutura causa das modificações na superfície.

Para a criação dos mapas de riscos as enchentes e inundações na bacia do Córrego Rangel é conveniente a unificação dos resultados do HEC-RAS e do GRASS, visto que o HEC-RAS define a área no contexto do canal principal, enquanto que o GRASS faz uma analogia geral da bacia hidrográfica. A simplificação dos modelos com o uso dos programas computacionais gera muitas incertezas, o que aumenta a necessidade da calibração e validação da modelagem. Em uma análise pontual, o modelo HEC-RAS é o que melhor representa a realidade expressa ao longo das inundações na Avenida Dom José André Coimbra.

Para continuação desta pesquisa e estudos futuros recomenda-se a inserção de dados na modelagem hidráulica, de modo a caracterizar melhor a calha de escoamento superficial e os efeitos da infraestrutura na modelagem. Tais dados consistem em informações como localização de bueiros e pontes instaladas no sistema ao longo do canal, dimensão do canal, identificação de áreas ineficientes e bloqueios que interrompam a percolação do fluxo normalmente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUA y SIG. **Hidrología con ArcGis y Archydro**. 2010. Disponível em:  
<<http://www.aguaysig.com/2010/04/hidrologia.html>>. Acesso em: 3 maio 2015.

ARCGIS. **Topo to Raster: Spatial Analyst**. 2012. Disponível em:  
<<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/index.html#//009z00000006s000000>>.  
Acesso em: 3 maio 2015.

BALLESTEROS, J. A.; BODOQUE, J. M.; DÍEZ-HERRERO, A.; SANCHEZ-SILVA, M.; STOFFEL, M. **Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharger based on tree-ring evidence and hydraulic modelling**. 2011. Disponível em:  
<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169411002253>>. Acesso em: 05 mai 2015.

BARBOSA, F. A. R. **Medidas de Proteção e Controle de Inundações Urbanas na Bacia do Rio Mamanguape/PB**. 2006. 116 pág. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Civil, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2006. Disponível em:  
<[http://www.cprm.gov.br/publique/media/diss\\_franciscobarbosa.pdf](http://www.cprm.gov.br/publique/media/diss_franciscobarbosa.pdf)>. Acesso em: 10 mai 2015.

BARBOSA, Z. N. T.; OLIVEIRA, W. N.; ALVES, P. R. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de riscos Estudo de caso: Angra dos Reis -RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR)., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 4940-4947. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em:  
<<http://urlib.net/3ERPFQTRW/3A5D2GP>>. Acesso em: 29 jun. 2015.

BARRETTO, P. C. A. **Avaliação hidrológica de microbacias de nascentes de rios: Contribuições para a gestão de recursos ambientais no semiárido pernambucano**. 2010. 176 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em:  
<[http://www.repositorio.ufpe.br/bitstream/handle/123456789/5285/arquivo3326\\_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.repositorio.ufpe.br/bitstream/handle/123456789/5285/arquivo3326_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 20 jun. 2015.

BARROS, A. M. F. B.; CARVALHO, C. S.; MONTANDON, D. T. **O Estatuto da Cidade comentado (Lei nº 10.257 de 10 de julho de 2001)**. 2010. Disponível em:  
<[http://www.citiesalliance.org/sites/citiesalliance.org/files/CA\\_Images/CityStatuteofBrazil\\_Port\\_Ch6.pdf](http://www.citiesalliance.org/sites/citiesalliance.org/files/CA_Images/CityStatuteofBrazil_Port_Ch6.pdf)>. Acesso em: 13 fev 2015.

BERNARDES, T. **Caracterização do ambiente agrícola do Complexo Serra Negra por meio de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas**. 2010.

Disponível em:

<<http://www.epamig.br/geosolos/MaterialSite/Teses/Tiago/Tiagodissertacao.pdf>>. Acesso em: 13 dez 2014.

BERNARDES, T. **Classificação Automática de imagens de satélites no mapeamento da região cafeeira de Patrocínio, MG**. 2006. Disponível em:

<[http://www.epamig.br/geosolos/MaterialSite/CongressosNacionais/SimposioCafe-AguasdeLindoi/Classificacao\\_Automatica\\_Patrocinio.pdf](http://www.epamig.br/geosolos/MaterialSite/CongressosNacionais/SimposioCafe-AguasdeLindoi/Classificacao_Automatica_Patrocinio.pdf)>. Acesso em: 13 dez 2014.

BLASCHKE, T.; KUX, H. **Sensoriamento remoto e SIG avançados: novos sistemas sensores e métodos inovadores**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 08 de janeiro de 1997. Política Nacional dos Recursos Hídricos. Brasília, DF, 10 jun 2001. Disponível em:

<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm)>. Acesso em: 15 fev 2015.

BRASIL. Constituição (2002). Decreto nº 4.297, de 10 de janeiro de 2002. **Zoneamento Ecológico-econômico do Brasil - Zee**. BRASÍLIA, DF, Disponível em:

<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/2002/d4297.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4297.htm)>. Acesso em: 20 jun. 2015.

BRASIL. **Lei nº 10.257**, de 10 de junho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Brasília, DF, 10 jun 2001. Disponível em:

<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/leis\\_2001/110257.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/110257.htm)>. Acesso em: 15 fev 2014.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. **Novo Código Florestal**. Brasília, DF, 25 mai 2012. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112651.htm)>. Acesso em: 15 abr 2015.

CHAVES, J. M.; FRANCA-ROCHA, W. de J. S. da. (Org.). **Geotecnologias: Trilhando novos caminhos nas geociências**. Salvador: SBG, 2006.

CÂMARA, G. et al. **Análise espacial e geoprocessamento**. São José dos Campos: INPE, 2003. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/analise/cap1.pdf>>. Acesso em: 10 mai 2015.

CÂMARA, G.; FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem numérica de terreno**. 2005.

Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>>. Acesso em: 02 mar 2015.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. (ORGs). **Geoprocessamento em projetos ambientais**. 2 ed. São José dos Campos, SP, 1998. Disponível em:

<<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap10-aplicacoesambientais.pdf>>. Acesso em: 7 abr 2015.



- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Conceitos básicos em ciência da informação**. 2001. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap2-conceitos.pdf>>. Acesso em: 13 fev 2015.
- CAMPOS, R. G. D. **Análise da representatividade de diferentes hipóteses de modelagem matemática para definição de manchas de inundação em áreas urbanas – Estudo de caso da cidade de Governador Valadares-MG**. 2011. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <<http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/860M.PDF>>. Acesso em: 20 jun 2015.
- CANHOLI, A. P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.
- CARDOSO NETO, A. **Sistemas Urbanos de Drenagem**. 2008. Disponível em: <[http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/ProducaoAcademica/Antonio%20Cardoso%20Neto/Introducao\\_a\\_drenagem\\_urbana.pdf](http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/ProducaoAcademica/Antonio%20Cardoso%20Neto/Introducao_a_drenagem_urbana.pdf)>. Acesso em: 06 mai 2015.
- CARVALHO, D. F.; SILVA, L. D. B. **Hidrologia: escoamento superficial**. 2006. Ou 7 Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/HIDRO-Cap7-ES.pdf>>. Acesso em: 10 abr 2015.
- CORDEIRO, J. P.; BARBOSA, C. C. F.; CÂMARA, G. **Álgebra de campos e objetos**. Brasília: EMBRAPA, 2001. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap8-algebra.pdf>>. Acesso em: 10 abr 2015.
- Deckers, P.; KELLENS, W.; REYNS, J.; WOUTER, V.; MAEYER, P. **A GIS for flood risk management in flanders**. 2010. Departmente of Geography, Faculty of Sciences, Ghent University, Krijgslaan 281, Belgium. Disponível em: <[www.vliz.be/imisdocs/publications/226258.pdf](http://www.vliz.be/imisdocs/publications/226258.pdf)>. Acesso em: 20 jun 2015.
- DRUCK, S. et al. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Embrapa, Brasília, 2004. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/>>. Acesso em: 10 set 2013.
- EMBRAPA. **Súmula da X reunião técnica de levantamento de solos**. Rio de Janeiro: SNLCS, 1979. 83 p. Disponível em: <[http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu\\_i00006739\\_001.pdf](http://library.wur.nl/isric/fulltext/isricu_i00006739_001.pdf)>. Acesso em: 10 ago 2014.
- FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem Numérica de Terreno**. 1998. Disponível em <[http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis\\_ambiente/4mnt.pdf](http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/4mnt.pdf)>. Acesso: 15 abril 2014.
- FERNANDEZ, P., MOURATO, S. E MOREIRA, M. 2013. Comparação dos modelos hec-ras e lsflood-fp na delimitação de zonas inundáveis. **Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos**. Volume 34# 01. Disponível em: <<http://www.aprh.pt/index.php/pt/>> Acesso em: 15 abr 2015.

FERRERO, V. O. **Hidrología computacional y modelos del terreno**. 2004. Disponível em: <[http://www.gabrielortiz.com/descargas/Hidrologia\\_Computacional\\_MDT\\_SIG.pdf](http://www.gabrielortiz.com/descargas/Hidrologia_Computacional_MDT_SIG.pdf)>. Acesso em: 11 mai 2015.

FRANÇA, B. T.; RIBEIRO, C. B. de M. **Modelagem hidrológica e hidráulica para mapeamento de áreas de risco de inundações urbanas na bacia hidrográfica do Rio Pomba**. 2013. XX Simposio Brasileiro de Recursos Hídricos. Disponível em: <[http://www.gabrielortiz.com/descargas/Hidrologia\\_Computacional\\_MDT\\_SIG.pdf](http://www.gabrielortiz.com/descargas/Hidrologia_Computacional_MDT_SIG.pdf)>. Acesso em: 11 mai 2015.

GARBRECHT, J.; MARTZ, L. W. **Digital Elevation Model Issues In Water Resources Modeling**. 2000. Disponível em: <<http://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap866/p866.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2015.

GRASS GIS. 2015. Disponível em: <<http://grass.osgeo.org/>>. Acesso em: 05 abr. 2015.

GROHMANN, Carlos Henrique. **Introdução a Análise Digital de Terreno com GRASS-GIS**. 2008. Disponível em: <[http://www.igc.usp.br/pessoais/guano/downloads/tutorial\\_grass6.pdf](http://www.igc.usp.br/pessoais/guano/downloads/tutorial_grass6.pdf)>. Acesso em: 3 maio 2015.

GUIMARÃES, Renato Castelo. **Comparação entre duas metodologias de cálculo e propagação de vazão em coletores de redes de drenagem urbana: o Método Racional e Equações de Saint-Venant**. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-ce, 2009. Disponível em: <[http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/3673/1/2009\\_dis\\_reguimaraes.pdf](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/3673/1/2009_dis_reguimaraes.pdf)>. Acesso em: 20 jun 2015.

HANSEN, M. A. F. **As práticas de campo em eventos de inundação com o apoio de informações espaciais**. 2008. Disponível em: <<http://www.inpe.br/crs/crectalc/pdf/hansen.pdf>>. Acesso em: 14 mar 2015.

HEC - Hydrologic Engineering Center. **US Army Corps of Engineers**. Davis, USA: Institute for Water Resources, 2014. Disponível em: <<http://www.hec.usace.army.mil/>>. Acesso em: 08 jun 2015.

HORA, Silmara Borges da. **Mapeamento e avaliação do risco a inundação do Rio Cachoeira em trecho da área urbana do município de Itabuna/BA**. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, Mg, v. 2, n. 21, p.57-75, ago. 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/sn/v21n2/a05v21n2>>. Acesso em: 02 abr 2015.

IBGE. **Cidades**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2014. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>>. Acesso em: 06 dez 2014.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Manual de geoprocessamento**. São José dos Campos. 2002. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/espanol/tutorial/classific.html>>. Acesso em: 06 fev 2015.

ISDR – INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION. **Anual Report 2007**, 2007. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>>. Acesso em: 06 abr 2015.

LANÇA, R. M. M. **Equações de Saint-Venant**. 2000. Disponível em: <<http://w3.ualg.pt/~rlanca/tese-mestrado/tm-04-eq-s-venant.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2015.

LIMA NETO, O. C.; TAVARES, P. R. L. **Mapeamento de áreas de inundação da microbacia hidrográfica do Rio Granjeiro na cidade de Crato/CE**. 2013. Disponível em: <[http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCMQFjAB&url=http%3A%2F%2Fencontros.ufca.edu.br%2Findex.php%2Fencontros-universitarios%2Ffeu-2013%2Fpaper%2FdownloadSuppFile%2F2125%2F228&ei=9HSRVb\\_pIsfnsAX0pLTWc&usq=AFQjCNEZ4I2VbAHAvnZGtsgJAD8L0xPHIw&sig2=6srTMQMkcVH491pOn6NgtA&bvm=bv.96783405,d.b2w](http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0CCMQFjAB&url=http%3A%2F%2Fencontros.ufca.edu.br%2Findex.php%2Fencontros-universitarios%2Ffeu-2013%2Fpaper%2FdownloadSuppFile%2F2125%2F228&ei=9HSRVb_pIsfnsAX0pLTWc&usq=AFQjCNEZ4I2VbAHAvnZGtsgJAD8L0xPHIw&sig2=6srTMQMkcVH491pOn6NgtA&bvm=bv.96783405,d.b2w)>. Acesso em: 20 jun 2015.

LONGLEY, P. A. et al. **Sistema e ciência da informação geográfica**. Tradução de André Schneider... et al. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

MACHADO, M. D. G. **As unidades morfológicas e a estrutura da paisagem no município de Patrocínio – Minas Gerais**. 2001. 82 pág. Dissertação (Mestrado) – “Curso de Geografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

MEIRELLES, M. S. P.; CÂMARA, G.; ALMEIDA, C. M. **Geomática: Modelos e Aplicações Ambientais**. Brasília, DF: Embrapa Informações Tecnológicas, 2007.

MERWADE, V. **Tutorial sobre o uso do HEC-GeoRAS com ArcGIS 10 e modelagem HECRAS**. 2012. Disponível em: <<https://web.ics.purdue.edu/~vmerwade/education/georastutorial.pdf>>. Acesso em: 22 abr 2015.

MERZ, B.; THIEKEN, A. H. **Flood risk analysis: concepts and challenges**. Austria: 2004. Disponível em: <[ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/pub/home/hydro/krahn/Merz-Thieken\\_%D6WAW2004.pdf](ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/pub/home/hydro/krahn/Merz-Thieken_%D6WAW2004.pdf)>. Acesso em: 22 mai 2015.

MERZ, B.; THIEKEN, A. H.; GOCHT, M. **Flood risk mapping at the local scale: concepts and challenges**. 2007. Disponível em: <<http://www.springer.com/us/book/9781402041990>>. Acesso em: 22 mai 2015.

MINAS GERAIS. **Lei nº 1.201**, de 05 de dezembro de 1972. Institui o Plano Diretor do município de Patrocínio e dá outras providencias. Patrocínio, MG, 1972.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005.

MONTEIRO, P.; SILVA, D. M. e S.; PADILHA, A. C.; GOMES, T. **Influência do aumento da área urbana no regime hidrológico de pequenas ribeiras**. 2008. Disponível

em: <

[http://paginas.fe.up.pt/~shrha/publicacoes/pdf/JHRHA\\_3as/21\\_Influ%C3%A4nciaAumento\\_PMonteiro.pdf](http://paginas.fe.up.pt/~shrha/publicacoes/pdf/JHRHA_3as/21_Influ%C3%A4nciaAumento_PMonteiro.pdf)>. Acesso em: 20 jun 2015.

MOTA, S. **Urbanização e meio ambiente**. 4. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

NANIA, L. S.; MOLERO, E. **Manual básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRAS 3.1.1**. 2007. Disponível em:

<[http://www.urbanismogranada.com/administrador/archivos/04\\_10\\_07\\_ManualB\\_sico\\_HEC-RAS313\\_HEC-GeoRAS311\\_Espa\\_ol.pdf](http://www.urbanismogranada.com/administrador/archivos/04_10_07_ManualB_sico_HEC-RAS313_HEC-GeoRAS311_Espa_ol.pdf)>. Acesso em: 06 jul 2014.

PASQUALE, N., PERONA, P., WOMBACHER, A., BURLANDO, P. 2013.

**Hydrodynamic model calibration from pattern recognition of non-orthorectified terrestrial photographs**. Computers & Geosciences (2013). Disponível em:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0098300413001787>. Acesso em: 20 de jun de 2015.

PATROCÍNIO Online. 2014. Disponível em: <<http://www.patrocinioonline.com.br/>>. Acesso em: 20 jun. 2015.

PEDROSA, B. M.; CÂMARA, G. **Aspectos conceituais da modelagem dinâmica espacial**. 2001. Disponível em: < [http://mtc-](http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/lac.inpe.br/worcap/2004/09.06.17.43/doc/artigo%2014%20pp%20106-108%20D%20bianca_artigoWorcap.pdf)

[m18.sid.inpe.br/col/lac.inpe.br/worcap/2004/09.06.17.43/doc/artigo%2014%20pp%20106-108%20D%20bianca\\_artigoWorcap.pdf](http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/lac.inpe.br/worcap/2004/09.06.17.43/doc/artigo%2014%20pp%20106-108%20D%20bianca_artigoWorcap.pdf)>. Acesso em: 13 mai 2015.

PINHEIRO, A. **Previsão de chuva e inundação no Brasil**. 2013. Disponível em:

<<http://www.cbdnat.com.br/trabalhos/20%2003%2013%20-%20Comunica%E7%E3o%202%20-%20Adilson%20Pinheiro.pdf>>. Acesso em: 05 abr 2015.

QGIS BRASIL. 2015. Disponível em: <<http://qgisbrasil.org/blog/>>. Acesso: 15 abr 2015.

REIS FILHO, A. A. **Análise integrada por geoprocessamento da expansão urbana de Teresina com base no Estatuto da Cidade**: Estudo de potencialidades, restrições e conflitos de interesses. 2012. 278 pág. Dissertação (Mestrado) –Curso de Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012. Disponível em:

<[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/MPBB-935K4U/c\\_pia\\_de\\_antonioaderson\\_tese.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/MPBB-935K4U/c_pia_de_antonioaderson_tese.pdf?sequence=1)>. Acesso em: 10 mai 2015.

REIS, P. A.; SCHMIDT, M. A. R. **Diagnóstico da expansão urbana da cidade de Patrocínio, MG, por meio de classificação supervisionada**. Rio de Janeiro, 2013.

Disponível em

<<http://www.simpgeu.poli.ufrj.br/index.php/simpgeu/simpgeu/paper/view/109/98>>. Acesso: 10 abr 2015.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Conceitos básicos de modelagem hidrológica**. 2003. Disponível em:

<[http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2\\_modelos\\_hidrologicos.pdf](http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf)>. Acesso em: 1 jun 2015.

RIBEIRO, C. B. de M.; LIMA, R. N. de S. **Simulação de inundações urbanas a partir da integração de técnicas de geoprocessamento à modelagem hidráulica e hidrológica**. 2011. Disponível em:

<[http://www.ufjf.br/revistageografia/files/2011/12/Revista\\_Geografia\\_Dez-2011\\_-\\_Ricardo\\_Neves1.pdf-71.pdf](http://www.ufjf.br/revistageografia/files/2011/12/Revista_Geografia_Dez-2011_-_Ricardo_Neves1.pdf-71.pdf)>. Acesso em: 15 jun 2015.

RIBEIRO, D. A. Três novas metodologias para hierarquização de bacias hidrográficas. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2007, São Paulo. **Anais...** . São Paulo: Abrh, 2007. p. 1 - 20. Disponível em:

<[https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/3178c4350c396310354c62647187c1f1\\_622c80b53662078a945f650061747737.pdf](https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/3178c4350c396310354c62647187c1f1_622c80b53662078a945f650061747737.pdf)>. Acesso em: 20 jun 2015.

RIGHETTO, A. M. **Manejo de águas pluviais urbanas**. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

Disponível em: <[http://www.finep.gov.br/prosab/livros/prosab5\\_tema%204.pdf](http://www.finep.gov.br/prosab/livros/prosab5_tema%204.pdf)>. Acesso em: 15 mai 2015.

ROLNIK, R. (Org). **Estatuto da cidade: guia para implementação pelos municípios e cidadãos**. 2. ed. Brasília: Câmara dos Deputados, Coordenação de Publicações, 2002.

Disponível em:

<[http://www.unc.br/mestrado/mestrado\\_materiais/estatuto\\_cidade\\_2002.pdf](http://www.unc.br/mestrado/mestrado_materiais/estatuto_cidade_2002.pdf)>. Acesso em: 22 mai 2015.

ROLNIK, R.; JÚNIOR, S. **Estatuto da Cidade: novos horizontes para a reforma urbana**.

São Paulo: Pólis, 2001. Disponível em: <<http://www.polis.org.br/uploads/833/833.pdf>>. Acesso em: 09 fev 2015.

ROSA, R. **Introdução ao sensoriamento remoto**. 7. ed. Uberlândia: EDUFU, 2009.

RUHOFF, A. **Geotecnologias em Recursos Hídricos: Modelagem numérica do terreno para aplicações hidrológicas**. 2010. Disponível em:

<<http://blog.andersonruhoff.com/2010/11/modelagem-numerica-do-terreno-para.html>>. Acesso em: 20 jun 2015.

SANTOS, J. **Geoprocessamento Digital: ArcGIS 10.1: Super Análise Hidrológica com Spatial Analyst**. 2013. Disponível em:

<<http://www.processamentodigital.com.br/2013/05/07/arccgis-10-1-super-analise-hidrologica-com-spatial-analyst/>>. Acesso em: 25 abr 2015.

SANTOS, R. F. de. **Vulnerabilidade Ambiental: Desastres naturais ou fenômenos induzidos?**. 2007. Brasília: MMA. Disponível em:

<[https://geojurista.files.wordpress.com/2014/04/vulnerabilidade\\_ambiental\\_desastres\\_naturais\\_ou\\_fenomenos\\_induzidos\\_mma\\_2007.pdf](https://geojurista.files.wordpress.com/2014/04/vulnerabilidade_ambiental_desastres_naturais_ou_fenomenos_induzidos_mma_2007.pdf)>. Acesso em: 11 mai 2015.

SHARMA, B. S.; SINGH, A. **Assessment of the flood potential on a lower tapi basin tributary using SCS-CN method integrated with remote sensing & GIS data**. 2014.

Disponível em: <[http://www.omicsgroup.org/journals/geography-natural-disasters-abstract.php?abstract\\_id=29754](http://www.omicsgroup.org/journals/geography-natural-disasters-abstract.php?abstract_id=29754)>. Acesso em: 05 mai 2015.

SILVA, E. M. da; MALVINO, S. S. B.. **Análise climática do município de Patrocínio.**

Disponível em:

<<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/viewFile/10264/6124>>.

Acesso em: 10 fev 2015.

SOARES FILHO, B. S. **Modelagem de dados espaciais.** 2000. Disponível em:

<<http://www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/publicacoes/modelagemdedadosespaciais.pdf>

>. Acesso em: 13 jun 2015.

TOMAZ, P. **Método santa bárbara.** 2012. Disponível em:

<[http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos\\_livros/livro\\_metodo\\_calculos\\_vazao/capitulo24.pdf](http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_metodo_calculos_vazao/capitulo24.pdf)>. Acesso em: 22 jun 2015.

\_\_\_\_\_. **Método racional.** 2013. Disponível em:

<[http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos\\_livros/livro\\_metodo\\_calculos\\_vazao/capitulo02.pdf](http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_metodo_calculos_vazao/capitulo02.pdf)>. Acesso em: 22 jun 2015.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais:** Conhecer para prevenir. 2009. São Paulo: Instituto Geológico. Disponível em:

<<http://www.igeologico.sp.gov.br/downloads/livros/DesastresNaturais.pdf>>. Acesso em: 20 jun 2015.

TUCCI, C. E. M. Plano Diretor de Drenagem Urbana: Princípios e Concepção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n.2, jul/dez 1997. Disponível em:

<[http://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/db01fdcd78c5843f024709a1bf2b7bdb\\_6f0118d184384e38afda2b400a5d6458.pdf](http://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/db01fdcd78c5843f024709a1bf2b7bdb_6f0118d184384e38afda2b400a5d6458.pdf)>. Acesso em: 12 mar 2015.

TUCCI, C. E. M. (Org.). Plano Diretor de Drenagem Urbana: Manual de Drenagem Urbana. **Instituto de Pesquisas Hidráulicas**, v. 6. 2005. Disponível em:

<[http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu\\_doc/manual\\_de\\_drenagem\\_ultima\\_versao.pdf](http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/dep/usu_doc/manual_de_drenagem_ultima_versao.pdf)>. Acesso em: 12 mar 2015.

TUCCI, C. E. M. **Águas urbanas.** 2008. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142008000200007](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142008000200007)>.

Acesso em: 2 mar 2015.

TUCCI, C. E. M. **Blog do Tucci:** Recursos Hídricos e Meio Ambiente. 2010. Disponível em: <<http://rhama.net/wordpress/?p=134>>. Acesso em: 2 jun 2015.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Org.). Inundações Urbanas na América do Sul. Porto Alegre. **Associação Brasileira de Recursos Hídricos.** 2003. Disponível em:

<<http://www.cepal.org/samtac/noticias/documentosdetrabajo/5/23335/InBr02803.pdf>>.

Acesso em: 12 mar 2015.

TUCCI, C. E. M.; MENDES, C. A. **Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica.** 2006. MMA. Disponível em:

<[http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa\\_pnla/\\_arquivos/sqa\\_3.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/sqa_pnla/_arquivos/sqa_3.pdf)>. Acesso em: 20 jun. 2015.

TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. E. L. **Hidrologia: Ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: Ed. UFRGS/ABRH, 2013.

VALENTE, O. F. **Reflexões hidrológicas sobre inundações e alagamentos urbanos**.

2009. Disponível em:

<<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/minhacidade/10.109/1839>>. Acesso em: 10 fev 2015.

ZUFFO, A. C.; LEME, P. E. **GRADEX e Santa Barbara**: método híbrido para cálculo de vazão de projeto para macrodrenagem urbana. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., João Pessoa, 2005. **Anais...** João Pessoa, 2005. Disponível em:

[http://www.academia.edu/4365644/GRADEX\\_E\\_SANTA\\_B%3%81RBARA\\_M%3%A9todo\\_h%C3%ADbrido\\_para\\_c%C3%A1lculo\\_de\\_vaz%C3%A3o\\_de\\_projeto\\_para\\_macro\\_drenagem\\_urbana](http://www.academia.edu/4365644/GRADEX_E_SANTA_B%3%81RBARA_M%3%A9todo_h%C3%ADbrido_para_c%C3%A1lculo_de_vaz%C3%A3o_de_projeto_para_macro_drenagem_urbana). Acesso em: 20 jun 2015.