

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

BRUNA DELLA FLORA

**SIMULAÇÃO DE INUNDAÇÕES ATRAVÉS DO MODELO HAND. ESTUDO DE
CASO: ZONA URBANA DE ALEGRETE-RS**

ALEGRETE

2019

BRUNA DELLA FLORA

**SIMULAÇÃO DE INUNDAÇÕES ATRAVÉS DO MODELO HAND. ESTUDO DE
CASO: ZONA URBANA DE ALEGRETE-RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia Civil,
como requisito parcial para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia Civil.
Orientador: Adriana Gindri Salbego

ALEGRETE

2019

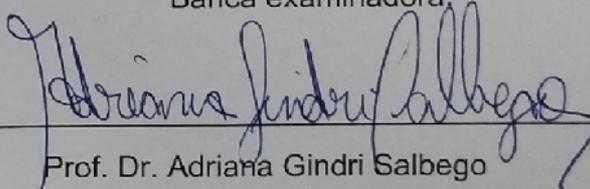
BRUNA DELLA FLORA

SIMULAÇÃO DE INUNDAÇÕES ATRAVÉS DO MODELO HAND. ESTUDO DE CASO: ZONA URBANA DE ALEGRETE-RS

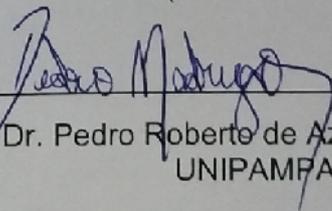
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil.
Orientador: Adriana Gindri Salbego

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: .

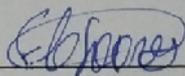
Banca examinadora:



Prof. Dr. Adriana Gindri Salbego
Orientador
(UNIPAMPA)



Prof. Dr. Pedro Roberto de Azambuja Madruga
UNIPAMPA



Prof. Dr. Fátima Cibele Soares
UNIPAMPA

Dedico este trabalho à todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para a minha paz de espírito e felicidade, principalmente a Deus.

AGRADECIMENTO

Sou grata por ter chegado até esse momento, por ter aprendido tanto e por não ter desistido. A jornada não foi fácil, foi dura, árdua, mas fui encorajada por pessoas que amo. Quero agradecer imensamente a luz desse universo. Quero agradecer a Deus! A minha mentora e ao meu Anjo da Guarda que está sempre comigo.

Agradecer aos meus Pais que nunca deixaram faltar, a minha amada mãe que deu aos seus filhos o estudo que nunca teve. Que sempre estimulou dar o melhor de si em toda e qualquer tarefa. Ao meu irmão Franchesco que sempre foi um exemplo de dedicação, amor e empenho na profissão escolhida. A minha irmã amada, empenhada e que coloca seu amor em todo serzinho vivo que anda por esse mundo.

Quero agradecer às pessoas maravilhosas que entraram no meu caminho. Agradecer a minha psicanalista Rosângela, a Naiele, que chegou na minha vida em um momento tão conturbado e me ensinou tanto. Amo-a demais! Sou grata por ter encontrado uma xará que divide não só o nome, mas uma amizade tão cheia de amor. Devo muitos aprendizados!

Quero agradecer aos meus amigos da faculdade, aos meninos da TAN (Negão, Thomas, Nizar, Cupellino, Habib e Nog), a Karina e a Nadine companheiras e amigas de muitos trabalhos. Devo a todos eles, muitas lembranças boas. Quero agradecer aos amigos do Covil do 304, amigos queridos que quando tudo estava difícil arrancavam um sorriso. Queria agradecer a minha Prima Diovana, companheira de 5 anos. Sempre tão dedicada e preocupada comigo. Devo muito a ela. Quero agradecer a cada amigo que me olhou com carinho ao longo desses 5 anos. Sou imensamente grata.

Quero agradecer aos mestres que tive a oportunidade de aprender. Agradeço imensamente a minha Orientadora Adriana, tão dedicada e amorosa comigo. Juntamente com o Professor Pedro Madruga, que nunca mediram esforços para me ajudar. Quero agradecer ao meu orientador do estágio Diego sempre tão profissional e atencioso nos seus conselhos. Juntamente, meu agradecimento a UNIPAMPA como um todo. Uma universidade impar em qualidade de ensino.

Por fim, e não menos importante quero agradecer ao meu companheiro Luis Felipe com sua paciência inesgotável. Amo-te e sou imensamente grata por cada momento de aprendizagem e de apoio que servimos um ao outro. Obrigada, por estar e permanecer!

“Eu me lembro do dia em que orei,
pelas coisas que eu tenho hoje. Gratidão,
gratidão e gratidão”

RESUMO

Ao longo dos anos é notória as ocorrências de inundações no município de alegrete, localizado na metade oeste do estado do rio grande do sul, posicionado junto a metade do curso da bacia hidrográfica e alocado às margens do rio Ibirapuitã. A área urbana é frequentemente afetada por cheias do rio Ibirapuitã e de seus tributários, arroio Jararaca, arroio Regalado e arroio Caverá, gerando grandes inundações. estas, são processos naturais, inerentes à dinâmica fluvial. Ao longo da história humana, este processo tem influenciado positivamente e negativamente a sociedade. quando esta influência é negativa, ocorrem desastres hidrológicos. uma das mais importantes medidas preventivas dos desastres hidrológicos é a identificação e mapeamento de áreas de susceptibilidade. É nesse contexto, que o objetivo deste trabalho, portanto, foi testar a aplicabilidade do modelo height above the nearest drainage (HAND) para o mapeamento de áreas susceptíveis a inundações no município de alegrete. o modelo foi utilizado por meio da metodologia brasileira desenvolvida no INPE, através do software TerraView com uma extensão (plug-in) contendo a ferramenta "hydrological tools", que normaliza o MDT a nível da drenagem mais próxima, possibilitado assim, gerar simulações apenas variando a cota fluviométrica, produzindo mapas de inundações do município. Dessa forma, foi realizado a espacialização do risco de inundações para área urbana a partir da modelagem digital do terreno, utilizando o software QGIS. As cotas utilizadas foram classificadas em: risco nulo, risco alto e cota de alerta. para avaliar a metodologia utilizada, comparou-se imagens de satélites históricas e imagens áreas com as simulações desenvolvidas no software. Outra forma de avaliar, foi comparar os bairros afetados com base em levantamentos históricos realizados em outros projetos. os resultados obtidos validam o modelo HAND como uma ferramenta útil para mapeamento de áreas susceptíveis à inundações, principalmente em locais onde há ausência de monitoramento hidrológico.

Palavras Chaves: Inundações, HAND e comparação.

ABSTRACT

Over the years, floods has been a notorious problem in the municipality of Alegrete, located in the western half of the state of Rio Grande do Sul, located close to half of the river basin course and allocated to the banks of the Ibirapuitã river. The urban area is often affected by flooding of the Ibirapuitã River and its tributaries, Arroio Jararaca, Arroio Regalado and Arroio Caverá, generating large floods. These are natural processes, inherent to river dynamics. Throughout human history, this process has positively and negatively influenced society. When this influence is negative, hydrological disasters occur. One of the most important preventive measures for hydrological disasters is the identification and mapping of susceptibility areas. It is in this context that the objective of this work, therefore, was to test the applicability of the Height Above the Nearest Drainage (HAND) model for the mapping of flood susceptible areas in the municipality of Alegrete. The model was used through the Brazilian methodology developed at INPE, through the TerraView software with a plug-in extension containing the hydrological tools, which normalizes the MDT at the nearest drainage level, thus generating simulations. just varying the fluviometric quota, producing flood maps of the municipality. Thus, the flood risk spatialization for the urban area was performed using digital terrain modeling with QGIS software. The quotas used were classified as: nonexistent risk, high risk and alert quota. To evaluate the used methodology , historical satellite images and area images were compared with the simulations developed in the software. Another way to evaluate was to compare affected neighborhoods based on historical surveys conducted on other projects. The results validate the HAND model as a useful tool for mapping flood-prone areas, especially where there is no hydrological monitoring.

Keywords: Floods, HAND and comparison.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1– Enchente, cheia, alagamento e inundação..... | 17 |
| Figura 2 – Desenho representativo do reservatório de Amortecimento | 20 |
| Figura 3 Comportamento do rio antes (a) e após (b) a implementação das medidas estruturais. | 20 |
| Figura 4 - Processo de obtenção de imagens por sensoriamento remoto..... | 24 |
| Figura 5– Aeronave BEM-110 Bandeirante (INPE) e seus principais sensores remotos. | 25 |
| Figura 6 – Imagem de satélite com resolução espacial de 20 metros, da Ilha de Florianópolis, em Santa Catarina, obtida pela Câmera MUX do satélite CBERS 4... | 27 |
| Figura 7 - Imagens de diferentes sensores e resoluções espaciais para discriminar áreas urbanas. | 28 |
| Figura 8 - Diferença de resolução radiométrica, área urbana: região nordeste da cidade de São Paulo. | 29 |
| Figura 9– Estação Fluviométrica Convencional..... | 38 |
| Figura 10 - Distrito sede / área urbana de Alegrete | 40 |
| Figura 11 – Localização do Município de Alegrete – RS. | 45 |
| Figura 12 - Rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã | 46 |
| Figura 13 – Localização da estação fluviométrica | 47 |
| Figura 14 - Localização da estação fluviométrica Alegrete (código 76750000) | 48 |
| Figura 15 - Estação fluviométrica “ALEGRETE” (código 76750000) | 48 |
| Figura 16 - Plataforma Hidroweb..... | 49 |
| Figura 17– Plataforma Gestor ANA | 49 |
| Figura 18 - Comparativo de Cheias no Município de Alegrete - RS | 50 |

| | |
|--|----|
| Figura 19 – Municípios que compõem a REDEC 6. | 51 |
| Figura 20 – Imagem RASTER utilizada no estudo..... | 52 |
| Figura 21 (a) Codificação das direções (b) Atribuição de direção método D8. | 53 |
| Figura 22 Correção do MDT | 54 |
| Figura 23 - Passo 2, a direção e a área de acumulação de fluxo de cada célula são determinadas, portanto é criado o DFD intermediário | 55 |
| Figura 24 – Passo 3, correção do MDT e extração da rede de drenagem | 55 |
| Figura 25 - Cálculo da área acumulada para rede de drenagem..... | 56 |
| Figura 26 – Normalização do MDT por meio do HAND. | 57 |
| Figura 27..... | 59 |
| Figura 28 – MDT da área de estudo (satélite ALOS, sensor PALSAR) | 62 |
| Figura 29 - Mapa de fluxo de drenagem | 63 |
| Figura 30 - Mapa das áreas de contribuição..... | 63 |
| Figura 31 - Mapa de rede de drenagem | 64 |
| Figura 32 – Mapa de classificação da drenagem segundo Horton-Strahler ... | 65 |
| Figura 33 - Microbacias baseadas nos segmentos..... | 65 |
| Figura 34 – Microbacias baseadas no fluxo..... | 66 |
| Figura 35 - MDT normalizado através da ferramenta HAND | 66 |
| Figura 36 – Mapa da mancha SEM RISCO de inundação..... | 68 |
| Figura 37 – Mapa de demarcação de bairros afetados..... | 70 |
| Figura 38 - Mapeamento da inundação com cota fluviométrica de 14,02m sobre imagem do Google Earth..... | 72 |
| Figura 39 - Comparação entre fotografias datadas de antes da inundação de 2019 e durante. | 74 |

| | |
|---|----|
| Figura 40 - Mapeamento de inundação na cota de 14,02m sobre bairros do município de Alegrete..... | 75 |
| Figura 41 – Mapa com Cota de Alerta | 79 |
| Figura 42 – Imagem LISS 3 | 81 |
| Figura 43 - Comparação SIMULAÇÃO x IMAGEM 22/01/2019..... | 82 |
| Figura 44 - Comparação Imagem 12/0112/01/2019 durante a inundação (a) <i>versus</i> simulação do modelo HAND (b)..... | 84 |

LISTA DE SIGLAS

CREPDEC 6 - 6ª Coordenadoria Regional de Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul.

HAND - Altura acima da drenagem mais próxima

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPA - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MDT - Modelo Digital do Terreno

NASA - National Aeronautics and Space Administration (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço)

SGH - Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 JUSTIFICATIVA..... | 13 |
| 1.2 OBJETIVOS | 14 |
| 1.2.1 OBJETIVO GERAL | 14 |
| 1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 14 |
| | |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 15 |
| 2.1 INUNDAÇÕES..... | 15 |
| 2.1.1 HISTÓRICO | 15 |
| 2.1.2 CONCEITO | 16 |
| 2.1.3 INUNDAÇÕES URBANAS | 18 |
| 2.1.4 MEDIDAS DE CONTROLE E PREVENÇÃO | 19 |
| 2.1.5 MAPEAMENTO DAS ÁREAS DE RISCO | 22 |
| 2.1.5.1 IMPORTÂNCIA | 23 |
| 2.2 SENSORIAMENTO REMOTO..... | 23 |
| 2.2.1 CONCEITO | 23 |
| 2.2.2 SENSORES REMOTOS | 24 |
| 2.2.3 IMAGENS DE SATÉLITE..... | 26 |
| 2.2.4 RESOLUÇÃO DAS IMAGENS..... | 26 |
| 2.2.5 SATÉLITE ALOS..... | 30 |
| 2.2.6 SATÉLITE RESOURCESATE - 2 | |
| 2.2.7 MODELO DIGITAL DO TERRENO - MDT | 32 |
| 2.3 MODELOS HIDROLÓGICOS..... | 33 |
| 2.4 HIDROMETRIA..... | 35 |
| 2.4.1 ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS | 37 |
| 2.4.1.1 ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS MANUAIS OU CONVENCIONAIS | 37 |
| 2.4.1.2 ESTAÇÕES FLUVIOMÉTRICAS AUTOMÁTICAS | 38 |
| 2.5 ESTUDOS DE CASO | 39 |
| 2.6 MODELO HAND | 42 |
| | |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 44 |
| 3.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 44 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3.2 | ESTAÇÃO HIDROLÓGICA..... | 46 |
| 3.3 | LEVANTAMENTO DE DADOS HISTÓRICOS DE INUNDAÇÕES E ESTUDOS 50 | |
| 3.4 | ESTRUTURAÇÃO DE UMA BASE CARTOGRÁFICA DIGITAL DA ÁREA DE ESTUDO | 51 |
| 3.5 | APLICAÇÃO DO MODELO HAND | 52 |
| 3.6 | ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS MANCHAS DE INUNDAÇÃO..... | 61 |
| 4. | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS | 62 |
| 4.1 | CARACTERIZAÇÃO DA ALTIMETRIA | 62 |
| 4.2 | SIMULAÇÃO DAS IMAGENS NO MODELO HAND | 67 |
| 4.3 | ANÁLISE COMPARATIVA SIMULAÇÃO X IMAGEM REAL | 80 |
| 5. | CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 85 |
| 6. | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 88 |

1. INTRODUÇÃO

A inundação urbana é um evento tão antigo quanto as cidades ou aglomerações urbanas. Isso é relatado, desde a Antiguidade, onde o rio Nilo no Egito, inundava as planícies de várzea, o que permitia o cultivo de alimentos em meio a um deserto.

Esses desastres estão intimamente ligados à história do Homem e ao seu modo de apropriação e uso dos recursos naturais. Desde a formação dos primeiros grupos, quando o homem deixou de ser nômade, até a concepção das cidades modernas, a sociedade vem convivendo com a ocorrência destes eventos, gerando sérias perdas sociais e econômicas. Ao longo da humanidade e da urbanização, os desastres relacionados à relação “homem x natureza” tem se intensificado. Um exemplo disso são as inundações, que não se caracterizam simplesmente pela ocorrência de um fenômeno natural adverso, mas por seu efeito sobre um cenário social vulnerável.

Segundo dados do IBGE (2010), o Brasil até meados dos anos 60, tinha uma taxa de urbanização inferior a 45%. No entanto, nas últimas décadas obteve um crescimento bastante significativo e preocupante da população urbana. Isto é, a partir da década de 60, mais de 80% da população passou a viver em áreas urbanas, trazendo consigo impactos gerados pela forma inadequada da ocupação urbana (Cortes, 2009). Isso resultou em condições de moradias deficientes e em áreas com infra-estrutura inadequada.

O desenvolvimento histórico da utilização de áreas livres explica os condicionamentos urbanos hoje existentes. A população de maior poder aquisitivo tende a habitar locais mais seguros, enquanto a população carente tende a ocupar áreas de alto risco de enchentes, de baixo valor ou mesmo invadidas, provocando problemas sociais que se repetem por ocasião de cada cheia. A ocupação das áreas impróprias pode ser evitada através do planejamento do uso dos solos das várzeas, o qual deve ser regulamentado no Plano Diretor Urbano das cidades.

No município de Alegrete, localizado na região sudoeste do Rio Grande do Sul, a ocorrência de inundações na zona urbana é histórica, sendo um dos municípios gaúchos mais afetados por esta tipologia de desastre natural (SILVA, 2011). Este fato,

está intimamente ligado às primeiras instalações das colônias portuguesa e espanhola na América do Sul, que ocorreram às margens dos rios, o que não foi diferente às margens do Rio Ibirapuitã, manancial que banha a zona urbana de Alegrete. Esta situação ainda permanece, com número elevado de moradores próximos às várzeas inundáveis do rio. Ressalta-se a condição em que o Brasil há anos vêm assumindo a liderança dos desastres naturais de maior destaque catastrófico.

Dentro deste contexto, a realização de um mapeamento das áreas susceptíveis a inundações na zona urbana de Alegrete/RS, consiste em um instrumento de extrema importância para o município, pois permite o controle e gestão das inundações, bem como a definição das áreas de risco.

1.1 Justificativa

Alegrete, assim como as demais cidades da Fronteira-Oeste do estado do Rio Grande do Sul, que possuem característica de relevo semelhantes (levemente ondulado, com altitudes inferiores a 500 metros), são atingidas frequentemente por inundações. Esses desastres naturais geram impactos socioambientais e econômicos em função da magnitude dos eventos, atingindo boa parte da população.

Em Alegrete, existe uma deficiência no planejamento urbano, resultando na ocupação de locais inadequados dentro do perímetro urbano, quase sempre de forma espontânea, próximo ao rio Ibirapuitã, sem a intervenção dos órgãos de fiscalização responsáveis, ou mesmo sem a orientação necessária à ocupação planejada por profissionais capacitados e conscientes.

O desenvolvimento de sistemas de monitoramento, a consolidação das séries históricas de inundações, disponibilidade de bases digitais de informações e de imagens de satélite de alta resolução espacial favorecem o acompanhamento do desenvolvimento de determinado evento em períodos de elevada precipitação pluviométrica. Todos estes dados podem proporcionar um mapeamento integralizado das áreas e das edificações afetadas pelas inundações, e o mesmo pode servir como base para estratégias e planejamento contra esse fenômeno.

Segundo os dados do inventário registrados pela 6ª Regional de Defesa Civil do Rio Grande do Sul – CREPDEC 6, entre Janeiro/1980 a Dezembro/ 2015 sobre ocorrências de inundações, foi constatado o destaque do município de Alegrete pela frequência nos registros. Esses dados, enfatizam ainda mais a necessidade de existirem mapas que possibilitem a utilização do alerta de inundação, e a definição de regras de ocupação das áreas de alto risco. A associação dessas medidas, contribuem para a eficácia na redução dos prejuízos associados à inundação.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Aplicação do modelo HAND para mapeamento de áreas susceptíveis à inundação na zona urbana do município de Alegrete/RS.

1.2.2 Objetivos Específicos

A realização deste trabalho se dará pelo conjunto de objetivos específicos que são descritos a seguir:

- Caracterizar a altimetria da área de estudo (dado de entrada do modelo HAND), baseado em informações remotas, utilizando técnicas de geoprocessamento;
- Identificar áreas inundadas em eventos históricos, com base em imagens de satélite da área de estudo;
- Elaborar mapa de áreas susceptíveis a inundação da zona urbana de Alegrete/RS, para as cotas de inundação de alto e baixo risco
- Realizar análise comparativa entre as áreas susceptíveis a inundação determinada pelo modelo HAND com imagens de satélites de eventos históricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Inundações

2.1.1 Histórico

As inundações são eventos naturais que ocorrem na superfície terrestre, desde antes da humanidade. Desde o princípio da existência do ser humano e durante a evolução, o homem procurou se localizar próximos aos rios para usufruir em todos os aspectos o que a natureza lhe fornecia. De forma a usar como transporte, obter água para seu consumo e mesmo dispor seus dejetos

O desenvolvimento histórico da utilização de áreas livres explica muitos dos antigos condicionamentos urbanos existentes. Devido à grande dificuldade de meios de transporte no passado, utilizava-se o rio como a via principal. As cidades se desenvolveram às margens dos rios ou no litoral. Pela própria experiência dos antigos moradores, a população procurou habitar as zonas mais altas onde o rio dificilmente chegaria. Observa-se que a parcela da população com maior memória sobre os eventos de inundação são os que se localizam em locais com cota mais segura (TUCCI E BERTONI 2003).

É importante ressaltar o histórico do homem e de sua convivência com as inundações. Desde a antiguidade, cerca de 3000 anos, encontramos exemplos, como a seguir: A cidade de Amarna, no Egito, pois foi a cidade que o Faraó Aquenaton (1340 a.C.) escolheu para ser a nova capital, foi mencionado “Correndo de leste para oeste, dois leitos secos de rio, nos quais nada se construiu por medo das enchentes repentinas, dividiam a cidade em três partes: o centro e os bairros residenciais de norte e do sul “(BRIER, 1998).

A própria história nos mostra que, em diferentes locais no planeta Terra, o homem tem procurado conviver com as inundações, desde o caso mais raro até as mais devastadoras. Um exemplo deste cuidado e aprendizado que o homem vem desenvolvendo, é a da Igreja Católica, pois, sempre que ocorre uma inundação numa cidade, o prédio da Igreja, apesar de ser uma das obras mais antigas, localiza-se em nível seguro (ROTSTEIN, 2013).

De acordo com o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (2013) entre 1991 e 2012 foram registradas 39 mil ocorrências, das quais 33% corresponderam a

inundações bruscas (enxurradas) e graduais (enchentes), e 3% aos movimentos de massa e erosões.

2.1.2 Conceito

As inundações são o perigo natural mais comum, afetando mais pessoas e causando mais danos do que qualquer outro tipo de perigo, incluindo terremotos, erupções vulcânicas, deslizamentos de terra e tsunamis (KUSKY, 2008). É nesse cenário, que Robiyama e Goerl (2005), nos trazem questionamento quando a existência de diversos termos relacionados ao fenômeno das inundações. Muitos destes termos são usados erroneamente em virtude de traduções equivocadas e adaptações malfeitas de termos provenientes de línguas estrangeiras, principalmente do inglês e espanhol. As palavras cheia e enchente têm como origem o verbo encher, do Latin *implere*, que significa ocupar o vazio, a capacidade ou a superfície de; tornar cheio ou repleto.

Em consequência destas variações terminológicas, faz-se necessário uma introdução quanto à alguns termos que comumente são usados de forma indiscriminada, tanto na linguagem popular quando nos trabalhos científicos. Estes termos são: inundações, cheia, enchente e alagamento. Embora sejam frequentemente usados como sinônimos, estes termos referem-se a fenômenos hidrológicos distintos.

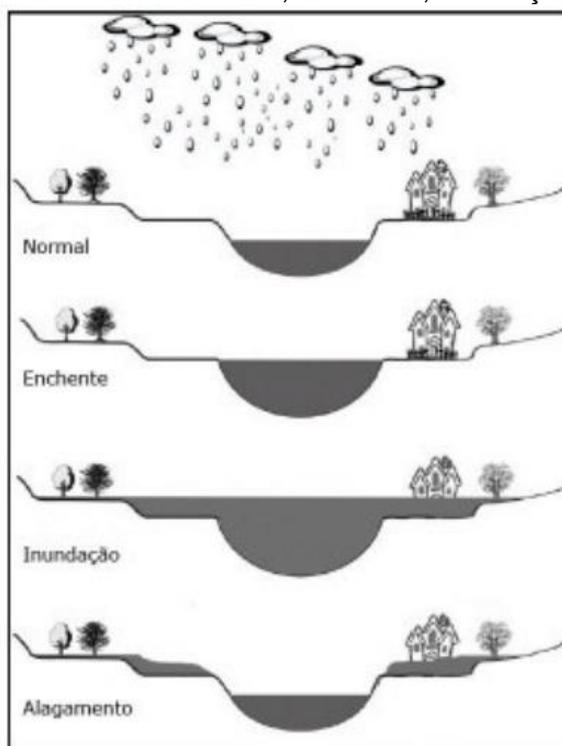
As cheias são fenômenos hidráulicos, caracterizados pelo aumento da vazão em decorrência do escoamento superficial, que pode ser provocado por precipitação, derretimento de neve etc. As cheias são elevações do nível da água, não representando, necessariamente, uma inundação. Para constituir uma enchente ou inundação, uma cheia deve estar associada a uma ocupação vulnerável (CORTES, 2009).

Enchentes são acontecimentos caracterizados quando ocorre o escoamento do rio, com vazão máxima, porém sem extravasamento do canal. O escoamento fica restrito ao leito menor, ou leito normal do rio. Também são conceituadas como fenômenos naturais, que ocorrem periodicamente nos cursos d'água devido a chuvas de magnitude elevada.

Inundações passam a ocorrer, a partir do extravasamento do canal para as áreas marginais (GOERL;KOBIYAMA, 2005). Na inundação o escoamento atinge o leito maior do canal, dentro de um processo natural. No entanto, como isto ocorre de forma irregular ao longo do tempo, a população tende a ocupar o leito maior, ou seja, o homem ultrapassa os limites das condições naturais do meio em que vive ficando sujeito ao impacto das inundações, que passam a ser um problema social, econômico e ambiental (TUCCI ,2007).

No alagamento as águas pluviais extravasam as galerias da rede de drenagem antes de atingir o canal principal. O alagamento está vinculado na maioria das vezes à capacidade de drenagem urbana. É o acúmulo de água nas ruas e nos perímetros urbanos, por fortes precipitações, em cidades com sistemas de drenagem deficientes. Podem ocorrer, geralmente, em áreas planas ou com depressões e fundos de vales (GRACIOSA;MEDIONDO, 2007).

Figura 1– Leito do rio Normal, Enchente, inundação e Alagamento.



Fonte: Andrade (2006) (Adaptado de Goerl e Kobiyana, 2005 e Mendes, 2004)

2.1.3 Inundações Urbanas

As inundações em áreas urbanas são reflexos da combinação de eventos hidrológicos em áreas ocupadas sem critério, com deficiências do planejamento da ocupação do espaço urbano. Estes eventos podem ocorrer devido ao comportamento natural dos rios ou ampliados pelo efeito de alteração produzida pelo homem na urbanização pela impermeabilização das superfícies e a canalização dos rios (TUCCI;BERTONI, 2003).

Existem basicamente dois tipos de inundações: A Inundação Ribeirinha e a devido a Urbanização ou drenagem urbana. As enchentes, por sua vez, são divididas em dois tipos por Tucci (2007), enchentes devido à urbanização e enchentes em áreas ribeirinhas: [...] a primeira é caracterizada pelo aumento de sua

[...] frequência e magnitude devido à ocupação do solo com superfícies impermeáveis e rede de condutos de escoamentos. Adicionalmente o desenvolvimento urbano pode produzir obstruções ao escoamento como aterros e pontes, drenagens inadequadas e obstruções ao escoamento junto a condutos e assoreamento. As enchentes em áreas ribeirinhas são naturais, atingindo a população que ocupa o leito maior dos rios. Essas enchentes ocorrem, principalmente, pelo processo natural no qual o rio ocupa o seu leito maior, de acordo com os eventos extremos, em média com tempo de retorno da ordem de 2 anos.

Já a Inundação devido a urbanização ou a drenagem urbana, ocorre na medida que a população impermeabiliza o solo. Isso gera uma quantidade de água em um escoamento através dos condutos muito superior ao projetado, do que as que existiam quando a superfície era permeável e o escoamento se dava pelo ravinamento¹ natural.

As inundações ribeirinhas estão historicamente ligadas a história do desenvolvimento humano. Conseqüentemente, as inundações caracterizadas devido a urbanização tornaram-se mais frequentes no século 21 têm sido mais frequentes neste século, com o aumento significativo da urbanização das cidades e a tendência dos engenheiros de drenarem o escoamento pluvial o mais rápido possível das áreas urbanizadas (TUCCI, 2003).

¹ Tipo de erosão do solo causada pela ação da concentração de água de escoamento superficial, criando pequenas fissuras na superfície do solo.

2.1.4 Medidas de Controle e Prevenção

O controle das cheias, que podem gerar enchentes ou inundações, conta com dois tipos de medidas distintas. Entretanto, quando trabalhadas juntas podem apresentar maior eficiência para combater esse desastre natural que ocorre com tanta frequência.

Para Bertoni e Tucci (2003), as medidas para gerir o controle de inundação pode ser de duas formas: Do tipo Estrutural, a qual consiste na criação de sistemas físicos que modificam os sistema fluvial para evitar prejuízos gerados pelas enchentes; Do tipo Não-estrutural que são aquelas em que os prejuízos causados pelo fenômeno natural de enchentes são reduzidos, através da melhor convivência da população.

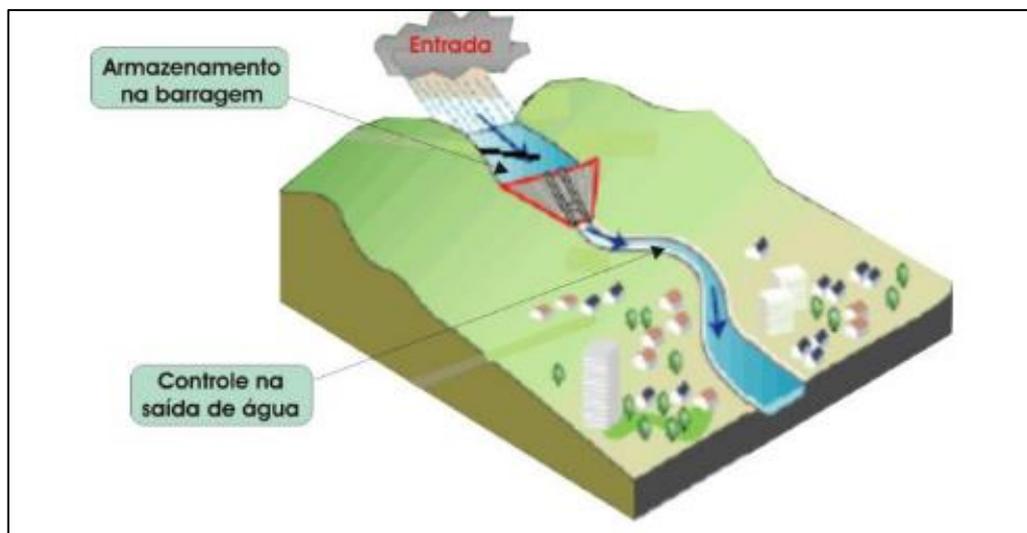
- **Medidas Estruturais**

Segundo Barbosa (2006), as medidas estruturais são medidas físicas de engenharia, desenvolvidas pela sociedade com o intuito de reduzir o risco de enchentes. Essas medidas podem ser extensivas ou intensivas. As medidas extensivas são aquelas que agem na bacia, procurando modificar as relações entre precipitação e vazão, como modificação da cobertura vegetal no solo, que reduz e retarda os picos de enchente e controla a erosão da bacia. As medidas intensivas são aquelas que agem no rio e podem ser de três tipos: (a) medidas que aceleram o escoamento; (b) medidas que retardam o escoamento; (c) desvio do escoamento.

Existem exemplos de algumas estruturas que tem como função reduzir os riscos de inundação.

Reservatório e bacias de amortecimento: A construção destas estruturas (Figura 2) tem dois propósitos principais: Amortecer o pico de cheias para um evento chuvoso intenso, garantindo o controle para jusante das áreas vulneráveis e para o armazenamento de água para abastecimento, irrigação e outros fins.

Figura 2 – Desenho representativo do reservatório de Amortecimento

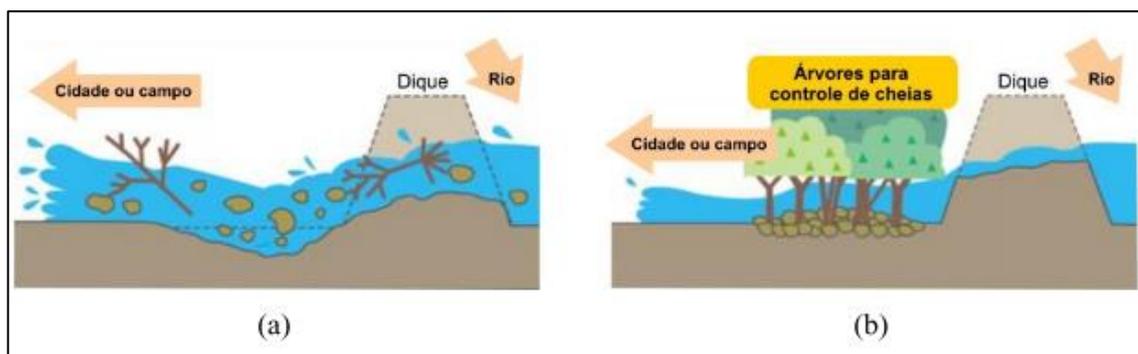


Fonte: Barbosa (2006)

Diques: Aumento da capacidade de descarga dos rios e corte de meandros (Figura 3).

Reflorestamento nas margens dos rios: Servem para o amortecimento da vazão e controle de erosão, juntamente a preservação do meio ambiente (Figura 3).

Figura 3 Comportamento do rio antes (a) e após (b) a implementação das medidas estruturais.



Fonte: Barbosa (2006)

Quadro 1- Medidas estruturais

| Medida | Principal Vantagem | Principal Desvantagem | Aplicação |
|--|---|---|-----------------------------------|
| MEDIDAS EXTENSIVAS | | | |
| Alteração da cobertura vegetal | Redução do Pico de cheia | Impraticável em grandes áreas | Pequenas Bacias |
| Controle de perda de solo | Reduz assoreamento | Impraticável em grandes áreas | Pequenas Bacias |
| MEDIDAS INTENSIVAS | | | |
| Diques e polders | Alto grau de proteção de uma área | Danos significativos caso falhe | Grandes rios e na planície |
| Melhorias do Canal: | | | |
| Redução da rugosidade por desobstrução | Aumento da vazão com pouco investimento | Efeito localizado | Pequenos rios |
| Corte de meando | Ampla a área protegida e acelera o escoamento | Impacto negativo em rio com fundo aluvionar | Área de inundação estreita |
| Reservatório: | | | |
| Todos os reservatórios | Controle a jusante | Localização difícil devido a desapropriação | Bacias Intermediárias |
| Reservatórios com comportas | Mais eficiente com o mesmo volume | Vulnerável a erros humanos | Projetos de usos múltiplos |
| Reservatórios para cheias | Operação com mínimo de pedras | Custo não partilhado | Restrito ao controle de enchentes |
| Mudanças do Canal: | | | |
| Caminho da cheia | Amortecimento de volume | Depende da topografia | Grandes Bacias |
| Desvios | Reduz vazão do canal principal | Depende da topografia | Bacias médias e grandes |

Fonte: Simons et al. (1977) apud Tucci (1993)

- **Medidas Não-Estruturais**

Segundo Tucci e Bertoni (2003) as medidas estruturais não são projetadas para dar uma proteção completa. Isto exigiria a proteção contra a maior enchente possível. Esta proteção é fisicamente e economicamente inviável na maioria das situações. A medida estrutural pode criar uma falsa sensação de segurança, permitindo a ampliação da ocupação das áreas inundáveis, que futuramente podem resultar em danos significativos. As medidas não-estruturais, em conjunto com as anteriores ou sem essas, podem minimizar significativamente os prejuízos com um custo menor. O custo de proteção de uma área inundável por medidas estruturais, em geral, é superior ao de medidas não-estruturais.

As medidas não-estruturais de inundação podem ser agrupadas em: zoneamento de áreas de inundação através de regulamentação do uso da terra, construções à prova de enchentes, seguro de enchente, previsão e alerta de inundação.

Para alcançar maior eficiência ao controle à inundação é necessário que exista uma associação das medidas tanto estruturais como não estruturais. Essa técnica garante a população o mínimo de prejuízo além de possibilitar uma convivência harmoniosa com o rio. Para as populações ribeirinhas, essa convivência é fundamental para evitar perdas materiais e até, em alguns casos, perdas humanas. As construções de barragens, diques, canalizações em muitos dos casos são necessários, porém, as ações de cunho social, econômico e administrativo também têm seu papel decisivo, através da educação e principalmente da conscientização por parte da população e do poder público (BARBOSA, 2006).

2.1.5 Mapeamento das Áreas de risco

A identificação e o mapeamento das áreas sujeitas à ocorrência de processos naturais que resultem em danos e ameaça a sociedade apresenta-se como uma carência de elevada importância, em função de sua relevância em ações de planejamento e gestão ambiental, territorial e de riscos (SILVEIRA et al., 2014).

Referindo-se a importância do conhecimento das áreas suscetíveis a inundação enquanto perspectiva de diminuição, ou ainda evitando o aumento da ocupação destas áreas, Figueiredo (2003) lembra que:

O mapeamento de áreas inundáveis representa uma ferramenta importante para direcionamento das expansões urbanas e a ordenação do uso e ocupação do solo, pois se dispondo do zoneamento dessas áreas, pode-se delimitá-las e designá-las para usos adequados (FIGUEIREDO, 2003, p.1791).

2.1.5.1 Importância

Para Tucci (2007), a utilização de mapas de inundação é essencial para definir as regras de construção e ocupação das áreas de alto risco, devendo obrigatoriamente. Eles são ferramentas bastante úteis, uma vez que permitem especializar as áreas de risco de modo a tornar perceptível o espaço urbano e o sistema de drenagem como um todo. Sua elaboração de forma técnica, porém, de fácil entendimento por parte da população, funciona como suporte na política de prevenção e controle de inundações possibilitando a integração a programas de educação ambiental. Para elaboração destes mapas são necessárias algumas informações como as descritas a seguir:

1. Informação sobre cheias históricas;
2. Mapas de solo;
3. Fotografias aéreas;
4. Imagens de satélites;
5. Modelagem de dados sobre o comportamento hidráulico do rio;
6. Utilização de modelos digitais de terreno e níveis de água.

Desenvolver mapas, envolve a necessidade de investimento pelas partes de interesse, como o município ou o pelo órgão de gerenciamento no controle de enchentes (Defesa Civil).

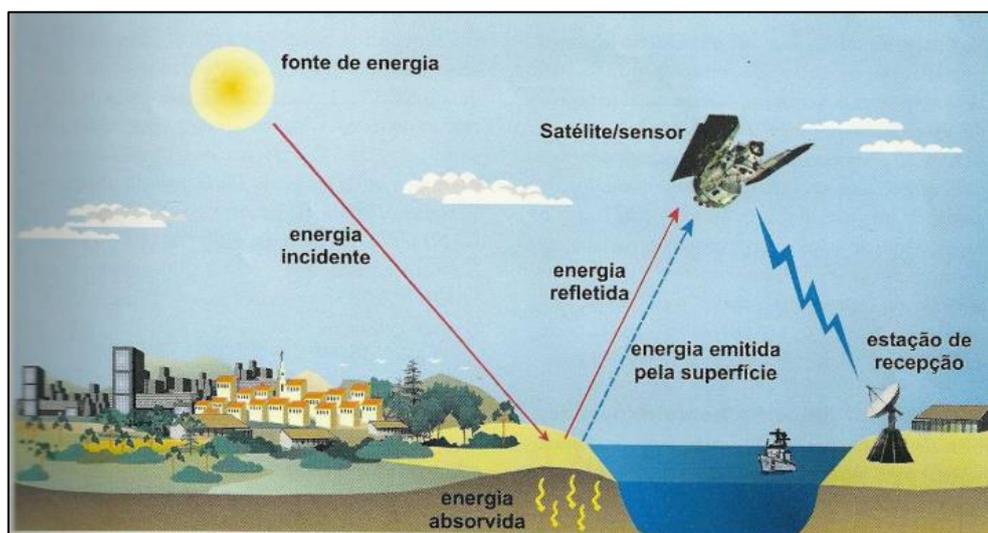
2.2 Sensoriamento Remoto

2.2.1 Conceito

O sensoriamento remoto é o nome dado às novas tecnologias que permite a obtenção de imagens da superfície terrestre, através da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície. Essa tecnologia refere-se à obtenção de informações sem o contato direto entre o pesquisador ou o equipamento e o objeto de estudo. O termo sensoriamento se refere à obtenção dos dados. Enquanto que remoto significa distante, realizada sem o contato físico entre o sensor e a superfície, ou seja,

realizado somente na interação da radiação eletromagnética com a matéria (FLORENZANO, 2011). Como ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Processo de obtenção de imagens por sensoriamento remoto



Fonte: Florenzano (2011)

Segundo Florenzano (2011), a forma de obter as imagens via sensoriamento remoto, ocorre através da energia refletida ou que é emitida pela superfície terrestre. Esta, é captada por sensores eletrônicos, a bordo de satélites artificiais, e transforma-se em sinais elétricos, que são registrados e posteriormente transmitidos para estações que recebem estes sinais na Terra, através de enormes antenas parabólicas. Como podemos analisar na Figura 5. Sensores remotos podem ser colocados em aeronaves, foguetes e balões para obter imagens da superfície da Terra, entretanto estas plataformas são operacionalmente caras e limitadas (STEFFIN, [s.d.]). A NASA (National Aeronautics and Space Administration – Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço) é uma das maiores captadoras de imagens recebidas por seus satélites. No Brasil, o principal órgão que atua nesta área é o INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

2.2.2 Sensores Remotos

Existe hoje um grande número destes satélites em órbita ao redor da Terra. Eles obtêm imagens com características distintas que dependem tanto do satélite quanto do sensor. Simplificadamente, eles captam e registram a energia que a Terra

reflete ou emite através dos elementos existentes na superfície terrestre. Segundo Florenzano (2011), existem sensores portáteis e isolados em plataformas: terrestres, aéreas (balões, helicópteros e aviões) e orbitais (satélites artificiais). Câmaras fotográficas (Figura 5), câmaras de vídeos, radiômetros, sistemas de varredura (escâneres) e radares são exemplos de sensores.

O olho humano é um sensor natural que enxerga somente a luz ou energia visível. Sensores artificiais permitem obter dados de regiões de energia invisível ao olho humano. Existem sensores que captam dados de diferentes regiões do espectro eletromagnético.

Os sensores do tipo radar, funcionam de forma diferenciada. Eles produzem uma fonte de energia própria na região de micro-ondas, podendo obter imagens tanto durante o dia como a noite e em qualquer condição meteorológica. Essa é a principal vantagem que os radares apresentam perante os demais sensores (ópticos). Por isso, sensores do tipo radar são comumente denominados sensores ativos, porque enviam pulsos de energia para a superfície. Já os sensores ópticos, são chamados passivos, visto que dependem da luz do sol, como as câmeras fotográficas (STEFFEN, s.d.).

Figura 5– Aeronave BEM-110 Bandeirante (INPE) e seus principais sensores remotos.



Fonte: Florenzano (2011)

2.2.3 Imagens de Satélite

As imagens capturadas pelos satélites proporcionam uma visão sinóptica (de conjunto) e multitemporal (em diferentes datas) de extensas áreas da superfície terrestre. São obtidas de forma remota a partir de sensores imageadores acoplados a satélites artificiais.

Segundo a Agência Espacial Brasileira, quando os sensores remotos captam a imagem, isso ocorre através da Radiação Eletromagnética² (REM) natural ou emitida da superfície terrestre, ou utilizam a REM artificial, produzida por radares instalados em satélites.

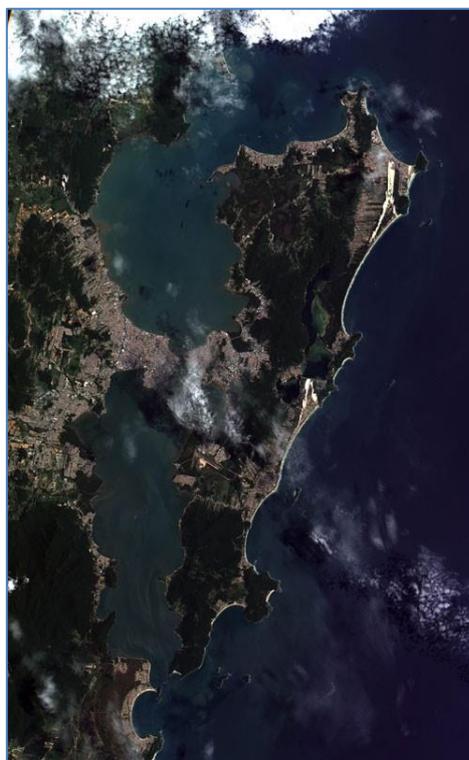
2.2.4 Resolução das Imagens

Uma imagem de satélite tem formato digital e pode ser definida como sendo um conjunto de pontos, onde cada ponto (pixel) corresponde a uma unidade de informação do terreno. Esta, é formada através de uma função bidimensional $f(x,y)$, onde x e y são coordenadas espaciais e o valor de f no ponto (x,y) representa o brilho ou radiância da área correspondente ao pixel, no terreno (FLORENZANO, 2011). O grande volume de dados, intrínseco às imagens de satélite, associado à relativa interpretação e análise dependem e requerem de recursos computacionais para o armazenamento e tratamento das informações.

Os pixels são células individuais que formam uma imagem e quando conjunto encontrados, fornecem todas as informações que compõem uma imagem completa. O pixel é indivisível e o seu valor integra todo o feixe de luz proveniente da parcela do solo ou alvo que corresponde ao mesmo. A dimensão do pixel define a resolução espacial da imagem. Quanto menor a sua dimensão, maior é a resolução espacial da imagem, e maior a capacidade de distinguir e definir alvos pequenos, como podemos analisar na Figura 6 (INPE, 2018).

² Propagação de energia por meio de variação temporal dos campos elétrico e magnético da onda portadora

Figura 6 – Imagem de satélite com resolução espacial de 20 metros, da Ilha de Florianópolis, em Santa Catarina, obtida pela Câmera MUX do satélite CBERS 4.



Fonte: INPE (2015)

Dentro do sensoriamento remoto, os tipos de resoluções existentes se desdobram na verdade em três diferentes (e independentes) parâmetros: resolução espacial, resolução espectral e resolução radiométricas.

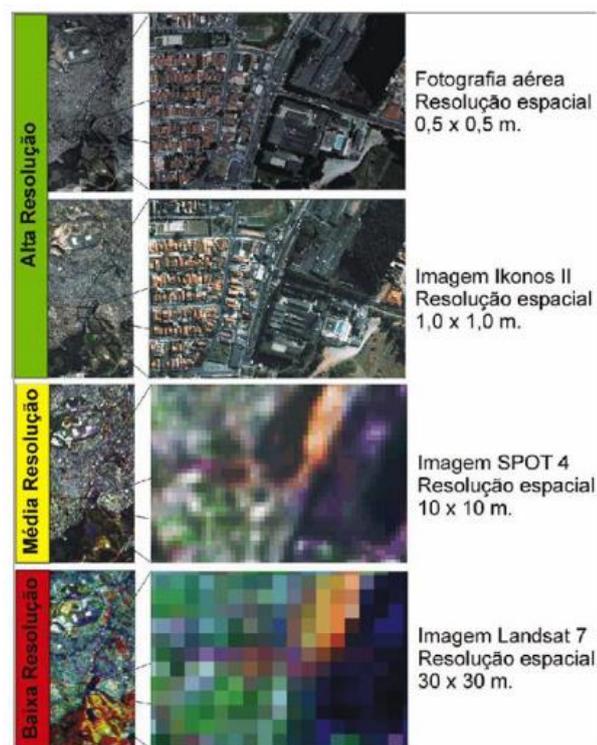
A Resolução Espacial consiste na capacidade que um sensor remoto tem de discriminar objetos em função do tamanho destes. Nos sensores atuais, instalados em plataformas orbitais (satélites artificiais), esse tipo de resolução varia de 50 cm a 1km (FLORENZANO, 2011). Esta habilidade baseia-se na projeção geométrica do detector na superfície terrestre, definindo a sua área do campo de visada do instrumento numa certa altitude e num determinado instante.

A Figura 8, ilustra o contraste visual existente entre diferentes resoluções espaciais em áreas urbanas. Podemos verificar que com uma imagem com resolução espacial em torno de 0,50m ou 1m, ambos considerados de alta resolução, consegue-se verificar a grande quantidade de detalhes e a distinção dos elementos urbanos (casas, ruas, quadras, vegetação, calçadas, loteamentos). A imagem do SPOT 4, considerada de média resolução com 10m, é capaz de detectar objetos maiores que

10 m x 10 m (100m²), isto é, possibilita identificar elementos urbanos, como a rede viária, aeroportos. Porém, é perceptível o tamanho do pixel.

Por último, na imagem do Landsat 7, com pixel de 30m, de baixa resolução, numa escala grande pode-se distinguir alguns elementos urbanos, avenidas e galpões, porém os pixels ficam ainda mais perceptíveis. Portanto, quanto maior a resolução espacial, maior o nível de detalhes perceptível na imagem, desde que o sinal de saída de um detector esteja relacionado com a média da energia radiante dentro da área projetada (MELO, 2002).

Figura 7 - Imagens de diferentes sensores e resoluções espaciais para discriminar áreas urbanas.



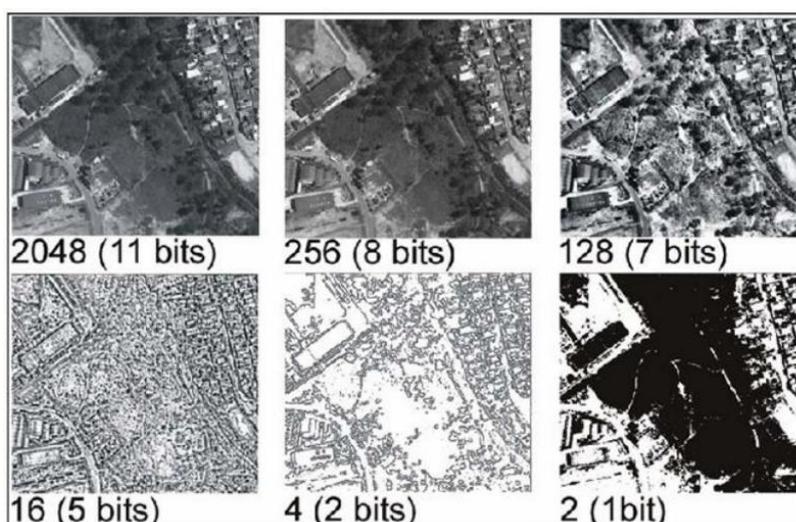
Fonte: Melo (2002)

A Resolução Espectral, consiste na capacidade que um sensor apresenta em discriminar objetos em função da sua sensibilidade espectral (FLORENZANO, 2011). Desta forma, quanto mais estreita for a faixa espectral da qual um sensor capta dados, maior é a possibilidade de registrar variações de energia refletidas pelo objeto. Podemos considerar também, que quanto maior o número de bandas (ou canais) de um sensor, maior é a sua resolução espectral.

A Resolução Radiométrica refere-se à capacidade que um sensor apresenta em discriminar a intensidade de energia refletida ou emitida pelos objetos. Segundo (MELO 2002) a utilização de imagens de alta resolução radiométrica possibilita a visualização e identificação de alvos em locais de alta ou baixa frequência radiométrica.

A radiância de cada pixel passa por uma codificação digital, obtendo um valor numérico, expresso em bits denominado de Número Digital (ND). Como o número de níveis de cinza está expresso em bits, ou seja, expresso em função do número de dígitos binários necessários para armazenar, em forma digital, o valor do nível máximo de cinza. O seu valor é sempre em potência de 2, por exemplo 8, bits significam $2^8 = 256$ níveis de cinza (Figura 8). Os satélites Landsat 7 e SPOT 4 possuem resolução radiométrica de 8 bits, enquanto o satélite IKONOS II de 11 bits. O fato de imagens do IKONOS II terem 11 bits (2048 níveis de cinza), significa que se obtém potencialmente um grande número de informações adicionais, se comparado com imagens de 8 bits (256 níveis de cinza). As diferenças são maiores nos níveis 2 e 4 do que nos níveis 256 e 2048, devido ao fato do olho humano não possuir sensibilidade às mudanças de intensidade acima de 30 níveis de cinza.

Figura 8 - Diferença de resolução radiométrica, área urbana: região nordeste da cidade de São Paulo.



Fonte: Melo (2002)

A Resolução Temporal refere-se à frequência de passagem do sensor num mesmo local, num determinado intervalo de tempo. Este ciclo está relacionado às

características orbitais da plataforma (altura, velocidade, inclinação), e ao ângulo total de abertura do sensor. A resolução temporal é de grande interesse especialmente em estudos relacionados a mudanças na superfície terrestre e no seu monitoramento (MELO, 2002). Por exemplo, a resolução temporal de 16 dias do TM-Landsat-5 é menor que a do sensor a bordo do satélite meteorológico Goes, que obtém imagens da mesma face da Terra a cada meia hora.

2.2.5 Satélite ALOS

O Programa ALOS tinha como objetivo a observação para aplicações na ciência, cartografia, monitoramento de desastres e exploração de recursos naturais.

A plataforma carregava três sensores: PRISM (Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping), com 2,5 m de resolução espacial, e que compreende três sistemas ópticos, para medição precisa das elevações; AVNIR-2 (Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2), com resolução de 10 m, para observação da cobertura e uso do solo; PALSAR (Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar), com resolução de 10-100 m, para observação da Terra em qualquer condição atmosférica, de dia ou de noite. Estes sensores devem adquirir imagens com posicionamento compatível com escala 1:25.000, sem uso de pontos de controle no terreno, devido ao avançado sistema de controle de órbita e atitude do ALOS, baseado em um receptor GPS de dupla frequência e rastreador de estrelas, entre outros dispositivos. É possível estimar que a posição do satélite possa ser determinada com a precisão de 1 m (MORAIS et al., 2009).

O satélite ALOS, foi lançado em 24 de janeiro de 2006 pela *Japan Aerospace Exploration Agency – JAXA*, no centro espacial de Tanegashima (Japão). Entrou na fase operacional e fornecimento de dados ao público em 24 de outubro de 2006 e deixou de operar em 2011. Foram incorporadas características necessárias aos satélites mais modernos, de alta resolução. Através desse programa, foram fornecidas informações da cobertura terrestre com alta resolução espacial (MORAIS et al., 2009).

O site responsável pela distribuição dos produtos ALOS chama-se **ASF**³ (Alaska Satellite Facility). O mecanismo de busca por imagens ALOS no site possui três metodologias. O método mais prático é a **consulta geográfica**. Antes de iniciar o processo de busca, é necessário informar a localização exata da região de interesse e suas coordenadas (MORAIS et al., 2009).

No Brasil, segundo estudos (GOMES et al., 2007) as imagens do sensor *PALSAR* foram utilizadas na Floresta Amazônica, onde em decorrência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os ventos alísios dos hemisférios norte e sul convergem, gerando uma persistente cobertura de nuvens que dificulta consideravelmente o imageamento por sensores ópticos. Uma vez que este fenômeno não afeta imagens obtidas por microondas, o *PALSAR* apresentou considerável resultado, principalmente considerando que a banda L é a que tem a maior capacidade de penetração, dentre os radares orbitais.

2.2.6 Satélite RESOURCESAT- 2 (LISS3)

Segundo informações do INPE (s.d), as imagens do RESOURCESAT-1 e 2, são disponibilizadas a partir do programa indiano de Satélites de Observação da Terra IRS (Indian Remote Sensing Satellite). O objetivo desses satélites de sensoriamento remoto indiano (IRS) é fornecer dados para o gerenciamento integrado de recursos terrestres e hídricos. Entretanto, os dados dos satélites RESOURCESAT-1 e 2 também são distribuídos para outros países, inclusive para o Brasil, onde incorpora, após acordo único com a Índia, a política brasileira de distribuição de imagens gratuitas.

A missão, em sua maioria desenvolvida e operada pela Indian Space Research Organization (ISRO), lançou o RESOURCESAT-1 em 17/04/2003, décimo satélite da série, e o RESOURCESAT-2 em 20/04/2011. Esse sistema de Observação da Terra é próprio para trabalhos na área de agricultura, levantamentos de uso e cobertura das

³ <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>

terras, monitoramento de safras, além de atuar em estudos de áreas urbanas e cartografia.

Os instrumentos dos satélites RESOURCESAT-1 (também conhecido como IRS-P6) e RESOURCESAT-2 adquirem quatro bandas espectrais que variam dos comprimentos de onda do infravermelho visível e do infravermelho próximo (VNIR) ao infravermelho de ondas curtas (SWIR). O satélite opera em uma órbita síncrona ao sol a uma altitude de 817 km. Os satélites levam 101,35 minutos para concluir uma revolução ao redor da Terra e completar cerca de 14 órbitas por dia. A Terra inteira é coberta por 341 órbitas durante um ciclo de 24 dias.

O satélite RESOURCESAT-2, possui dois sensores: LISS-3 e AWiFS. Os produtos IRS LISS-3 são referenciados à projeção e datum UTM / WGS84 (Universal Transverse Mercator / World Geodetic System 1984). Os produtos AWiFS são referenciados à projeção e dados LCC / WGS84 (Lambert Conformal Conic / World Geodetic System 1984). O sensor LISS-3 cobre uma faixa orbital de 140 km com uma resolução espacial de 24 metros com um ciclo de repetição de 24 dias. O AWiFS cobre uma faixa orbital de 740 km a uma resolução de 56 metros com um ciclo de repetição de 5 dias (USGS., s.d).

2.2.7 Modelo Digital do Terreno - MDT

O MDT (modelo digital do terreno) segundo Florenzano (2011), é uma representação matemática e computacional, da distribuição de um fenômeno espacial em uma dada região da superfície terrestre. O modelo, é representado por pontos distribuídos espacialmente no solo, descrevendo a topografia em um sistema arbitrário de referência. O MDT é representado por uma matriz regular de pontos com células justapostas.

O MDT é uma grade constituída de células (pixel), no qual cada uma delas tem o valor da sua posição geográfica (x, y) e o valor de altimetria (z). Com estas informações, a nível de pontos de grade, é possível mapear feições do relevo e gerar mapas geomorfométricos (MOMO, 2016). Dois tipos principais de dados existem para geração de modelos digitais de terreno: dados da superfície, chamados de DSM e os chamados de MDT. Os DSMs são amplamente disponíveis, mas como representam a superfície mais externa, apresentam artefatos que mascaram o solo, gerados pela

topografia do dossel⁴ da vegetação ou por edificações. Os MDT's tem capacidade de penetrar o dossel e representar a topografia real do solo livre de edificações e vegetações. Porém estes modelos são caros e tem baixa disponibilidade. Para zona urbana, os dados mais apropriados para fazer interpolação de curvas de nível, são os MDTs, os quais significam uma condição importante para a geração de mapas de risco sem artefatos (NOBRE et al., 2011).

Os dados de MDTs são de fundamental importância em aplicações de geoprocessamento desenvolvidas no ambiente de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). MDT's, quando inseridos em modelos hidrológicos permitem estimar a previsão do fluxo e da direção de escoamento da água e podem ser empregados como parâmetros para as políticas públicas para estabelecer planos de utilização para áreas com alta susceptibilidade a inundações (MENGUE et al., 2016).

2.3 Modelos Hidrológicos

Para Tucci (1998), a definição de modelo hidrológico consiste em uma forma numérica utilizada para representar processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrológica e através destes, conseguir prever futuras consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados.

Segundo Lima (2011) os modelos exercem a função de auxiliar o profissional envolvido com o tema, permitindo melhor compreensão dos fenômenos que ocorrem em uma bacia hidrológica, bem como, possibilitar a simulação do comportamento da bacia em condições diversas. A maior parte dos modelos representa apenas alguns dos processos que ocorrem numa bacia hidrográfica, haja vista a grande dificuldade de se representar tais processos por meio de equações.

Conceitualmente, o modelo consiste em uma representação da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem esta realidade. Nesse contexto, eles podem ser classificados sob diferentes aspectos. Estes, são classificados, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem

⁴ Dossel florestal é o estrato superior das florestas, que ao que tudo indica guarda a maior biodiversidade do planeta, contendo, segundo estimativas, até 65% das formas de vida das florestas tropicais, nas quais tal cobertura atinge de 30 a 60 m de altura.

(estocásticos ou determinísticos), o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais), a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos), a existência ou não de relações espaciais (pontuais ou distribuídos), e a existência de dependência temporal (estáticos ou dinâmicos).

Simplificadamente, o intuito de utilizar os modelos baseia-se na prevenção de eventos futuros que possam ser danosas à sociedade, relacionados com o regime hídrico e de grande valia para a tomada de decisões nas políticas públicas sociais. Visto que, os modelos são amplamente utilizados para prever cenários futuros através da simulação. De forma geral, nas últimas décadas os modelos hidrológicos se desenvolveram em dois sentidos: modelos que buscam representar com maior precisão, e de forma distribuída, os processos hidrológicos; e modelos que tratam de forma empírica a distribuição dos parâmetros em áreas de grande magnitude. Essa visão está relacionada com a escala dos processos no sistema físico (ALMEIDA; SERRA, 2017).

Os modelos hidrológicos são importantes para a predição e quantificação dos fenômenos físicos que ocorrem na natureza, visto a impossibilidade de se quantificar diretamente tais fenômenos. Desse modo, caracterizam-se como ferramentas essenciais para o preenchimento de diversas lacunas de informações necessárias no planejamento e gestão de Recursos Hídricos. Lou (2010) elenca as principais aplicações da modelagem hidrológica como sendo:

Análise de consistência e preenchimento de falhas: Devido à facilidade de operação e custo, é normal existirem séries mais longas de precipitação do que de vazão. Portanto, através do modelo, é possível, após o ajuste, estender a série de vazão tem como referência a precipitação. O modelo é comumente utilizado para analisar a consistência da curva-chave, dos dados de precipitações observados, além de permitir a verificação de alterações no rio e na bacia (ALMEIDA; SERRA, 2017).

Previsão de vazão: O conhecimento sobre previsão de vazão é muito importante para fazer o controle de cheia, a operação de obras hidráulicas, a navegação, entre outros. Esse tipo de estimativa da vazão pode ser obtido com base na precipitação conhecida, na vazão de um posto de montante. As características da simulação para esse objetivo são diferentes das demais. O modelo de previsão em

tempo atual deve buscar utilizar ao máximo as informações disponíveis no momento da previsão, atualizando parâmetros e/ou variáveis (ALMEIDA; SERRA, 2017).

Dimensionamento e previsão de cenários de planejamento: Quando é conhecida a precipitação e o risco de sua ocorrência, passa a ser possível estimar a vazão resultante para cenários de uso e simulação de futuras modificações da bacia, visando ao dimensionamento ou planejamento de alternativas de desenvolvimento do sistema em um cenário futuro. Nesse caso, os modelos hidrológicos utilizados podem ter algumas limitações quanto à simulação de certos cenários de desenvolvimento diferentes daquele do ajuste, como, por exemplo, a modificação do uso do solo (ALMEIDA; SERRA, 2017).

Efeitos resultantes da modificação do uso do solo: A análise do escoamento resultante da modificação do uso do solo é um problema complexo, que requer uma metodologia mais sofisticada que as utilizadas nas aplicações anteriores. Atualmente, os modelos existentes para atuar na modificação do solo são, em sua maioria, conceituais, possuindo uma série de formulações empíricas para representar os processos e logo os parâmetros acabam se relacionando mais qualitativamente do que quantitativamente com a física da bacia. Nessas condições, as variáveis englobam várias características da bacia, gerando certa dificuldade na análise quanto ao resultado da modificação das características da bacia (ALMEIDA; SERRA, 2017).

2.4 Hidrometria

A hidrometria constitui-se de uma parte da hidrologia destinada à medição de variáveis hidrológicas, objetivando mensurar dados como precipitações, vazões, níveis da água, entre outros, quanto a variação temporal e espacial (SANTOS et al., 2001). De forma simplificada, o monitoramento hidrológico é a hidrometria feita de maneira contínua. Onde o objetivo é permitir a coleta de informações a fim de criar uma base de dados e determinar com suficiente precisão o regime hidrológico de uma região. Com isso, acompanhamento das condições das principais bacias hidrográficas de interesse, bem como realizar pesquisas, estudos e projetos relacionados aos recursos hídricos. Assim, é formado um banco de dados hidrometeorológicos necessários às tomadas de decisões em áreas como agricultura e engenharia.

O Brasil dispõe atualmente de uma rede hidrometeorológica com aproximadamente 11.000 estações hidrométricas, administradas por organismos federais, setoriais, estaduais e particulares, dentre as quais 4.200 representam a rede básica nacional - Redes Hidrometeorológicas - em operação, de responsabilidade da Agência Nacional de Águas - ANA, constituída com o objetivo de avaliar a disponibilidade hídrica e conhecer o regime hidrológico das oito bacias hidrográficas brasileiras e sub-bacias constituintes. (CPRM, 2018) Sob responsabilidade da ANA, existem 4.641⁵ pontos de monitoramento no país divididos em estações que monitoram parâmetros relacionados aos rios (1.874), como níveis, vazões, qualidade da água e transporte de sedimentos, e outros que monitoram principalmente as chuvas (2.767) (ANA,2018a).

Todos os dados disponibilizados pela Agência Nacional das Águas – ANA, são divididos em sistemas de armazenamento diferentes. O banco de dados disponíveis no **Portal HidroWeb**⁶ se referem à coleta convencional de dados hidrometeorológicos, ou seja, registros diários feitos pelos observadores e medições feitas em campo pelos técnicos em hidrologia e engenheiros hidrólogos. Dados em tempo real coletados pelas estações denominadas Plataformas Coletoras de Dados – PCDs, transmitidos pelos satélites brasileiros SCD e CBERS, disponibilizados no **Portal Telemetria**⁷.

De acordo com Pereira et al. (2003), dentro da hidrometria pode-se mencionar a fluviometria, que compreende as medições de vazões, velocidade e cotas de rios. Os dados fluviométricos são imprescindíveis para os estudos de aproveitamentos hidroenergéticos, como o planejamento de uso dos recursos hídricos, previsão de cheias, gerenciamento de bacias hidrográficas, saneamento básico e meio ambiente de modo geral.

⁵ Os números se referem ao inventário de estações da ANA em 03/04/2018, podendo se alterar com certa frequência, em função da incorporação de novas estações ou de sua extinção.

⁶ <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/medicoes_historicas_abas.jsf>

⁷ <<http://mapas-hidro.ana.gov.br/Usuario/mapa.aspx>>

2.4.1 Estações Fluviométricas

A estação fluviométrica, em síntese, é formada por dispositivos para obtenção da cota fluviométrica, seção de medição de vazão e referências de nivelamento. É um posto de observação permanente do regime fluvial do rio.

Uma estação hidrométrica de fluviometria é composta por uma seção de medição de vazão do rio e por uma sequência de réguas linimétricas, que são estruturas fixas e graduadas que possibilitam a leitura do nível do rio, ou por um equipamento digital através de sensores instalados e transmissão de dados através da telemetria.(ANA, 2014b) O registro sistemático dos níveis de água constitui a base dos estudos fluviométricos, devido a facilidade com que podem ser efetuadas as observações.

2.4.1.1 Estações Fluviométricas Manuais ou Convencionais

As estações caracterizadas como manuais ou convencionais, são compostas por lances de réguas linimétricas, conforme figura 9.

Segundo Garcez e Alvarez (1988), os Limnímetros (fluviômetros) destinam-se à observação direta do nível de água. O equipamento mais comumente encontrado é constituído de uma régua de uma escala limimétrica, graduada em centímetros. As réguas (Figura 9) devem ser niveladas e o número de lances deve ser suficiente para abranger toda amplitude de variações de cotas. São feitas em geral duas leituras diárias, uma pela manhã, às 7:00, e outra, à tarde, às 17:00, principalmente no âmbito da Rede Hidrometeorológica Nacional (Brasil), mas pode ocorrer leituras uma ou mais vezes por dia, dependendo do gestor da rede de monitoramento.

Figura 9– Estação Fluviométrica Convencional



Fonte : Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica – SGH (2012)

Além das escalas linimétricas, utilizam-se outros sistemas para a observação dos níveis. Um deles é linígrafo, que contém um dispositivo automático que promove o registro contínuo dos níveis d'água na seção do posto. Convém ressaltar, segundo Garcez e Alvarez (1988), que existem apenas dois sistemas fundamentais de instrumentos: os baseados no registro de movimento de um flutuador e os baseados no registro da variação de pressão da água.

A escolha do local para instalação da estação fluviométrica deverá seguir alguns critérios, como por exemplo o acesso ao local de implantação da estação, que deverá ser permanente e o trecho do rio onde se localizará a estação deverá ser reto.

2.4.1.2 Estações Fluviométricas Automáticas

As estações automáticas executam a mesma função das estações convencionais. A diferença existente entre os dois modelos, baseia-se na tecnologia envolvida no sistema de observação, onde um torna-se automatizado enquanto o outro é manual. Esse tipo de estação tem como objetivo mensurar o nível do mar, rios, lagos, poços, etc., automaticamente, enviando esses dados pela internet, através de um sistema GSM ou satélite. Os dados enviados pelo equipamento ficam armazenados em servidores onde o usuário possui a senha para acessar os mesmos na internet em qualquer lugar do mundo (CHAVES, 2013). O intervalo de coleta dos

dados, armazenamento e transmissão varia em função do tipo de estação e da aplicação que será feita dos dados coletados.

Além de mensurar nível, a estação também pode medir outras variáveis como o índice de chuva, a velocidade e direção do vento, assim como outros diversos sensores existentes (SGH, 2012). Essas estações são constituídas dos seguintes componentes: a) Fonte de energia ; b) datalogger (registrador de dados); c) sensores; d) sistemas de transmissão; e) infraestrutura.

Atualmente, uma série de projetos surgiram para realizar a troca de estações convencionais para a instalação de PCH's automatizadas. Isso se justifica, através da tecnologia envolvida na observação, manipulação e envio dos dados, que torna o processo de aquisição de informações mais rápido.

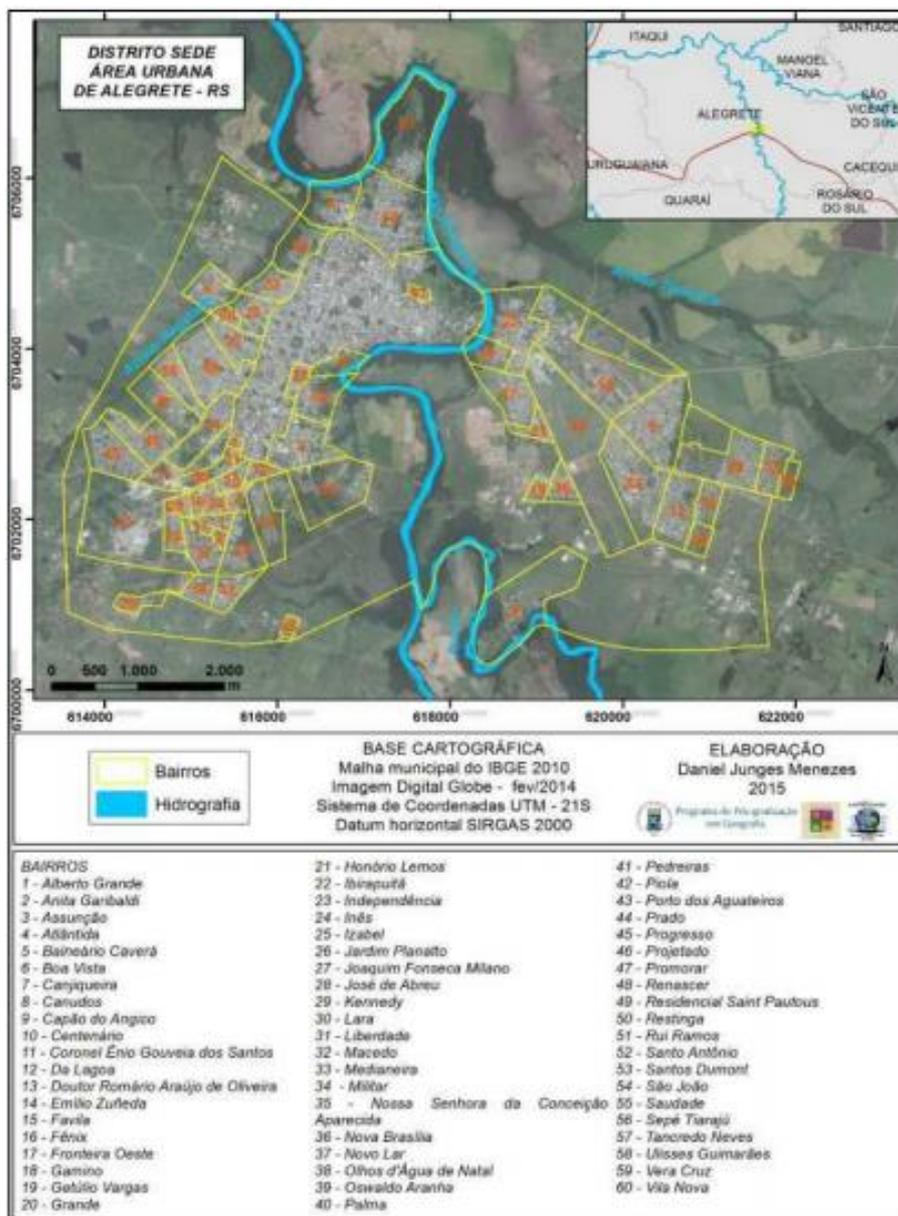
A coleta de dados na cidade de Alegrete é realizada através da 6ª Coordenadoria da Defesa Civil. A estação PCH está instalada no bairro Vila Nova (código 76750000), as margens do rio Ibirapuitã. A responsabilidade pela operacionalidade da estação é do Serviço Geológico do Brasil (CPRM), enquanto que a entidade responsável por esta é a Agência Nacional de Águas.

2.5 Estudos de Caso

Inúmeros foram os trabalhos acadêmicos desenvolvidos pelas Universidade Federal do Pampa – Campus Alegrete, no que tange as inundações e a sua problemática. Estes, servirão como instrumento de estudo para comprovar a veracidade da simulação pelo software HAND.

Exemplificando esses estudos, encontra-se na literatura o trabalho de Knierim e Tapahuasco (2015), que trata sobre a compilação de eventos históricos de enchentes, inundações e alagamentos no município de Alegrete. Através dos órgãos locais e de entrevistas, foi possível determinar os bairros que apresentam maior susceptibilidade a estes eventos. Estes dados são demonstrados na Tabela 1. Na figura 10, é apresentado o mapeamento dos bairros do município.

Figura 10 - Distrito sede / área urbana de Alegrete



Fonte : Menezes (2018)

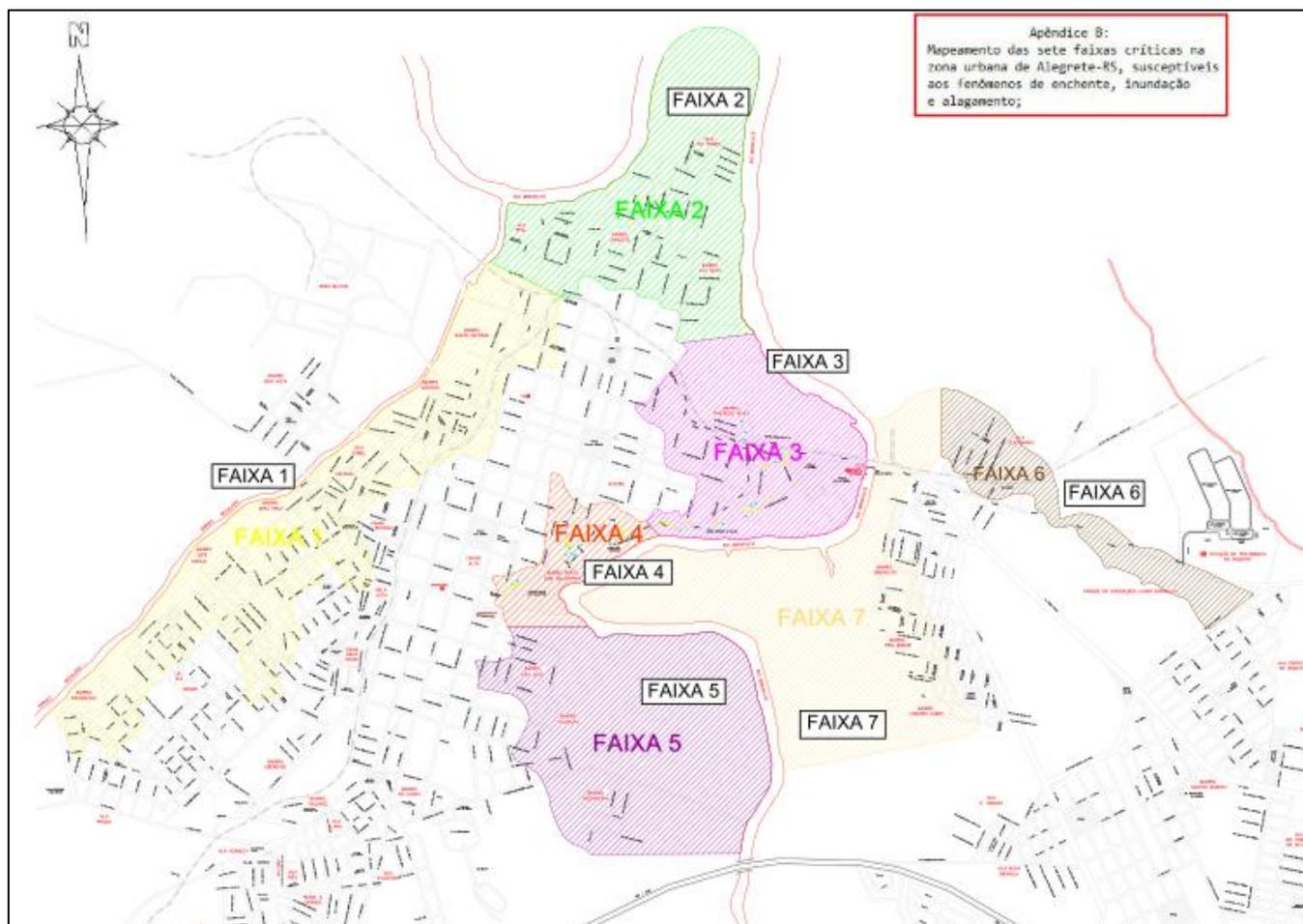
Tabela 1 – Faixa dos bairros atingidos historicamente

| Faixa | Bairros |
|--------------|---|
| 1 | Macedo; Vila Izabel; Restinga; Vera Cruz; Sepé Tiarajú; Progresso |
| 2 | Santo Antônio; Vila Real; Canudos; Rui Ramos; Vila Nova |
| 3 | Centro; Tancredo Neves |
| 4 | Porto dos Aguateiros |
| 5 | São João; Assunção; Medianeira |
| 6 | Ibirapuitã; Pró-Morar; Honório Lemes |
| 7 | Vila Centenário |

Fonte: Jornal Gazeta do Alegrete; Jornal Expresso Minuano; Defesa Civil de Alegrete.

A partir do estudo de e Knierim e Tapahuasco (2015), Santos. S (2015) idealizou um mapa no qual sinaliza as faixas que caracterizam os bairros mais afetados.

Figura 12- Mapeamento das sete faixas críticas na área urbana de Alegrete



Fonte: Santos. S (2015)

2.6 Modelo HAND

O modelo HAND, é um modelo hidrológico que consiste em normalizar a topografia de acordo com as alturas relativas e locais encontrados ao longo da rede de drenagem, e, desta forma, apresenta a topologia dos potenciais de drenagem locais. O modelo HAND é um algoritmo criado sob a liderança do pesquisador Carlos Donato Nobre, por um grupo de pesquisadores do INPA (Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia) e do INPE. O primeiro estudo, que validou o algoritmo foi na Bacia do Igaparé, em uma área de estudo de 18.000 km², na parte inferior de captação do rio Negro, em Manaus. No local, foram realizados trabalhos, encontrando forte correlação entre água no solo e topografia. Os resultados obtidos desta validação demonstraram sua capacidade para mapear ambientes expansivos utilizando apenas dados topográficos adquiridos remotamente como entrada (NOBRE et. al. 2011).

A definição do modelo reside no desnível ou na distância vertical de cada ponto em relação à drenagem mais próxima, onde é extraída a partir do algoritmo HAND. (RENNÓ et. al.,2008) A proposta do algoritmo visa ser um método barato e simplificado. Esse intuito, permite a identificação das áreas de desastres como áreas de risco de enchentes, onde dispensa deslocamento a campo para extração de informações e mapeamento das mesmas. Seus desenvolvedores definem como uma maquete digital de terreno, onde os dados inseridos podem ser alta ou baixa resolução e destes produtos são gerados MDT's das áreas de estudo. O algoritmo utiliza informações topográficas dos MDT's para extrair as informações hidrológicas das áreas. O sistema do software calcula propriedades de alagamento e de outros desastres naturais. Ele compreende que desníveis relativos de até 5 m são áreas de maior probabilidade de inundação. Áreas com desníveis relativos entre 5 e 15 m são compreendidos como de risco médio (SANTOS. K, 2015).

Silva et al. (2013) apresentaram os resultados da aplicação do modelo HAND para mapeamento de áreas suscetíveis a eventos críticos de cheias na bacia do rio Paraíba do Sul. O objetivo do trabalho foi de comparar a mancha de áreas inundável obtida com o HAND, com os resultados obtidos de um modelo hidráulico-hidrológico. O modelo HAND mostrou ser um método promissor na indicação de áreas suscetíveis às cheias, porém, não foi possível fazer uma relação direta entre as classes HAND e as curvas dos diversos tempos de recorrência obtidas pelo modelo hidráulico-

hidrológico. Mesmo assim, a maior porcentagem da classe indicadora de inundação foi incluída nos limites das curvas.

Mengue et al., (2016) desenvolveram estudos na utilização do modelo HAND para mapeamento de áreas mais suscetíveis à inundação em uma área do Rio Uruguai e afluentes, próximo à cidade de Itaqui, Estado do Rio Grande do Sul, utilizando como base um evento de inundação ocorrido em 26/10/1997. Observou-se que as áreas norte e oeste da cidade de Itaqui são as mais suscetíveis à inundação, concordando com os resultados de Saueressig (2012). Também foi possível concluir que recomenda-se a utilização de Modelos Digitais do Terreno, ao invés de Modelos Digitais de Superfície, visto que dados topográficos, como o SRTM, coletam informação de toda a superfície do terreno, como edificações e cobertura vegetal, comprometendo os dados do modelo HAND para simulações, principalmente em áreas urbanas e ao longo de cursos d'água com vegetação arbórea.

Momo et al., (2014) apresentaram os resultados do estudo no desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial. O estudo concluiu que o rendimento do modelo HAND pode ser considerado adequado no traçado das áreas suscetíveis à inundação, para modelos digitais de terreno de alta resolução espacial. Assim, considera-se que ele constitui uma ferramenta que pode ser empregada no traçado das áreas suscetíveis a inundação no estado de Santa Catarina, onde os municípios têm levantamentos planialtimétricos obtidos com imagens aerofotogramétricas de alta resolução (1m).

O algoritmo HAND foi utilizado também para o estudo de caso do município de Porto Alegre –RS. Milanesi et al., (2017) apresentaram resultados quando a delimitação do terreno sujeito a inundação, através do modelo, onde também foi possível identificar o perfil social da população em situação de vulnerabilidade, neste caso, com base numa base cartográfica em escala cadastral de 1:1.000 e resolução espacial de 1m.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este item tem o intuito de descrever os procedimentos que foram traçados, com o propósito de cumprir o objetivo geral e os objetivos específicos estabelecidos nesta pesquisa. Encontram-se, a seguir, descritas todas as etapas que englobam desde a apropriação de conceitos-chave atrelados ao tema, bem como o conhecimento da área de estudo e, como foram estabelecidas as análises, que remetem às inundações na área urbana de Alegrete.

3.1 Localização e descrição da área de estudo

O Município de Alegrete está localizado na região sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul, na latitude de 29° 47' 01,63" Sul e longitude 55° 47' 27,54" Oeste, com altitude média de 102 metros acima do nível do mar (Figura 11). O município apresenta uma área equivalente a 7.804 Km² (IBGE, 2010), sendo considerado o maior em superfície territorial do Estado. A população é composta por 78.984 habitantes, sendo que cerca de 80% reside na zona urbana.

A zona urbana apresenta frequentemente problemas de inundações, ocasionando pelo rio Ibirapuitã - manancial que banha a cidade. Os problemas com as inundações são recorrentes, devido a aglomeração de populações as margens do rio.

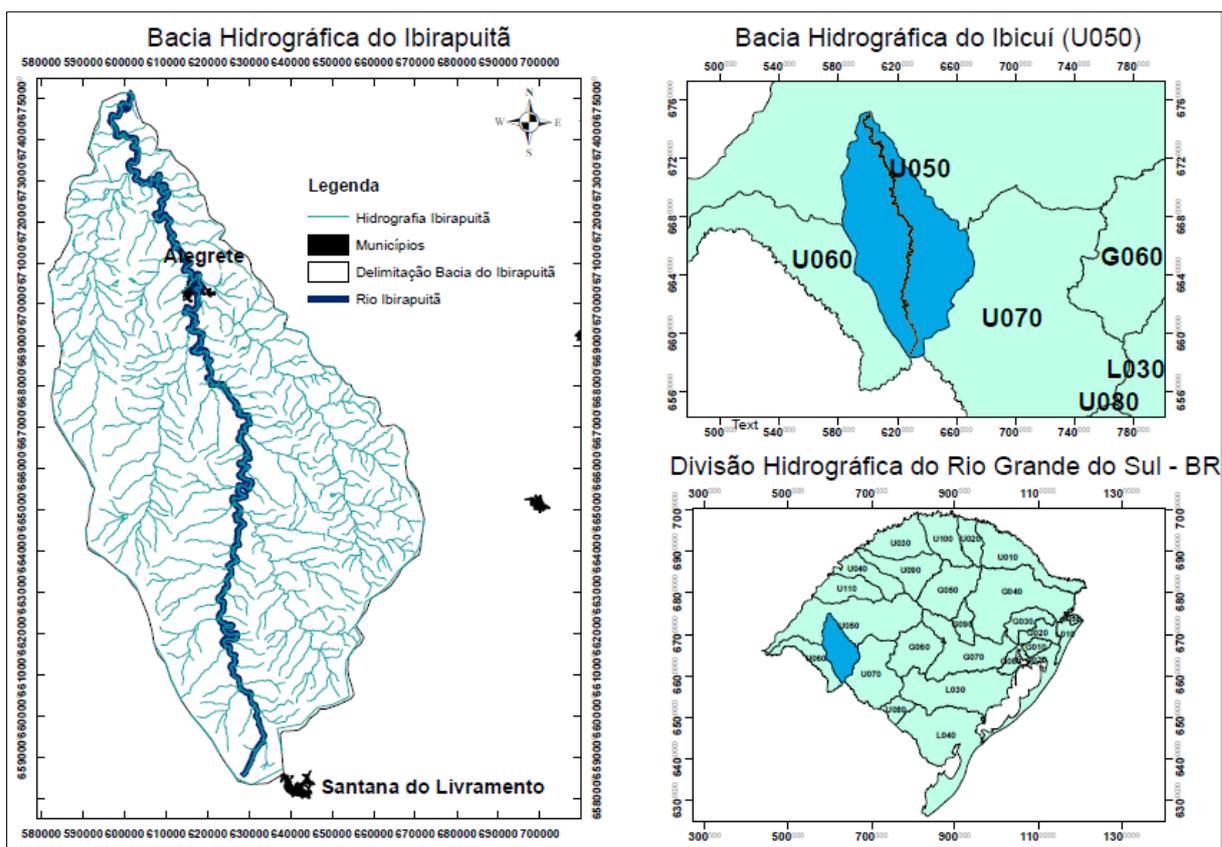
Figura 11 – Localização do Município de Alegrete – RS.



Fonte: Comitê do Ibicuí (20-?)

O rio Ibirapuitã, o qual pertence a Bacia Hidrográfica do Ibicuí, caracteriza-se como um rio de 7ª ordem, e é considerado o maior tributário da margem esquerda do rio Ibicuí - principal rio da referida bacia. O rio Ibirapuitã tem suas nascentes nas proximidades da zona urbana de Santana do Livramento, desaguando no rio Ibicuí. Apresenta como principais tributários o rio Ibirapuitã Chico (5ª ordem), sendo um dos seus primeiros afluentes, o arroio Pai-Passo (6ª ordem), afluente da margem esquerda, o Arroio Caverá (6ª ordem), tributário da margem direita e que drena significativa parte da porção leste da bacia hidrográfica e, o Arroio Inhanduí, tributário da margem esquerda e que deságua no Ibirapuitã nas proximidades da sua foz, junto ao Ibicuí. O Rio Ibirapuitã, possui uma extensão de aproximadamente 275 km, sendo 180 km no município de Alegrete (MENEZES 2018).

Figura 12 - Rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Ibirapuitã

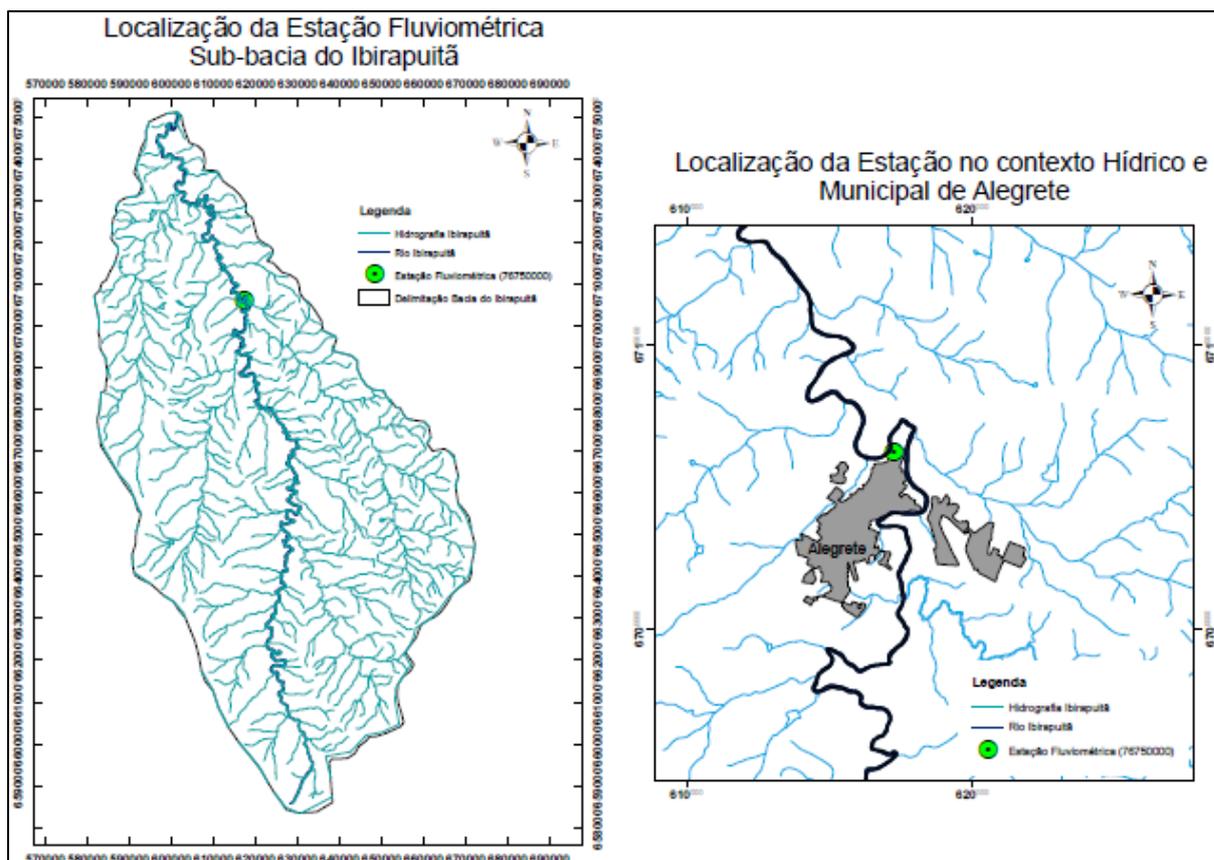


Fonte: Autoria Própria

3.2 Estação hidrológica

A estação automática hidrológica de referência (código 76750000), a qual será utilizada no presente estudo, está localizada junto ao Bairro Vila Nova, as margens do rio Ibirapuitã. A Figura 13 apresenta a localização da referida estação no contexto da área de estudo.

Figura 13 – Localização da estação fluviométrica



Fonte: Autoria Própria

A estação fluviométrica possui uma área de drenagem de 5.965 km² e se localiza à jusante da zona urbana de Alegrete, podemos analisar sua localização nas figuras 14 e 15. Os dados de nível da água e vazão do curso d'água são atualizados diariamente às 7 e 17 horas, disponibilizados na Plataforma HidroWeb (2018) (Figura 16), ou no site Gestor ANA (2018) (Figura 17). Quanto aos registros históricos da referida estação, verifica-se a existência de dados no período de 1940 a atualidade (novembro/2019), com significativos intervalos apresentando ausência de dados.

Figura 14 - Localização da estação fluviométrica Alegrete (código 76750000)



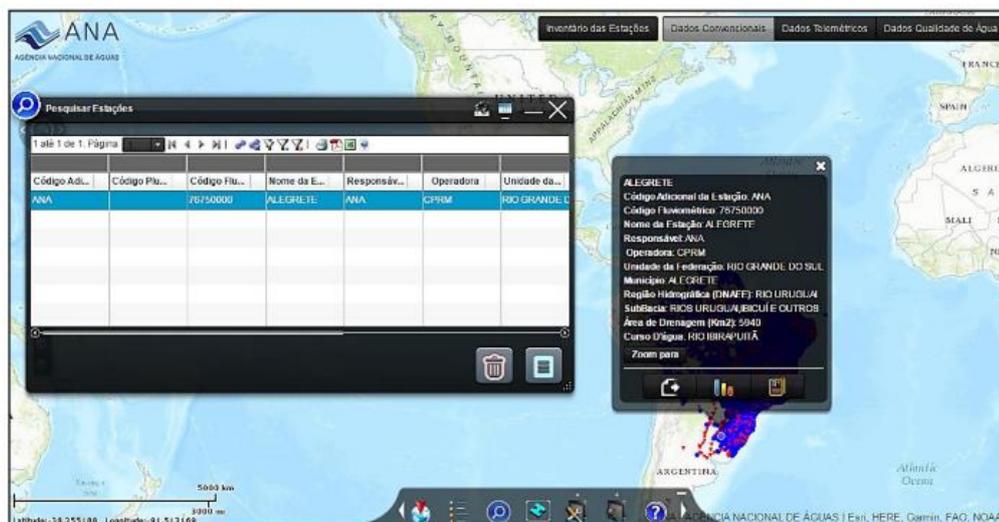
Fonte: Adaptado de Google Earth A

Figura 15 - Estação fluviométrica “ALEGRETE” (código 76750000)



Fonte: Menezes (2018)

Figura 16 - Plataforma Hidroweb.



Fonte : Site Hidroweb (2017, não paginado)

Figura 17– Plataforma Gestor ANA



Fonte: Site Gestor Ana (2018, não paginado)

Segundo a 6ª Regional da Defesa Civil, com base na régua de referência em Alegrete, a cota para o transbordamento da calha principal do rio Ibirapuitã é de 8,54m, no qual as moradias mais próximas ao rio, situadas em cotas mais baixas, são atingidas pela enchente. Essa informação foi adquirida através da comunicação verbal com a Defesa Civil do Município

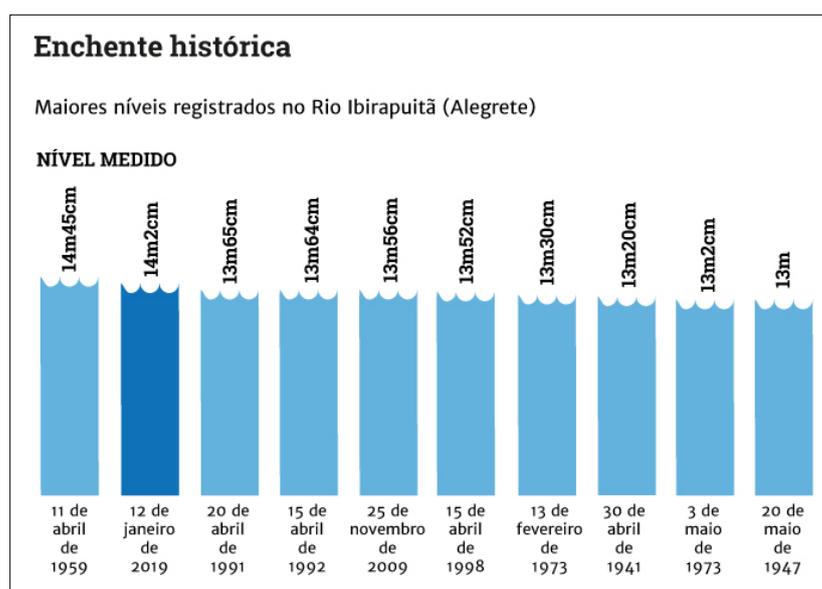
3.3 Levantamento de dados históricos de inundações e estudos

A área urbana da cidade de Alegrete encontra-se instalada circundando às margens do Rio Ibirapuitã. Situado na porção central da área urbana, este curso d'água é um canal de grande porte, que por sua vez apresenta as inundações de maior duração e potencial destrutivo, que são provocadas pela elevação do nível do canal do Rio Ibirapuitã.

Dentro do contexto comportamental e natural que o rio apresenta, é histórica a ocorrência das inundações. A ocupação das várzeas inundáveis, crescimento acelerado e falta de planejamento do município tornou a cidade de Alegrete um dos municípios gaúchos mais afetados por esta tipologia de desastre natural.

Estudos realizados pelo CPRM – Serviço Geológico do Brasil, disponibilizados em reportagem pelo Jornal Zero Hora, demonstram que o caso de enchentes é histórico no município. Analisando os dados abaixo, a cheia do ano de 2019 é a segunda mais intensa já registrada desde que teve início o monitoramento no local, na década de 1940, como pode ser analisado na Figura 18.

Figura 18 - Comparativo de Cheias no Município de Alegrete - RS



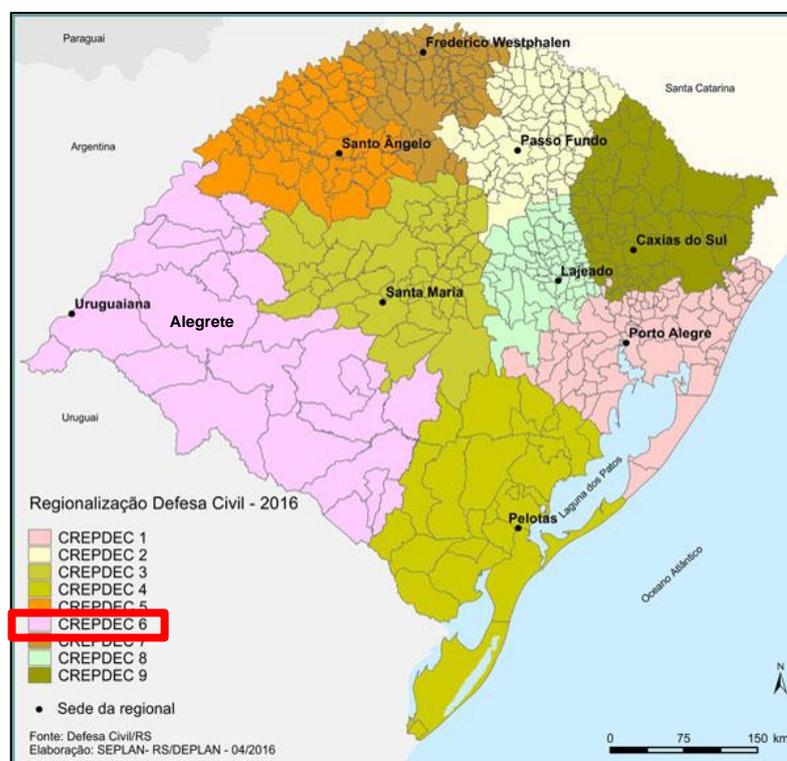
Fonte: Jornal Zero Hora⁸

⁸ Acesso em : <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2019/01/enchente-em-alegrete-e-a-maior-em-60-anos-cjr6vqkxf00dc01nxcaocy16e.html>

Outra fonte de informações referentes aos registros históricos de inundações em Alegrete foi buscadas na Defesa Civil do município, a qual disponibiliza as informações por regional, que abrange diversos municípios, bem como em jornais locais e estudos realizados na área.

O município de Alegrete pertence a 6ª Regional de Defesa Civil do Rio Grande do Sul (Figura 19).

Figura 19 – Municípios que compõem a REDEC 6.



Fonte : Site Defesa civil RS (2018, não paginado)

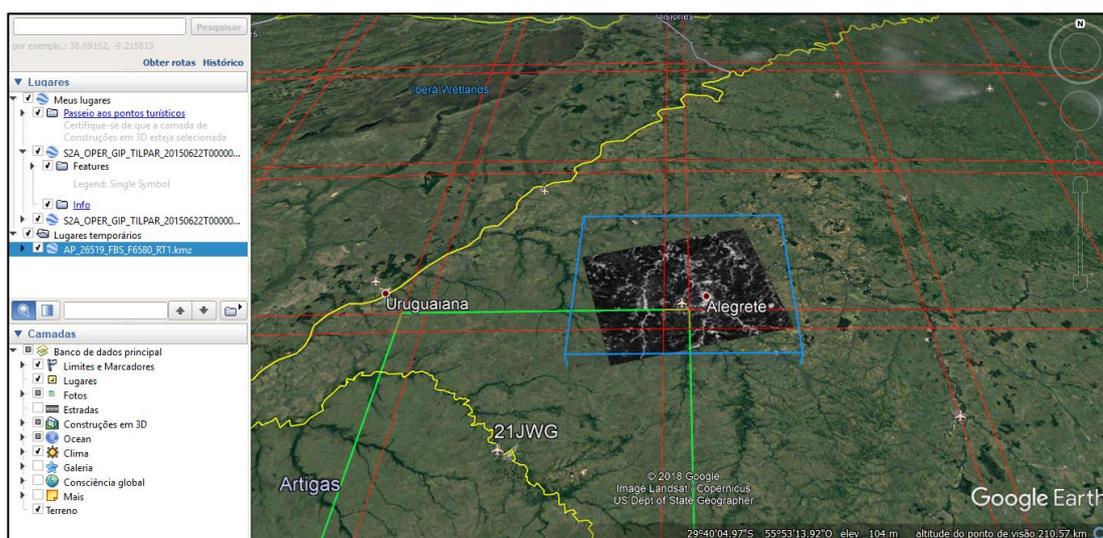
3.4 Estruturação de uma base cartográfica digital da área de estudo

Tendo em vista que a caracterização da altimetria da área de estudo basear-se-á em informações remotas, provenientes do satélite ALOS, bem como será determinado manchas de inundação de registros históricos baseadas em imagens de satélite, procedeu-se a estruturação da base cartográfica.

Para a caracterização da altimetria, utilizar-se-á imagens do satélite ALOS – sensor PALSAR, com resolução espacial de 12,5 metros, datadas de 16/01/2011, disponibilizadas através do endereço eletrônico <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>.

Com relação ao sistema de referência, a referida imagem está sob o sistema de coordenadas UTM, Datum Horizontal SIRGAS2000, zona 21S.

Figura 20 – Imagem RASTER utilizada no estudo



Fonte: Site Alaska (2018, não paginado)

A altimetria caracterizada através da imagem do satélite ALOS, é representada através do MDT, o qual compõe o dado principal de entrada (input) do modelo HAND, o qual será utilizado para a simulação das áreas de inundação da zona urbana do município de Alegrete/RS.

3.5 Aplicação do modelo HAND

Para realizar a delimitação do terreno sujeito à inundação, através da modelagem hidrológica, faz-se necessário o modelo digital do terreno (MDT), que são utilizados como arquivos de entrada (input) em softwares hidrológicos. Neste trabalho, foi utilizado o MDT proveniente do satélite ALOS.

O algoritmo do modelo HAND baseia-se no princípio que a água percorre o trajeto mais curto em relação aos terrenos mais baixos. Desta forma, as diferenças de nível entre o relevo e o talvegue das redes de drenagens superficiais (NOBRE et al., 2011). Para realizar o processo de modelagem HAND, o INPE desenvolveu uma extensão (*plug-in*) dentro de outros softwares, como no *TerraHidro*, contendo a

ferramenta “*Hydrological Tools*”. Este plug-in foi integrado no software livre *Terra View* desenvolvido pelo próprio INPE. O plug-in *TerraHidro*, atualmente na versão 4.5, permite que sejam gerados dados hidrológicos como rede de drenagem, bacias hidrográficas e o próprio HAND, todos a partir de um MDT.

O resultado da simulação do HAND é estreitamente relacionado com a qualidade (resolução) do dado topográfico. Seguindo os procedimentos executados pelo algoritmo HAND (RENNÓ et al., 2008), a partir do dado de entrada são executadas três etapas no Software *TerraView*:

Etapa 1: correção do MDT topográfico e direção do fluxo de drenagem (DFD)

Serão realizadas correções de incoerências altimétricas no MDT adicionado, pois a topologia hidrológica poderá estar desconexa. O MDT topográfico é essencial para estabelecer a direção e a velocidade do fluxo de drenagem. Nesta etapa define-se para cada ponto de grade, a direção do fluxo da água. A conexão hidrológica entre os pontos de grade leva em conta a direção do escoamento superficial, que é determinada pelo método D8. O método D8 (*Deterministic Eight- Neighbors*) define para cada célula um código de direção do fluxo. Este método utiliza a regra da maior declividade para atribuir a direção do fluxo. Por exemplo, se o sentido de maior queda foi à direita da célula de processamento, a sua direção de fluxo será codificada como sendo 1, se for a esquerda será 16 e assim por diante. Na Figura 21 ilustra como se define a direção de fluxo para cada célula da grade pelo método D8.

Figura 21 (a) Codificação das direções (b) Atribuição de direção método D8.



Fonte : Jenson e Domingue (1988) apud Momo (2014)

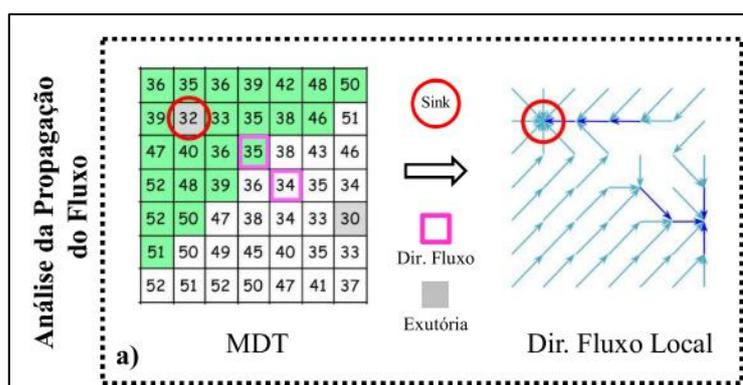
Conforme analisado na Figura 22, o resultado desde primeiro passo é uma grade de pontos chamada DFD (direção do fluxo de drenagem, em inglês LDD - Local Drain Direction). Desta forma, a direção do escoamento superficial e a conexão entre os pontos hidrológicos na formação da rede de drenagem na grade, são com base na força gravitacional, seguindo sempre para o ponto mais baixo (NOBRE et al., 2011).

É necessário atentar-se quando uma célula é menor ou igual do que os seus oito vizinhos, ela será identificada como área de poço ou sumidouro no MDT. Estas áreas são criadas artificialmente durante o processamento topográfico de geração do MDT e ocorrem quando há incoerência hidrológica do valor altimétrico no dado topográfico em alguns pontos da grade, causando interrupção da rede de drenagem. O algoritmo HAND para regularizar estas incoerências hidrológicas do MDT utiliza estratégia de regularização de áreas chamada breaching (corte para escoamento), que corrige essas incoerências hidrológicas do dado topográfico, gerando uma rede de drenagem inteiramente coerente. Figura 22

Os passos para correção do MDT são apresentados nas Figuras 24, 25 e 26.

No Passo 1, a primeira etapa metodológica do modelo é realizar uma correção hidrológica do MDT, com o intuito de eliminar áreas de poço ou sumidouro. Isto, para garantir a propagação do fluxo em todas as células do MDT.

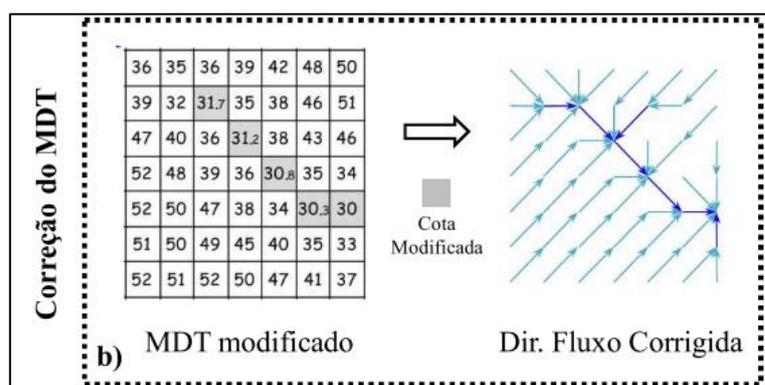
Figura 22 Correção do MDT



Fonte: Nobre et al.(2011)

Para eliminar esta área de poço, uma nova trajetória topológica é criada, conforme mostrado no passo 2 no DFD intermediário da Figura 21

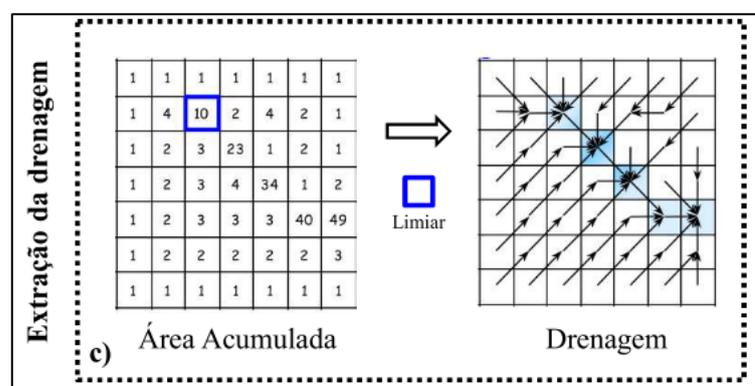
Figura 23 - Passo 2, a direção e a área de acumulação de fluxo de cada célula são determinadas, portanto é criado o DFD intermediário



Fonte: Nobre et al.(2011).

Já no passo 3, o DFD é corrigido considerando a distância entre as duas extremidades e um novo valor da altimetria é calculado pela interpolação linear.

Figura 24 – Passo 3, correção do MDT e extração da rede de drenagem



Fonte: Nobre et al. (2011).

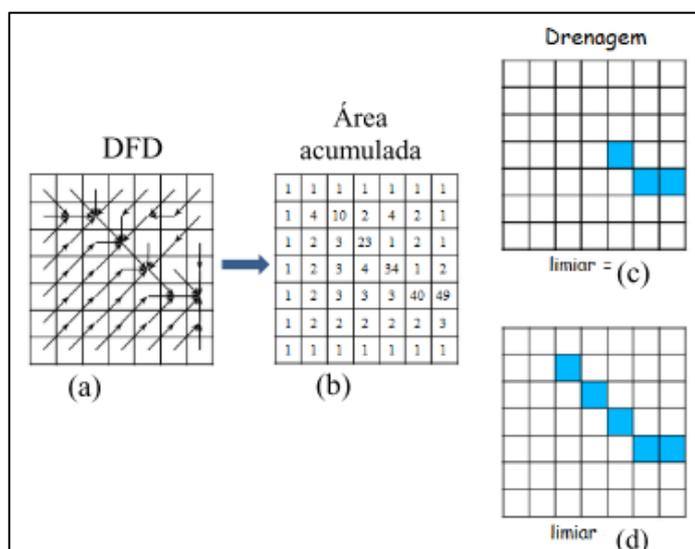
Etapa 2: Obtenção da Rede de Drenagem

A partir do MDT gerado juntamente com a definição da direção do fluxo de drenagem (DFD) são calculados para cada ponto (célula) da grade os valores acumulados de fluxo recebidos, aonde células com valores altos indicam uma maior concentração de fluxo acumulado. Desta forma, se utiliza o método da área de contribuição, onde se define um limiar mínimo para identificar as células da grade nos quais se iniciam o canal (headwater). Assim, a rede de drenagem é definida pelos

pontos da grade que tem uma área de contribuição maior que o limiar mínimo definido. A área de contribuição é calculada através da contagem do número de células, cujo caminho do fluxo converge para a célula considerada. Na Figura 25 mostra-se o funcionamento da etapa 2.

Na Figura 25, são apresentadas quatro matrizes: (a) DFD que faz a representação da direção do fluxo para cada ponto da grade; (b) matriz da área acumulada que representa a contagem de números dos fluxos recebidos; (c) matriz da rede de drenagem com limiar igual a 30 que representa o início do canal, sendo assim, iniciando na célula com valor acumulado igual a 34 na matriz de área acumulada. No caso da drenagem com limiar igual a 10; (d) o limiar de início de drenagem é menor, com isso representará uma rede de drenagem mais densa, assim, o canal terá início na célula com valor acumulado igual 10 na matriz de área acumulada. Por este método, define-se um limiar referente à área de contribuição mínima a partir do qual tem início a drenagem (nascentes). Quanto maior o limiar, menos pontos na grade serão encontrados, desta forma, menor será a densidade de drenagem. O resultado desta etapa é a geração do MDT-HAND, onde cada ponto de grade é ajustado um novo valor altimétrico referenciado topograficamente com a rede de drenagem. O MDT- HAND é uma superfície normalizada, distribuída de potenciais gravitacionais relativos (ou desníveis relativos) definida como modelo HAND (NOBRE et al., 2011).

Figura 25 - Cálculo da área acumulada para rede de drenagem



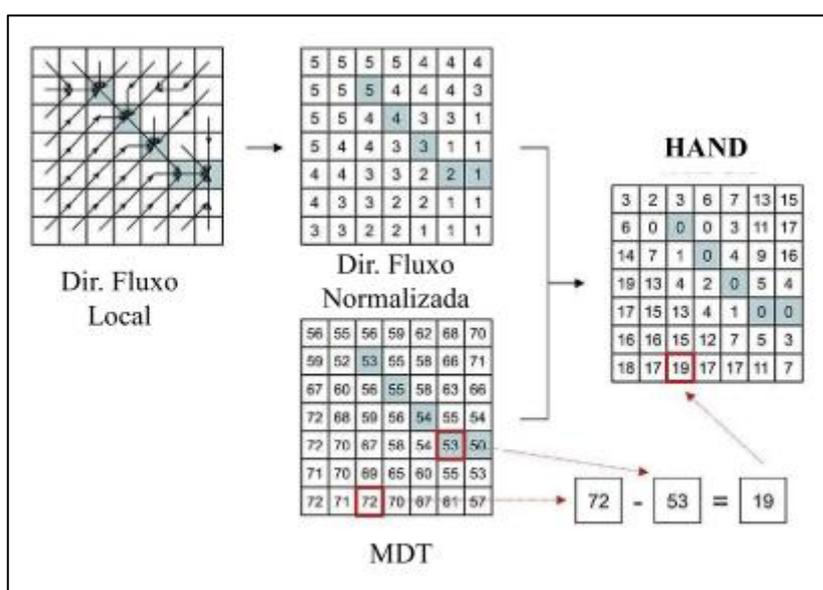
Fonte: Adaptado de Rennó et al. (2008).

Quanto menor o limiar, maior a densidade de drenagem.

Etapa 3: aplicação do modelo HAND

De posse do modelo HAND (ou grade HAND), a última etapa classifica todos os pontos da grade HAND com base nos seus respectivos potenciais gravitacionais relativos. Assim, o MDT é reclassificado com base na diferença entre a cota do canal mais próximo e as cotas da planície de inundação e/ ou das encostas adjacentes a este canal. Esta classificação é uma forma de agrupar alturas relativas em classes equipotenciais arbitrárias, definindo áreas por categorias de propriedades hidrológicas, associadas à rede de drenagem. A Figura 26 resume as etapas e apresenta um exemplo da aplicação do algoritmo HAND, associando cada ponto da grade de entrada ao ponto de escoamento mais próximo.

Figura 26 – Normalização do MDT por meio do HAND.



Fonte: Rennó et al. (2008)

Na Figura 26 é apresentada a matriz MDT-HAND, que representa o resultado da execução do algoritmo HAND. Na matriz MDT-HAND é destacado o ponto 19, que significa o novo valor HAND normalizado. Este valor é obtido pelo resultado da subtração entre o valor altimétrico original do MDT de entrada e o valor altimétrico do ponto de drenagem mais próximo à ele. Ou seja, o ponto com o valor altimétrico igual à 72 no MDT original, terá como destino na rede de drenagem o ponto com valor

altimétricos igual a 53. Simplificadamente, significa que o ponto analisado está a 19 m acima do seu ponto de drenagem mais próximo.

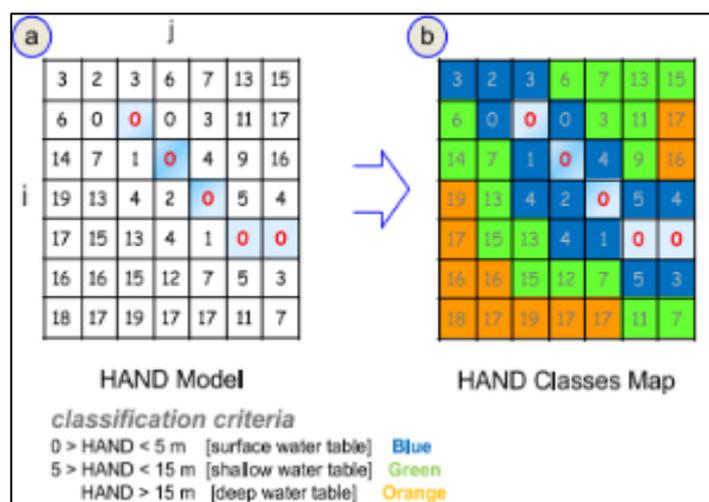
Sobre a imagem HAND efetuou-se uma reclassificação visando revelar diferentes zonas que representam níveis potenciais de risco à inundação (NOBRE et al., 2016). Para isso, utilizou-se o software QGIS versão 4.3.3, com a ferramenta “Reclassificação de um raster”.

Nobre et. al. (2011) e Rennó (2008) em seus artigos detalham que os terrenos são classificados como mais ou menos suscetíveis a enchentes, para isso é feita a classificação dos terrenos através dos desníveis relativos. Por exemplo, se um ponto está a 5 m HAND acima do rio mais próximo, este ponto terá mais chances de ocorrer uma enchente do que outro ponto cujo desnível seja de 15 m HAND para o mesmo rio.

Segundo a classificação de Nobre (2011), a imagem HAND foi zoneada em 03 (três) classes, que representam áreas potenciais de risco à inundação, sendo elas: baixa, média e alta. As alturas utilizadas para fazer o zoneamento, são referentes a cota fluviométrica do rio analisado. Para este projeto, a cota de zero risco, usaremos como referência 1cm a menos do dado fluviométrico registrado pela Defesa Civil, referente a cota que atinge as primeiras casas (8,54m).

- Susceptibilidade Nula: 0 – 8,53m; SEM RISCO
- Susceptibilidade Alta: 8,54 -14,02m; COM RISCO
- Cota de Alerta – 7,50 m

Figura 27: Procedimento da classificação no HAND



Fonte: Nobre et. al. (2011)

Dessa forma, utilizou-se o *Terra View* para se produzir as principais modelagens hidrológicas necessárias para a delimitação de terrenos sujeitos à inundação, sendo estas: Mapa de Fluxo da Drenagem (*.GEOTIFF), Mapa de Área de Contribuição (*.GEOTIFF), Mapa de Rede de Drenagem (*.GEOTIFF), Mapa de Trechos de Drenagem (*.SHP), Mapa de Microbacias (*.GEOTIFF e *.SHP), e o HAND (*.GEOTIFF).

Os procedimentos metodológicos para a realização do estudo são divididos em 4 partes:

- 1) Recorte da área de estudo;
- 2) Geração de mapas de fluxo de drenagem com base no MDT;
- 3) Determinação da área de contribuição, rede de drenagem, microbacias, trechos de drenagem e HAND;
- 4) Reclassificação das diferentes zonas que representam níveis potenciais de risco à inundação através do Software *Qgis*;
- 5) Comparação da mancha de inundação com áreas historicamente afetadas

Etapa 1: correção do MDT topográfico e direção do fluxo de drenagem (DFD)

Conforme explanado na metodologia do modelo HAND, serão realizadas correções de incoerências altimétricas no MDT adicionado. Esses passos de correção do MDT e DFD foram realizados no *TerraView* versão 0.4.5, a partir das ferramentas *Hydrological Tools*, busca-se a ferramenta *Flow Extraction*. A correção é gerada junto com Fluxo de drenagem na primeira etapa.

Etapa 2: Obtenção da Rede de Drenagem

Nesta etapa, será realizado no Software *TerraView*, foi calculada a área de contribuição, através da Ferramenta *Contributing Area*. Posteriormente, é extraído a rede de drenagem através da Ferramenta *Drainage Extration*, a partir de um limiar de 1000⁹ estabelecido pela autora, nesta etapa o DFD é utilizado na geração de um mapa de drenagem. O MDT original será processado pelo HAND e dele resultará o mapa de drenagem, onde sua referência é a topografia da região trabalhada e não o nível médio dos mares.

Etapa 3: Obtenção dos mapas de segmento de drenagem e microbacias

Nesta etapa são gerados mapas que ajudam a identificar por onde a água ira escoar e se acumular na superfície. O 'mapa de segmento de drenagem', converte a rede de drenagem em segmentos que serão classificadas pela ordem de Stharaler ¹⁰ e posteriormente é convertido em linhas vetoriais. O mapa é gerado através da ferramenta *Segments* do Software *TerraView*. O Mapa das microbacias serão gerados através da Ferramenta *Mini Basins* no *TerraView*.

⁹ O limiar define o nível de detalhamento da rede de drenagem, ou seja, o acúmulo acima desse limiar é considerado drenagem (quando dizemos para o programa que utilizaremos uma Limiar de 1000, quer dizer que a partir de uma área de contribuição de 1000m² o *TerraHidro* começa a desenhar a montante da rede como se fosse onde marcar a "nascente").

¹⁰ Esta numeração foi introduzida em hidrologia por Robert E. Horton (1945) e Arthur Newell Strahler (1952, 1957). Neste domínio é conhecida como ordem sequencial de Strahler e é usada para definir o tamanho de um trecho da rede fluvial, baseando-se na hierarquia dos afluentes.

Etapa 4: Obtenção do Mapa HAND e classificação das áreas de inundação a partir do software Qgis

Através da Ferramenta *HAND* do software *TerraView* será gerado o mapa *HAND* da área de estudo (*.TIFF). Com base neste arquivo, será exportado para o software *Qgis*, e através da ferramenta “*r.recorde*”, será possível reclassificar as zonas de inundações como baixo, médio e alto risco de inundação. Essa ferramenta, faz parte de um algoritmo responsável pela reclassificação de um arquivo raster, a função desse algoritmo é transformar os dados que compreendem uma representação contínua para uma representação discreta.

Compreende-se por representação contínua dados que são complexos para serem utilizados em qualquer projeto de mapeamento, pois na geração do mapa torna-se difícil estipular as fronteiras das áreas demarcadas. Comumente, a representação contínua é utilizada em raster de declividade, elevação, etc. Já a representação discreta, faz a desratização desses dados e os agrupa em áreas específicas. Esse tipo de representação, comumente é encontrada na literatura para gerar mapas de hipsometria, uso e ocupação do solo, mapa de solos etc.

3.6 Análise comparativa entre as manchas de inundação

Nesta etapa foi realizado uma análise comparativa entre as manchas de inundação determinadas através do modelo *HAND* e imagens de satélite (alta e média resolução espacial), datadas da ocorrência de eventos históricos. Para tanto, utilizou-se o Software *Qgis*.

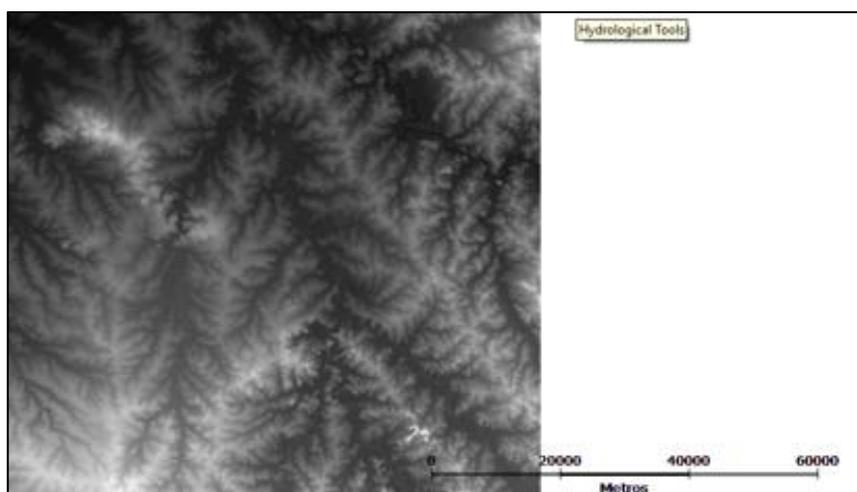
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1 Caracterização da altimetria

Para simulação no modelo HAND, faz-se necessário dados de altimetria do terreno. Para tanto, utilizou-se dados do MDT da área estudada proveniente do satélite ALOS – sensor PALSAR (Figura 28)

Para esta etapa do estudo, utilizou-se o software Terra para manipulação dos dados de altimetria e geração dos mapas temáticos, como: fluxo de drenagem, áreas de contribuição, rede de drenagem e respectiva classificação, microbacias baseadas nos segmentos, microbacias baseadas no fluxo e, por fim, no MDT normalizado através da ferramenta HAND.

Figura 28 – MDT da área de estudo (satélite ALOS, sensor PALSAR)



Fonte: Autoria Própria

Posteriormente, foi gerado o mapa de fluxo de drenagem, no qual, origina uma grade regular definindo as direções de fluxo, adotando por base a linha de maior declividade do terreno. Esta nova grade numérica gerada determina a direção de maior declividade de um pixel em relação aos seus oito pixels vizinhos. Deste modo, ocorre a descrição numérica da direção que o fluxo de água irá percorrer – Figura 29.

Figura 29 - Croqui do fluxo de drenagem



Fonte: Autoria Própria

Em seguida, gerou-se o mapa das áreas de contribuição, que consiste na representação da linha composta pelos pixels selecionados na etapa anterior, contendo os respectivos valores de acúmulo de água dentro de cada pixel – Figura 30.

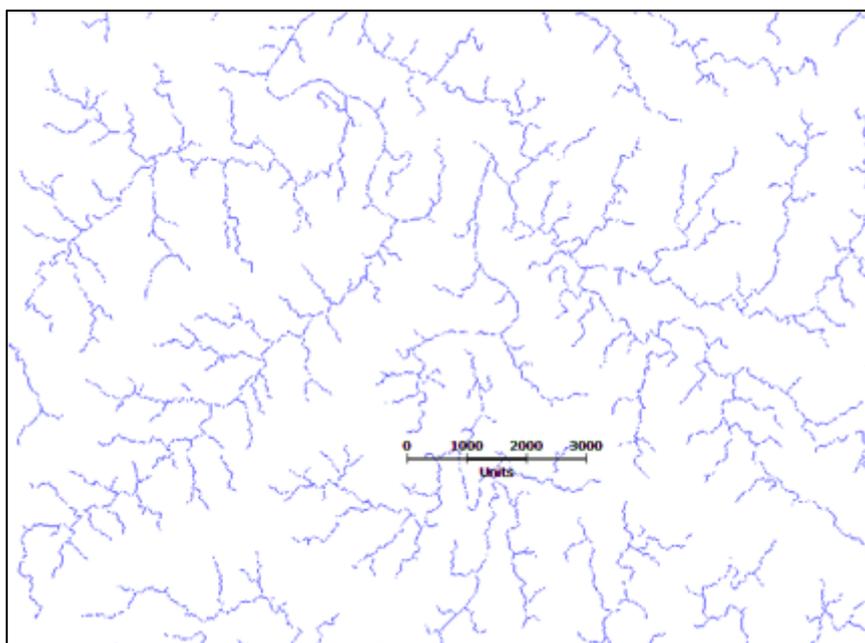
Figura 30 - Croqui das áreas de contribuição



Fonte: Autoria Própria

Em seguida, foi gerado o mapa de rede de drenagem, que é representado pelas células cuja acumulação seja maior que um limiar definido. Para este estudo, foi utilizado um limiar de 1000 m². O software compreende o termo limiar como uma área que ele utiliza para iniciar o desenho de uma rede de drenagem, isso significa que a partir de uma área de contribuição de 1000 m² o software começa a desenhar a montante da rede. É importante compreender, que quanto maior o limiar, menor a densidade de drenagem, ou seja, considera-se, neste caso, apenas os cursos d'água principais (maior ordem). Limiares menores incluirão as drenagens menores, aumentando o detalhamento da rede de drenagem considerada (Figura 31).

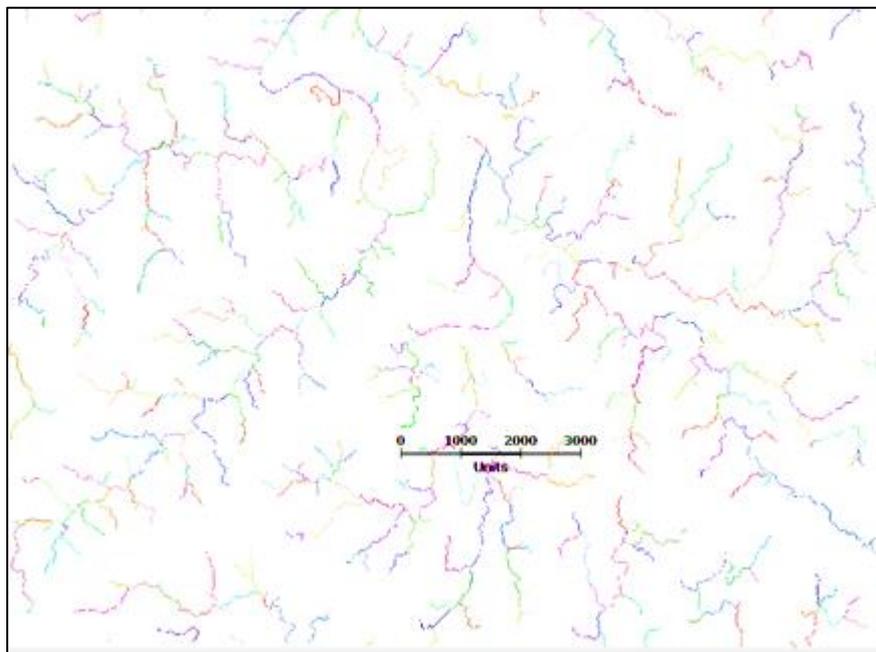
Figura 31 - Croqui de rede de drenagem



Fonte: Autoria Própria

Poteriormente, foi elaborado o mapa referente ao segmentos da rede de drenagem, ou seja, durante o processo de criação desse mapa todos os segmentos da rede de drenagem são categorizados pela sua ordem e, posteriormente são convertidos em linhas vetoriais. Essa categorização ocorre através da ordem de Strahler ou do número de Horton–Strahler. A classificação é feita através das cores (Figura 32).

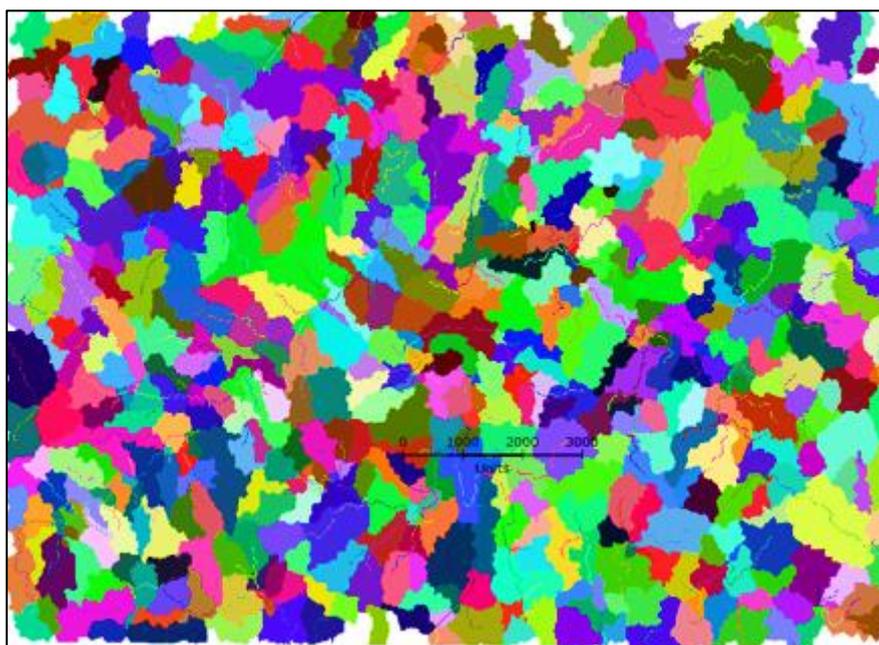
Figura 32 – Croqui de classificação da drenagem segundo Horton-Strahler



Fonte: Autorial Própria

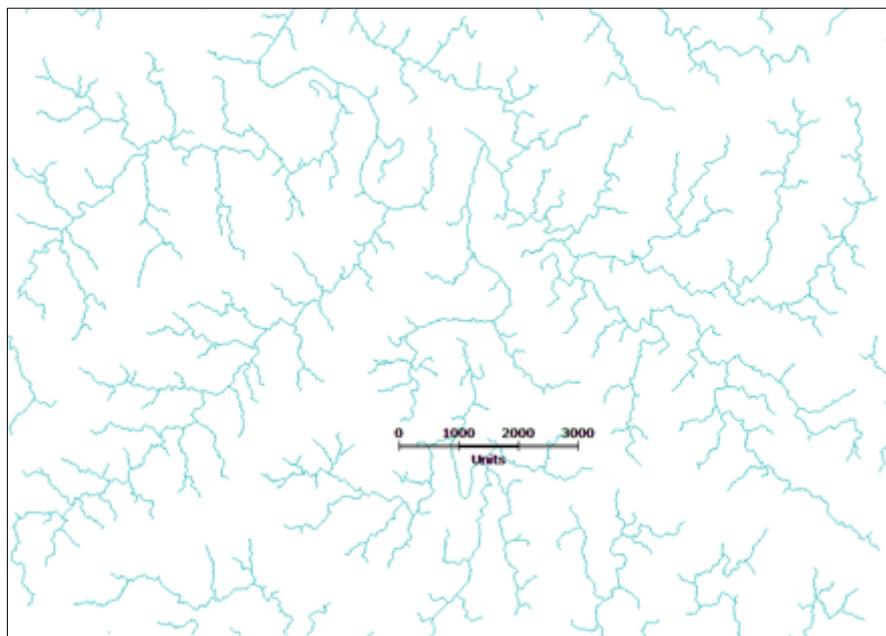
Em seguida, foi gerado o mapa das microbacias, apartir da rede de drenagem, segundo o fluxo e segmentos (Figuras 33 e 34).

Figura 33 – Croqui das Microbacias baseadas nos segmentos



Fonte: Autorial Própria

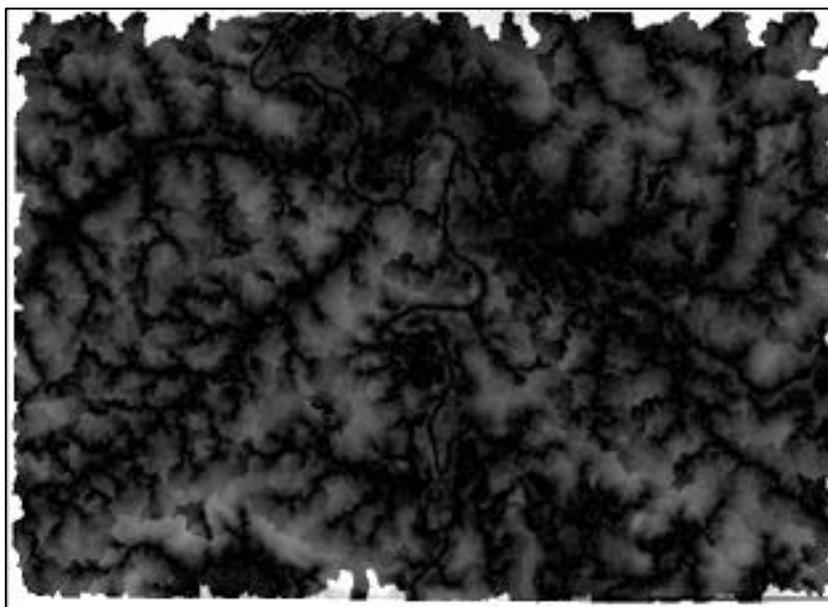
Figura 34 – Croqui das Microbacias baseadas no fluxo



Fonte: Autoria Própria

Por ultimo, gerou-se o mapa do modelo HAND. Nesse imagem (.tif), o nível de referência deixa de ser fixo em relação ao nível do mar e passa a ser relativo à rede de drenagem mais próxima (Figura 35).

Figura 35 – Croqui do MDT normalizado através da ferramenta HAND



Fonte: Autoria Própria

4.2 Simulação das imagens no modelo HAND

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações obtidas pelo modelo HAND para as cotas de inundação, consideradas: sem risco, com risco e risco de alerta.

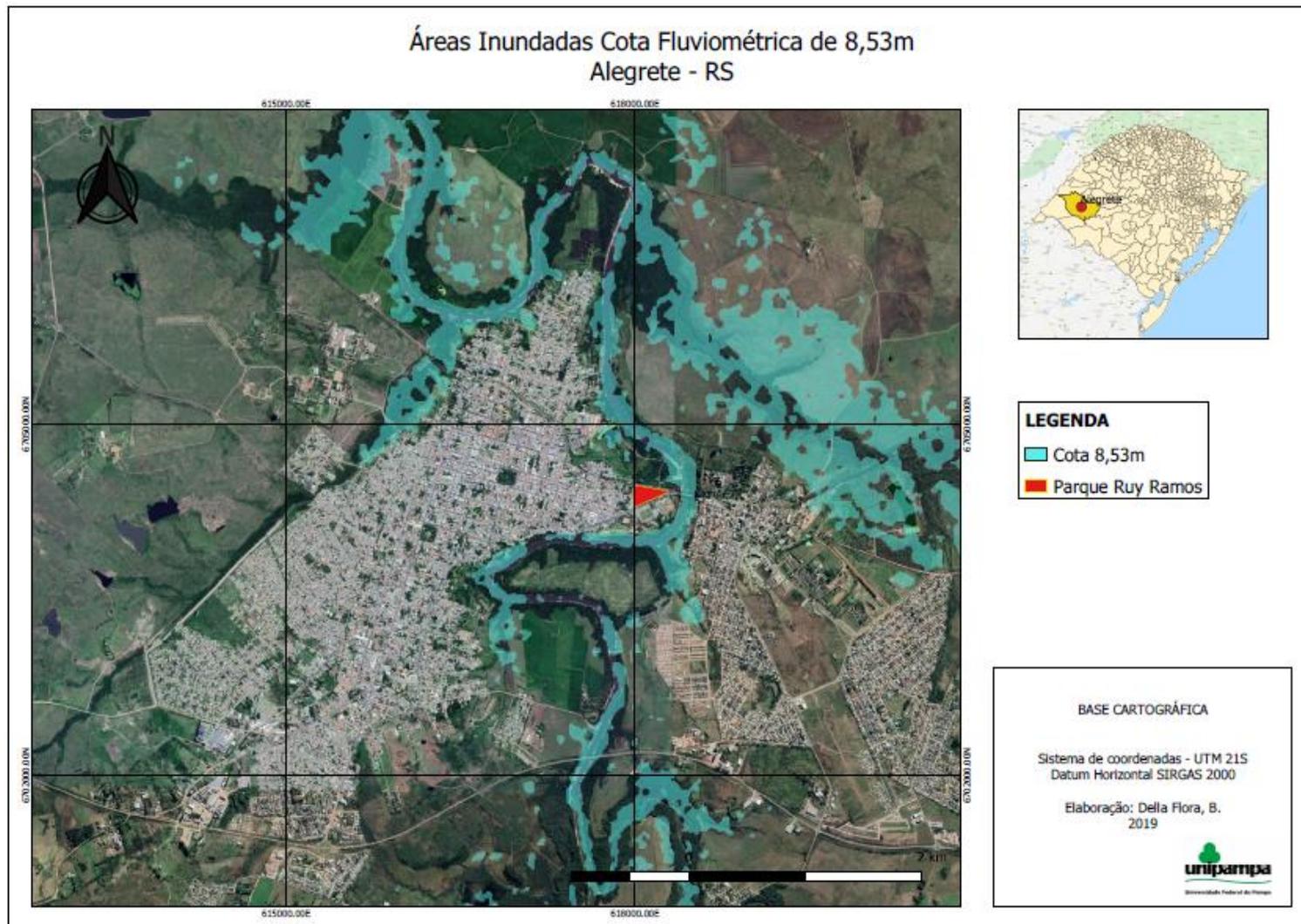
Estas cotas, referem-se a 8,54 - 14,02m (com risco) correspondente a cota que inunda as primeiras residências até a cota da segunda maior inundação ocorrida no município, conforme relata nos dados do CPRM, através da reportagem do Jornal Zero Hora (Figura 18). Já a cota de 8,53m (sem risco), refere-se a cota inferior à registrada na Defesa Civil (8,54m), que identifica o início da inundação. Por último, a cota de alerta (7,50m) é referente a 1,03 m abaixo da cota mencionada pela Defesa Civil, com o intuito de introduzir uma medida preventiva com base no mapa simulado, como por exemplo um alerta às famílias que residem nas áreas críticas.

Ao longo da criação dos mapas, foram identificados pontos específicos para maior veracidade na discussão dos resultados, visto que, são pontos comumente inundáveis, ou que foram registrados por terem sido inundados. Como exemplo, cita-se a Parque Ruy Ramo (Praça dos Patinhos).

- Cota Sem Risco de inundação (0 – 8,53 m)

A mancha na cota de inundação baixa (0 a 8,53m), compreende uma superfície de inundação de 6,83 hectares. Esta cota, foi simulada com 1 cm inferior a cota que inicia a inundação nas primeiras casas, segundo a Defesa Civil, como podemos analisar na Figura 36. Na imagem, a mancha em azul se refere a área inundada com essa cota fluviométrica.

Figura 36 – Mapa da mancha SEM RISCO de inundação

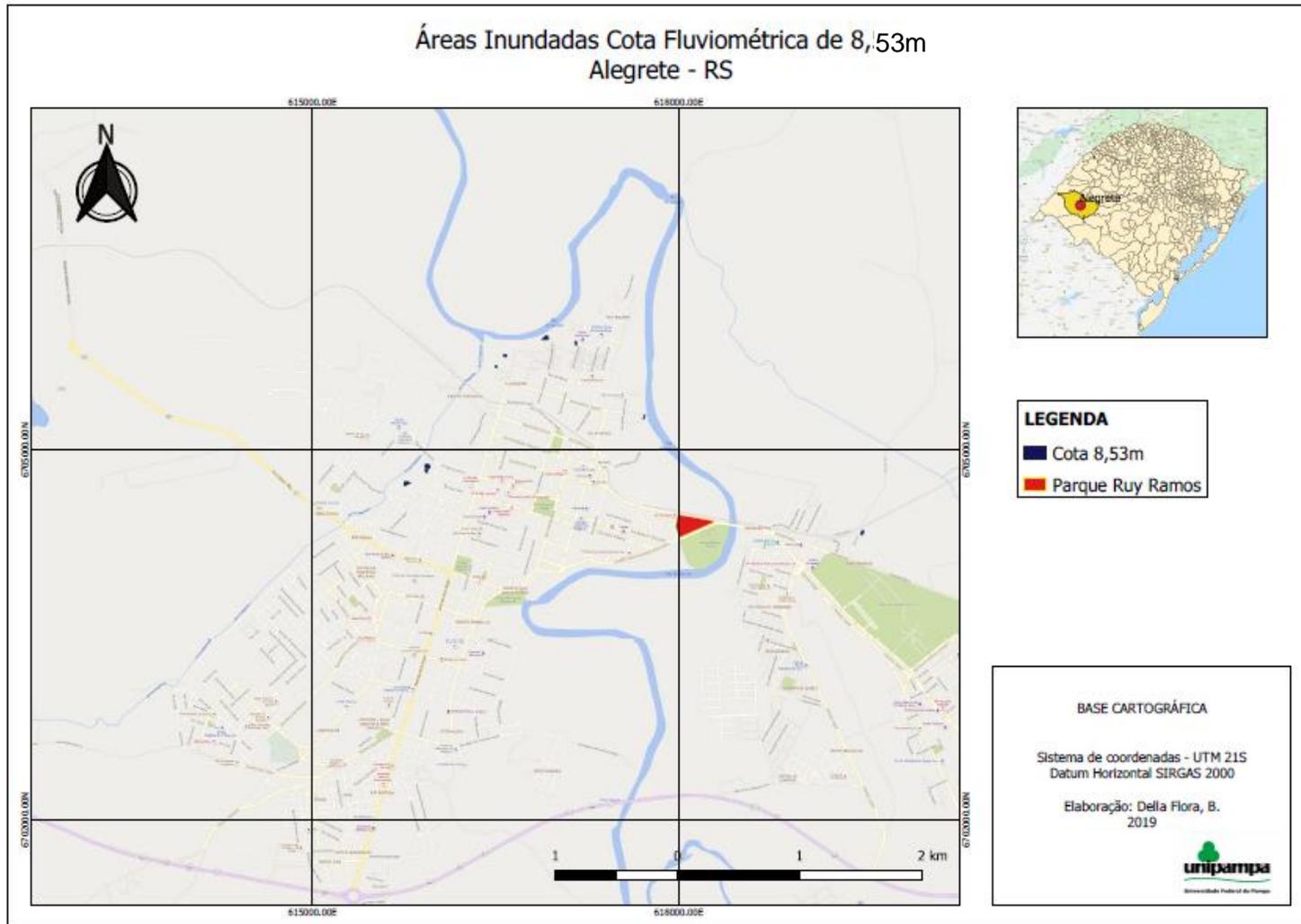


Fonte: Autoria própria

Após simulação da cota 8,53m no modelo HAND, foi possível analisar as áreas possivelmente afetadas pela mancha de inundação.

Entretanto, mesmo simulando um valor de cota inferior ao informado pela Defesa Civil (8,54m), ao qual foi atribuído zero risco, visto que em valores numéricos está abaixo do nível para atingir as primeiras famílias, a cota de inundação 8,53m atinge uma pequena área dos bairros Vila Nova, Macedo, Canudos e Rui Ramos. Esta informação pode ser observada no mapa de demarcação de bairros afetados, na Figura 37. Esta diferença, é aceitável visto que se trabalha na escala de centímetros.

Figura 37 – Mapa de demarcação de bairros afetados

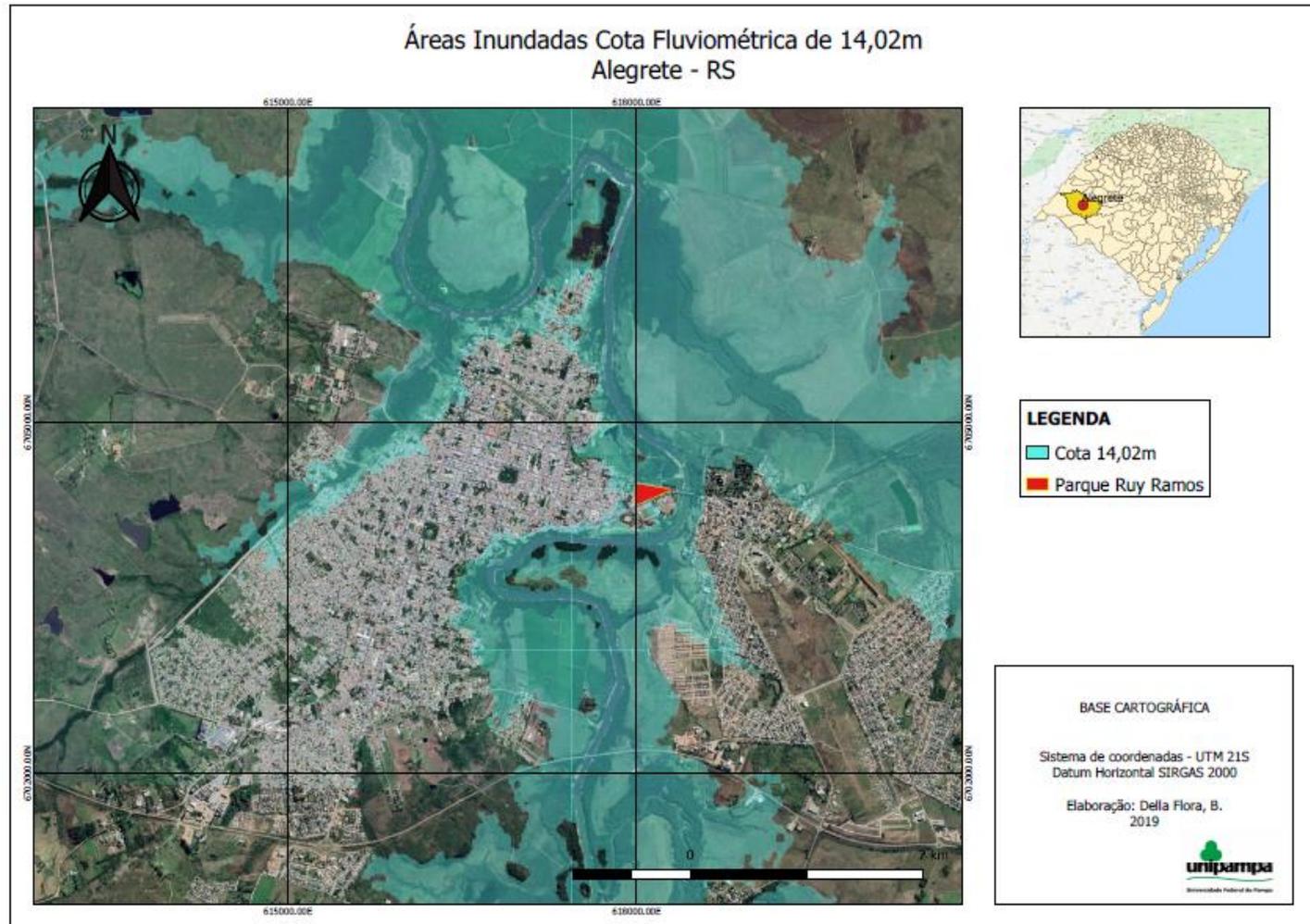


Fonte: Autoria própria

- Cota Com Risco de inundação (8,54 – 14,02 m)

A mancha na cota com risco de inundação, compreende uma superfície de 45.414,12 hectares. Esta cota está representada pela inundação ocorrida em 12 de janeiro de 2019, como podemos analisar na Figura 38. Na imagem, a mancha em azul se refere a área inundada com essa cota fluviométrica.

Figura 38 - Mapeamento da inunda o com cota fluviométrica de 14,02m sobre imagem do Google Earth.

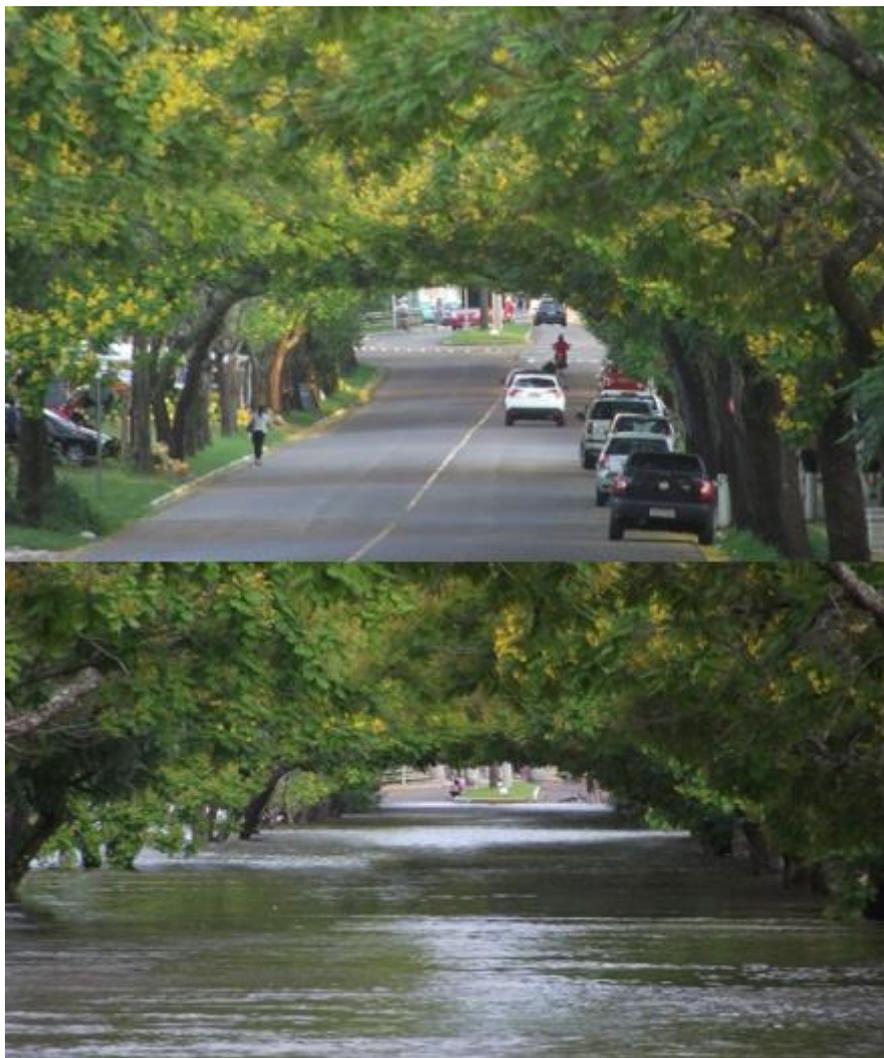


Fonte: Autoria própria

De acordo com a mancha de inundação sobre os bairros do município, apresentado na Figura 38, podemos analisar que 23 (vinte e três) bairros foram afetados, sendo eles : Rui Ramos, Vila Nova, Canudos, Santo Antônio, Macedo, Boa Vista, Restinga, Tancredo Neves, Medianeira, São João, Independência, Centro, Ibirapuitã, Osvaldo Aranha, Promorar, Segabinazzi, Honório Lemes, Airton Senna, Centenário, Vila Izabel, Capão do Angico e Sant Pastous, Ulisses Guimaraes, Balneário Caverá e Bairro Renascer. Comparando às faixas analisadas, citadas como críticas tanto no trabalho de Santos. S. (2015), como de Knierim e Tapahuasco (2015), 15 (quinze) bairros inundados na simulação estão citados nessas literaturas. Ficam de fora os bairros Boa Vista, Independência, Oswaldo Aranha, Segabinazzi, Airton Senna, Capão do Angico, Sant Pastous e Ulisses Guimaraes, Balneráro Caverá e Renascer.

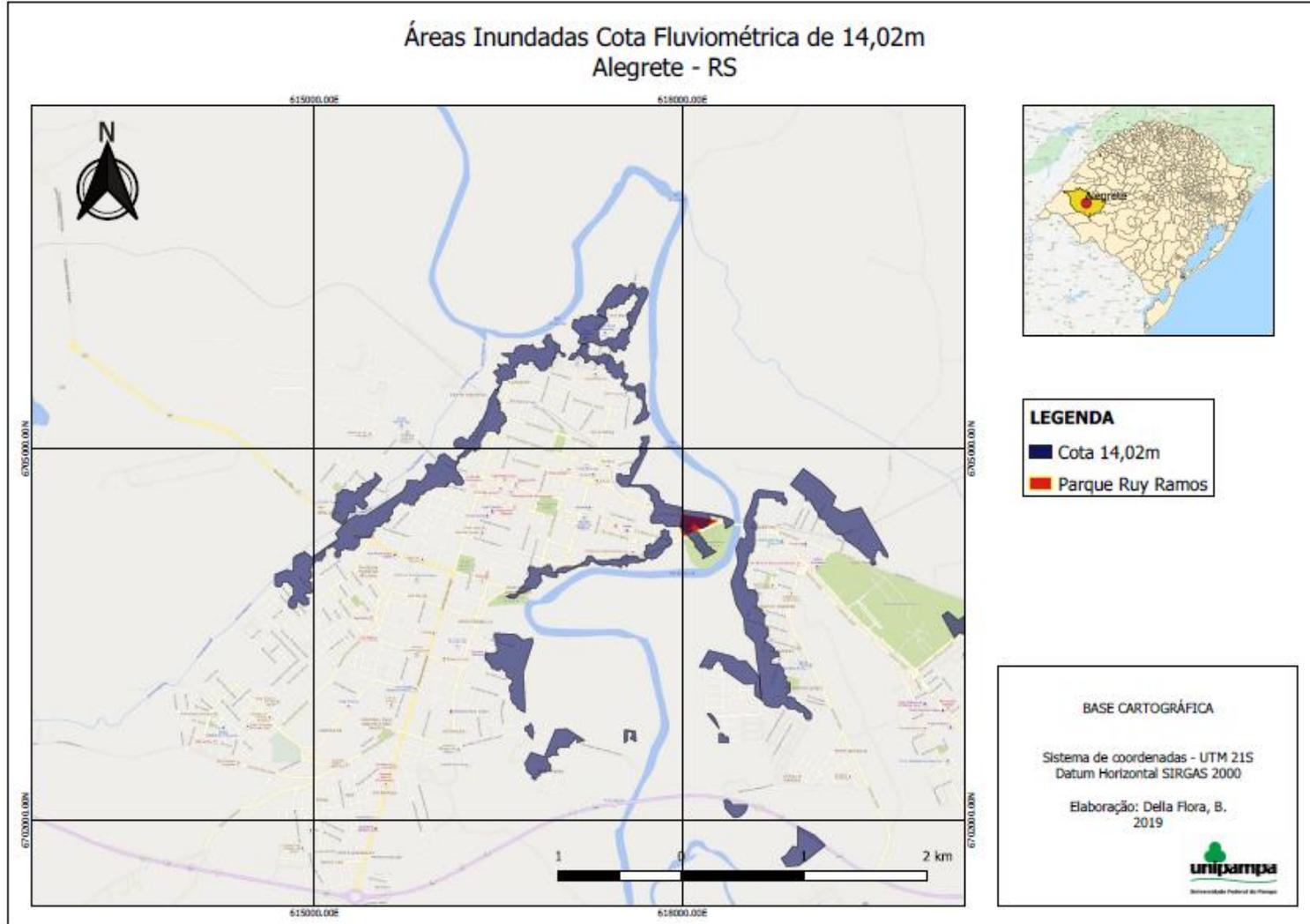
Podemos analisar no mapa da figura 38, que segundo a simulação, um dos pontos turísticos do município, o parque Ruy Ramos foi inundado pela cheia com a cota de simulação de 14,02m, registrada em Janeiro de 2019. Isso pode ser comprovado na Figura 39, registrada por um morador durante o período da inundação, que demonstra o grau de risco que essa área apresenta.

Figura 39 - Comparação entre fotografias datadas de antes da inundação de 2019 e durante.



Observa-se na Figura 40 as áreas urbanas afetadas pela inundação, destacadas em amarelo, que inundaram um total de 23 (vinte e três) bairros, inclusive o Parque Ruy Ramos (Praça dos Patinhos).

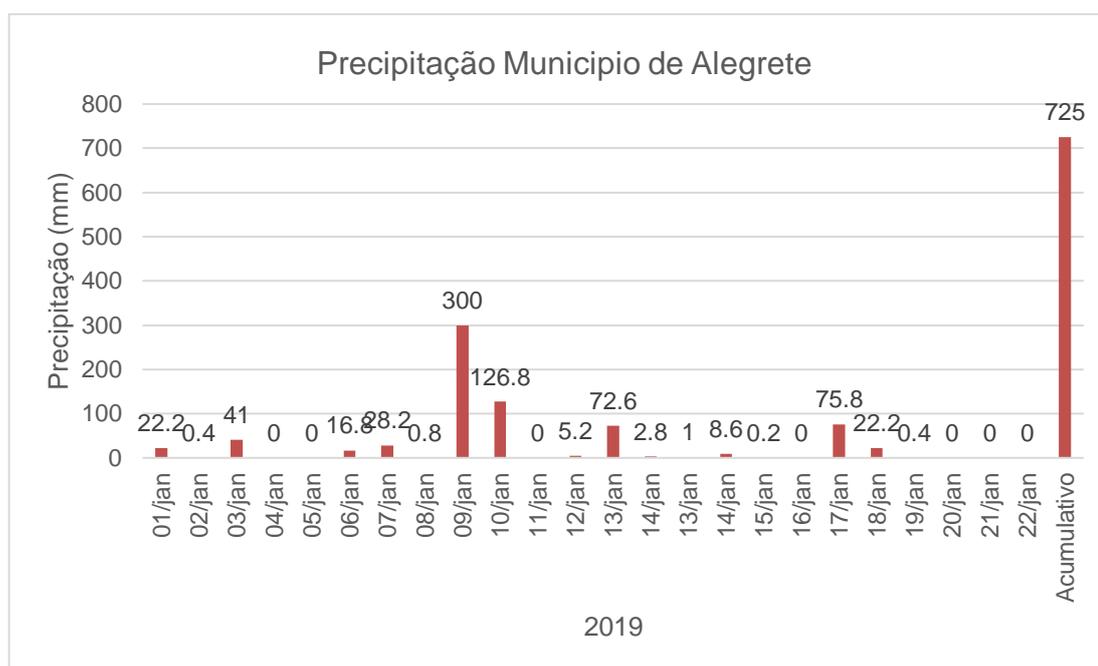
Figura 40 - Mapeamento de inundação na cota de 14,02m sobre bairros do município de Alegrete



Fonte: Autoria própria

Um fator importante a ser analisado, se refere a precipitação registrada pelo instituto CEMADEN durante o período que antecede a data que a cota de 14,02m foi atingida. Analisando o Gráfico 1, podemos perceber que o acumulativo pluviométrico chegou a 541,4 mm em 12 dias. O que significa, 401,03% de chuva superior à média mensal (30 dias) de 135mm esperada para o município de Alegrete, segundo dados do CEMADEN. Estes dados, justificam a cota que o canal do rio Ibirapuitã atingiu.

Gráfico 1 - Análise Pluviométrica de Alegrete-RS



Fonte: Dados Cemaden¹¹

Outro fator importante, pouco considerado pelos órgãos públicos, é o conhecimento das precipitações na cidade de Santana do Livramento – RS, onde nasce o rio Ibirapuitã. Através de metodologias conhecidas para calcular o tempo de concentração para bacias hidrográficas rurais, Silveira (2005) desenvolveu uma série de estudos quanto ao desempenho das fórmulas de tempo de concentração de bacias hidrográficas, tanto rurais ou urbanas. Em seu trabalho, Silveira constatou que para bacias hidrográficas rurais com área até cerca de 12.000 Km² as fórmulas de Corps of Engineers, Vem te Chow e Kirpich apresentam ótimo desempenho. Observa-se

¹¹ Disponível em: <http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>

que, a Bacia do Ibirapuitã possui uma área de 5.965km² (um valor de área, que representa metade do limite utilizado nessas fórmulas).

Através das equações citadas, foi determinado o tempo de concentração da bacia do rio Ibirapuitã, conforme mostra a Tabela 2, a seguir

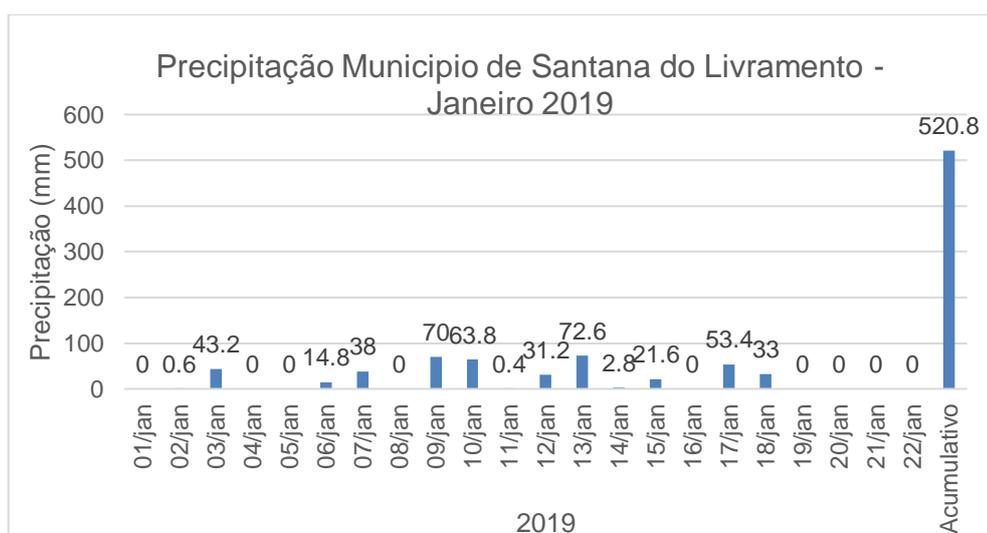
Tabela 2 – Tempo de Concentração Bacia do Ibirapuitã

| MÉTODO | EQUAÇÃO: Tc (horas) | Dias |
|--------------------|---------------------|------|
| CORPS OF ENGINEERS | 40.37 | 1.68 |
| VEM TE CHOW | 42.51 | 1.77 |
| KIRPICH | 54.75 | 2.28 |

Fonte: Autoria Própria

Segundo análise da tabela 2, percebe-se que, as precipitações ocorrentes na cidade de Santana do Livramento (cabecera do Rio Ibirapuitã) levam em média até 2 (dois) dias para elevar o nível do rio na zona urbana de Alegrete. Nesse contexto, buscou-se dados meteorológicos disponibilizados pelo INMET, quanto a precipitação do município de Santana do Livramento até dois dias antes a marcação da segunda maior cota fluviométrica do Rio Ibirapuitã, datado em 12/01/2019. Podemos observar no Gráfico 2, que durante o período de 10 dias ocorreu uma precipitação de 230,4mm, o dobro da média esperada para o mês de Janeiro, segundo dados do INMET.

Gráfico 2 - Análise Pluviométrica de Santana do Livramento-RS



Fonte: Dados INMET¹²

- Cota para Alerta (7,50 m)

A terceira cota simulada, refere-se a uma possível política de prevenção a ser utilizada no município, de forma a sinalizar às famílias que a inundação se aproxima de suas moradias. Um sistema de alerta, que possa ser emitido quando a cota fluviométrica do rio atingir 7,50m. Esta cota foi adotada como nível de alerta, pois nenhuma casa é atingida. Isso pode ser observado na Figura 41 do Mapa de Alerta.

Os primeiros bairros que são atingidos com o aumento da cota fluviométrica são: Vila Nova, Macedo, Canudos e Rui Ramos.

¹² Disponível em : http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTgwNA==

4.3 Análise comparativa SIMULAÇÃO X IMAGEM REAL

Para realizar a comparação entre as imagens que resultaram da simulação do método HAND, com uma imagem do evento real, necessitou utilizar um satélite diferente da imagem utilizada para simular a inundação.

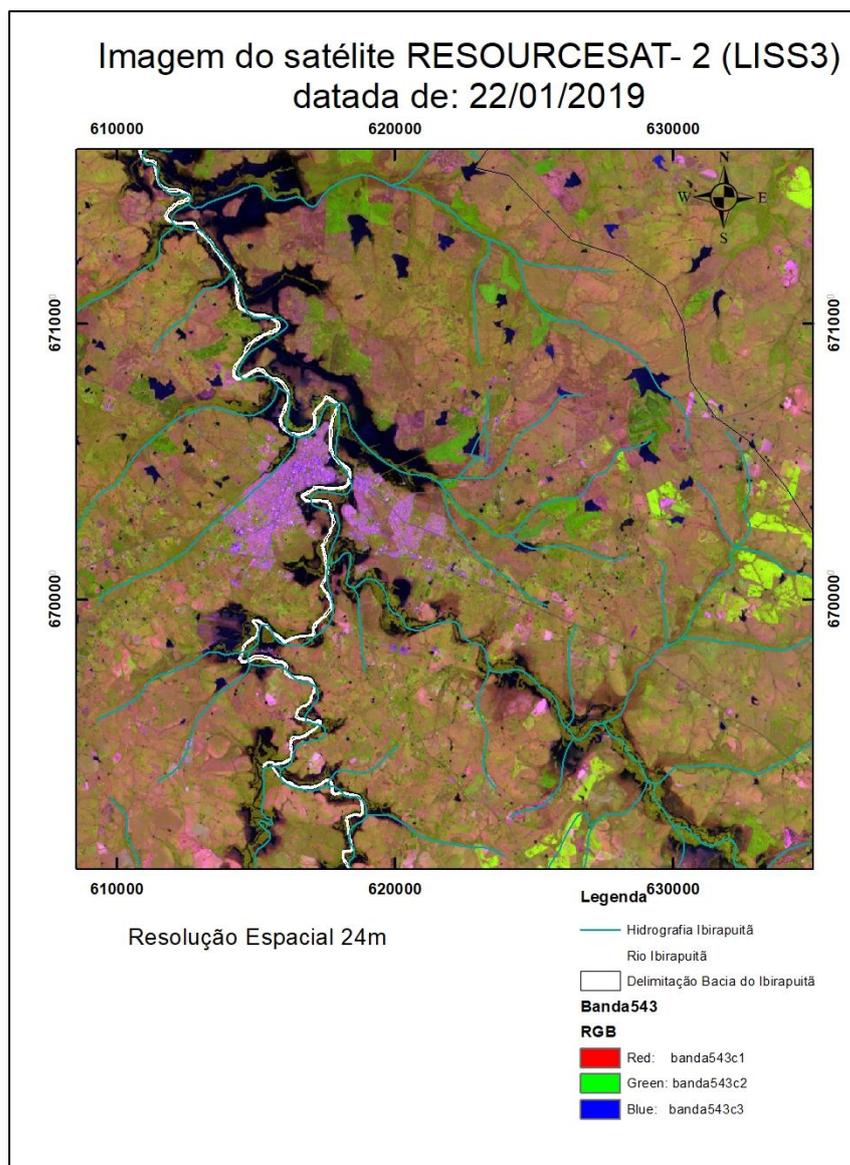
Para o dado de entrada no HAND, utilizou-se o satélite ALOS PALSAR. Porém, esse satélite parou de operar no ano de 2011. Com isso, buscou-se utilizar o satélite SENTINEL – 2, para assim, manter a resolução espacial inferior a 12,5 m. Entretanto, a busca das imagens não alcançou sucesso, visto que como pode ser observado no Gráfico 1, a precipitação se estendeu até o dia 19/01 e com isso as imagens encontradas eram de péssima qualidade, pois apresentaram alta porcentagem de cobertura de nuvens. Nesse contexto, através do site do INPE¹³, buscou-se em torno dos 20 satélites disponíveis alguma imagem de alta resolução e com baixa cobertura de nuvens. Entretanto, estudando os dados do Gráfico 1, tornamos a buscar imagens entre os dias 20 a 22/01, visto que, não se obteve precipitação durante esse período.

Com isso, utilizamos a imagem do dia 22/01/2019 (10 dias após a cota de 14,02m), que pertence ao satélite RESOURCESAT - 2 (LISS3) com resolução espacial de 24m.

Pode-se observar na Figura 42, a imagem do dia 22/01/19 com composição das bandas espectrais 543, onde demonstra em fundo azul escuro os corpos hídricos e o rio Ibirapuitã. Pode-se observar na imagem que mesmo após 10 dias, a inundação se estende sobre a área urbana do município.

¹³ <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>

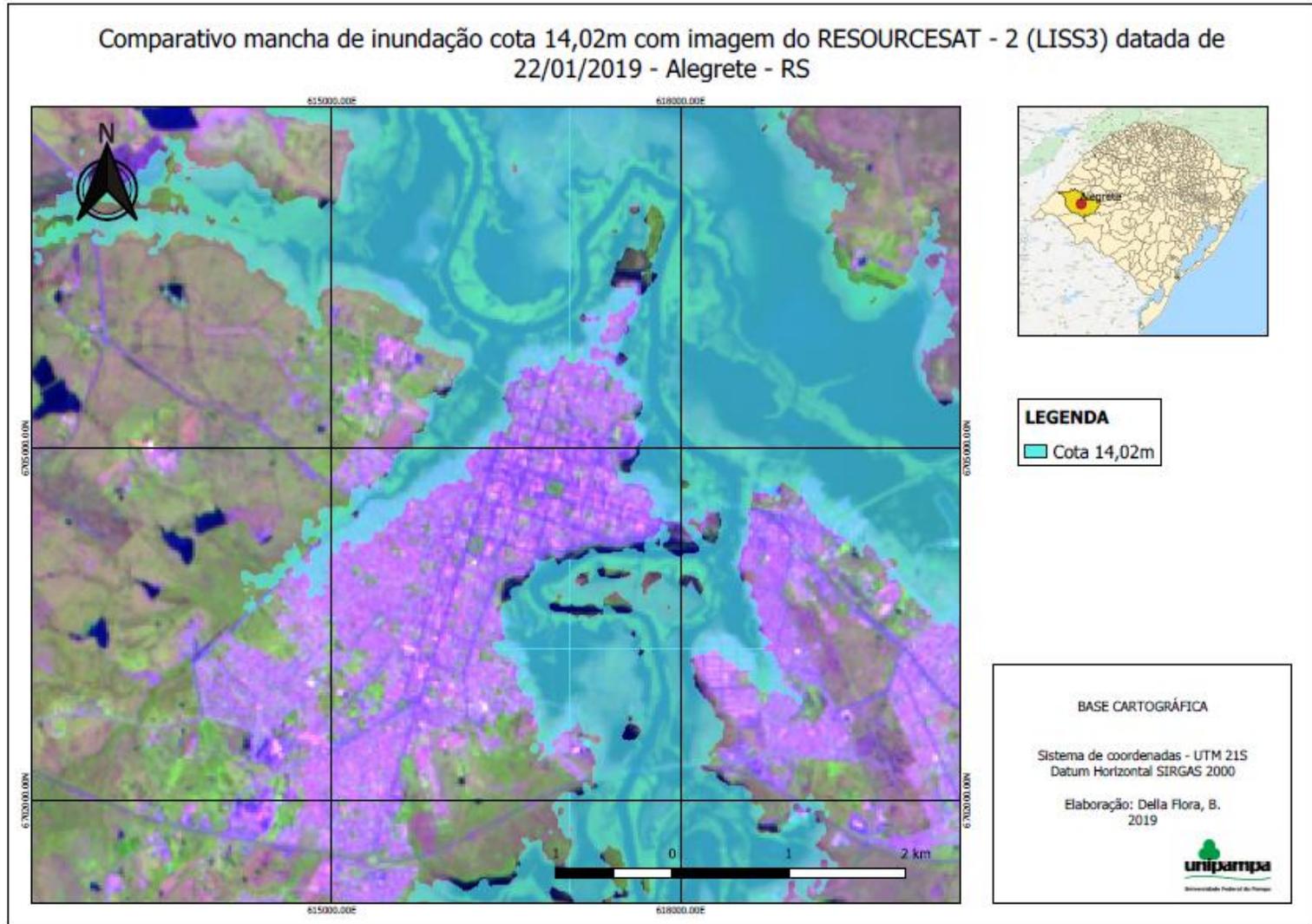
Figura 42 – Imagem LISS 3



Fonte: Autoria própria

Com o intuito de comprovar a confiabilidade da simulação, analisou-se eventos reais com os dados que o estudo forneceu. Na Figura 43, podemos observar a projeção da inundação simulada, utilizando a cota da segunda maior enchente, conforme relata nos dados do CPRM, através da reportagem do Jornal Zero Hora (Figura 18). ocorrida no município, em 12/01/2019, a qual gerou uma cota de 14,02m, sobre a imagem do satélite RESOURCESAT – 2 datada de 22/01/2019.

Figura 43 - Comparação SIMULAÇÃO x IMAGEM 22/01/2019



Fonte: Autoria própria

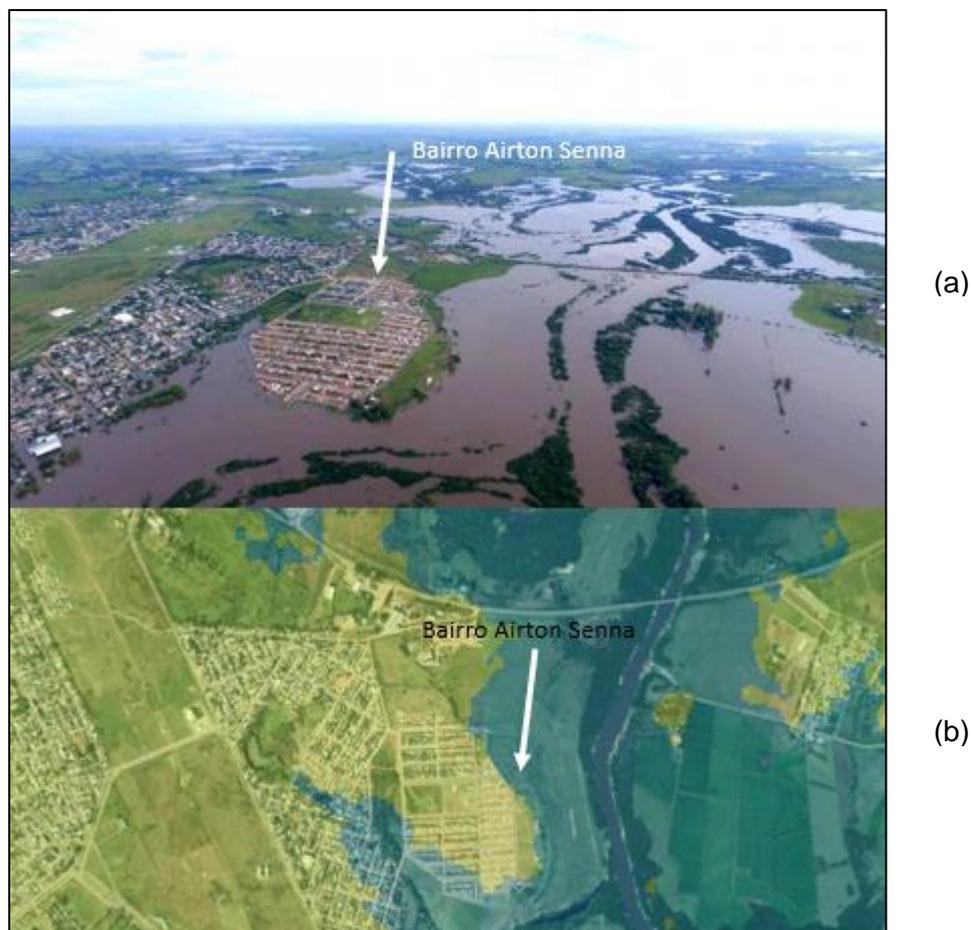
Analisando o Mapa da Figura 43, podemos afirmar que mesmo passados 10 (dez) dias após a cota que simulou a mancha azul, a inundação continuava intensa. Isso tornou-se uma característica desse evento, visto que se passaram 4 (quatro) dias sem precipitação e a cota fluviométrica apresentou pouquíssima redução.

No intuito de validar o modelo HAND utilizado no presente estudo, bem como a dificuldade em obter imagens de satélite nas datas em que ocorreu os registros de níveis máximos no rio Ibirapuitã, utilizou-se fotografias obtidas em vôo panorâmico na ocasião das inundações (Figura 44).

Na Figura 44 podemos comparar as áreas inundáveis que o modelo simula para a segunda maior cota registrada até a atualidade (14,02m), com uma imagem real da inundação ocorrida em 12/01/19. Na imagem (a), podemos observar a área inundada pelas águas do rio Ibirapuitã. Na imagem (b), a mancha azul representa a área inundada simulada no modelo HAND com cota de inundação de 14,02m. Analisando a Figura 44, percebe-se que a área inundada na imagem (a), coincide com a área que o modelo simula como inundada na cota escolhida na imagem (b).

Com base na análise acima exposta, verifica-se que o modelo utilizado no presente estudo apresentou confiabilidade na modelagem.

Figura 44 - Comparação Imagem 12/01/2019 durante a inundação (a) versus simulação do modelo HAND (b)



Fonte : Defesa Civil

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso do modelo HAND demonstrou ser adequado para mapear o evento de inundação ocorrido em Janeiro de 2019 na bacia do rio Ibirapuitã. O uso da cota diária da estação de Alegrete no rio Ibirapuitã permitiu ajustar e avaliar a simulação de inundação gerada pelo modelo HAND, sendo um parâmetro de referência fundamental para o resultado encontrado.

Uma das limitações da precisão dos resultados do modelo HAND está condicionado à qualidade da resolução das imagens, quanto mais alta a resolução, melhor a modelagem. O modelo apresenta grande potencial de aplicação desde que estejam disponíveis dados de superfície para mapeamento de áreas inundáveis ou para simular possíveis cenários futuros.

Os mapas gerados através das simulações com risco de inundação, possibilitaram listar os 23 (vinte e três) bairros afetados, os quais estão listados em trabalhos anteriores como áreas de risco a inundação. Podemos perceber também, que as áreas ocupadas e sujeitas a inundações que compreendem porções mais extensas estão junto ao arroio Regalado, nos bairros Canudos, Santo Antônio, Macedo, Izabel, Joaquim Fonseca Milano, Restinga, Sepé Tiraju, Vera Cruz, na margem leste e Boa Vista, na margem oeste. Na porção mais a montante os bairros Grande, Prado e Progresso estão associados a processos menos severos, embora recorrentes, não pela cheia do rio, mas pela alta precipitação, gerando alagamentos que, sem condições para escoar, unem-se a inundação.

Na porção norte do rio Ibitapuitã, posterior a desembocadura do arroio Regalado, são observadas áreas significativas nos bairros Rui Ramos e Vila Nova. Na porção Oeste do Rio Ibirapuitã podemos perceber os bairros Tancredo Neves, Centro, Independência, São João e algumas residências do bairro Medianeira. Situada a margem leste do Ibirapuitã, observamos os Bairros Ibirapuitã, Oswaldo Aranha, Promorar, Segabinazzi, Honório Lemes e Airton Senna. As áreas localizadas próximo ao Arroio Jararaca também são caracterizadas como área de risco, tais como os Bairros Centenário, Capão do Angico, Sant Pastous e algumas residências do Bairro Ulisses Guimaraes. Mais isolados e ao sul, os bairros Renascer e o Balneário Caverá, próximo ao Arroio Caverá tornam-se uma área de risco à inundação.

Apesar das questões ambientais serem bastante incisivas, fatores sociais respondem por grande parte da parcela da população que reside em áreas com risco de inundação. Essas moradias, comumente situam-se em zonas periféricas, de baixo valor imobiliário ou até mesmo, áreas ocupadas ilegalmente. Quando a população é de baixa renda e inexistem projetos públicos que oferecem condições de infraestrutura de maior qualidade, essas mesmas pessoas acabam em uma situação de maior vulnerabilidade.

Através deste projeto, é possível fornecer informações para o planejamento e gestão do uso e ocupação de áreas e apoiar na regulamentação de Leis do Município, através do mapeamento de áreas de riscos ou de áreas de preservação permanente. Como também estabelecer limites e estratégias de ações estruturais ou não estruturais. Considerar que novas habitações podem ser introduzidas em áreas de baixo risco ou sem torna uma alternativa à essas pessoas que vivem em vulnerabilidade socioeconômica e a mercê de inundações em suas cidades. Em aderência a isto, para que as inundações em Alegrete sejam menos impactantes, torna-se necessário desenvolver estratégias de gerenciamento das áreas onde o risco está consolidado.

Toda e qualquer atuação de âmbito político, estabelecida através da gestão administrativa dever atuar na diminuição das vulnerabilidades que assolam os municípios da fronteira Oeste do Estado do Rio Grande do Sul, região caracterizada por ser a mais empobrecida. Dessa forma, diminuindo a exposição ao risco melhorando a situação de moradia das famílias.

Neste contexto, conhecer as áreas inundadas com as cotas estabelecidas configurou este projeto de grande importância, tendo em vista a aprendizagem em um software brasileiro, e que oferece pouco material prático publicado no Brasil. A metodologia utilizada, através do HAND é amplamente difundida no exterior. Portanto, utilizar um software brasileiro para a o projeto valoriza ainda mais a pesquisa no nosso País.

E no que tange as instituições de ensino superior, que cada vez mais deve ser apoiado estudos que apresentem como alternativas viáveis para o desenvolvimento de conhecimento a respeito das áreas de risco, podendo contribuir, desde a identificação das áreas de risco, como também fazendo uso de novas metodologias e

criando ferramentas de forma a auxiliar soluções e mitigações para o problema. Deste modo, a disponibilização de informações e dados obtidos e gerados a partir da presente pesquisa, para os órgãos públicos que atuam diretamente nas áreas afetadas, deverá compor atividade complementar, somando à finalidade de contribuir sob ponto de vista teórico e metodológico na abordagem das inundações.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. **Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas**. Revista FAE Curitiba v. 20, n. 1, p. 129 - 137, jan./jun. 2017

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Rede Hidrometeorológica Nacional. Agência Nacional de Águas, 2018a**. Disponível em: <<http://www3.ana.gov.br/portal/ANA/monitoramento/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua/rede-hidrometeorologica-nacional>>. Acesso em: 23 outubro. 2018.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Sistema de Monitoramento Hidrológico - Telemetria**. Agência Nacional de Águas, 2018b. Disponível em: <<http://mapashidro.ana.gov.br/Usuario/ultimo.aspx?dado=Chuva&nivel=1&bacia=0&origem=123>>. Acesso em: 23 out. 2018

ANDRADE, J.P.M. **Previsão hidrometeorológica visando sistema de alerta antecipado de cheias em bacias urbanas**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BARBOSA, F. de A. dos R. **Medidas De Proteção E Controle De Inundações Urbanas Na Bacia Do Rio Mamanguape/Pb**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Paraíba, João Pessoa – Paraíba.

CEPED/UFSC. **Atlas Brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012**. Vol. Santa Catarina. [s. l.], 2013.

CHAVES, H. A. T. **Projeto de uma estação fluviométrica automática**. Dados, [s. l.], 2013.

COFFERRI, M. **Determinação de vazão em cursos d'água através de diferentes metodologias**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Universidade Federal do Pampa. 2017

CORTES, J. M. **Sistemática de auxílio a decisão para a seleção de alternativas de controle de inundações urbanas**. p. 316, 2009. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) - Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, Brasília.

CPRM SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Rede Hidrometeorológica Nacional**. CPRM,2018 Disponível em <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Apresentacao/RedeHidrometeorologica-Nacional---RHN-304.html> >. Acesso em: 23 out. 2018.

DEFESA CIVIL. Ministério da Integração Nacional. Secretaria de Defesa Civil. **Notificações e Decretos**. Disponível em: <<http://www.defesacivil.gov.br>>. Acesso em: 12 set 2018.

FLORENZANO, T. G. **Iniciação em sensoriamento remoto de imagens de satélite para estudos ambientais**. 3. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

GARCEZ, N.L.; ALVAREZ, A. G.; **Hidrologia**. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Edgard Blücher, 1988. 291p

GOERL, R. F.; KOBIYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. **Xvi Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos**, [s. l.], 2005. Disponível em: <http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005_inundacoes.pdf>

GOMES, L. B. et al. **Mapeando a Amazônia com o satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite)**. Image Processing, [s. l.], p. 1385–1392, 2007.

GRACIOSA, M. P.; MEDIONDO, E. M. **Gestão Do Risco De Inundações No Contexto De Bacias**. XVII Simpósio de Recursos Hídricos, [s. l.], p. 1–16, 2007

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico, 1940, 1980, 2000 e 2010**. Disponível em : <www.ibge.gov.br>.

INPE – Instituto de Pesquisas Espaciais. **Catálogo de imagens do satélite CBERS-4**. 2015. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>. Acesso em: 25 de set. 2018.

KNIERIM, L. S. ; TAPAHUASCO, W. F. C. . **Levantamento das áreas críticas suscetíveis a enchentes, inundações e alagamentos no município de Alegrete/RS**.

In: VII Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2015, Alegrete/RS. Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão. Alegrete/RS: UNIPAMPA, 2015.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M; MORENO, A.D.; OLIVEIRA, P.I.; MARCELINO, V.E.; GONÇALVES, F.E.; BRAZETTI, P. L. L.; GOERL, F.R.; MOLLERI, F. S. G.; RUDORFF, M. F. **Prevenção De Desastres Naturais : Conceitos Básicos**. 1. Ed. Florianópolis: Editora Organic Trading,2006.

LIMA, L. S. de. **Implementação de um modelo hidrológico distribuído na plataforma de modelagem dinâmica**. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais), Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais,2011.

LOU, R. F. **Modelagem hidrológica chuva-vazão e hidrodinâmica aplicada na bacia experimental do Rio Piabanha/RJ**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

MELO, D. H. C. T. B. **Uso de dados Ikonos II na análise urbana: testes operacionais na zona leste de São Paulo**. 2002 Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - INPE - São José dos Campos.

MENDES, H.C.; VERÇOSA, M.M.D.; MATSUNAGA, S.P. E MENDIONDO, E.M.M. (2004). **Hidrossolidariedade como mecanismo de gestão em políticas públicas para a prevenção de riscos hidrológicos**. I Seminário Latinoamericano de Políticas Públicas em Recursos Hídricos. Set 2004, Brasília, DF, ABRH, Anais

MENEZES, D.J. **Proposta metodológica para análise espaço - temporal de inundações: aplicação na área urbana de alegrete – RS**. Dissertação (Doutorado em Geografia, Área de Concentração Análise Ambiental e Dinâmica Espacial, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS). 2018

MENGUE, V. P. et al. **Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai**. Pesquisas em Geociências, [s. l.], v. 43, n. 1, 2016.

MILANESI, J.; QUADROS, E. L. L. De; LAHM, R. A. **Utilização do modelo hand no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundação – Porto Alegre / RS**

. Revista Brasileira de Cartografia (2017), nº69/4, Ed. Desastres Naturais e Impactos Ambientais. Pontifícia Univ. [s. l.], 2017

MOMO, M. et al. **Desempenho do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis à inundação usando dados de alta resolução espacial**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 200–208, 2016. Disponível em: <<http://www.abrh.org.br/SGCv3/index.php?PUB=1&ID=188&SUMARIO=5159>>

MOMO, M. R. **Avaliação da aplicação do modelo hand no mapeamento de áreas suscetíveis a inundação no município de Blumenau**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Regional de Blumenau. Blumenau – SC. 2014.

MONTEIRO, L.R., KOBAYAMA, M. 2013. **Proposta de metodologia de mapeamento de perigo de inundação**. REGA. 10, (2) , p.13-25.

MORAIS, R.P.; MIRANDA, C. S.; LIMA, D.L.; ANACHE. J.A.A.; STANIESKI.J.; PARANHOS.A.C. **Uso dos Sensores AVNIR2 e PRISM do ALOS na identificação das Áreas de Preservação Permanente**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 5315-5320

NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; HODNETT, M. ; RENNÓ, C.D; RODRIGUES, G. ; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. **Height Above the Nearest Drainage - a hydrologically relevant new terrain model**. Elsevier - Journal of Hydrology, v.404, 2011. p.13–29 2011.

PEREIRA, R. D. S.; NETO, A. D. S.; TUCCI, C. E. M. **Princípios da Hidrometria**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2003

PINHEIRO, T. F.; RENNÓ, C. D.; ESCADA, M. I. S. **Utilização de um novo algoritmo descritor de terreno para o mapeamento de ambientes de terra firme na Amazônia** 2009. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14. 2009, Natal. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009.

RENNÓ, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. **HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM; mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia**. Remote Sensing of Environment, v. 112, 2008.

RESOURCESAT 1 e 2 - Indian Remote Sensing Satellite. INPE. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/documentacao/satelites/resourcesat>>. Acesso em: 10 outubro. 2019.

RODRIGUES, G. D. O. et al. **Efeitos da resolução espacial de dados SRTM na descrição de terrenos obtida pelo modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage) – estudo de caso em Manaus/AM.** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, [s. l.], 2011.

ROTSTEIN, J. **O passado presente : Um exercício de coerência.** 1. Ed. Rio de Janeiro : Digitaliza Brasil, 2013.

SANTOS, I.; LAURERT, L.F; SUGAI.B.R.M.; BUBA, H.; MARONE.E.; **Hidrometria aplicada.** 1. Ed. Curitiba: Instituto de Tecnologia e Desenvolvimento, 2001.

SANTOS, K. A. Dos. **Utilização de modelo hidrodinâmico para mapeamento de áreas de inundação.** Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente), Escola de Engenharia, Universidade Federal de Goiás - Goiânia. [s. l.], 2015.

SANTOS, S.A. **Estudo de áreas urbanas susceptíveis a fenômenos de inundações, enchentes e alagamentos na cidade de Alegrete – RS.** Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Pampa, 2015.

SAUERESSIG, S. S. **Zoneamento das áreas de risco a inundação da área urbana de Itaqui, RS.** Dissertação (Mestrado Programa de Pós-graduação em Geografia e Geociências), Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS. 2012.

SGH - Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica. **Orientações para Operações das Estações Hidrométricas. Agência Nacional de Águas.** Brasília. 2012

SILVA, C. B. Da. **Mapeamento das áreas de inundação do Rio Ibirapuitã em Alegrete - RS.** Santa Maria, v.15, n.3, set.dez.2011

SILVA, W. F.; MOLLERI, G. S. F.; PINTO, M. B. P.; JÚNIOR, G. J. L. D. de A. **Análise do modelo HAND para a indicação de áreas suscetíveis a eventos**

críticos de cheias. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16, 2013, Foz do Iguaçu. Anais... Foz do Iguaçu: INPE, p. 7001-7008, 2013.

SILVEIRA, A.L.L. **Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais.** RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 10 n.1 Jan/Mar 2005.

SIMONS, D.B. et al. 1977. **Flood flows, stages and damages.** Fort Collins: Colorado State University

STEFFEN, C. A. **INTRODUÇÃO AO SENSORIAMENTO REMOTO.** São José dos Campos - SP. Apostila de Sensoriamento Remoto. Disponível em: <<http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>

TUCCI, C. E. M. **Inundações urbanas: impactos da urbanização.** Porto Alegre: Ed. ABRH/RHAMA, p87-124, 2007.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos,** 1. Ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 1998.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. **Inundações Urbanas na América do Sul.** 1. Ed. Porto Alegre : Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003

TUCCI, C.E.M. 1993. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** 1. Ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, ABRH, 952p.

USGS EROS Archive - ISRO Resourcesat 1 and Resourcesat 2 - LISS-3. **USGS.** <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-isroresourcesat-1-and-resourcesat-2-liss-3?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects>. Acesso em: 13 outubro. 2019.