



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**Caio Cortez de Lima**

**IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ZONAS DE ALAGAMENTOS  
URBANOS NA CIDADE DE NATAL, NORDESTE DO BRASIL, COM O  
SUPORTE DE GEOTECNOLOGIAS**

**Natal**

**2019**

**Caio Cortez de Lima**

**IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ZONAS DE ALAGAMENTOS  
URBANOS NA CIDADE DE NATAL, NORDESTE DO BRASIL, COM O  
SUPORTE DE GEOTECNOLOGIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Geotecnia.

**Orientador:** Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro  
**Coorientador:** Prof. Dr. André Luís Silva dos Santos

**Natal**

**2019**

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN  
Sistema de Bibliotecas - SISBI  
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Lima, Caio Cortez de.

Identificação e avaliação de zonas de alagamentos urbanos na cidade de Natal, nordeste do Brasil, com o suporte de geotecnologias / Caio Cortez de Lima. - 2019.

157 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2019.

Orientador: Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro.

Coorientador: Prof. Dr. André Luís Silva dos Santos.

1. Georisco - Dissertação. 2. MDE - Dissertação. 3. MDS - Dissertação. 4. SIG - Dissertação. 5. GNSS - Dissertação. I. Amaro, Venerando Eustáquio. II. Santos, André Luís Silva dos. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 624

CAIO CORTEZ DE LIMA

**IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ZONAS DE ALAGAMENTOS  
URBANOS NA CIDADE DE NATAL, NORDESTE DO BRASIL, COM O  
SUPORTE DE GEOTECNOLOGIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil – ênfase em Geotecnia.

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro - Orientador (UFRN)

---

Prof. Dr. André Luís Silva dos Santos - Coorientador (IFMA)

---

Prof. Dr. Carlos Wilmer Costa – Examinador Externo ao programa (UFRN)

---

Prof. Dr. Marcelo Soares Teles Santos – Examinador Externo a Instituição  
(UFSB)

---

Dr. Leonlene de Sousa Aguiar – Examinador Externo ao programa (IDEMA)

**Natal, 22 de março de 2019.**

# IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ZONAS DE ALAGAMENTOS URBANOS NA CIDADE DE NATAL, NORDESTE DO BRASIL, COM O SUPORTE DE GEOTECNOLOGIAS

**Caio Cortez de Lima**

**Orientador:** Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro  
**Coorientador:** Prof. Dr. André Luis Silva dos Santos

## RESUMO

Alagamentos urbanos provocados por chuvas intensas têm causado significativa perda de vidas e danos econômicos em diversas áreas urbanas do mundo. Esse tipo de alagamento vem se tornando frequente em muitas cidades brasileiras. Na cidade de Natal, capital do Estado do Rio Grande do Norte (RN), Nordeste do Brasil, o processo de urbanização ocorrido nas últimas quatro décadas promoveu significativa impermeabilização do solo, que tem se refletido em inúmeros alagamentos urbanos por ano. Este estudo objetiva identificar e avaliar áreas susceptíveis a alagamentos em Natal, especificamente no Bairro do Tirol, considerando a integração de variáveis como Modelo Digital de Terreno (MDT) e Modelo Digital de Superfície (MDS), sistema de drenagem pluvial, registros históricos de alagamentos e precipitações horárias, além de considerar o tipo de ocupação dos lotes urbanos no bairro. As abordagens metodológicas foram conduzidas e integradas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), com o apoio de base de dados de alta acurácia e precisão obtidos *in loco* com *Global Navigation Satellite System* (GNSS) para as análises de alagamento urbano. Os resultados mostraram que na área de estudo duas depressões topográficas em locais de intensa atividade comercial e social se destacam por apresentarem características geomorfológicas e antrópicas altamente favoráveis aos alagamentos em eventos de precipitação intensa. Além disso, os resultados permitiram a geração de modelos de fluxo superficial com

parâmetros de alta aplicabilidade para o aprimoramento de projetos de sistemas de drenagem urbana e da gestão urbana. Este estudo demonstrou ainda que as abordagens metodológicas baseadas no uso de Geotecnologias podem subsidiar planos de gestão de riscos e reduzir gastos públicos com obras e ações emergenciais mais eficazes.

**Palavras-chave:** Georisco; MDE; MDS; SIG; GNSS.

# IDENTIFICATION AND EVALUATION OF URBAN FLOODING ZONES IN NATAL CITY, NORTHEAST BRAZIL, WITH THE SUPPORT OF GEOTECHNOLOGIES

**Caio Cortez de Lima**

**Advisor:** Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro  
**Co-advisor:** Prof. Dr. André Luis Silva dos Santos

## ABSTRACT

Urban floods motivated by heavy rains have caused significant loss of life and economic damage in several urban areas of the world. This flooding type have become frequent in many Brazilian cities. In Natal City, Rio Grande do Norte (RN) State Capital, Northeast Brazil, the urbanization process over the last four decades promoted significant soil sealing, which has reflected in numerous urban floods per year. This study aims to identify and evaluate areas susceptible to flooding in Natal, specifically in the region of Tirol, considering Digital Terrain Model (DTM), Digital Surface Model (DSM), pluvial drainage system, historical records of flooding and hourly precipitations, in addition to reflecting the type of occupation of urban lots in the neighborhood. Methodological approaches were conducted and integrated into the Geographic Information System (GIS) environment, with the support of *in loco* high accuracy database of *Global Navigation Satellite System* (GNSS) for urban flooding analyses. The results showed that in the study area two topographic depressions in sectors of intense commercial and social activities stand out because they present geomorphological and anthropic characteristics highly favorable to flooding in events of Intense precipitation. Furthermore, the results allowed the generation of a superficial flow models with parameters of high applicability for the improvement of projects of urban drainage systems and urban management. This study also demonstrated that methodological approaches based on the use of Geotechnologies can subsidize risk

management plans and reduce public expenditures with more effective works and emergency actions.

**Keywords:** Geohazard; DEM; DSM; GIS; GNSS.



*“A fé não é uma espécie de resignação da razão diante dos limites do nosso conhecimento; não é uma concessão ao irracional diante dos perigos de uma razão meramente instrumental. A fé não é uma expressão de cansaço e de fuga, mas é a coragem de ser e movimento de abertura à grandeza e à amplitude da realidade. A fé é um ato de afirmação que se fundamenta na força de um novo “sim” que se torna possível para o homem no contato com Deus.”*

*“A alternativa fundamental que o desenvolvimento da época moderna coloca diante de nós consiste principalmente nesta pergunta: a origem de todas as coisas está no irracional, a falta de racionalidade é a verdadeira origem do mundo, ou ele provém da razão criadora? Crer significa abraçar a segunda alternativa, e de fato só ela é “racional”, no sentido mais profundo do termo, e digna do homem. A crise da razão, diante da qual nos encontramos hoje, faz com que seja necessário evidenciar novamente essa característica essencial da fé, que salva a razão enquanto a compreende em toda a sua amplitude e profundidade e protege da restrição empírica. Longe de ser contra razão, o mistério a salva e defende da racionalidade do ser e do homem.”*

*(JOSEPH RATZINGER 1990 – Parma, Itália)*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente a Deus, a Maria Santíssima e ao Glorioso São José por conceder todas as graças necessárias para superar desafios que me foram enviados durante esta caminhada rumo ao conhecimento.

Agradeço a minha esposa Eirilanny Maria pela paciência e cumplicidade nos desafios durante a realização desta dissertação. Também expresso grande gratidão aos meus familiares Dilena, minha mãe, e Érica, minha irmã, por todo apoio e paciência durante tempo que convivíamos diariamente. Não posso esquecer-me dos demais membros da família, de modo especial meu pai Elias e minhas tias Etma, Eneida e Ieda por todo incentivo profissional.

Tenho muito a agradecer ao Prof. Dr. Venerando Eustáquio Amaro pela orientação e todo esforço despendido para enriquecer o trabalho, ao Prof. Dr. André Luís Silva dos Santos pela coorientação e disponibilidade para sanar dúvidas cruciais. Além desses, expresso grande gratidão ao Prof. Me. Paulo Victor do Nascimento Araújo pelas significativas contribuições, discussões e empenho durante a construção do conhecimento científico desta pesquisa. Agradeço a todos do corpo docente do Programa de Engenharia Civil, representado pelo Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França, pelos conhecimentos de engenharia repassados. Reconheço também o apoio dos vários amigos e colegas do Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO) e do Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagem Costeira e Oceânica (GNOMO) pelos auxílios nas atividades de campo e por tornar o ambiente dos laboratórios agradável e propício para troca de experiências profissionais e crescimento mútuo em áreas multidisciplinares da ciência e da vida. Assim, deixo minha gratidão ao Paulo Victor, Leon, Maria de Fátima, Alex, Pulleti, Débora, Lívian, Matheus Prudêncio, Mateus Amorim e tantos outros que contribuíram de alguma forma.

Por fim, agradeço a todos os meus queridos amigos na fé que me ajudaram a manter a cerne durante os últimos dois anos.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xiii
<b>LISTA DE QUADROS E TABELAS</b> .....	xviii
<b>LISTA DE SIGLAS</b> .....	xx
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	3
1.2 RELEVÂNCIA.....	3
1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	6
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA</b> .....	7
2.1 ABORDAGENS COM USO DE GEOTECNOLOGIAS PARA IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ALAGAMENTOS URBANOS .....	7
2.2 GEODÉSIA DE PRECISÃO APLICADA À INFORMAÇÃO ALTIMÉTRICA.....	15
2.3 HISTÓRICO DE ALAGAMENTOS EM NATAL.....	20
<b>3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO</b> .....	26
3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO .....	26
3.2 CONTEXTO CLIMATOLÓGICO.....	29
3.3 HIDROGRAFIA .....	31
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	35
4.1 DADOS PÚBLICOS DISPONÍVEIS .....	35
<b>4.1.1 Imagens de Sensoriamento Remoto</b> .....	35
4.1.1.1 Imagens RapidEye.....	37
4.1.1.2 Ortofoto .....	37
4.1.1.3 Ortomosaico.....	38
<b>4.1.2 Dados topográficos</b> .....	38
<b>4.1.3 Sistema de drenagem pluvial urbana</b> .....	39
<b>4.1.4 Rede de arruamentos e lotes de ocupação urbana</b> .....	39

<b>4.1.5 Registros pluviométricos</b> .....	41
<b>4.1.6 Registros de alagamentos</b> .....	42
4.2 ELABORAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO .....	43
<b>4.2.1 Bases de referência geodésicas</b> .....	43
<b>4.2.2 Calibração geodésica do MDT</b> .....	46
<b>4.2.3 MDS Simplificado</b> .....	47
4.3 IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DEPRESSÕES TOPOGRÁFICAS.....	48
<b>4.3.1 Análise geomorfológica preliminar</b> .....	48
<b>4.3.2 Identificação das depressões no terreno</b> .....	49
4.4 GERAÇÃO DO ARRANJO DO FLUXO SUPERFICIAL E DELINEAMENTO DE MICROBACIAS.....	50
<b>4.4.1 Geração de modelo de fluxo superficial</b> .....	50
<b>4.4.2 Delineamento de microbacias</b> .....	51
4.5 ABORDAGENS DE DETALHE EM ÁREAS CRÍTICAS DE ALAGAMENTOS .....	52
<b>4.5.1 Relação entre precipitação horária e cota de alagamentos</b> .....	53
<b>4.5.2 Extensão dos alagamentos e exposição de elementos urbanos</b> .....	55
<b>4.5.3 Mapeamento do risco a alagamento</b> .....	57
<b>5 RESULTADOS</b> .....	60
5.1 MDT CALIBRADO E MDS SIMPLIFICADO .....	60
5.2 RELAÇÕES ENTRE A GEOMORFOLOGIA LOCAL E DEPRESSÕES TOPOGRÁFICAS.....	63
<b>5.2.1 Feições geomorfológicas</b> .....	63
<b>5.2.2 Depressões topográficas</b> .....	66
5.3 FLUXO SUPERFICIAL.....	69
<b>5.3.1 Fluxo superficial sobre o sistema de arruamentos</b> .....	69
<b>5.3.2 Áreas de contribuição e microbacias</b> .....	72
5.4 MAPAS DE PERIGO E RISCO A ALAGAMENTO EM ÁREAS CRÍTICAS .....	76

<b>5.4.1 Relação entre precipitação horária e cota de alagamentos.....</b>	<b>76</b>
<b>5.4.2 Mapa de perigo a alagamento.....</b>	<b>80</b>
<b>5.4.3 Mapa de risco a alagamento.....</b>	<b>83</b>
<b>5.5 APLICABILIDADE DOS RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>86</b>
<b>5.5.1 Aplicabilidade dos resultados .....</b>	<b>86</b>
<b>5.5.2 Recomendações .....</b>	<b>88</b>
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>89</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>
<b>APÊNDICE I – DADOS GEODÉSICOS UTILIZADOS PARA CALIBRAÇÃO DE MDT .....</b>	<b>104</b>
<b>APÊNDICE II – DADOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES PLUVIOMÉTRICAS E DE ALAGAMENTO NAS DEPRESSÕES A E B.....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICE III – ARTIGO SUBMETIDO NO ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – UFRJ.....</b>	<b>107</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Localização da área de estudo no Bairro do Tirol, Natal/RN.....	4
<b>Figura 1.2:</b> Densidade de pontos críticos de alagamentos por zona administrativa da Cidade de Natal. Fonte: Adaptado de Natal (2014).....	5
<b>Figura 2.1:</b> Matriz de Sensibilidade apresentada no Workshop de Auckland, Nova Zelândia. As cores vermelha, amarelo e verde representam alto, médio e baixo impacto esperado, respectivamente. Fonte: Adaptado de NIWA <i>et al.</i> (2012).....	14
<b>Figura 2.2:</b> Ilustração do método de posicionamento relativo no sistema GNSS. Fonte: AMARO <i>et al.</i> , 2012. ....	17
<b>Figura 2.3:</b> Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Fonte: IBGE (2019).....	17
<b>Figura 2.4:</b> Alturas geoidal (N), geométrica (h), ortométrica (H), que representam as distâncias, respectivamente, entre o elipsoide e geóide, elipsoide e superfície terrestre e, geóide e superfície terrestre. Fonte: IBGE (2018).....	19
<b>Figura 2.5:</b> Consequências de alagamentos nas depressões topográficas identificadas na área de estudo: A) Alagamento em área com hospitais, clínicas médicas e lojas comerciais na Rua Mossoró em 29/05/2014; B) Problema de subsidência da pavimentação exatamente em local de alagamento no cruzamento da Rua Mossoró com a Av. Afonso Pena em 27/12/2015; C) Submersão de cômodos de residência no cruzamento da Rua Mossoró com a Av. Afonso Pena em 22/04/2017; D) Submersão de veículo na Rua Mipibu em junho de 2011; E) Grandes trechos de vias obstruídas pelas águas pluviais nas proximidades da Rua Mipibu em 11/04/2017 (SOARES, 2017). ....	21
<b>Figura 2.6:</b> Soterramento de carros na Avenida Silvio Pedrosa em 15/06/2014. Fonte: Fotojornalismo Canindé Soares. ....	23
<b>Figura 2.7:</b> Localização dos principais trechos de alagamentos no Bairro do Tirol, identificados por meio do Relatório de Manejo de Águas pluviais (NATAL, 2014) e registros jornalísticos.....	24

<b>Figura 3.1:</b> Localização da Sub-bacia Natal. Fonte: Adaptado de Barbosa & Lima Filho (2006). .....	27
<b>Figura 3.2:</b> Contexto geológico regional da área de estudo, que contempla a porção setentrional da Província Borborema. Fonte: Adaptado de Oliveira (2008). .....	27
<b>Figura 3.3:</b> Mapa geológico para a área de estudo. Alguns autores como Moreira (1996) ainda representam a Formação Potengi no topo do Grupo Barreiras, sotoposta aos depósitos eólicos. Fonte: Adaptado de CPRM (2012). . . . .	28
<b>Figura 3.4:</b> Temperaturas e precipitações mensais de Natal como representante do Clima As. Fonte: Adaptado de Alvares <i>et al.</i> (2013). .....	30
<b>Figura 3.5:</b> Baixo curso das bacias do Rio Doce e do Rio Potengi/Jundiáí, que possuem exutórios na Cidade de Natal, além do pequeno trecho da Bacia Pirangi que se estende sobre a cidade na sua região sul. Os rios dessas bacias com grande influência sobre a cidade são os rios: Doce, Potengi/Jundiáí e Pitimbú. Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA, 2018). Imagem Rapideye de 09/2013. ....	32
<b>Figura 3.6:</b> Bacias e sub-bacias de drenagem do Bairro do Tirol e adjacências. Bacias: Riacho do Baldo (IX); Praias Urbanas (VIII), Potengi/Rocas-Ribeira (VII), Rio das Lavadeiras (XII), Bacia do Parque das Dunas (XI) e Bacia Potengi/ Quintas-Base Naval (X). ....	34
<b>Figura 4.1:</b> Fluxo metodológico aplicado à identificação e avaliação de zonas de alagamentos no Bairro do Tirol, Natal-RN. MDEs* - Modelos Digitais de Elevação: Termo aplicado neste trabalho que engloba MDT e MDS. ....	36
<b>Figura 4.2:</b> A) Disposição espacial das curvas de nível com variação altimétrica de 1 m sobre a área de estudo; B) Detalhe das curvas de nível. ....	39
<b>Figura 4.3:</b> A) Arranjo espacial do sistema de drenagem na área de estudo com os principais elementos: poços de visita e galerias; B) Detalhe do sistema de drenagem no cruzamento da Rua Ceará Mirim com a Av. Prudente de Moraes. ....	40

<b>Figura 4.4:</b> A) Dados da delimitação dos lotes de ocupação urbana na área de estudo; B) Detalhe dos lotes e do sistema de arruamento, incluindo ruas, avenidas e canteiros centrais.....	41
<b>Figura 4.5:</b> Localização de pluviômetros utilizados para o presente trabalho. As estações estavam localizadas na Escola Estadual Desembargador Floriano Cavalcante (FLOCA), Bairro de Capim Macio, e nas proximidades do Canal do Baldo, Bairro de Cidade Alta.....	42
<b>Figura 4.6:</b> Distribuição das bases de referência na região de estudo, utilizadas para calibração de MDT.....	44
<b>Figura 4.7:</b> Coleta de pontos de controle geodésicos pelo Posicionamento Relativo Estático-Rápido. A) Estação fixa no CGPM; B) Estação móvel próximo ao cruzamento da Av. Hermes da Fonseca com a Rua Joaquim Fagundes....	44
<b>Figura 4.8:</b> Esquema do posicionamento de <i>Pour Points</i> sobre a rede de canais gerado no arquivo de saída da função <i>Flow Accumulation</i> para geração das microbacias (Adaptado de GOMES, 2005).....	52
<b>Figura 4.9:</b> Procedimento realizado para associar a precipitação pluviométrica horária aos rápidos alagamentos ocorrentes no Bairro do Tirol. A) Identificação da cota máxima de alagamento por meio do limite de borda da lâmina da água em registro fotográfico realizado às 14h do dia 07/05/2018 logo após a formação do alagamento; B) Coleta da cota máxima de alagamento com receptor GNSS.....	53
<b>Figura 4.10:</b> Principais tipos de situações para alagamentos urbanos identificados no Bairro do Tirol e adjacências.....	55
<b>Figura 5.1:</b> Resultado da análise de Regressão Linear entre Modelo Digital de Terreno (MDT) e Bases de Referência.....	60
<b>Figura 5.2:</b> Diferenças entre MDT calibrado e MDS simplificado com a inserção do sistema de arruamentos no MDS.....	62
<b>Figura 5.3:</b> Classes altimétricas do MDT calibrado com interpretação de feições geomorfológicas e lineamentos de altos topográficos capazes de favorecer a ocorrência de alagamentos e controlar a dinâmica de escoamento superficial das águas pluviais.....	64



- Figura 5.4:** Localização das depressões topográficas identificadas ao longo do sistema de arruamentos, intrinsecamente relacionadas ao contexto geomorfológico local e a disposição espacial das construções urbanas: A) Depressões *A*, *B*, *C* e *D* presentes na Sub-bacia de drenagem Riacho do Baldo IX.1, setor nordeste do Bairro do Tirol; B) Depressões *E*, *F*, *G*, *H* e *I*, localizadas na Sub-bacia de drenagem Riacho do Baldo IX.2, setor sul do Bairro do Tirol..... 67
- Figura 5.5:** Arranjo do fluxo superficial de águas pluviais, setores de confluência e exutórios, diante da localização das depressões e sistema de drenagem no Bairro do Tirol e adjacências. Destaque para os pontos críticos com maior número de episódios de alagamentos registrados entre os anos de 2013 e 2018. .... 70
- Figura 5.6:** Transbordamento de poço de visita do sistema de esgoto durante alagamento na Rua Açú após evento de precipitação intensa em 13/04/2018. .... 71
- Figura 5.7:** Inter-relação entre fluxos do escoamento superficial de microbacias (relacionadas as depressões alagáveis e microbacias secundárias) do Bairro do Tirol e fluxos subterrâneos em galerias de drenagem..... 74
- Figura 5.8:** Localização de pontos de referência da cota máxima de alagamento coletado com receptor GNSS nas depressões *A* e *B*. Cada ponto está associado a um evento de precipitação intensa em que foi possível associar fotografias históricas com marcadores de boa identificação *in loco*. . 77
- Figura 5.9:** Modelos de Regressão Linear entre a Precipitação Acumulada e Cota de Alagamento, para as depressões *A* e *B*. Na depressão *A* verifica-se uma forte relação linear entre o volume de precipitação e a variação da cota do espelho d'água (Situação do Tipo I), enquanto na regressão aplicada à depressão *B* mostra relação linear moderada entre os dois parâmetros aplicados (Situação do Tipo II), segundo valores de  $R^2$  e  $p$ . .... 78
- Figura 5.10:** Detalhe sobre a ocupação urbana e mapeamento dos perigos a alagamento nas depressões *A* e *B*: A) Mapa de ocupação urbana e perigo a alagamento, em função das alturas das lâminas de água; as diferentes quantidades de bocas de lobo em ambas as depressões afetam diretamente o

comportamento dos alagamentos; B) Alagamento na Rua Mossoró prejudicando clínica médica, hospital e áreas comerciais em 07/05/2018; C) Gari tentando desobstruir boca de lobo diante de alagamento em frente à escola e residências na Rua Mipibú em 17/02/2018.....	82
<b>Figura 5.11:</b> Mapa de risco a alagamentos para lotes urbanos ao longo das depressões <i>A</i> e <i>B</i> no Bairro do Tirol.....	84

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

<b>Tabela 2.1:</b> Registro das maiores precipitações acima de 150 mm/dia em Natal/RN. Fonte: INMET (2018). .....	23
<b>Tabela 4.1:</b> Características das Imagens RapidEye, Ortofoto e Ortomosaico utilizadas nesta pesquisa. MMA – Ministério do Meio Ambiente; SETUR – Secretaria de Turismo de Natal; SEMURB – Secretária de Meio Ambiente e Urbanismo de Natal.....	37
<b>Tabela 4.2:</b> Classes de riscos segundo os conjuntos numéricos obtidos a partir dos produtos entre perigo e vulnerabilidade para as áreas mais críticas do Bairro do Tirol.....	59
<b>Tabela 5.1:</b> Estatística descritiva entre os dados das Bases de Referência, o MDT original e o MDT calibrado.....	61
<b>Tabela 5.2:</b> Informações para as depressões quanto ao contexto geomorfológico envolvido, presença de registro prévio de alagamentos, tipo de pavimentação, quantidade de bocas de lobo e sua área de abrangência.*32,3% correspondem à via carroçável com material areno-argiloso. ....	68
<b>Tabela 5.3</b> Número de confluências de fluxo superficial e exutórios relativos a cada depressão identificada no Bairro do Tirol e adjacências.....	72
<b>Tabela 5.4</b> Informações sobre as microbacias de drenagem associadas às depressões alagáveis.....	75
<b>Tabela 5.5:</b> Valores de precipitação acumulada por hora associados às classes de perigo de alagamento nos lotes urbanos da depressão A. ....	83
<b>Tabela 5.6:</b> Valores de precipitação acumulada por hora associados às classes de perigo de alagamento nos lotes urbanos da depressão B. ....	83
<b>Tabela 5.7:</b> Dimensões das áreas de alto, moderado e baixo risco a alagamento nas depressões A e B no Bairro do Tirol.. ....	86

**Quadro 2.1:** Principais trechos de alagamentos no Bairro do Tirol, identificados por meio do Relatório de Manejo de Águas pluviais (NATAL, 2014) e registros jornalísticos. .... 24

**Quadro 4.1:** Sistema de critérios utilizado para atribuir níveis de vulnerabilidade aos tipos de lote urbano. Os prefixos 1º e 2º associados aos critérios são referentes à primeira e à segunda ordem de critérios. A cor vermelha, laranja e verde representam níveis de vulnerabilidade alta, média e baixa, respectivamente. As células em azul claro mostram que determinados critérios não foram empregados, uma vez que critérios de primeira ordem foram suficientes para definir o lote com vulnerabilidade alta. .... 58

## LISTA DE SIGLAS

As - Clima Tropical de Verão Seco  
ANA - Agência Nacional de Águas  
CEMADE - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais  
CEPAL - *Comisión Económica para América Latina y el Caribe*  
CGPM - Comando Geral da Polícia Militar  
CN - Número de Curva de Escoamento  
CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais  
FLOCA - Escola Estadual Desembargador Floriano Cavalcante  
GNSS - *Global Navigation Satellite System*  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IFRN - Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
LIDAR - *Light Detection and Ranging*  
MDE - Modelo Digital de Elevação  
MDT - Modelo Digital do Terreno  
MDS - Modelo Digital de Superfície  
MMA - Ministério do Meio Ambiente  
NRCS - *Natural Resources Conservation Service*  
PDDMA - Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais de Natal  
RAAP - Rede Altimétrica de Alta Precisão  
RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo  
RGLS - Rede Geodésica do Litoral Setentrional  
RMSE - *Root Mean Square Error*  
RRNN - Referência de Nível  
SEMOP - Secretaria Municipal de Obras Públicas e Infraestrutura  
SETUR - Secretaria de Turismo do Rio Grande do Norte  
SGB - Sistema Geodésico Brasileiro  
SIG - Sistema de Informações Geográficas  
SPT - *Standard Penetration Test*  
TIN - *Triangular Irregular Networks*

UNISDR - *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*

USISM - Método de Simulação de Inundação em Tempestade Urbana

VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado

## 1 INTRODUÇÃO

A urbanização crescente e desordenada, aliada ao crescimento populacional desregrado, tem acarretado a expressiva impermeabilização dos solos urbanos em cidades brasileiras (TARGA *et al.*, 2012; SANTOS JÚNIOR & SANTOS, 2014; SANTOS *et al.*, 2017). A impermeabilização dos solos urbanos, por reduzir a infiltração natural e, conseqüentemente, aumentar o escoamento superficial quando sob condições de precipitações elevadas, são responsáveis por constantes alagamentos e inundações, igualmente em várias cidades do mundo, com expressivas perdas socioeconômicas e de vidas humanas (CORREIA *et al.*, 2015; SMITH *et al.*, 2016; RECANATESI *et al.*, 2017; PILLA *et al.*, 2019). Zonas urbanas são particularmente vulneráveis a estes fenômenos em virtude do elevado número de pessoas e grandes áreas construídas, o que torna recorrente as perdas de vida e danos econômicos durante eventos extremos de precipitação (SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2016; BARROS & CONDE, 2017; SILVA *et al.*, 2018).

A frequência e a magnitude destes eventos dependem de vários parâmetros como topografia, escoamento superficial, arranjo urbano e ocupação do solo (RIBEIRO *et al.*, 2013), os quais devem ser analisados de maneira integrada para a elaboração de um sistema de drenagem pluvial eficaz ou outras soluções e planos de mitigação adequados aos problemas decorrentes.

Na última década, os estudos sobre modelagens computacionais aplicados às enchentes e alagamentos urbanos com uso de ferramentas de Geoprocessamento têm crescido significativamente (SANTOS *et al.*, 2017; KOURGIALAS & KARATZAS, 2017; BESKOW *et al.*, 2018; ARAÚJO *et al.*, 2019; AGUIAR *et al.*, 2019). Um dos parâmetros primordiais em modelagens hidrológicas são Modelos Digitais de Elevação (MDE), que permitem a determinação de características morfométricas das bacias hidrográficas e influenciam diretamente no entendimento sobre o escoamento da água na superfície e, igualmente, em parte do seu ciclo hidrológico (CAMPOS *et al.*, 2015, OMRAN *et al.*, 2016). Além disso, o uso de Geotecnologias, entre as quais o Sensoriamento Remoto, a Geodésia e o Sistema de Informações Geográficas (SIG), potencializam a compreensão de riscos complexos, pois

possuem a capacidade de integrar informações multifontes e associar ferramentas de modelagens e gestão de recursos hídricos (CHAVES *et al.*, 2015; FRANCI *et al.*, 2016; ALVES *et al.*, 2018; GUERRA & ABEBE, 2019).

O desenvolvimento de mapas de risco e perigo, em escala adequada, aplicados aos fenômenos de inundações, enchentes ou alagamentos é uma ferramenta importante para evitar e reduzir a ocorrência destes eventos ao fornecer informações seguras aos gestores responsáveis pelas ações emergenciais e ao público em geral (DEMIR & KISI, 2016; ARAÚJO *et al.*, 2019). Informações contidas em mapas sobre a extensão dos alagamentos urbanos são cruciais na avaliação de risco em áreas populosas e propensas a estes fenômenos, pois auxiliam as decisões nas operações de resgate e ações emergenciais durante os eventos de alagamentos (COOK & MERWADE, 2009). Portanto, mapas de risco e perigo a alagamentos urbanos são fundamentais como ferramenta de planejamento urbano e mitigação das consequências de chuvas intensas, embora a maioria dos municípios brasileiros não possuam este tipo de informação.

Neste contexto, a cidade de Natal, capital do Estado do Rio Grande do Norte (RN), sofre frequentemente com alagamentos durante os fenômenos de chuvas intensas, que provocam obstruções de ruas, perdas de bens materiais, além de paralisar atividades comerciais e a circulação da população nos bairros afetados. O Bairro do Tirol se destaca por possuir cerca de 96% de infraestrutura de drenagem já instalada (NATAL, 2015) e ser uma das áreas com maiores preços do m<sup>2</sup> no mercado imobiliário da cidade (ARAÚJO, 2015). Entretanto, há anos o Bairro do Tirol enfrenta problemas com alagamentos frequentes, como indicam os relatos em noticiários.

Diante deste cenário, este estudo apresenta procedimentos com uso de Geotecnologias para identificar e avaliar áreas susceptíveis aos alagamentos no Bairro do Tirol, a partir de Modelo Digital do Terreno (MDT), Modelo Digital de Superfície (MDS), arranjo do sistema de drenagens pluviais, registros históricos de alagamentos e de precipitações horárias, todos dados integrados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Assim, foi possível elaborar modelo de fluxo superficial e delimitar microbacias hidrográficas no Bairro do Tirol, as quais favoreceram a compreensão dos processos hidrológicos superficiais e indicaram setores de maior acúmulo de água por



meio de parâmetros como área de contribuição e quantidade de exutório em cada depressão topográfica identificada. Além disso, prognósticos do volume de chuva para gerar alagamentos em áreas críticas, o arranjo, o tipo ocupacional e a vulnerabilidade de lotes urbanos foram integrados para elaboração de mapas de perigo e risco a alagamento.

## 1.1 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na Zona Leste, próxima ao centro da cidade de Natal, abrangendo todo o território do Bairro do Tirol com cerca de 3,6 km<sup>2</sup>, além de terrenos imediatamente circunvizinhos, que apresentaram alguma relação com os alagamentos no bairro. O Bairro do Tirol faz fronteiras com os bairros de Petrópolis a norte, Cidade Alta a noroeste, Barro Vermelho a oeste, Lagoa Seca e Lagoa Nova a sudoeste, e Nova Descoberta em pequeno trecho no extremo sul do perímetro da área de estudo (Figura 1.1).

As principais vias de acesso à área de estudo são: as avenidas Senador Salgado Filho, Rui Barbosa e Xavier da Silveira no setor sul; as avenidas Alexandrino de Alencar e Governador Juvenal Lamartine no setor oeste; a Avenida Prudente de Moraes nos setores oeste e norte; e, a Avenida Hermes da Fonseca e as ruas Afonso Pena, Rodrigues Alves, Campos Sales e Floriano Peixoto no setor norte. Além destas vias, ruas secundárias entre as avenidas também permitem o acesso.

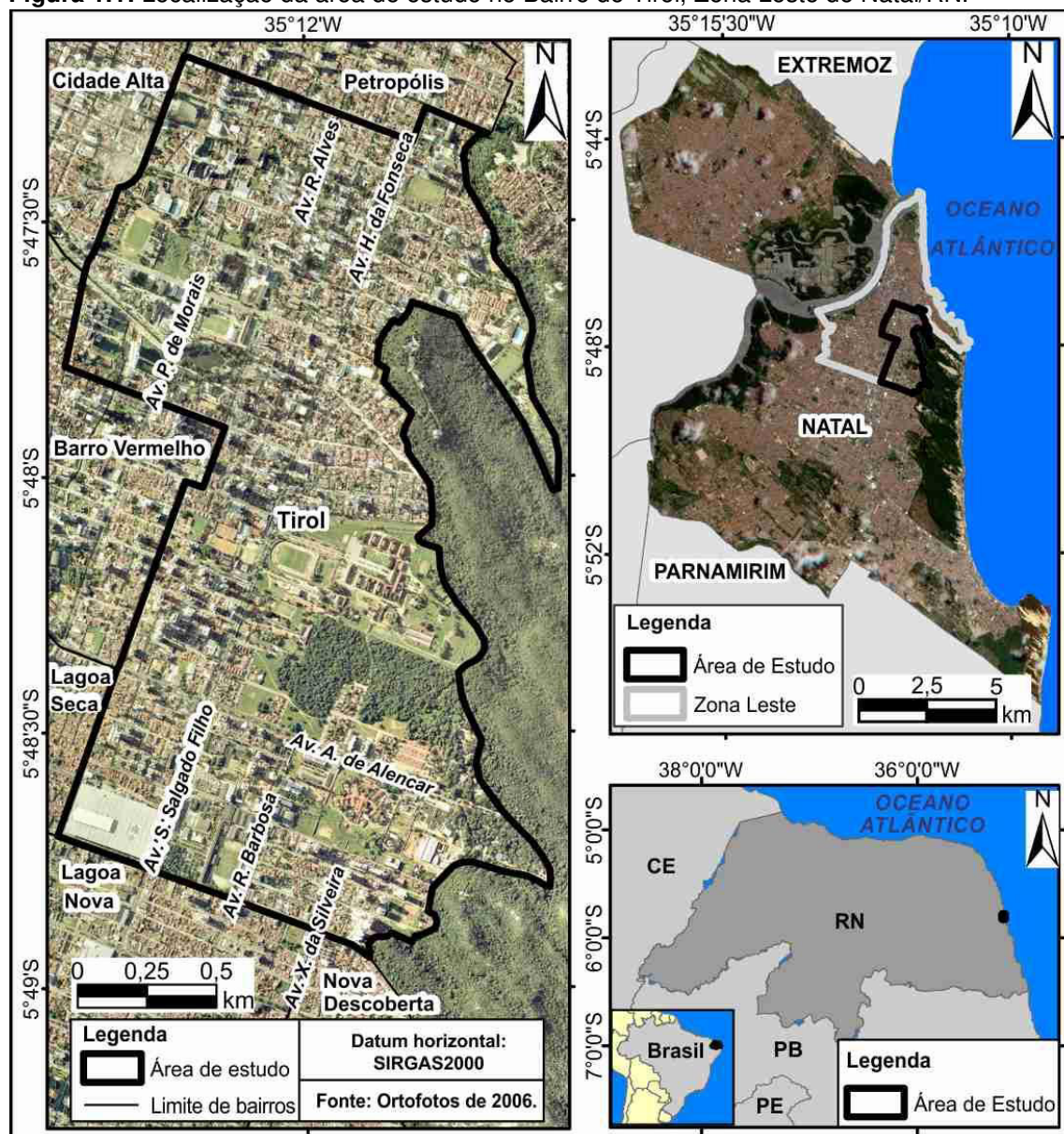
## 1.2 RELEVÂNCIA

Em geral, os problemas relacionados a alagamentos de áreas urbanas ocorrem devido à presença de construções de drenagens e estruturas de aterros irregulares, infraestrutura de drenagens ineficazes, obstruções por resíduos sólidos e áreas urbanas impermeabilizadas, tudo isso dificulta a infiltração da água no solo e favorecem o escoamento e o acúmulo superficial das águas pluviais (MAHMOOD *et al.*, 2017; KOURGIALAS & KARATZAS, 2017).

Em Natal, o volume de escoamento superficial para o interior das zonas urbanas é favorecido tanto pela impermeabilização do solo, quanto pela

presença de sub-bacias de drenagem fechadas, que caracterizam o contexto hidrodinâmico da cidade.

**Figura 1.1:** Localização da área de estudo no Bairro do Tirol, Zona Leste de Natal/RN.



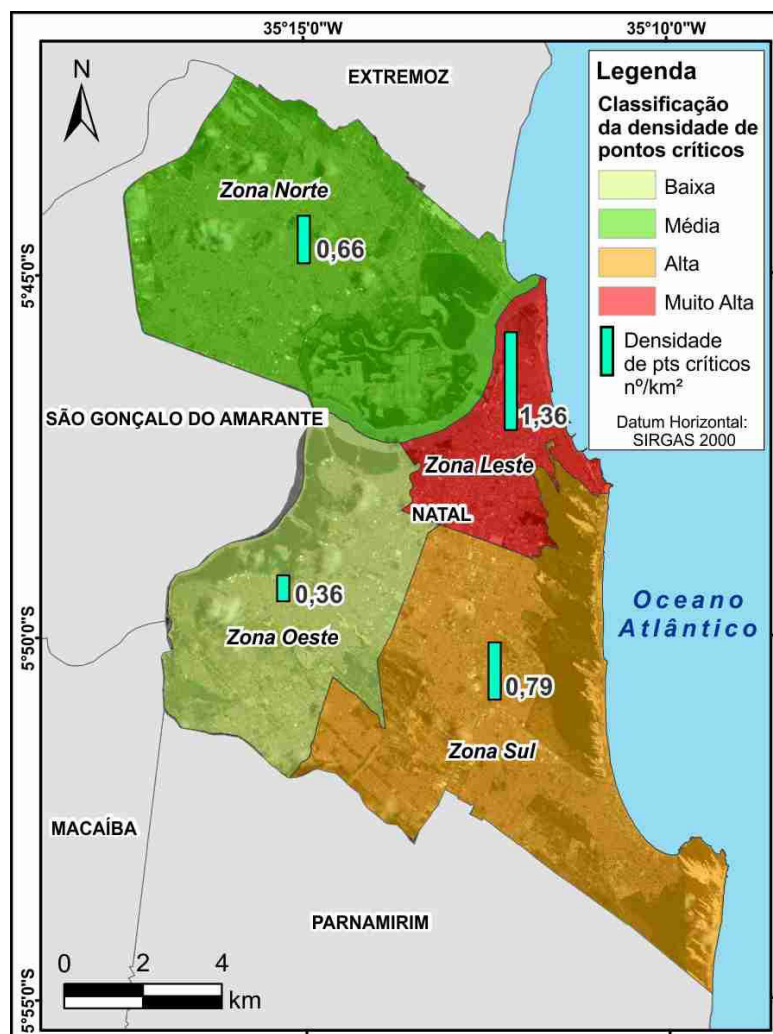
Nesse tipo de bacias, os fluxos superficiais se orientam para áreas de captação internas, como lagoas e reservatórios naturais ou artificiais, provocando menor tendência de escoamentos para o oceano ou canais fluviais. Assim, as características destas sub-bacias conduzem os gestores da cidade a adotar uma política que visa o processo de infiltração no solo como elemento de drenagem. Portanto, a preservação de áreas de infiltração nos lotes, construção de reservatórios de retenção para receber as águas do sistema

público e implantação de sistemas de drenagem urbana são medidas oriundas desta política (NATAL, 2014).

Diante destas circunstâncias, nos últimos anos, a Prefeitura de Natal tem investido em obras de drenagem urbana, apresentando porcentagens de áreas drenadas de 41%, 76%, 97% e 78%, respectivamente, para as zonas administrativas norte, sul, leste e oeste (NATAL, 2015). Entretanto, verifica-se que dentre todas as zonas administrativas da cidade, o número de pontos críticos de alagamentos por unidade de área é maior na Zona Leste (Figura 1.2), quando esta deveria ser a região com menor densidade de alagamentos em virtude da sua elevada quantidade de investimentos públicos (NATAL, 2014).

Assim, a presente pesquisa toma como área de estudo o bairro do Tirol

**Figura 1.2:** Densidade de pontos críticos de alagamentos por zona administrativa da Cidade de Natal. Fonte: Adaptado de Natal (2014).



localizado na Zona Leste de Natal, por apresentar sub-bacias fechadas e abertas, o que representa as distintas condições de drenagem dos bairros da cidade. Além disso, o bairro do Tirol detém grande parte de investimentos públicos no setor de drenagem, embora alagamentos ainda sejam bastante recorrentes, colocando em risco infraestrutura e áreas residenciais de um dos maiores polos do mercado imobiliário da cidade.

### 1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo desta dissertação é aplicar metodologia para identificar e avaliar áreas urbanas susceptíveis a alagamentos no Bairro do Tirol na Cidade de Natal, em decorrência de eventos extremos de precipitação pluviométrica. Assim, intenciona-se compreender os processos hidrodinâmicos superficiais e seus principais parâmetros controladores, considerando a integração de variáveis como Modelo Digital de Terreno (MDT) e Modelo Digital de Superfície (MDS), sistema de drenagem pluvial, registros históricos de alagamentos e precipitações horárias, além de considerar o tipo de ocupação dos lotes urbanos no bairro.

Em vista desta proposta delineiam-se as seguintes ações para esta pesquisa:

- 1) Desenvolver Modelo Digital do Terreno e Modelo Digital de Superfície da região de estudo com suporte de tecnologia GNSS de alta acurácia e precisão;
- 2) Modelar o arranjo do fluxo superficial frente aos elementos do ambiente urbano;
- 3) Delimitar microbacias hidrográficas;
- 4) Identificar áreas críticas de alagamento por meio de características intrínsecas do ambiente urbano, contexto geomorfológico e registros de alagamento;
- 5) Correlacionar a altura da lâmina d'água e a extensão dos alagamentos com registros pluviométricos;
- 6) Mapear áreas de risco a alagamento.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção temas primordiais para os objetivos desta pesquisa serão discutidos a fim de promover respaldo técnico científico, sobretudo, para as seções metodológicas descritas futuramente. Em especial, abordagens sobre bacias hidrográficas e modelos hidrodinâmicos com o uso de geotecnologias como Sistema de Informações Geográficas (SIG) serão levados em conta. Além disso, o histórico de inundação da cidade de Natal será apresentado.

### 2.1 ABORDAGENS COM USO DE GEOTECNOLOGIAS PARA IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE ALAGAMENTOS URBANOS

Diante dos problemas de alagamentos e inundações recorrentes em zonas urbanas de diversas partes do mundo, geotecnologias como *Global Navigation Satellite System* (GNSS), drones, Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), aliado à Fotogrametria e ao Sensoriamento Remoto, estão sendo aplicadas em diversas abordagens através do geoprocessamento com foco na avaliação e análise desta problemática (CORREIA *et al.*, 2015; OMRAN *et al.*, 2016; PREGNOLATO *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018; AGUIAR *et al.*, 2019; ARAÚJO *et al.*, 2019).

O geoprocessamento é um conjunto de técnicas computacionais que opera sobre base de dados georreferenciados, para os transformar em informação, permitindo análises e sínteses que levam em conta propriedades intrínsecas e geotopológicas de eventos e entidades identificadas, propiciando respaldo para tomada de decisão de modo transdisciplinar (TEIXEIRA *et al.*, 1992; XAVIER DA SILVA, 2009). O SIG constitui-se por um sistema que integra dados, equipamentos e pessoas com a finalidade de coletar, armazenar, recuperar, manipular, visualizar e analisar dados espacialmente referenciados a um sistema de coordenadas conhecido por meio de um conjunto de ferramentas em softwares (BURROUGHT, 1986; CÂMARA & ORTIZ, 1998; FITZ, 2008).

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) apresenta conceitos distintos quanto aos termos “enchente”, “inundação” e “alagamento” (BRASIL, 2007). Enchente corresponde ao aumento temporário do nível d’água em um

canal de drenagem em virtude de um acréscimo na vazão ou descarga no corpo hídrico. Inundação é um processo de extravasamento das águas do canal de drenagem para áreas adjacentes quando a enchente atinge cota acima do nível máximo da calha principal do rio. Por sua vez, o termo alagamento refere-se ao acúmulo momentâneo de água, relacionado ou não a processos fluviais, em determinada área devido à deficiência do sistema de drenagem. Assim, no presente trabalho aplica-se esta definição sobre alagamento (BRASIL, 2007), porém com a ressalva de que serão analisados processos de acúmulo de água em zonas urbanas com a influência apenas de processos pluviais.

Dentre as abordagens propostas na literatura atual para análises hidrodinâmicas é comum a aplicação de parâmetros como uso e cobertura do solo, Modelos Digitais de Elevação (MDEs), declividade, hidrografia, regime pluviométrico, nível de impermeabilização do solo (CABRAL *et al.*, 2014; MUIS *et al.*, 2015; KOURGIALAS & KARATZAS, 2017; ARAÚJO *et al.*, 2018). Além disso, as análises voltadas para bacias hidrográficas merecem destaque, visto que por meio dos estudos sobre estas regiões fisiográficas é possível compreender de maneira generalizada a disposição espacial do escoamento superficial de uma área de interesse. A partir dessas regiões diversos parâmetros, como os supracitados, podem ser integrados. Na medida em que parâmetros precisos, sobretudo a altimetria com elevada acurácia vertical do terreno, são integrados ao modelo da bacia hidrográfica, a compreensão do escoamento superficial passa a se tornar mais próxima da realidade com modelos de alagamentos mais acurados.

A evolução do sistema de drenagem natural ao longo do tempo e do espaço é controlada por diversas variáveis como a litologia, lineamentos tectônicos, geomorfologia e tipo de solo. Desta maneira, muitas destas variáveis refletem a topografia da bacia hidrográfica, que foi modelada por milhares ou milhões de anos no tempo geológico. Portanto, o reconhecimento do contexto geológico-geomorfológico por meio de Modelo Digital do Terreno (MDT), embora não represente a completa realidade, torna-se essencial para uma análise preliminar do fluxo hídrico.

Nesta perspectiva, Omran *et al.* (2016) faz o uso de SIG no software ArcMap para extrair da Bacia Hidrográfica Wadi Feiran, Península do Sinai –

Egito, a sua rede de canais e delimitar as sub-bacias a partir de MDT. Além disso, estes autores desenvolveram um fluxo de trabalho automatizado em ambiente SIG capaz de definir várias características dos elementos da bacia hidrográfica como a frequência, ordem e densidade de canais. As ferramentas desenvolvidas possuem alta aplicabilidade em modelos de escoamentos superficiais e permitem a economia de tempo por ser um processo automatizado. Ademais, as rotinas de processamento desenvolvidas por Omran *et al.* (2016) permitem a inserção de MDEs mais acurados e de outras regiões do mundo conforme o modelo da bacia hidrográfica de interesse.

Ainda no que diz respeito às bacias hidrográficas, Campos *et al.* (2015), lançando mão do SIG, realizou medidas e análises de várias características morfométricas da Microbacia do Ribeirão Descalvado, na Cidade de Botucatu-São Paulo, para melhor compreensão do escoamento superficial e formulação de medidas preventivas no controle de enchentes. Estes autores fizeram uso de parâmetros normativos associados às características morfométricas da bacia (coeficiente de compacidade, fator de forma, densidade de drenagem, frequência de rios, área da bacia, entre outros) para inferir informações quanto ao processo de escoamento superficial e inundações. Desta maneira, Campos *et al.* (2015) associam a área da bacia à quantidade de água produzida como deflúvio durante as precipitações; relacionam o coeficiente de compacidade e o coeficiente de forma com o tempo de concentração e a vazão máxima da bacia; e, por fim, associam a densidade de drenagem e frequência de rios com o nível de erosão no terreno. O tempo de concentração é o tempo necessário para que toda a microbacia contribua na saída da água após uma precipitação (CAMPOS *et al.*, 2015).

Uma das grandes vantagens do uso do ambiente SIG é o seu caráter transdisciplinar (TEIXEIRA *et al.*, 1992). Assim, na busca pela unidade do conhecimento científico e compreensão da realidade, o SIG permite o cruzamento de inúmeras informações oriundas das mais diversas áreas do conhecimento, o que favorece a peremptoriedade de resultados. Estes cruzamentos de informações são realizados por meio de operações computacionais (operações aritméticas entre os planos, cálculos estatísticos, cálculos de distâncias, filtragens espaciais, classificação dos dados, etc.) entre os dados disponíveis. Portanto, nas análises de alagamentos o uso de SIG

torna altamente viável a integração de conhecimentos da geologia, hidrologia e geotecnia.

Modelos hidrológicos tornam-se cada vez mais precisos à medida que parâmetros físicos do ambiente urbano são acrescentados. Entretanto, muitas vezes, dados mais precisos da infraestrutura urbana como profundidades e diâmetros das tubulações dos sistemas de drenagem são de difícil acesso, o que tornam modelos hidrológicos simplificados uma valiosa ferramenta de análise. Além disso, modelos hidrológicos mais robustos podem se tornar inviáveis, em virtude da ausência de dados necessários para sua execução, embora represente mais fielmente a realidade (ZHANG & PAN, 2014; OMRAN *et al.*, 2016).

Nas zonas rurais o escoamento superficial das águas pluviais pode ser simulado preliminarmente levando em conta apenas os parâmetros de uso e cobertura do solo, topografia da bacia hidrográfica, e o tipo de solo (LEE *et al.*, 2016). Contudo, nas áreas urbanizadas o processo de fluxo superficial é determinado por fatores antropogênicos como as configurações de edificações, rede de arruamentos e canais de drenagem artificiais (HSU *et al.*, 2000). De maneira simplista, a força da gravidade associada à topografia da rede de arruamentos determina a direção do fluxo das águas ao longo das ruas e avenidas, entretanto tal fluxo pode ser interrompido ou desviado pela presença de casas, construções e demais estruturas antropogênicas (LEE *et al.*, 2016).

No tocante a modelos hidrológicos simplificados, Zhang & Pan (2014) desenvolveram o Método de Simulação Inundação em Tempestade Urbana (USISM), o qual se baseia, sobretudo, no MDE da cidade de Harbin, China. O USISM toma de maneira simplificada informações relativas ao processo de evaporação, infiltração da água no solo e no sistema de drenagem urbana, embora seja capaz de identificar regiões com forte potencial de alagamentos e seu volume máximo de armazenamento. Para este modelo as seguintes informações fundamentais são inseridas ou calculadas: volume de água do fluxo superficial, volume de precipitação, potencial máximo de retenção de umidade do solo e número de curva do escoamento (CN). Esta última propriedade, CN, foi desenvolvida pelo *Natural Resources Conservation Service* (NRCS, 1972) dos Estados Unidos e incorpora condições empíricas da influência do tipo de solo, condições hidrológicas e uso da terra. Outros autores



também aplicam o parâmetro CN em modelos hidrodinâmicos (e.g., CABRAL *et al.*, 2014; RECANATESI *et al.*, 2017; RISI *et al.*, 2017).

Nas análises e modelos de inundação em grandes escalas, ou seja, em maiores níveis de detalhamento dentro do meio urbano, as informações precisas de valores altimétricos das ruas e avenidas são extremamente importantes, pois o conjunto de vias e arruamentos comporta-se como canais de drenagem durante intensas chuvas. Assim, por meio da aplicação de rotinas de acumulação de fluxo e direção de fluxo em ambiente SIG, atrelado às informações altimétricas é possível identificar pontos críticos de alagamentos, que representam regiões de convergência do escoamento superficial (RECANATESI *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2018; ABEDIN & STEPHEN, 2019).

Marafuz *et al.* (2015), levando em conta o arranjo espacial urbano e a geomorfologia local, integram um MDE à um inventário da disposição espacial das superfícies de escoamentos na Vila de Arouca no oeste de Portugal. Assim, estes autores, por meio de investigações de campo, levantaram informações a respeito da direção e percurso dos fluxos de escoamento ao longo das ruas, com a identificação de pontos de convergência e divergência dos fluxos. Ademais, reconheceram regiões em depressões geográficas que são favoráveis ao acúmulo de água e classificaram as ruas e avenidas como condutoras e receptoras. Desta maneira tem-se que as vias responsáveis por canalizar o fluxo para outras ruas são as condutoras, enquanto as receptoras recebem o fluxo de outras ruas e conduzem a água para seus destinos finais, como canais naturais de drenagem, rios, oceano ou lagoas de captação.

De maneira geral, dados primordiais de entrada (altitude e ocupação/infraestrutura do terreno) nos modelos e abordagens supracitados estão disponíveis em bancos de dados governamentais de nível local, nacional ou internacional, mas podem não estar completos ou com a acurácia desejada. O impacto, sobremaneira, da resolução dos dados de elevação tem forte implicações nos modelos de alagamento e inundação. Desta forma, uma resolução (cerca de 2 a 5 m de resolução espacial para imagens raster) e acurácia adequada são necessárias para a representação realística do fluxo superficial em meio à infraestrutura urbana ou ao longo dos arruamentos (FEWTRELL *et al.*, 2008; LEITÃO *et al.*, 2016).

Atualmente, dados de elevação com resoluções espaciais muito altas podem ser facilmente coletados em virtude dos avanços no Sensoriamento Remoto, e suas aplicações para modelagens de alagamentos urbanos tem mostrado relevantes progressos para delimitação do fluxo superficial (OZDEMIR *et al.*, 2013). Apesar disso, os dados de sensores remotos para estas aplicações ainda não são de uso generalizado por dois motivos (EGGIMANN *et al.*, 2017). Primeiramente, exige grande esforço computacional para o registro de grandes áreas e, segundo, em áreas urbanizadas há elementos móveis e temporários como veículos e construções, que são detectados por alguns sensores remotos (e.g., Light Detection and Ranger - LIDAR, VANTs ou Drones), mas não são modelados adequadamente (DOTTORI *et al.*, 2013).

Embora as tecnologias com sensores remotos para obter dados de elevação possuam algumas limitações, estas fontes de dados podem ser muito promissoras quando aplicadas ao mapeamento temático de áreas de interesse. O reconhecimento de elementos urbanos (tipos de edificações e infraestruturas) por meio do Sensoriamento Remoto e SIG torna-se fundamental quando existe o propósito de se avaliar riscos no ambiente urbano face a eventos extremos, decorrentes das mudanças climáticas.

O termo risco, segundo O Escritório das Nações Unidas para Redução de Desastres (UNISDR, 2009, 2015, 2016), é definido como a combinação da probabilidade de um evento perigoso ocorrer e suas consequências negativas, a qual resulta da interação entre vulnerabilidade, exposição e capacidade. De maneira semelhante, A Comissão Econômica da América Latina e o Caribe (CEPAL, 2011) define risco como perdas esperadas em virtude de um evento perigoso (ameaça) sobre um elemento exposto durante um período de tempo. Assim o risco pode ser determinado como resultado do produto entre perigo, exposição e vulnerabilidade (CEPAL, 2011; WISNER *et al.*, 2012; MENDES, 2018).

Os perigos representam um evento físico ou atividade humana potencialmente danosa que podem causar perdas de vida ou ferimentos, danos a propriedades e interferências sociais e econômicas ou degradação ambiental. A exposição é definida como população, propriedades ou outros elementos que estão em determinada área sujeita ao perigo e conseqüentemente susceptíveis

a perdas devido à ocorrência do evento danoso. Os graus de riscos variam também em função da vulnerabilidade, a qual pode ser definida por fatores físicos, sociais, econômicos e ambientais, que podem aumentar a susceptibilidade dos elementos expostos ao efeito nocivo do perigo (UNISDR, 2009; CEPAL 2011; UNISDR, 2015).

Além desses fatores, a avaliação de risco pode considerar atributos e recursos disponíveis pela comunidade, sociedade ou gestores para gerenciar e reduzir os riscos e fortalecer a resiliência dos elementos expostos ao perigo, considerando o fator capacidade (UNISDR 2009, 2015).

Neste contexto, o *National Institute of Water and Atmospheric Research* (NIWA et al., 2012) apresenta a Ferramenta da Matriz de Sensibilidade, que tem o objetivo de auxiliar as autoridades da gestão local a reconhecer os elementos urbanos com necessidades de intervenções mais urgentes no que diz respeito à vulnerabilidade aos eventos naturais extremos. A Matriz de Sensibilidade deve ser desenvolvida por um conjunto de pessoas que possuam experiência de atuação e conhecimento sobre o local de estudo, como agentes da defesa civil, pesquisadores, servidores de órgãos ambientais locais, corpo de bombeiros entre outros profissionais capacitados.

A Matriz de Sensibilidade é constituída em duas dimensões com os elementos decorrentes de mudanças climáticas (alagamentos, inundações, chuvas intensas, deslizamentos etc.) elencados em uma coluna à esquerda e, em contrapartida, os elementos da infraestrutura urbana e edificações potencialmente vulneráveis (rodovias, sistema de drenagem, áreas residenciais) listados em uma linha no topo da matriz. A partir dessa estrutura, cada elemento da matriz é avaliado de acordo com sua vulnerabilidade ao evento extremo (Figura 2.1). Os elementos da Matriz de Sensibilidade devem ser frutos de discussões entre o grupo de profissionais da região de estudo (NIWA et al, 2012).

Abordagens com o uso de matrizes possui grande potencial para determinação da vulnerabilidade, exposição e perigo, que são fatores fundamentais para o cálculo de risco a qualquer tipo de alagamento (ROSENZWEIG *et al.*, 2018). Assim, vários parâmetros podem ser integrados por meio de matrizes de risco como altitude, declividade, tipo do solo, uso e cobertura do solo, geomorfologia, quantidade de residentes, volume de

precipitação, volume de chuva, distribuição de renda, resultando nas variações de vulnerabilidade, perigo e exposição (NETO *et al.*, 2014; ZANIN *et al.*, 2016; AGUIAR *et al.*, 2019; ABEDIN & STEPHEN, 2019)

**Figura 2.1:** Matriz de Sensibilidade apresentada no Workshop de Auckland, Nova Zelândia. As cores vermelha, amarelo e verde representam alto, médio e baixo impacto esperado, respectivamente. Fonte: Adaptado de NIWA *et al.* (2012).

EFEITO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS	RISCO DOS ELEMENTOS URBANOS					
	Transporte		Utilidade pública		Edificações	
	Rodovias	Porto	Sistema de drenagem	Abastecimento de água	Residências	Escolas
Inundação (incluindo rios e superfícies de inundação)	Sim. Vulnerável a locais de drenagem inadequada	Sim	Sim	Pontes de tubulação vulneráveis. Barragem segura. A qualidade da água pode ser reduzida.	Sim. Mas informações difíceis de obter. Provavelmente afeta pequenas regiões, mas com muitas pessoas.	Tal como áreas residenciais. Alguns riscos.
Deslizamentos (incluindo erosão do solo e instabilidade)	Sim. Susceptível em muitas vias locais	Não	Sim	Potencial para falha do reservatório como a Barragem Hunua Waitakere	Alguns. Como acima.	Sim. Algum potencial
Chuva (incluindo chuva de alta intensidade, saturação do solo e umidade)	Todas as vias locais vulneráveis	Sim	Sim. Mais colapso de dutos. Potenciais problemas de saúde pública	Desempenho do vertedouro – com inundação no período de 100 anos	Superfícies de inundação em trechos irregulares.	Em alguns locais, mas menos que as áreas de residências
Inundação Costeira (incluindo aumento do nível do mar, efeitos de intrusão salina e ondas de	Sim, mais os efeitos das intrusões salinas na superfície	Onehunga Wharf com elevado potencial em eventos com períodos de	Sim. Intrusão salina, mal odor e obstrução do duto	Não	Em algumas áreas	Sim. Algumas áreas

tempestade)		100 anos				
Erosão Costeira	Menos vulnerável, mas há potencial problema nas escarpas	Não, exceto Onehunga Wharf com alta probabilidade	Sim	Não	Em algumas áreas	Sim. Em algumas áreas

## 2.2 GEODÉSIA DE PRECISÃO APLICADA À INFORMAÇÃO ALTIMÉTRICA

A tecnologia GNSS permite a coleta, não apenas, de coordenadas planimétricas, mas também informações altimétricas do terreno com precisão centimétrica, quando os dados são processados com informações e critérios adequados (SANTOS & SÁ, 2006; MONICO, 2008). Esta tecnologia utiliza-se das constelações de satélites dos sistemas GPS, GLONASS e Galileo, os quais estão munidos de relógios atômicos e fornecem sinais eletromagnéticos, que quando captados pelos receptores dos usuários são computados na forma de posição, tempo e velocidade (GONÇALVES, 2011). Este tipo de tecnologia, apesar de fornecer alta precisão, foge parcialmente das limitações discutidas por Eggiman *et al.* (2017), como o alto esforço computacional e limitações de modelagens no ambiente urbano, pois possui simplicidade operacional e não requer elevado esforço para processamento de dados. Por outro lado, pode sofrer interferências em áreas urbanizadas dos sinais emitidos por satélites, devido à presença de obstáculos como edificações de alturas mais elevadas que provocam erros de multicaminhamento (SOUZA, 2008; MONICO, 2008).

A coleta de coordenadas planialtimétricas com precisão e baixo custo atrai o interesse de muitos pesquisadores e profissionais. Por este motivo a tecnologia GNSS é aplicada em inúmeras áreas do conhecimento com aplicações, por exemplo, no monitoramento de barragens, ortorretificação de imagens de satélites e veículos aéreos, análises de variações no posicionamento de linhas de costa entre outros usos (e.g., SANTOS *et al.*, 2012; SIGUEL *et al.*, 2013; SANTOS *et al.*, 2013; MENDONÇA *et al.*, 2014; SANTOS *et al.*, 2014; BERVEGLIERI *et al.*, 2015). Apesar de apresentar

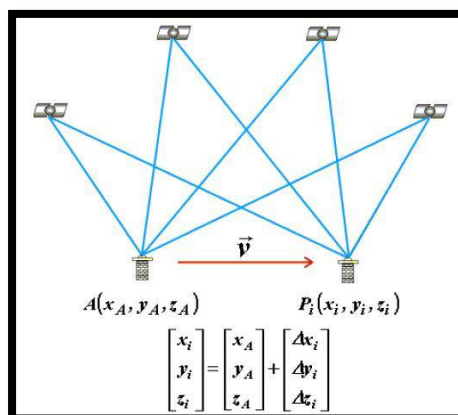
certas limitações com o erro de multicaminhamento, a aplicação desta tecnologia em áreas urbanas não se torna inviável, desde que um bom planejamento na seleção de bases de referência seja realizado e/ou sejam aplicadas técnicas de pós-processamento para identificação e atenuação deste erro (ALVES *et al.*, 2013).

Kalayci e Ogutcu (2014) aplicaram técnicas GNSS motorizadas em uma área residencial na cidade de Koya, Turquia. Nesta abordagem foi projetada uma estrutura adequada para encaixe da antena do GPS em um veículo e também um suporte para fixação de uma estação total, de forma que nos locais onde os sinais do sistema GNSS foram comprometidos por obstáculos fez-se o uso da estação total. Levando em conta a aplicabilidade e a economia em termos de tempo de pesquisa, custos financeiros e de mão-de-obra, este método mostrou-se muito produtivo mesmo quando é aplicado por poucas pessoas por meio do posicionamento *Stop and Go* de coleta de dados com receptor GNSS (KALAYCI E OGUTCU, 2014).

No posicionamento e levantamento com as técnicas de GNSS é fundamental a existência de bases de referência (SANTOS & SÁ, 2006; MONICO, 2008). Assim, utilizam-se dois aparelhos receptores para coletas de dados, simultaneamente, durante um determinado intervalo de tempo, de forma que um aparelho permanece instalado sobre uma estação base fixa pré-definida e o outro na posição móvel de interesse (MONICO, 2008; AMARO *et al.*, 2012). Pelo fato de envolver dois aparelhos e seus vetores representativos das distâncias entre si e os satélites (Figura 2.2), este método de levantamento é denominado relativo e proporciona elevada precisão.

No Brasil existem as estações de referência pré-fixadas pertencentes a Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), que foram materializadas através de pinos de centragem forçada, especialmente projetados, e cravados em pilares estáveis, instalados a partir de 1996 (Figura 2.3). Cada uma das estações ativas da RBMC é equipada com receptor GNSS de alto desempenho que mantém o monitoramento 24 h por dia, mantido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), e que visa à utilização do sistema GNSS no método relativo. As estações da RBMC desempenham o papel de fornecer coordenadas conhecidas pertencentes ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), o qual apresenta coordenadas finais com precisão de  $\pm 5$  mm (IBGE, 2017a).

**Figura 2.2:** Ilustração do método de posicionamento relativo no sistema GNSS. Fonte: AMARO *et al.*, 2012.



**Figura 2.3:** Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). Fonte: IBGE (2019).



Além das estações da RBMC o Brasil conta com a Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP), instalada a partir de 1945 através do Nivelamento Geométrico de Alta Precisão. A instalação dessa rede permite até hoje o suporte às grandes obras de engenharia, através de marcos materializados

sobre o terreno, denominados de Referências de Nível (RRNN) que contém informações altimétricas precisas e espaçamentos de 5 km entre cada marco.

As RRNN fornecem dados cruciais para os levantamentos com GNSS, pois possuem altitudes ortométricas referidas ao nível médio do mar, calculado no Marégrafo de Imbituba, Estado de Santa Catarina (IBGE, 2017b). Assim, a existência destas duas redes de referência, tanto para auxílio na determinação de coordenadas planimétricas quanto coordenadas altimétricas, fornece o respaldo necessário na aplicação de técnicas GNSS.

Em virtude da grande área territorial do Brasil, mesmo com a implantação da RAAP e RBMC, algumas regiões ainda carecem de referenciais geodésicos. A ausência de informações deste tipo reduz a acurácia do método, uma vez que quanto maior a distância entre as bases de referência maior a quantidade de erros associados aos dados finais (ROSALEN, 2014). Desta maneira, Santos & Amaro (2011), apresentam uma abordagem para a implantação local da Rede Geodésica do Litoral Setentrional (RGLS) no Estado do Rio Grande do Norte. A abordagem proposta foi constituída de três etapas: *i)* implantação das estações da RGLS; *ii)* Determinação de coordenadas geodésicas; e, *iii)* Determinação das Altitudes Ortométricas.

Na primeira etapa, destaca-se o planejamento da distribuição geográfica das estações da rede que foi elaborado a fim de proporcionar distâncias curtas (distâncias máximas de 3,5 km) entre os aparelhos receptores. Através deste planejamento foi garantida a alta precisão ao posicionamento relativo cinemático (realizado posteriormente), que consiste em fixar um dos receptores em local de coordenadas conhecidas (estações materializadas da RGLS), enquanto o segundo aparelho coleta dados em movimento. Ademais, os referidos autores buscaram posicionar os marcos de referência de modo a evitar problemas de multicaminhamento.

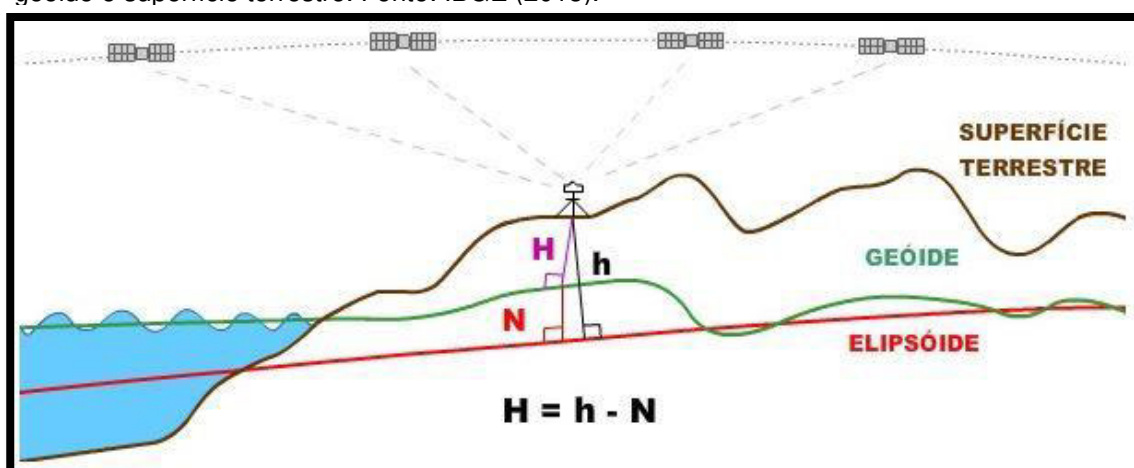
A segunda etapa consistiu na aplicação do método relativo estático com GPS para determinação das coordenadas geodésicas dos marcos a serem implantados na região. O método relativo estático consiste na coleta de informações com os dois receptores em posições estáticas. Primeiramente, o método relativo estático teve como finalidade a determinação das coordenadas geodésicas do marco central da rede, tomando como referência as duas estações mais próximas da RBMC, que foram as de Natal (RNNA) e Mossoró



(RNMO), distantes, respectivamente 95 km e 164 km da estação central. Devido as grandes distâncias das bases (>100 km) é necessário o mínimo de quatro horas de duração da sessão de levantamento com receptores do tipo L1/L2 (IBGE, 2008; INCRA, 2013). Na abordagem de Santos & Amaro (2011) o tempo de duração foi de seis horas. As coordenadas das demais estações foram determinadas em segundo momento, desta vez, tomando como referência a própria estação central da rede, e por envolver distancias curtas foram realizados sessões de apenas uma hora.

Na terceira etapa foram determinadas as altitudes ortométricas, relacionadas ao geóide, o qual consiste na equipotencial do campo de gravidade da Terra e coincide com o nível médio dos mares. As alturas ortométricas foram calculadas a partir das altitudes geométricas, obtidas com o receptor GNSS e referidas à superfície do elipsoide de referência utilizado no levantamento. Este procedimento é necessário, visto que a altitude determinada diretamente pelos receptores GNSS representam alturas geométricas, que estão relacionadas apenas a um elipsoide de referência e não ao nível médio do mar (IBGE, 2017b). A Figura 2.4 ressalta, esquematicamente, as diferenças entre as alturas geoidal (N), geométrica (h) e ortométrica (H), além da relação matemática entre elas.

**Figura 2.4:** Alturas geoidal (N), geométrica (h), ortométrica (H), que representam as distâncias, respectivamente, entre o elipsoide e geóide, elipsoide e superfície terrestre e, geóide e superfície terrestre. Fonte: IBGE (2018).



Nestas circunstâncias para o cálculo da altura ortométrica de um ponto de interesse (*i*), é necessário, pelo menos, uma estação de referência (*A*), de

coordenadas geodésicas ( $\alpha_A$ ,  $\lambda_A$ ,  $h_A$ ) e altitudes ortométricas conhecidas ( $H_A$ ). O cálculo é feito através das diferenças das alturas geométricas ( $\Delta h_i = h_A - h_i$ ), determinadas pelo receptor GNSS, e das diferenças de alturas geoidais ( $\Delta N_i = N_A - N_i$ ), determinadas a partir de um modelo geoidal, as quais são inseridas na seguinte equação (FEATHERSTONE *et al.*, 1998; OLLIKAINEN *et al.*, 1988; SANTOS & SÁ, 2006; SANTOS *et al.*, 2012):

$$H_i = H_A + \Delta H_i = H_A + (\Delta h_i - \Delta N_i) \quad (2.1)$$

Santos *et al.*, 2015, ao aplicar os conceitos e abordagens definidos por Featherstone *et al.* (1998), Ollikainen *et al.* (1988) e Santos & Amaro (2011) na coleta de coordenadas planialtimétricas no método relativo cinemático, concluíram que em áreas de grandes dimensões e variações topográficas o sistema GNSS mostrou resultados satisfatórios. Estes autores realizaram, através dos dados coletados, o MDT de uma faixa de praia, que apresentou acurácia quase duas vezes maior que MDT elaborado a partir de métodos topográficos convencionais.

Frente às aplicações e metodologias apresentadas, o sistema GNSS com levantamento por GPS geodésico de alta precisão mostra grande potencial para validação e produção de MDEs aplicados a análises de inundações e alagamentos na Cidade de Natal/RN. Em especial, porque as metodologias já estabelecidas em estudos anteriores permitem vincular as coordenadas planialtimétricas ao SGB, ou seja, os dados produzidos estarão atrelados a um referencial unívoco em todo o Brasil. Desta maneira, seria possível a comparação entre dados de diferentes partes do território brasileiro.

### 2.3 HISTÓRICO DE ALAGAMENTOS EM NATAL

A Cidade de Natal possui um amplo histórico de alagamentos. Todos os anos durante chuvas mais intensas é possível identificar trechos urbanos submergidos e prejudicados pelo nível das águas (Figura 2.5). Neste trabalho, o termo chuvas intensas é definido como precipitações ocorridas durante uma hora com volumes capazes de gerar alagamentos. De acordo com os registros

de alagamentos no Bairro do Tirol, volumes de aproximadamente 10 mm ou superior podem causar alagamentos quando ocorrem de maneira intensa em curto período de tempo de uma hora. Após dias consecutivos de pancadas de chuvas a situação tende a se agravar com a saturação do solo e/ou obstrução do sistema de drenagem, de modo que volumes menores que 10 mm podem provocar alagamentos.

**Figura 2.5:** Consequências de alagamentos nas depressões topográficas identificadas na área de estudo: A) Alagamento em área com hospitais, clínicas médicas e lojas comerciais na Rua Mossoró em 29/05/2014; B) Problema de subsidência da pavimentação exatamente em local de alagamento no cruzamento da Rua Mossoró com a Av. Afonso Pena em 27/12/2015; C) Submersão de cômodos de residência no cruzamento da Rua Mossoró com a Av. Afonso Pena em 22/04/2017; D) Submersão de veículo na Rua Mipibu em junho de 2011; E) Grandes trechos de vias obstruídas pelas águas pluviais nas proximidades da Rua Mipibu em 11/04/2017 (SOARES, 2017).



Conforme a base de dados históricos de precipitação pluviométrica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), praticamente em todos os últimos dez anos houve chuvas acima dos 90 mm/dia, com exceção dos anos de 2010

e 2015 nos quais tiveram máxima de precipitação de cerca de 70 mm/dia (INMET, 2018). Em eventos de tempestades com grandes volumes de precipitação em poucos dias, próximos dos 100 mm ou mais, é provável a ocorrência de outros danos ao ambiente urbano e a sociedade, como deslizamentos de terra, queda de árvores, subsidência de pavimento, entre outros, além dos alagamentos.

Dentre os vários eventos de tempestades, destaca-se a chuva com mais de 40 horas ininterruptas no final de julho de 1998 com precipitações de 135 e 253 mm nos dias 29 e 30 deste mês, respectivamente. Segundo dados históricos do INMET no dia 30 de julho de 1998 foi registrado a maior precipitação pluviométrica pelo menos dos últimos 56 anos na cidade. Neste evento extremo a Prefeitura de Natal decretou estado de calamidade pública, com 500 famílias desabrigadas, 6 mortos, além de registros de rodovias interditadas, queda de barreira de contenção na saída da cidade e deslizamento de terra na cidade vizinha de Ceará Mirim (LIMA, 1998).

A segunda maior chuva no período de tempo supracitado aconteceu em 14 e 15 de junho de 2014 com precipitações de 131 e 222 mm, respectivamente. Este evento foi marcado pelo deslizamento de mais de 50.000 m<sup>3</sup> de areia e entulhos no Bairro de Mãe Luíza e Areia Preta com destruição de várias edificações desde imediações da Rua Atalaia até a Avenida Silvio Pedrosa na orla da Praia de Areia Preta (SANTOS JÚNIOR. *et al.*, 2016). Além disso, carros que passavam na Avenida Silvio Pedrosa no momento exato do maior deslizamento foram soterrados pelo grande volume de terra e entulhos (Figura 2.6).

Além desses dois eventos extremos de precipitação, nos últimos 56 anos houve 9 eventos com precipitações acima de 150 mm, conforme série histórica de dados do INMET. A Tabela 2.1 apresenta o registro do volume das chuvas e suas respectivas datas de ocorrência.

Desta maneira, com base no relatório técnico de Manejo de Águas Pluviais em Natal (NATAL, 2014) e registros jornalísticos da cidade, é possível identificar vários trechos de alagamentos corriqueiros na cidade. No bairro do Tirol os principais pontos de alagamentos podem ser visualizados na Figura 2.7 e Quadro 2.1.

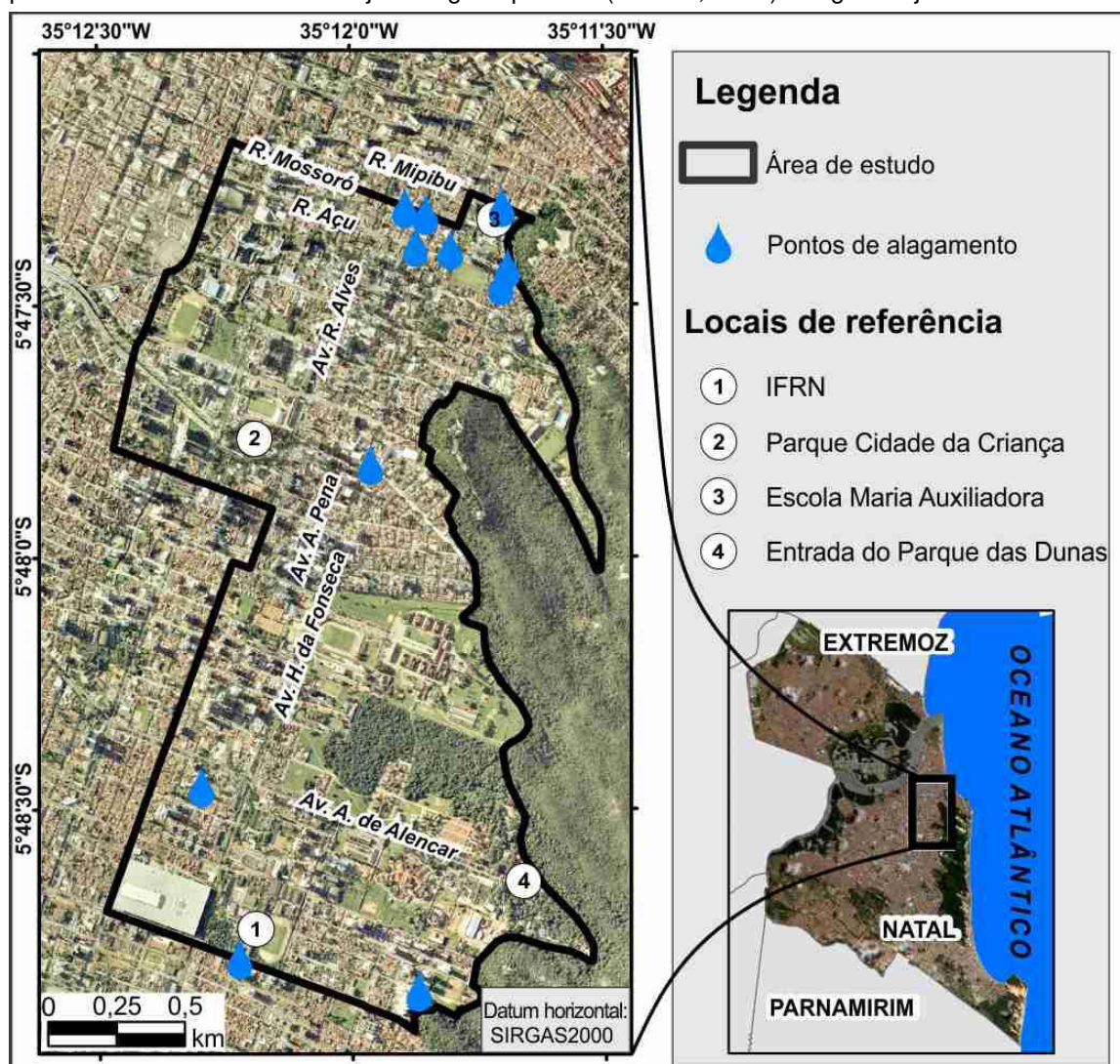
**Figura 2.6:** Soterramento de carros na Avenida Silvio Pedrosa em 15/06/2014. Fonte: Fotojornalismo Canindé Soares.



**Tabela 2.1:** Registro das maiores precipitações acima de 150 mm/dia em Natal/RN. Fonte: INMET (2018).

Precipitação diária (mm)	Data de ocorrência
253,2	30 de julho de 1998
222,0	15 de junho de 2014
216,8	2 de julho de 2008
210,4	9 de junho de 2008
184,4	27 de junho de 2000
171,9	8 de agosto de 2008
168,4	5 de maio de 1998
167,7	18 de junho de 1986
163,5	16 de maio de 2005
153,1	17 de junho de 2001
152,4	15 de julho de 2004

**Figura 2.7:** Localização dos principais trechos de alagamentos no Bairro do Tirol, identificados por meio do Relatório de Manejo de Águas pluviais (NATAL, 2014) e registros jornalísticos.



**Quadro 2.1:** Principais trechos de alagamentos no Bairro do Tirol, identificados por meio do Relatório de Manejo de Águas pluviais (NATAL, 2014) e registros jornalísticos.

Pontos de Alagamentos	Locais de Referência
Rua Mipibu	Ao lado da escola Maria Auxiliadora
Cruzamento da Rua Mossoró com a Rua Cônego Leão Fernandes	Em frente ao Hospital de Olhos do RN
Cruzamento da Rua Mossoró com Avenida Afonso Pena	Próximo ao Banco Itaú Personalité
Cruzamento da Rua Açú com a Avenida Afonso Pena	Em frente à farmácia Drogasil
Cruzamento da Avenida Hermes da	Próximo a Associação dos

Fonseca com a Rua Ângelo Varela	Aposentados e Funcionários do Banco do Brasil (AABB)
Rua Vale de Miranda	Próximo ao shopping Midway Mall
Avenida Bernardo Viera	Na lateral do Instituto Federal do RN (IFRN)
Rua Pio Cavalcanti	Próximo ao Parque das Dunas

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo serão elucidadas as características físicas cruciais para a realização desta pesquisa que estão relacionadas ao contexto geológico e geomorfológico da área de estudo. Além disso, é fundamental a compreensão do contexto climatológico em que a cidade de Natal está inserida, uma vez que rege a frequência e a intensidade dos alagamentos. Assim, o regime de chuvas, sua interação com a geomorfologia local que constituem as bacias hidrográficas também serão discutidas e apresentadas.

#### 3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOMORFOLÓGICO

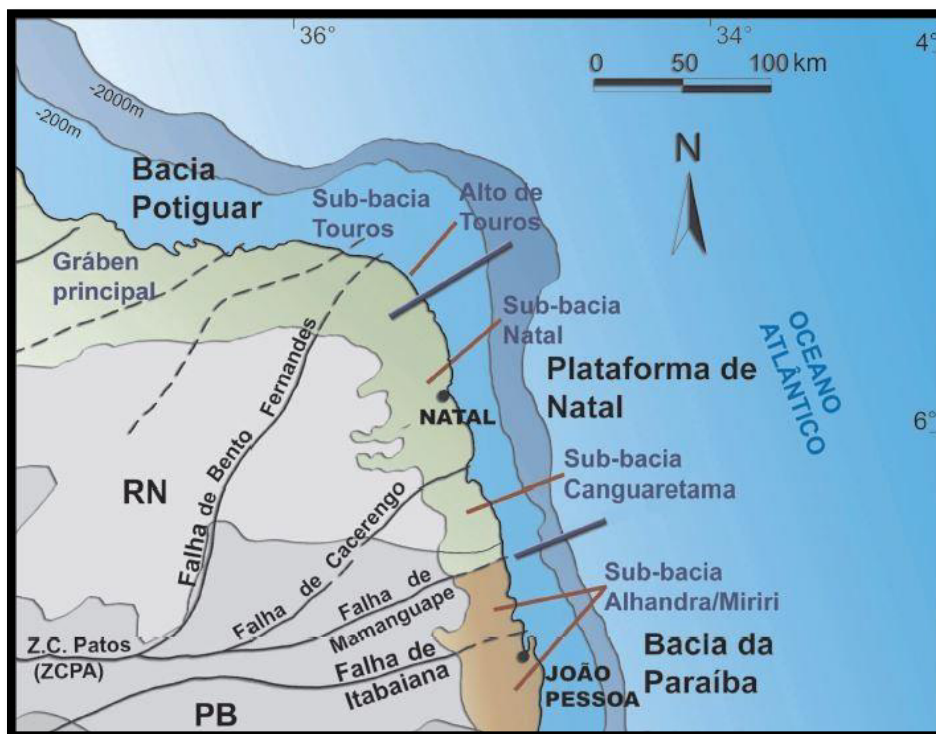
A área de estudo está localizada na faixa sedimentar costeira oriental do Estado do Rio Grande do Norte, no contexto da Sub-bacia Natal (Figura 3.1), pertencente à Bacia Pernambuco-Paraíba (MABESOONE & ALHEIROS, 1988; BARBOSA & LIMA FILHO, 2006). Na região adjacente, a oeste de Natal, o embasamento cristalino é constituído pelo Subdomínio Geofísicotectônico São José do Campestre (Figura 3.2), o qual é marcado por grandes lineamentos e zonas de cisalhamento com direção predominante sudeste-nordeste (JARDIM DE SÁ *et al.*, 1992; AMARO, 1998). Provavelmente tais estruturas estendem-se sob a Formação Barreiras e sob os sedimentos cretáceos e paleogênicos da Bacia Pernambuco-Paraíba, com influências na margem continental adjacente (MOREIRA *et al.*, 2014).

Em conformidade com o mapeamento geológico realizado na região estudada pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2012), a Cidade de Natal é caracterizada pela presença aflorante das seguintes unidades geológicas: Grupo Barreiras; e os depósitos aluvionares antigos, marinhos e continentais, arenosos e areno-argilosos, flúvio-marinhos, aluvionares de canal, eólicos litorâneos vegetados, eólicos litorâneos não-vegetados, litorâneos praias e os recifes arenosos (“*beach rocks*”). Além dessas unidades, conforme descrito por Moreira (1996), existe a Formação Potengi sobreposta ao Grupo Barreiras, e segundo Moreira (2014), há também uma unidade mais antiga que as outras supracitadas, de idade mesozóica,

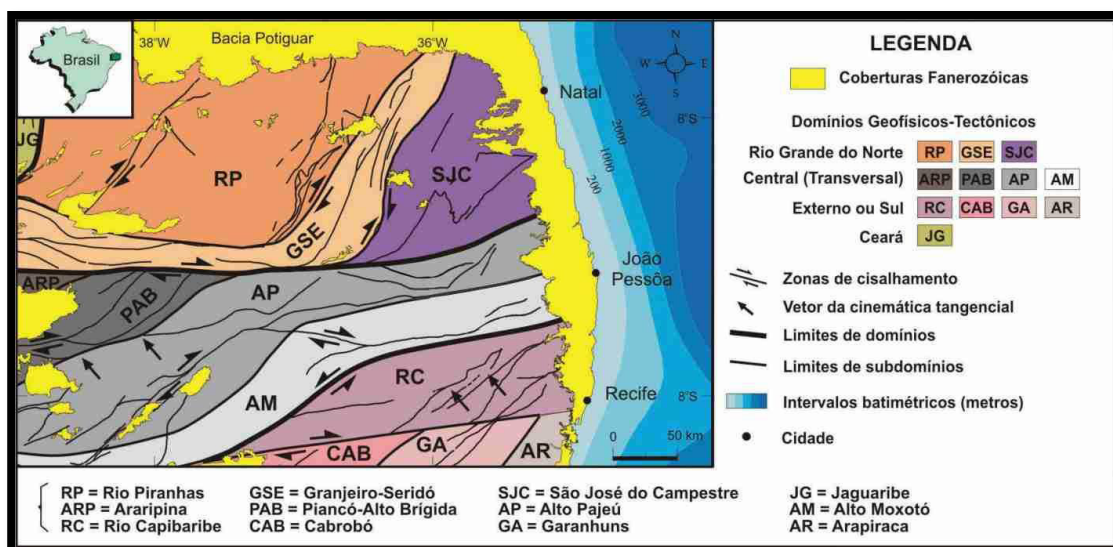


detectada apenas em subsuperfície através de perfis de poços e que seria correlata a Formação Guimarães da Bacia Potiguar.

**Figura 3.1:** Localização da Sub-bacia Natal. Fonte: Adaptado de Barbosa & Lima Filho (2006).

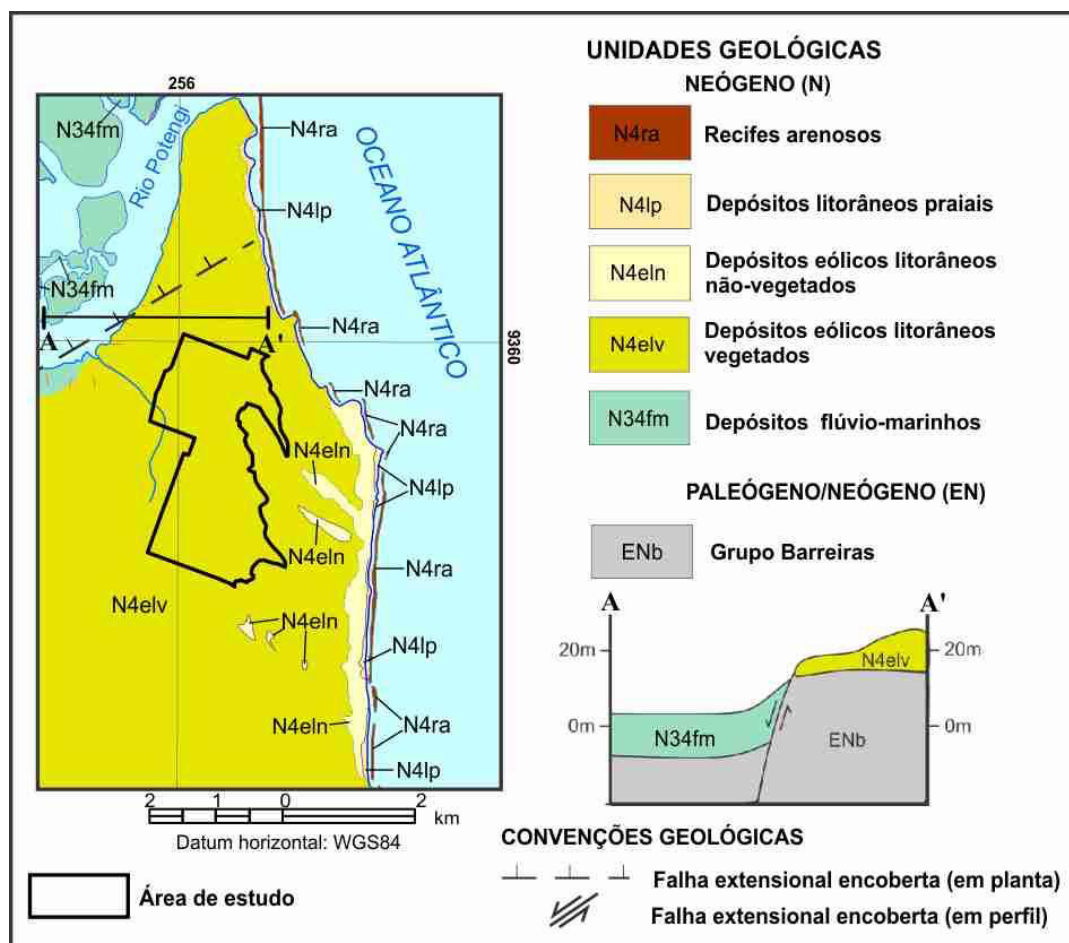


**Figura 3.2:** Contexto geológico regional da área de estudo, que contempla a porção setentrional da Província Borborema. Fonte: Adaptado de Oliveira (2008).



Apesar do mapeamento de dez unidades geológicas aflorantes em toda a área de ocupação da Cidade de Natal, a área de estudo é marcada apenas por uma unidade geológica aflorante, que consiste nos Depósitos eólicos litorâneos vegetados (Figura 3.3). Esta unidade é caracterizada por areias quartzosas bem selecionadas ou mal graduada de coloração avermelhada (presença de óxido de ferro) a amarronzada (matéria orgânica em decomposição) com formas de dunas residuais (CPRM, 2012). Moreira (1996) descreve esta unidade como depósitos retrabalhados da Formação Potengi com espessura de até 13 m e de granulometria fina a média pouca argilosa, de acordo com perfil SPT (*Standard Penetration Test*). Em geral, na área de estudo a morfologia de dunas deste tipo de depósito foi parcialmente destruída por atividades de terraplanagem com fins de ocupação urbana na área de estudo.

**Figura 3.3:** Mapa geológico para a área de estudo. Alguns autores como Moreira (1996) ainda representam a Formação Potengi no topo do Grupo Barreiras, sotoposta aos depósitos eólicos. Fonte: Adaptado de CPRM (2012).



O contexto geomorfológico em que a Cidade de Natal está inserida relaciona-se sobremaneira aos depósitos arenosos quaternários, que deram origem a campos dunares acomodados sobre o Grupo Barreiras e a Formação Potengi. Por sua vez, os afloramentos do Grupo Barreiras ocorrem nas regiões costeiras delimitando as regiões litorâneas das sublitorâneas (BARRETO *et al.*, 2004), tal como ocorrem em alguns trechos da Via Costeira na Cidade de Natal com a formação de falésias.

Alguns estudos geomorfológicos foram realizados envolvendo a Cidade de Natal, dentre os quais se destaca o mapeamento realizado por Silva (2002), visto que apresenta escala de maior detalhe com segmento de área mapeada desde a Praia do Forte, na Cidade de Natal, até a Praia de Cotovelo, no município de Parnamirim. Silva (2002) reconhece seis unidades geomorfológicas: Corredores de Vento ou *blowouts*, Campos de Dunas Ativas, Campos de Dunas Fixas por Vegetação, Campos de Dunas Parabólicas, Campos de Dunas Parabólicas Avermelhadas e Superfícies de Dunas Arrasadas.

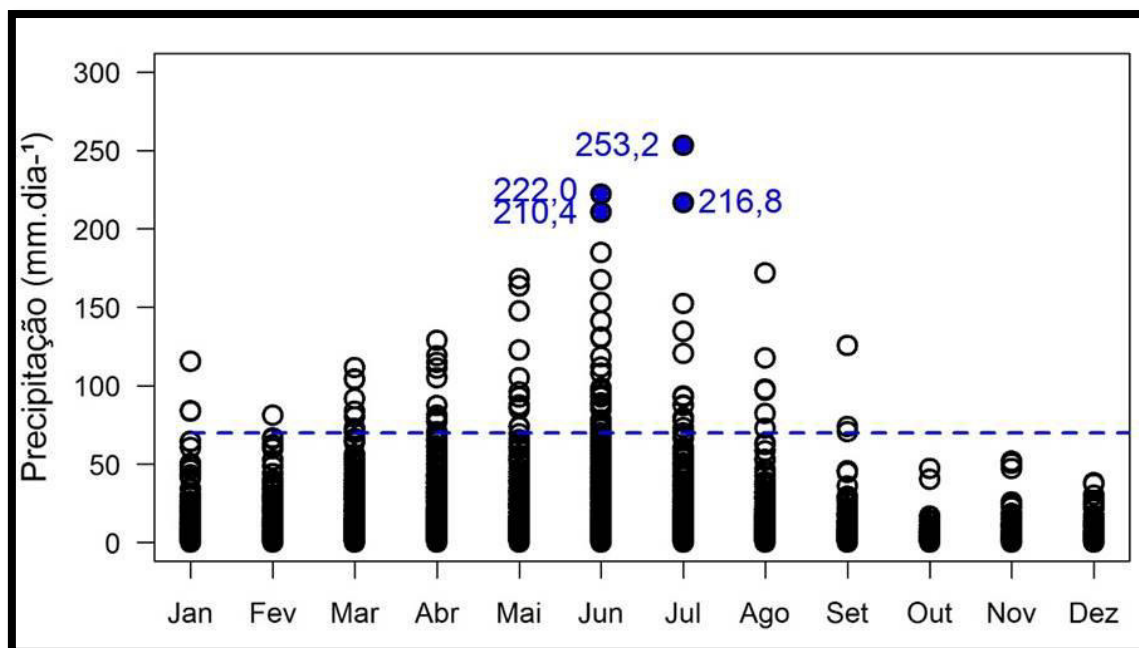
No mapeamento realizado por Silva (2002), todo o Bairro do Tirol encontra-se sobre a unidade geomorfológica de Superfícies de Dunas Arrasadas, provavelmente embasadas pelas rochas do Grupo Barreiras. Esta unidade caracteriza-se por apresentar depósitos com coloração avermelhada com superfícies arrasadas e morfologia de dunas parcialmente destruída em decorrência de atividades de terraplanagem para ocupação urbana. Além disso, estes terrenos apresentam nível topográfico inferior às unidades vizinhas que, na localidade deste bairro, trata-se da unidade de Campos de Dunas Fixas por Vegetação. Na área de estudo, esta última unidade é constituída por campos dunares de coloração amarelo esbranquiçada com cerca de 6 km de extensão, largura média de 1,5 km e altitudes variando entre 80 a 125 m. Na vizinhança da área de estudo esta unidade corresponde ao Parque das Dunas.

### 3.2 CONTEXTO CLIMATOLÓGICO

No contexto climatológico da faixa costeira oriental do Rio Grande do Norte, a Cidade de Natal é a representante típica do Clima Tropical com Verão Seco (As), segundo Alvares *et al.* (2013). O Clima As em Natal é caracterizado

por um inverno chuvoso, no qual as chuvas se concentram de maio a julho, e uma estação intensamente seca na primavera, que se estende de setembro a dezembro. Nos períodos mais chuvosos a precipitação pluviométrica pode ultrapassar os 250 mm por dia (Figura 3.4) com variações de temperaturas em torno de 27° C (ALVARES *et al*, 2013).

**Figura 3.4:** Distribuição mensal do acúmulo de precipitação diária na cidade de Natal. Os valores em azul representam os maiores valores acumulados de precipitação diária. A linha em azul representa o limiar de evento extremo, segundo Amorim *et al.*, 2019. O gráfico representa 31 anos de dados de precipitação (1986 a 2016). Fonte: Amorim *et al.* (2019)



No tocante aos aspectos quantitativos das variáveis climáticas, Santo & Silva (2016) utilizaram a base de dados do INMET com série histórica de cerca de 30 anos de médias mensais para realização da estatística descritiva sobre o clima de Natal. A base de dados utilizados por estes autores compreende o período de janeiro de 1984 a novembro de 2015 (31 anos e 10 meses) para análise da temperatura do ar, precipitação acumulada e umidade relativa do ar. No que diz respeito a variável velocidade do vento, o período da base de dados foi de janeiro de 1984 a dezembro de 2014 (30 anos e 11 meses).

Desta maneira, verifica-se que em Natal, no período analisado, a precipitação mostrou uma média mensal de 144,1 mm ( $\pm 146,05$  mm), com máxima de 791,8 mm mensal. A média da umidade relativa do ar foi de 80,42% ( $\pm 3,81\%$ ), com maiores percentuais no mês de junho, de modo que os maiores

registros estão em concomitância com os meses mais chuvosos. A variabilidade da temperatura do ar mostrou médias mensais de 26,4°C ( $\pm 1,05^\circ\text{C}$ ), com mínimas médias de 23,03 °C ( $\pm 1,76^\circ\text{C}$ ) e máximas médias de 29,68°C ( $\pm 0,9^\circ\text{C}$ ). A temperatura máxima mensal foi de 32,54°C, registrada no final de março. Por fim, para a velocidade do vento a média registrada foi de 4,28 m/s ( $\pm 0,67\text{m/s}$ ), com velocidade máxima média de 7,7 m/s ( $\pm 1,9\text{m/s}$ ).

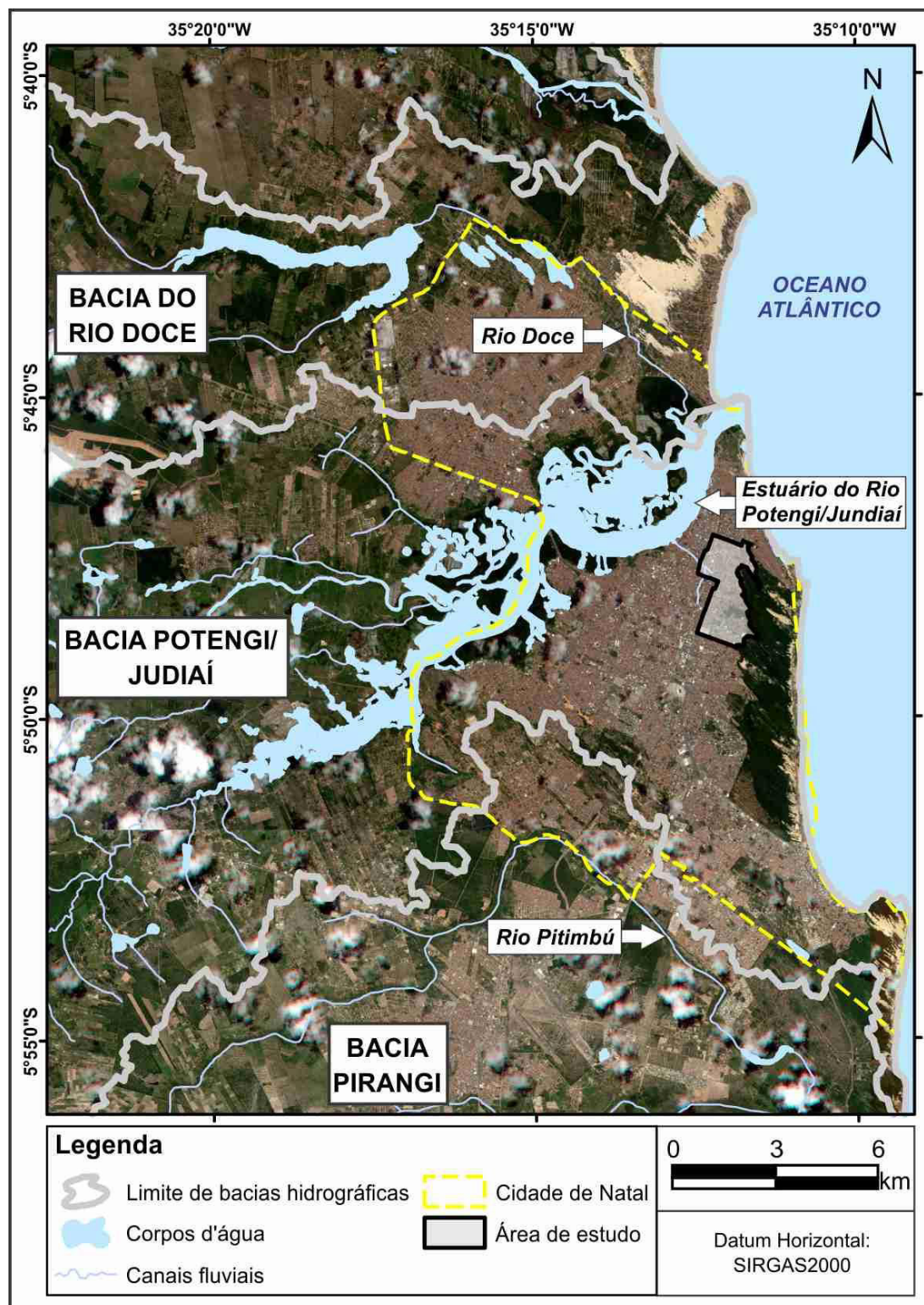
Para a melhor compreensão de eventos extremos de precipitação é importante elucidar que a faixa costeira oriental do RN é influenciada sobremaneira por cinco mecanismos meteorológicos: os eventos El Niño-Oscilação Sul (ENOS); Temperatura da Superfície do Oceano Atlântico (TSM), Ventos Alísios, Pressão do Nível do mar (PNM); Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o Oceano Atlântico; Frentes Frias e; Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (UVO *et al.*, 1995; UVO & BERNDTSSON, 1996). Por fim, Ferreira & Melo (2015) também apontam as Linhas de Instabilidade e os Complexos Convectivos de Mesoescala como causadoras de chuvas intensas na região estudada.

### 3.3 HIDROGRAFIA

Para a melhor compreensão e interpretação de dados relacionados à hidrodinâmica superficial, é importante o conhecimento do contexto regional e local das bacias e sub-bacias hidrográficas e de drenagem, sobre as quais a cidade de Natal se desenvolveu. Assim, esta hidrografia contempla os estuários das bacias do Rio Potengi/Jundiaí e Rio Doce, além de envolver pequeno trecho da Bacia do Rio Pirangi (Figura 3.5).

De modo geral, a Bacia do Rio Potengi/Jundiaí ocupa área de 4.093 km<sup>2</sup> (7,7% do território estadual) e deságua junto à capital Potiguar, entre as zonas administrativas Norte (ao norte do estuário), Leste e Oeste (ao sul do estuário) numa região de planície flúvio-marinha que, para montante, transforma-se em planície fluvial. Por sua vez, a Bacia do Rio Doce se estende por 387,8 km<sup>2</sup> (0,7% do território estadual) e no seu baixo curso possui principal canal (Rio Doce) confluindo para mesma região do exutório da Bacia Potengi/Jundiaí. Por fim, a Bacia Pirangi ocupa uma área de 458,9 km<sup>2</sup> (0,9% do território estadual) com estuário da bacia entre os municípios de Parnamirim e Nísia Floresta no

**Figura 3.5:** Baixo curso das bacias do Rio Doce e do Rio Potengi/Jundiá, que possuem exutórios na Cidade de Natal, além do pequeno trecho da Bacia Pirangi que se estende sobre a cidade na sua região sul. Os rios dessas bacias com grande influência sobre a cidade são os rios: Doce, Potengi/Jundiá e Pitimbú. Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA, 2018). Imagem Rapideye de 09/2013.



RN. O Rio Pitimbú, pertencente a esta bacia, é um dos principais mananciais

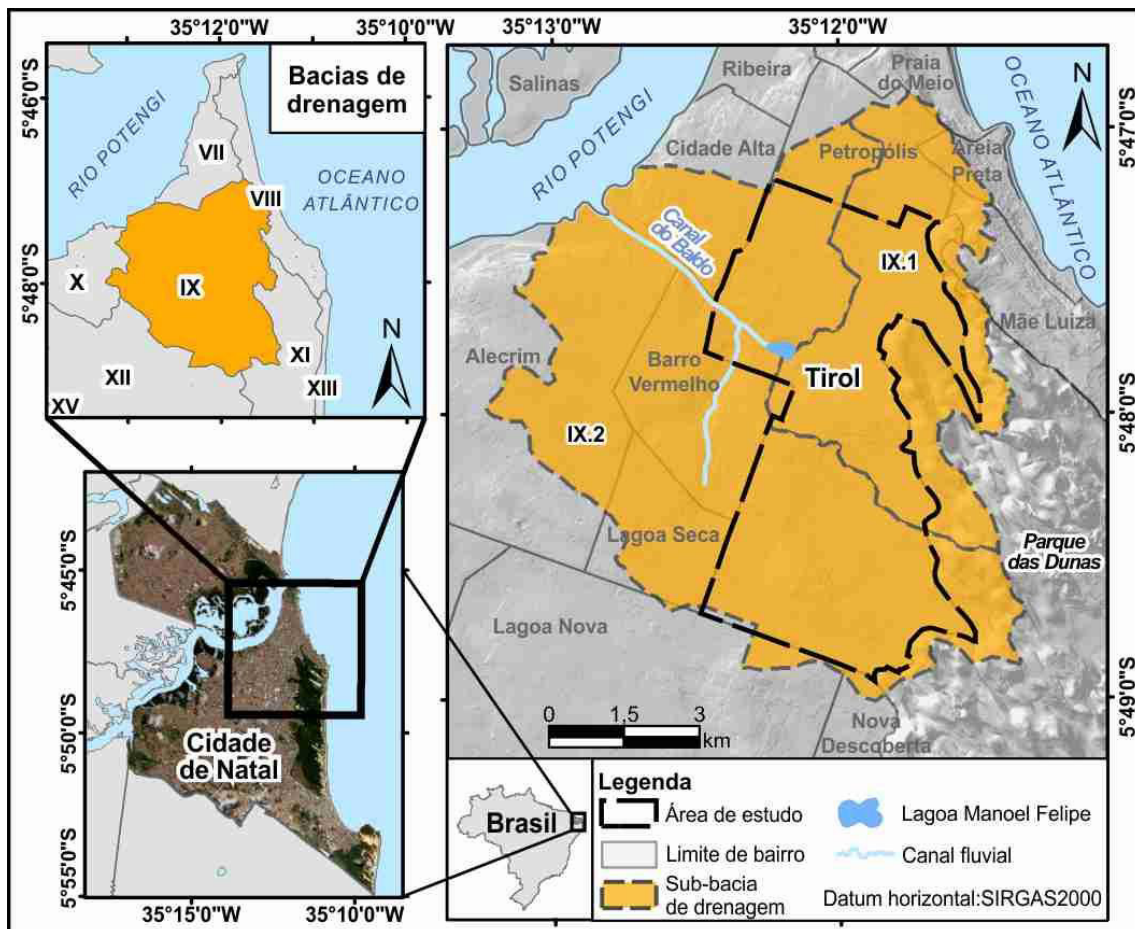
de água potável para a Cidade de Natal e localiza-se nas adjacências dos bairros Pitimbú e Planalto (RN, 1998).

Em perspectiva local destacam-se as bacias de drenagem da cidade, que podem ser classificadas como fechadas, quando não possui exutórios para escoamento da água para rios ou oceano, ou abertas, quando possuem exutórios (NATAL, 2014). Assim, na cidade de Natal há grandes quantidades de lagoas artificiais e naturais de bacias fechadas em que a maior parte da água escoar através da infiltração subsuperficial. Entre os anos de 1980 e 2010 a cidade se desenvolveu expressivamente em locais de baixos topográficos e regiões em torno de lagoas naturais (COSTA, 2015), que são áreas naturalmente alagáveis, favorecendo a intensa impermeabilização do solo. Portanto, em períodos de grandes volumes de chuvas lagoas transbordam e depressões são alagadas, fazendo com que as águas ultrapassem os limites impostos pela urbanização e alcancem as edificações.

Quanto à área de estudo, o Bairro do Tirol está localizado sobre a bacia de drenagem aberta Riacho do Baldo (IX). Esta bacia ainda faz fronteira com as seguintes bacias: Praias Urbanas (VIII) a nordeste, Potengi/Rocas-Ribeira (VII) a norte, Rio das Lavadeiras (XII) a sudoeste, Potengi/ Quintas-Base Naval (X) a oeste e Parque das Dunas (XI) a sudeste. Dentre estas, apenas a Bacia do Parque das Dunas é fechada. A Bacia IX possui área de 876 ha, margeia o Rio Potengi a noroeste, e faz limite com o Parque das Dunas a leste. Esta bacia contempla parte dos bairros de Petrópolis, Cidade Alta, Alecrim, grande parte de Lagoa Seca, a totalidade dos bairros de Barro Vermelho e Tirol, além de avançar por pequeno trecho nos bairros de Mãe Luíza, Areia Preta, Nova Descoberta e Lagoa Nova (NATAL, 2009).

O Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais de Natal - PDDMA (NATAL, 2009) ainda subdividiu as bacias de drenagem em sub-bacias para realizar análises mais precisas quanto ao sistema de drenagem e manejo das águas pluviais. Sub-bacia de drenagem consiste no conjunto de terrenos que, numa percepção integrada, são considerados como geradores de escoamento para cada corpo d'água receptor final do volume precipitado na sua região. Desta maneira, a Bacia Riacho do Baldo foi fragmentada nas Bacias IX.1, porção leste, e IX.2, porção oeste, conforme Figura 3.6 (NATAL, 2009).

**Figura 3.6:** Bacias e sub-bacias de drenagem do Bairro do Tirol e adjacências. Bacias: Riacho do Baldo (IX); Praias Urbanas (VIII), Potengi/Rocas-Ribeira (VII), Rio das Lavadeiras (XII), Bacia do Parque das Dunas (XI) e Bacia Potengi/ Quintas-Base Naval (X).



Entre os corpos hídricos na área de estudo destacam-se a Lagoa Manoel Felipe, situada no Parque Cidade das Crianças na Rua Rodrigues Alves, e o Canal do Baldo, localizado paralelamente à Av. Governador Juvenal Lamartine, que capta a água da Lagoa Manoel Felipe e permite seu fluxo até o Rio Potengi. Além destes corpos hídricos há um canal que capta água do Bairro Barro Vermelho, no sentido sul-norte, e a conduz até o Canal do Baldo, interceptando pequeno trecho do Bairro do Tirol.



## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os procedimentos metodológicos empregados nesta pesquisa consideraram a interferência das construções antrópicas no fluxo superficial de águas pluviais no Bairro do Tirol e adjacências, por meio de abordagens operacionais em Geoprocessamento, para manipulação de dados multifontes com as ferramentas disponíveis em ambiente SIG. A abordagem metodológica estabeleceu um conjunto de análises e interações para a identificação e avaliação de depressões topográficas susceptíveis aos alagamentos, definição do fluxo de escoamento superficial de águas pluviais, episódios de alagamentos com registros horários de precipitação frente às infraestruturas urbanas e risco a alagamento dos lotes urbanos (Figura 4.1).

### 4.1 DADOS PÚBLICOS DISPONÍVEIS

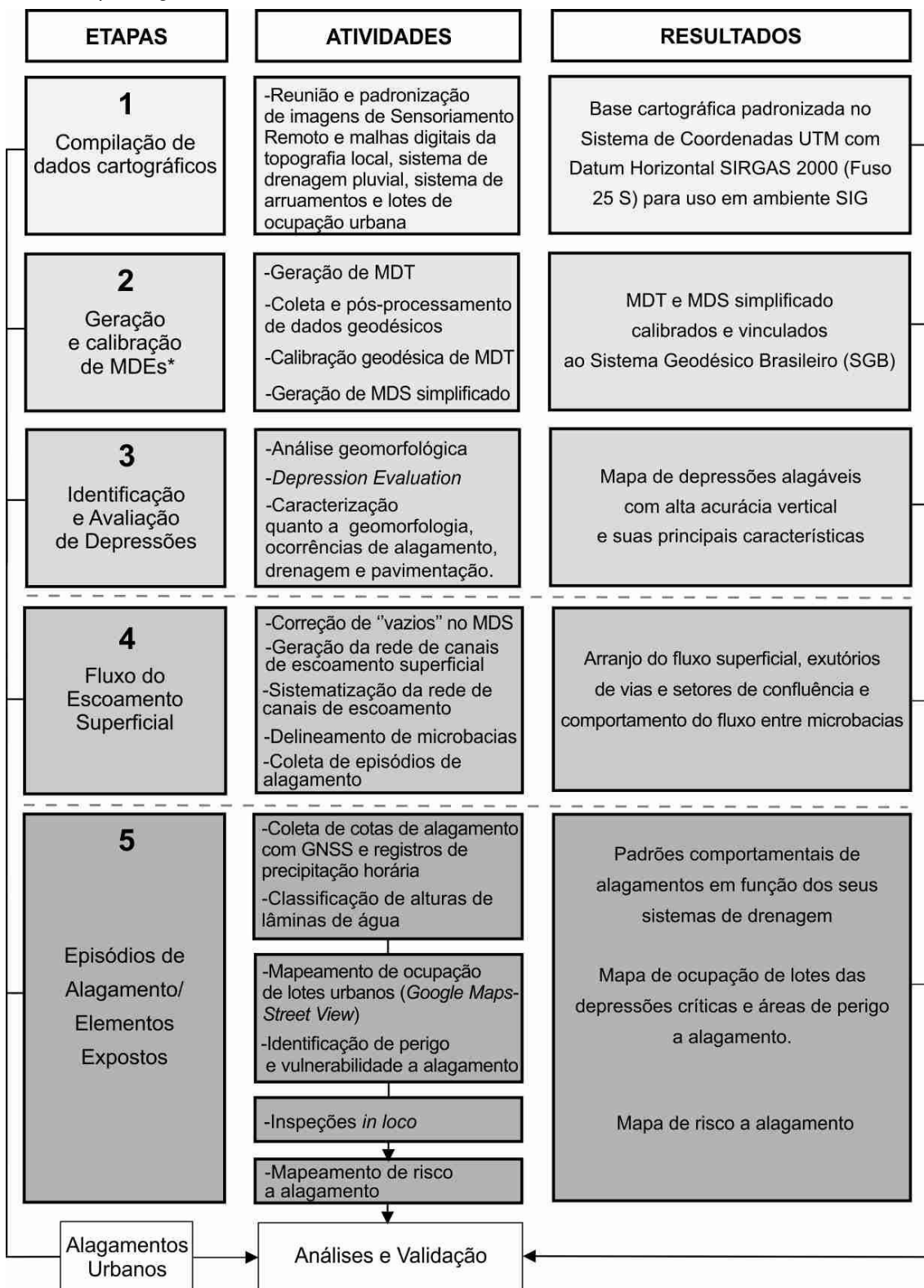
Para execução da presente metodologia foi necessário compilação de base cartográfica georreferenciada da Cidade de Natal. Neste aspecto, vários dados multifontes utilizados neste estudo (imagens de Sensoriamento Remoto, dados topográficos, sistema de drenagem urbana e registros pluviométricos e de alagamentos) foram obtidos por meio de órgãos públicos reguladores (*e.g.*, Ministério do Meio Ambiente – MMA – e secretarias municipais). Todas as informações geoespaciais foram padronizadas para o *Datum* horizontal SIRGAS2000, sistema de projeção UTM (Fuso: 25S / MC: 39º W. Gr). Além desses, dados sobre registros pluviométricos, cedidos pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), e fotografias com registros de alagamentos, obtidos por inspeções *in loco* ou por meio de jornais locais e publicações em redes sociais, foram compiladas.

#### 4.1.1 Imagens de Sensoriamento Remoto

As imagens de sensores remotos utilizadas apresentam alta resolução espacial e, por este motivo, forneceram compreensão adequada do padrão

organizacional do ambiente urbano. Assim, por meio destes dados foi possível

**Figura 4.1:** Fluxo metodológico aplicado à identificação e avaliação de zonas de alagamentos no Bairro do Tirol, Natal-RN. MDEs\* - Modelos Digitais de Elevação: Termo aplicado neste trabalho que engloba MDT e MDS.



analisar a distribuição espacial de lotes urbanos construídos, padrão de arruamentos, localização de corpos hídricos, o que favoreceu o planejamento de etapas metodológicas com visitas *in loco* e interpretações de resultados. As imagens reunidas são da missão RapidEye, de levantamentos aerofotográficos e ortomosaico dos aplicativos *Google Earth* e *Google Maps* (Tabela 4.1).

**Tabela 4.1:** Características das Imagens RapidEye, Ortofoto e Ortomosaico utilizadas nesta pesquisa. MMA – Ministério do Meio Ambiente; SETUR – Secretaria de Turismo de Natal; SEMURB – Secretária de Meio Ambiente e Urbanismo de Natal.

	BANDAS ESPECTRAIS	FONTE	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m)	DATA DE AQUISIÇÃO
<b>Imagem RapidEye</b>	Bandas de 1 a 5	MMA	6,5	15/09/2015
	Bandas de 1 a 5	MMA	6,5	31/05/2014
	Bandas de 1 a 5	MMA	6,5	27/09/2013
	Bandas de 1 a 5	MMA	6,5	11/09/2013
<b>Ortofoto</b>	Bandas de 1 a 3	SETUR	2	09/2006
<b>Ortomosaico</b>	Bandas de 1 a 3	SEMURB	0,16	22/01/2013

#### 4.1.1.1 Imagens RapidEye

Os dados RapidEye são referentes aos anos de 2013 a 2015 e foram cedidos pelo MMA. Dentre as imagens de Sensoriamento Remoto utilizadas neste trabalho, estes dados apresentam resolução espacial de menor detalhe com 6,5 m. Apesar disto serviu de base para georreferenciamento de dados cartográficos como a malha digital de curvas de nível da Cidade de Natal.

#### 4.1.1.2 Ortofoto

A ortofoto é uma imagem de fotografia aérea ortorretificada do ano de 2006 advinda da Secretaria de Estado do Turismo do RN (SETUR) com resolução espacial de 2 m. As câmeras para tomada das fotografias aéreas foram de dois tipos: 1) fabricação *Car Zeiss Oberkochen* – RMK A 15/23, tipo de lentes PLEOGON A2 e; 2) fabricação *Zeiss Jena*, Mod. LMK 1050 FMC, tipo

de lentes LAMEGON PI. Para transformação analógica/digital foi utilizado um Scanner Fotogramétrico da marca Vexcel, modelo Ultra Scan 5000, com resolução real de até 5  $\mu\text{m}$  (RN, 2006).

#### 4.1.1.3 Ortomosaico

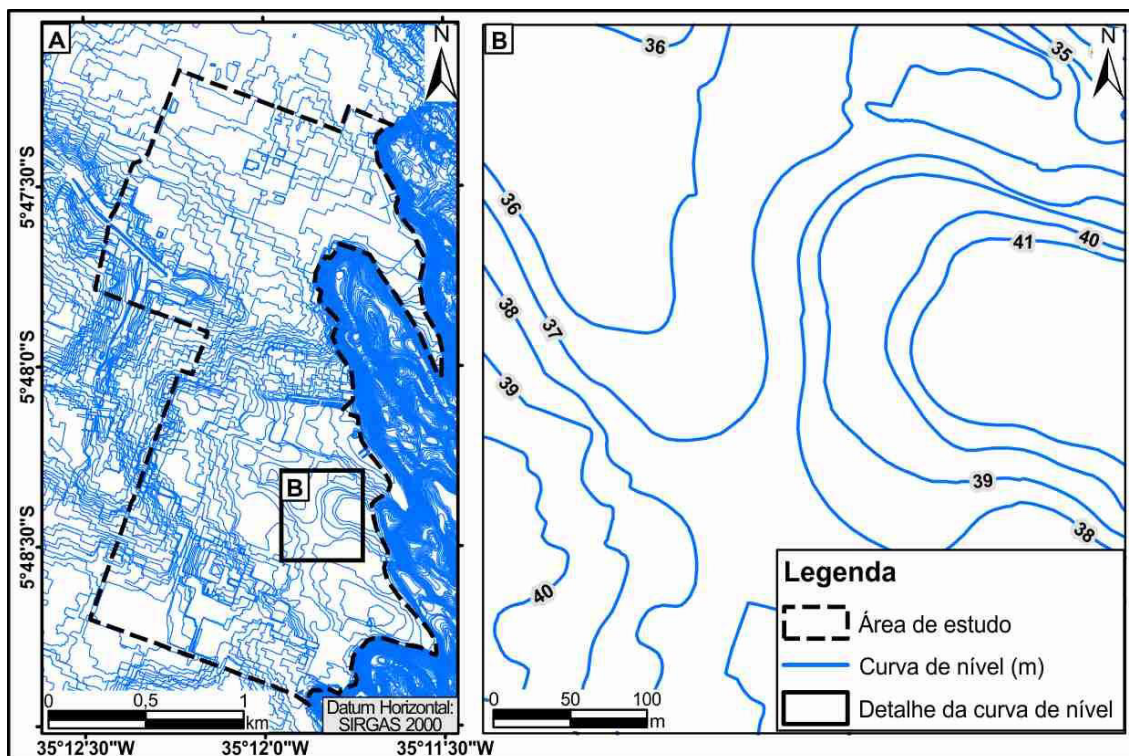
O ortomosaico possui resolução espacial de 0,16 m e é constituído por um conjunto de imagens ortorretificadas do ano de 2013 oriundas do acervo dos aplicativos gratuitos *Google Earth* e *Google Maps*. Este material foi compilado e cedido pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB). Dentre todas as imagens, este material apresentou maior contribuição para edições de dados cartográficos no formato *shapefile*, como informações sobre o sistema de arruamentos, uso e ocupação de lotes urbanos e tipo de pavimentação, em virtude de sua altíssima resolução espacial.

#### 4.1.2 Dados topográficos

Os dados topográficos são curvas de nível plotadas a cada 1 m de variação altimétrica (Figura 4.2), provenientes de processos de Fotogrametria a partir de levantamentos aerofotográficos, e foram cedidos pela SEMURB. O procedimento realizado para extração de informações planialtimétricas adotou pontos de apoio básicos estabelecidos pelo IBGE de acordo com o Sistema Geodésico Brasileiro. Portanto, o referencial altimétrico foi o nível do marégrafo de Imbituba-SC (equipotencial do nível médio dos mares), enquanto o referencial planimétrico adotado foi o *Datum* horizontal SAD69 (RN, 2006).

O referencial geodésico planimétrico utilizado é relativo ao ano de 2006, por isso foi necessário a reprojeção dos dados para o *Datum* horizontal SIRGAS2000 (referencial geodésico brasileiro vigente). Além disso, o georreferenciamento das curvas de nível foi realizado tomando como referência as imagens descritas na seção anterior e apresentou Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE – *Root Mean Square Error*) de 0,9252. O georreferenciamento das curvas de nível apenas foi possível devido à alta resolução das imagens de Sensoriamento Remoto, que permitiu identificar feições do terreno representadas também nas isolinhas altimétricas.

**Figura 4.2:** A) Disposição espacial das curvas de nível com variação altimétrica de 1 m sobre a área de estudo; B) Detalhe das curvas de nível.



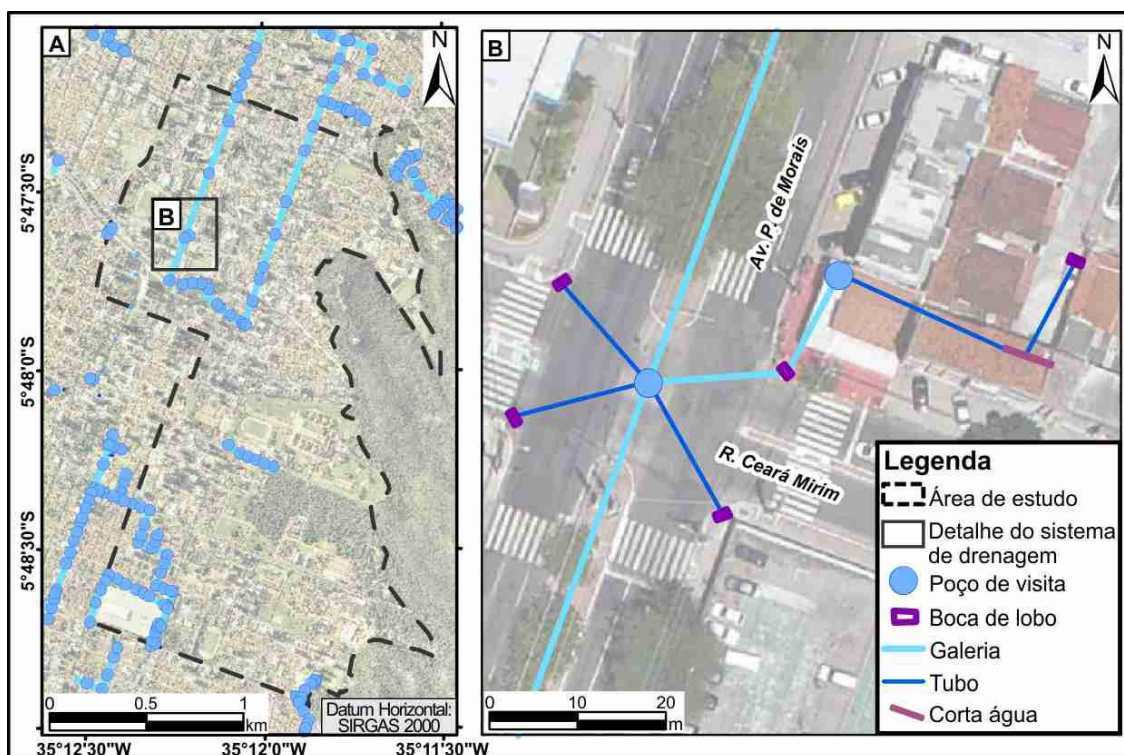
#### 4.1.3 Sistema de drenagem pluvial urbana

O projeto digital da infraestrutura de drenagem pluvial da Zona Leste da cidade foi cedido pela Secretaria Municipal de Obras Públicas e Infraestrutura (SEMOPI) e é referente ao ano de 2009, com pouca ou nenhuma mudança da estrutura no Bairro do Tirol até o presente. O projeto contempla estruturas como bocas de lobo (denominação local dada à estrutura de captação de águas pluviais), bueiros, poços de visita, canais, canaletas, tubos de ligação, galerias de drenagem e corta água, além de apresentar os diâmetros das galerias e fornecer o sentido do fluxo da água ao longo das galerias (Figura 4.3).

#### 4.1.4 Rede de arruamentos e lotes de ocupação urbana

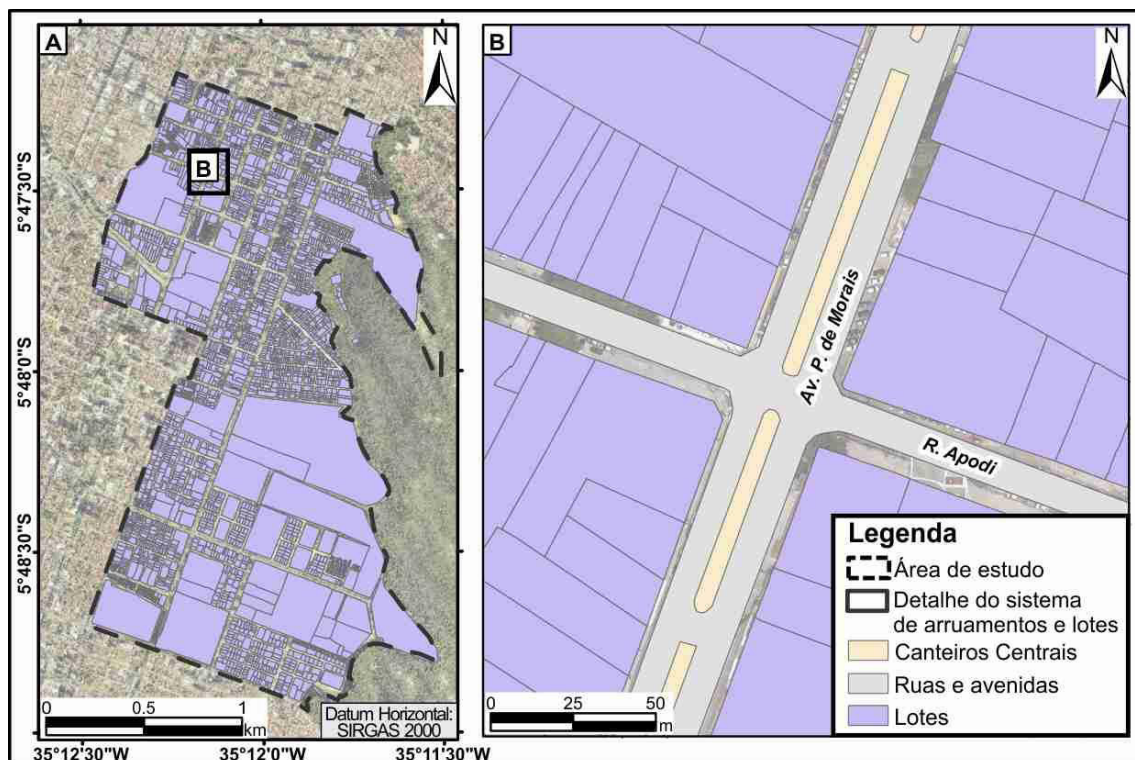
Estes dados correspondem à malha digital georreferenciada das ruas, avenidas e canteiros centrais, os quais foram cedidos pela SEMOPI, e dos

**Figura 4.3:** A) Arranjo espacial do sistema de drenagem na área de estudo com os principais elementos: poços de visita e galerias; B) Detalhe do sistema de drenagem no cruzamento da Rua Ceará Mirim com a Av. Prudente de Moraes.



lotes de ocupação do Bairro do Tirol, provenientes da SEMURB (Figura 4.4). Este último conjunto de dados representam áreas edificadas como condomínios e casas residenciais, prédios públicos e empreendimentos comerciais. Estes dados são referentes ao período entre os anos de 2008 e 2009. Apesar de poucas mudanças nestas informações em relação ao ano de 2019, algumas correções foram feitas, como na disposição dos canteiros centrais e aumento de áreas ocupadas, por meio das imagens de Sensoriamento Remoto, sobretudo nos trechos em que alagamentos foram registrados.

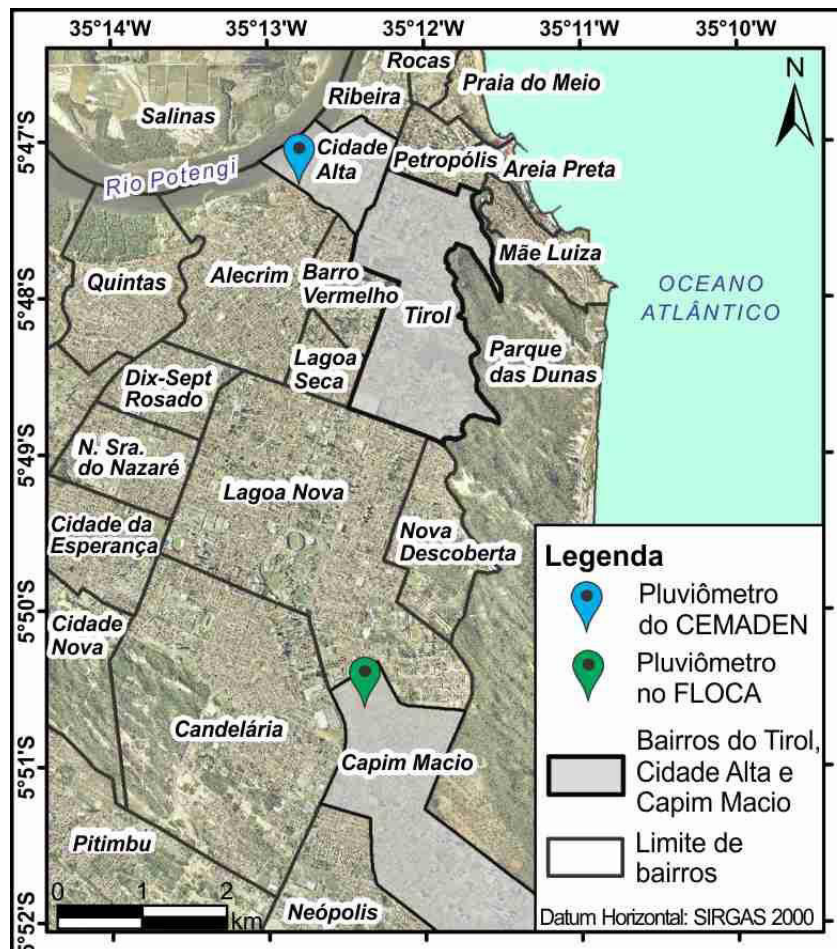
**Figura 4.4:** A) Dados da delimitação dos lotes de ocupação urbana na área de estudo; B) Detalhe dos lotes e do sistema de arruamento, incluindo ruas, avenidas e canteiros centrais.



#### 4.1.5 Registros pluviométricos

Dados sobre volume de chuva foram obtidos através de duas estações pluviométricas. Uma das estações estava localizada na Escola Estadual Desembargador Floriano Cavalcante (FLOCA) no Bairro de Capim Macio, a aproximadamente 3 km a sul do Bairro do Tirol. A segunda estação estava sob supervisão do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e se localizava no Bairro de Cidade Alta, área vizinha a oeste do Bairro do Tirol. O conjunto de dados analisados correspondeu ao período de maio de 2014 a maio de 2018, com valores de precipitação horária, o que favoreceu a análise dos alagamentos provocados por chuvas intensas. A Figura 4.5 mostra a localização da coleta dos dados pluviométricos durante o período em que este trabalho foi realizado.

**Figura 4.5:** Localização de pluviômetros utilizados para o presente trabalho. As estações estavam localizadas na Escola Estadual Desembargador Floriano Cavalcante (FLOCA), Bairro de Capim Macio, e nas proximidades do Canal do Baldo, Bairro de Cidade Alta.



#### 4.1.6 Registros de alagamentos

Um levantamento histórico de registros de alagamentos ocorridos em Natal, especificamente no Bairro do Tirol, foi realizado entre os anos de 2013 a 2018, através de notícias em jornais locais, publicações em redes sociais e inspeções *in loco*. Tais informações serviram de base para a validação dos processamentos realizados em ambiente SIG, uma vez que a maioria dos episódios dispunha de registros fotográficos onde foi possível estabelecer marcadores (pontos de referência) da cota máxima de alcance do alagamento, definido através do limite de borda da lâmina de água. Com essa estratégia foi possível a espacialização da extensão do espelho d'água e da frequência dos episódios em pontos críticos de alagamento no Bairro do Tirol.



## 4.2 ELABORAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

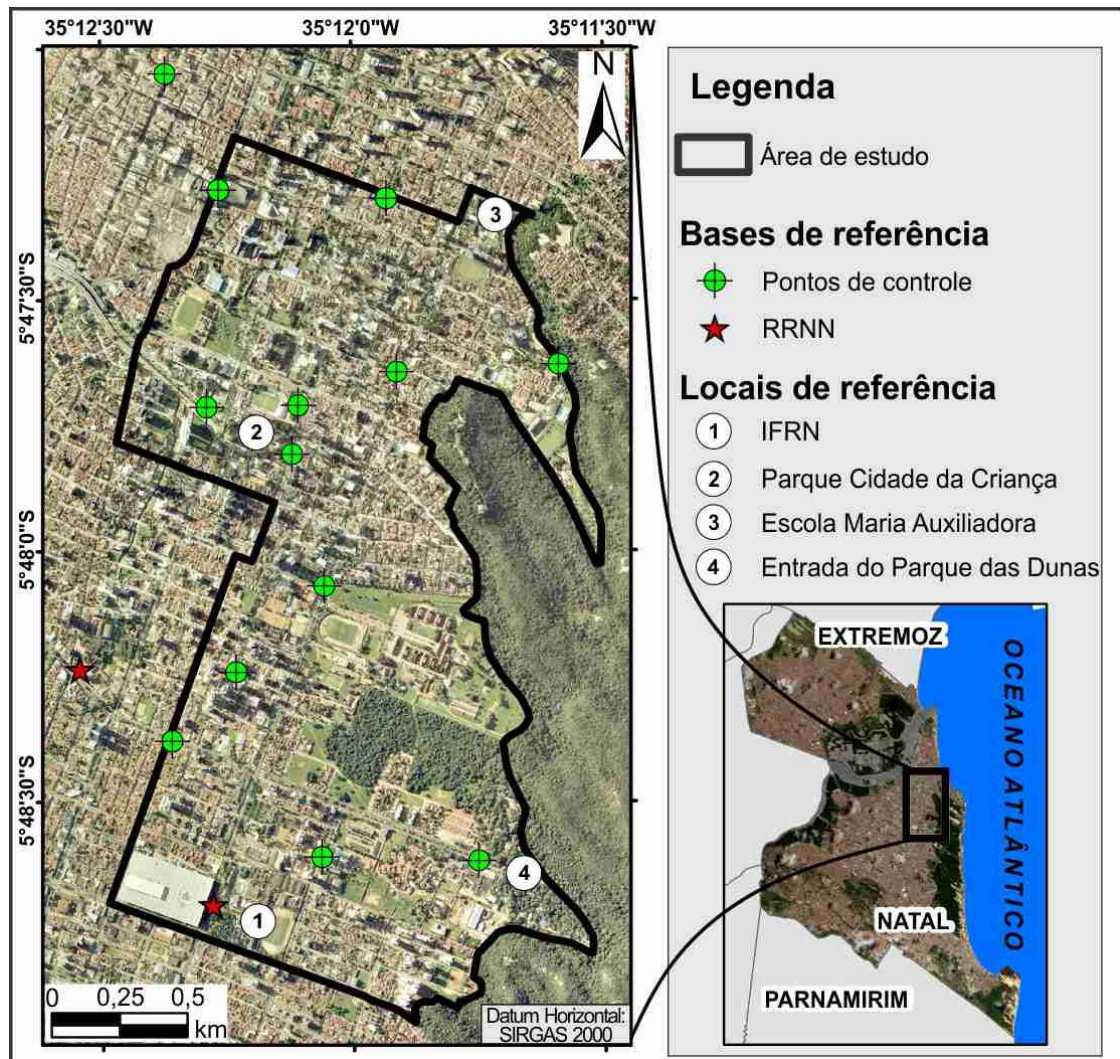
Após aplicar as devidas correções geométricas sobre as curvas de nível, estas foram utilizadas para a criação do Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de estudo. Na geração do MDT foi utilizada a interpolação por triangulação com uso da técnica *Triangular Irregular Networks* (TIN), visto que o resultado torna-se melhor do que quando comparado a outros métodos de interpolação (AMARO *et al.*, 2013). Para aplicar a técnica TIN foi utilizado o software ArcMap 10.2, a partir do qual obteve-se o MDT no formato *raster*.

### 4.2.1 Bases de referência geodésicas

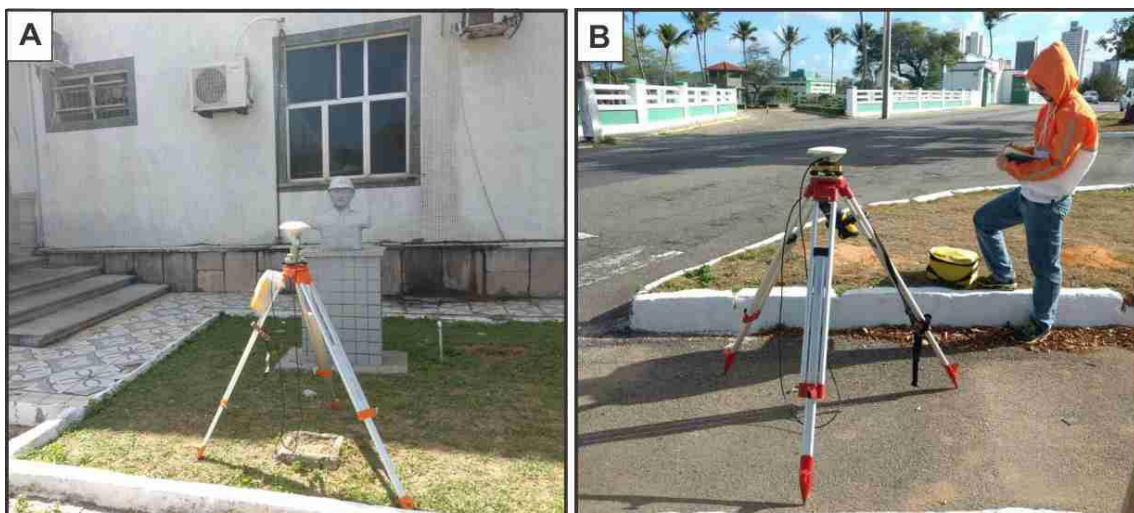
Para a calibração geodésica do MDT utilizou-se bases de referência sobre o terreno com informações de coordenadas geodésicas e altitude ortométrica, os quais foram obtidos através do uso de receptores GNSS. Assim, na região de estudo foram coletados 13 pontos de controle, somados a duas RRNN da RAAP do IBGE com coordenadas geodésicas fornecidas pelo Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO/UFRN), totalizando 15 bases de referência. A distribuição dos pontos de controle na região de estudo buscou contemplar as maiores variações de altitude e boa distribuição espacial, podendo ser observada na Figura 4.6.

Os levantamentos geodésicos foram realizados pelo posicionamento relativo Estático-Rápido pós-processado, no qual dois receptores coletam dados simultaneamente durante um determinado intervalo de tempo: um instalado numa posição fixa (estação base) e o outro nos pontos de interesse (estações móveis), tal como exemplifica a Figura 4.7. As estações bases foram posicionadas no campo de futebol do Instituto Federal do Rio Grande do Norte (IFRN) e no pátio de entrada do Comando Geral da Polícia Militar (CGPM), ambas localizadas na Zona Leste da cidade.

**Figura 4.6:** Distribuição das bases de referência na região de estudo, utilizadas para calibração de MDT.



**Figura 4.7:** Coleta de pontos de controle geodésicos pelo Posicionamento Relativo Estático-Rápido. A) Estação fixa no CGPM; B) Estação móvel próximo ao cruzamento da Av. Hermes da Fonseca com a Rua Joaquim Fagundes.



O levantamento foi realizado em duas sessões e a maior distância entre uma estação base e um ponto de controle foi de 3,2 km, o que favoreceu a acurácia dos pontos de controle (SANTOS & SÁ, 2006). O tempo de permanência do receptor nas estações móveis foi de 15 minutos, ao passo que nas estações bases foi de 5 horas na primeira sessão (estação base no IFRN) e de 3 horas na segunda sessão (estação base no CGPM). Na coleta de dados das estações buscou-se posicionar o equipamento sobre o nível do arruamento ou sobre o terreno natural de menor altitude a fim de torná-lo o patamar de referência após a calibração do MDT. Quando esta prática não foi possível, a diferença entre as altitudes do canteiro central e do arruamento foi somada à altura da antena do receptor durante o pós-processamento. Nas estações bases foi utilizado um receptor de modelo Trimble 5700 com fase da onda portadora nas frequências L1 e L2, enquanto nas estações móveis foram utilizados receptores do modelo Trimble R3 na frequência L1.

O pós-processamento dos dados geodésicos consistiu em duas etapas: determinação das coordenadas geodésicas e determinação das altitudes ortométricas. Os dados geodésicos foram processados através do software Topcon Tools v.8.2, conforme a mesma rotina de processamentos aplicados por Santos e Amaro (2011) e Santos *et al.* (2014). Na determinação das coordenadas geodésicas foram utilizadas as RBMCs de Natal (RNNA), Mossoró (RNMO), Campina Grande (PBCG) e João Pessoa (PBJP). As alturas ortométricas foram estabelecidas com base no modelo geoidal MAPGEO 2015 e em duas estações RRNN: 2592N e 2592M, localizadas no pátio da Academia de Polícia Militar e na calçada do IFRN em Natal, respectivamente, com a distância máxima de 3,05 km do ponto de controle mais distante. Para cada ponto de controle as alturas ortométricas foram obtidas a partir da média aritmética das alturas referenciadas segundo as duas RRNN e seguindo as fórmulas apresentadas (ver seção 2.2) por Ollikainen *et al.* (1988), Featherstone *et al.* (1998) e Santos *et al.* 2012. Desta maneira, os pontos de controle foram vinculados ao SGB e a RAAP. Todas as 15 bases de referência foram padronizadas para o *Datum* horizontal SIRGAS2000, sistema de projeção UTM (Fuso: 25S / MC: 39º W. Gr).

#### 4.2.2 Calibração geodésica do MDT

Para avaliação e calibração do MDT, as diferentes alturas ortométricas, provenientes das bases de referência e do MDT, foram comparadas através de procedimentos estatísticos, conforme metodologia desenvolvida por Araújo *et al.* (2018). Portanto, uma matriz com esses valores foi construída e submetida a uma análise de Regressão Linear, com os valores das bases de referência como variável independente e o MDT como variável dependente.

A análise de Regressão Linear permite a verificação da relação linear entre uma variável dependente e uma variável independente e é definida pela seguinte função matemática:

$$Y_i = \alpha + \beta X_i + \epsilon_i \quad (4.1)$$

De modo que  $Y_i$  é a variável dependente explanada (altitude ortométrica calibrada);  $\alpha$  é a constante que representa intercepção da reta com o eixo das ordenadas;  $\beta$  é a constante de coeficiente angular da reta (declive da reta);  $X_i$  é a variável independente explicativa (altitude ortométrica das bases de referência); e  $\epsilon_i$  é uma variável aleatória que representa o erro experimental.

Os resultados encontrados pela regressão linear podem ser avaliados pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O ajustamento do modelo indicado pode ser medido pelo valor de  $R^2$  no intervalo de 0 a 1, que mostra o quanto o modelo consegue explicar os valores observados. Quanto maior o valor de  $R^2$ , melhor será o ajustamento do modelo à amostra.

Na sequência o MDT foi calibrado através da equação proposta na Regressão Linear. Assim, os MDTs (original e calibrado) foram submetidos à análise de estatística descritiva e a comparação no tocante à média da Variação da Altura Ortométrica ( $\Delta H$ ) e ao valor da Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE). O  $\Delta H$  indica se um MDT possui um deslocamento vertical, positivo ou negativo, em relação à referência do solo verdadeiro (GESCH *et al.*, 2012; 2016) e é representada pela seguinte expressão:

$$\overline{\Delta H} = \frac{\sum_{i=1}^n (H_{BASE, i} - H_{MDT, i})}{n} \quad (4.2)$$

Em que  $H_{BASE}$  é o valor da altura ortométrica observada nas bases de referência e  $H_{MDT}$  é o valor da altura ortométrica do modelo, ambos em um mesmo ponto  $i$ . O RMSE, por sua vez, foi empregado por ser uma medida estatística bastante difundida no meio científico e frequentemente usada para comparações de modelos de elevações (MOURA *et al.*, 2014; MUKUL *et al.*, 2015; SANTOS *et al.*, 2015; MUKUL *et al.*, 2016; PATEL *et al.*, 2016; MUKUL *et al.*, 2017).

### 4.2.3 MDS Simplificado

No ambiente urbano, fatores antropogênicos como a rede de arruamentos e o arranjo das edificações influenciam bastante no processo de escoamento superficial das águas pluviais, posto que o fluxo da água é conduzido ou barrado por tais estruturas (HSU *et al.*, 2000). Levando em conta estas considerações e que o conjunto de vias e arruamentos se comportam como canais de drenagem durante chuvas intensas (RECANATESI *et al.*, 2017), não considerar os fatores antropogênicos em um MDT do meio urbano acarretaria em modelos de escoamentos superficiais bastante imprecisos (LEE *et al.*, 2016).

Desta maneira o presente trabalho incorporou ao MDT, após ser realizada a calibração geodésica, informações espaciais referentes a ruas e avenidas, canteiros centrais, lotes urbanos e calçadas. A calibração geodésica foi realizada sobre o MDT, da qual superfície não representa os elementos urbanos supracitados, exceto as ruas e avenidas, visto que o nível dos arruamentos foi tomado como referência durante a coleta e processamento dos dados geodésicos. Assim, o MDT foi transformado em um Modelo Digital de Superfície (MDS) simplificado por meio da atribuição de valores altimétricos representativos dos lotes, canteiros centrais e calçadas, os quais foram somados ao MDT calibrado.

Os valores altimétricos atribuídos são apenas representativos, contudo permitem a expressão topográfica desses elementos urbanos como barreiras e/ou condutores do fluxo superficial no MDS simulado. Assim, a partir dos dados georreferenciados, descritos na seção 4.1.4, e baseando-se nos valores

aplicados por Lee *et al.*,(2016) foram atribuídos valores altimétricos de 0,2 m para calçadas e canteiros centrais, e 20 m para os lotes urbanos.

Nenhum valor foi adicionado para representar os arruamentos, pois seu nível altimétrico corresponde à superfície do MDT calibrado. A informação planimétrica das calçadas foi estimada como sendo a área entre o limite dos arruamentos e o limite dos lotes ocupados. O procedimento de transformação do MDT em MDS simplificado foi realizado através do software ArcMap 10.2.

#### 4.3 IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE DEPRESSÕES TOPOGRÁFICAS

Esta etapa da pesquisa objetivou mapear áreas de concentração de águas pluviais ao longo do sistema de arruamentos por meio da identificação e avaliação de depressões topográficas sobre as quais foram construídas ruas e avenidas do Bairro do Tirol. Desta maneira, o MDT calibrado foi analisado no tocante a características geomorfológicas do terreno, as quais foram, posteriormente, correlacionadas com elementos urbanos por meio do MDS simplificado e base cartográfica compilada.

##### 4.3.1 Análise geomorfológica preliminar

O contexto geomorfológico e geológico em que a área de estudo está inserida possui grande influência nos problemas de alagamentos urbanos, uma vez que as depressões topográficas, propícias ao acúmulo de água pluvial, estão intrinsecamente relacionadas a feições geomorfológicas existentes no Bairro do Tirol. Assim, o MDT calibrado com alta acurácia foi aplicado para identificação prévia de feições geomorfológicas, antes mesmo de avaliar os fatores antrópicos, para promover melhor compreensão do comportamento hidrológico superficial das águas pluviais nas etapas seguintes deste trabalho.

Desta maneira, as altitudes ortométricas do MDT calibrado foram discretizadas em cinco classes: 1) 3 – 26 m; 2) 26 – 29 m; 3) 29 – 36 m; 4) 36 – 54 m e 5) 54 – 105 m, a fim de elucidar no MDT as principais variações topográficas que definem feições geomorfológicas. Por meio desta abordagem rápida e simples, com uso do software ArcMap 10.2, foi possível identificar feições geomorfológicas e associá-las a sistemas deposicionais marcantes na

região de estudo. Além disso, lineamentos de altos topográficos que controlam tais feições foram delineados.

#### **4.3.2 Identificação das depressões no terreno**

A identificação das depressões ao longo dos arruamentos é uma etapa essencial para a modelagem do fluxo superficial, sobretudo para setores onde o fluxo concentra-se em áreas urbanas susceptíveis aos alagamentos. Este procedimento é pré-requisito para se modelar o escoamento concêntrico de microbacias fechadas em que há acúmulo de água no interior do terreno. Quando esta etapa não é aplicada os modelos de fluxos superficiais podem comportar-se como microbacias completamente preenchidas por água (caso extremo de alagamento) ou como microbacias abertas, não reconhecendo fluxos concêntricos.

Para a identificação dos baixos topográficos foi aplicada sobre o MDS a função *Depression Evaluation* do software ArcMap 10.2, na extensão ArcHydro 2.0 (ESRI, 2011). Com a finalidade de eliminar depressões falsas e/ou insignificantes, apenas os baixos topográficos que apresentaram pelo menos 1 m de profundidade entre a menor cota no interior da depressão e a menor cota em relação a sua borda foram considerados. O valor de 1 m foi estabelecido em virtude da precisão de 1 m das curvas de nível a partir da qual o MDT foi gerado, entretanto após os procedimentos de calibração realizados a precisão do MDT foi aprimorada.

Os locais mais propícios para ocorrência de alagamentos foram ratificados com a análise integrada entre os registros prévios de alagamento, o arranjo do sistema de drenagem pluvial, a extensão da depressão ao longo das ruas e avenidas, a correlação com o contexto geomorfológico do Bairro do Tirol e o nível de impermeabilização do solo, com pavimentos e construções. Os diferentes tipos de pavimentos foram identificados por meio da ortofoto, ortomosaico e inspeções *in loco*. Quanto ao sistema de drenagem pluvial, a sua ausência nos baixos topográficos favorece a ocorrência de alagamentos, mas a sua presença não indica, fundamentalmente, que o sistema instalado

comporte todo o volume de água acumulado durante chuvas intensas nem que o mesmo esteja em perfeitas condições de desobstrução e escoamento.

#### 4.4 GERAÇÃO DO ARRANJO DO FLUXO SUPERFICIAL E DELINEAMENTO DE MICROBACIAS

As rotinas de geoprocessamento em ambiente SIG aplicadas nesta etapa possibilitaram a geração do arranjo da rede de canais de drenagem, que representa o fluxo superficial preferencial das águas pluviais diante dos elementos urbanos como os lotes ocupados e o sistema de arruamento. Além disso, permitiram a determinação das áreas de contribuição de cada depressão topográfica por meio da delimitação de microbacias.

##### 4.4.1 Geração de modelo de fluxo superficial

Para determinação do arranjo do fluxo superficial foi necessário a eliminação de falhas no MDS, as quais consistem em pixels com valores menores que das regiões adjacentes (“vazios”), entretanto sem que houvesse a supressão das depressões verdadeiras identificadas em etapa anterior (DIDANROGLU *et al.*, 2015). Assim, ainda no MDS, com suas depressões predeterminadas em etapa anterior, utilizou-se a função *Fill Sinks* também na extensão ArcHydro do ArcMap 10.2 para a geração de linhas de fluxos superficiais contínuas nos procedimentos posteriores, que fornecem modelos de escoamentos superficiais mais precisos.

Posteriormente o MDS foi submetido às rotinas de geoprocessamentos em ambiente SIG (ArcHydro – ArcMap 10.2) para os cálculos da direção e acúmulo do fluxo superficial e geração da rede de canais de drenagem. As seguintes funções foram aplicadas: 1) *Flow Direction*, 2) *Flow Accumulation*, 3) *Stream Definition*, 4) *Stream Segmentation*, 5) *Drainage Line Processing*. Tais rotinas avaliaram o MDS na dimensão do pixel, comparando as diferenças altimétricas entre eles e gerando, como resultante, o sentido do fluxo para cada pixel e a disposição da rede de canais preferenciais para o escoamento superficial. A função *Stream Definition* definiu a densidade dos canais de drenagem de forma que a acomodação das linhas de fluxos superficiais foi



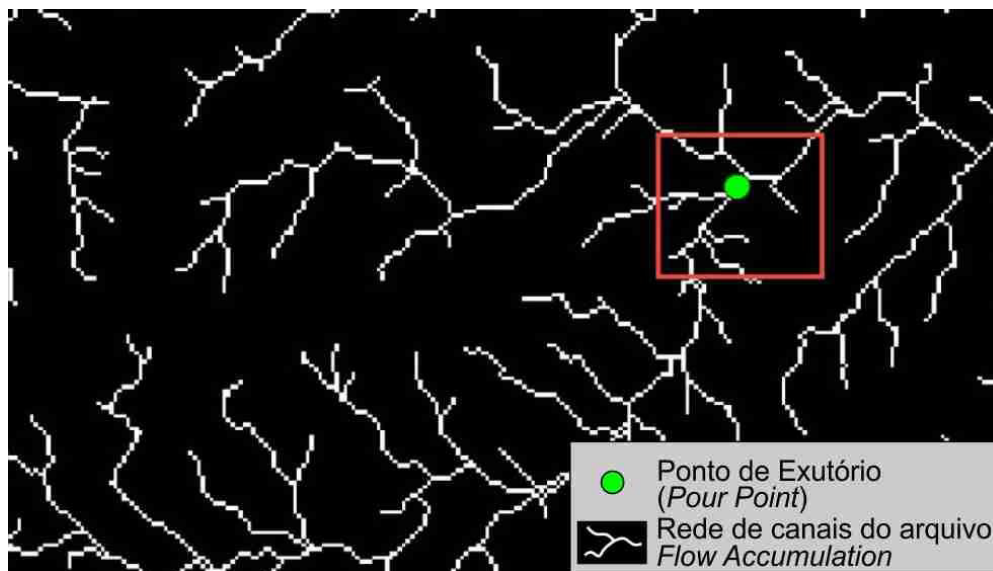
calculada para áreas de influência com dimensão média de 7.500 m<sup>2</sup>, em função da escala espacial de 1:16.000 empregada nas análises para a dimensão total do Bairro do Tirol e adjacências.

Por fim, outras rotinas de Geoprocessamento (ArcHydro – ArcMap 10.2) foram realizadas para determinar o sentido do fluxo superficial da rede de canais de drenagem, antes contido de maneira distribuída em cada pixel somente, e sistematizar a rede de drenagem com pontos de entrada (*Drainage Inlet*), saída (*Drainage Outlet*) e confluência d'água (*Stream Confluence*). Desta forma as seguintes funções, com utilização de dados provenientes das rotinas anteriores, foram aplicadas: 6) *Catchment Grid Delineation*, 7) *Catchment Polygon Processing*, 8) *Drainage Point Processing*, 9) *Hydro Network Generation*. Esta abordagem permitiu identificar pontos críticos de acúmulo de água nas depressões urbanas (RECANATESI *et al.*, 2017) e evidenciar os setores onde ocorreu confluência de canais e pontos de descarga final de volume d'água sobre a superfície no arranjo estrutural do sistema de arruamento.

#### **4.4.2 Delineamento de microbacias**

As microbacias foram delineadas com a finalidade de determinar as áreas de contribuição das depressões topográficas e permitir melhor compreensão da dinâmica hidrológica superficial a partir do comportamento do fluxo entre as microbacias. Nesta etapa foi executada rotina de Geoprocessamento com aplicação da função *Watershed*, do software ArcMap 10.3, a qual utiliza dados oriundos da função *Flow Direction* (seção 4.3.3) e de pontos de exultório da bacia (*Pour Points*) como dados de entrada. Este procedimento considerou regiões de exutório, sobretudo, em setores com deflúvios sobre bocas de lobo ou depressões topográficas (TIKKANEN, 2013; ABEDIN & STEPHEN, 2019). Além disso, os exutórios foram locados manualmente necessariamente sobre a rede de canais observados no arquivo de saída da ferramenta *Flow Accumulation* (Figura 4.8), para bom funcionamento da rotina.

**Figura 4.8:** Esquema do posicionamento de *Pour Points* sobre a rede de canais gerado no arquivo de saída da função *Flow Accumulation* para geração das microbacias (Adaptado de GOMES, 2005).



Em segundo momento, o sentido do fluxo superficial no exutório de cada microbacia foi determinado a partir da rede de canais de drenagem gerado em etapa anterior. Desta maneira, observou-se o comportamento da migração do fluxo entre as microbacias ao longo de todo o Bairro do Tirol e foram realizadas comparações entre o sentido do fluxo superficial e o sentido do fluxo subterrâneo no sistema de drenagem pluvial. Ademais, por meio desta abordagem as microbacias associadas às depressões topográficas foram classificadas em aberta ou fechada.

#### 4.5 ABORDAGENS DE DETALHE EM ÁREAS CRÍTICAS DE ALAGAMENTOS

Após a análise de vários parâmetros relacionados às depressões topográficas – como contexto geomorfológico, registros de alagamentos, impermeabilização do terreno segundo tipos de pavimentação, área das depressões topográficas, sistema de drenagem pluvial, áreas de contribuição, tipos de microbacias e configuração do modelo de escoamento superficial – áreas críticas com problemas de alagamentos foram definidas. Assim, a

presente etapa objetivou estabelecer relações entre precipitações pluviométricas e cotas de alagamento, avaliar a exposição dos lotes urbanos em função de diferentes alturas de lâminas d'água, resultando em mapas de perigo e risco a alagamentos nas áreas críticas. Os mapeamentos foram realizados na escala espacial de detalhe de 1:5.000.

#### 4.5.1 Relação entre precipitação horária e cota de alagamentos

Dentre os registros fotográficos do apanhado histórico de alagamentos, pontos de referência da cota máxima de alagamento foram identificados em campo (Figura 4.9 A). Em seguida, dados altimétricos com alta acurácia geodésica dos limites de bordas das lâminas de água (representando o nível máximo da cota do fenômeno por cada episódio de alagamento) foram coletados nas regiões críticas (Figura 4.9 B) por meio de receptor GNSS (Apêndice II). Esses dados coletados em campo foram pós-processados em laboratório e vinculados a Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

**Figura 4.9:** Procedimento realizado para associar a precipitação pluviométrica horária aos rápidos alagamentos ocorrentes no Bairro do Tirol. A) Identificação da cota máxima de alagamento por meio do limite de borda da lâmina da água em registro fotográfico realizado às 14h do dia 07/05/2018 logo após a formação do alagamento; B) Coleta da cota máxima de alagamento com receptor GNSS.



A utilização do receptor GNSS seguiu mesma abordagem apresentada na seção **4.2.1**, tanto para a realização do posicionamento relativo Estático-Rápido como para o pós-processamento dos dados geodésicos. O levantamento dos dados geodésicos foi realizado em duas seções e, em ambas, as estações bases foram posicionadas no campo de futebol localizado no Comando Geral da Polícia Militar (CGPM). A maior distância entre a estação base e pontos de interesse foi de 1,17 km. O tempo de permanência do receptor GNSS nos pontos de interesse foi de 10 a 15 minutos, enquanto na estação base foi de 6h na primeira seção e de 7h na segunda seção. Assim como na seção **4.2.1**, para determinação das coordenadas geodésicas foram utilizadas as RBMC de Natal (RNNA), Mossoró (RNMO), Campina Grande (PBCG) e João Pessoa (PBJP). As alturas ortométricas foram estabelecidas com base no modelo geoidal MAPGEO 2015 e em duas estações RRNN: 2592N e 2592M. Os modelos dos receptores GNSS foram os mesmos apresentados na seção **4.2.1**.

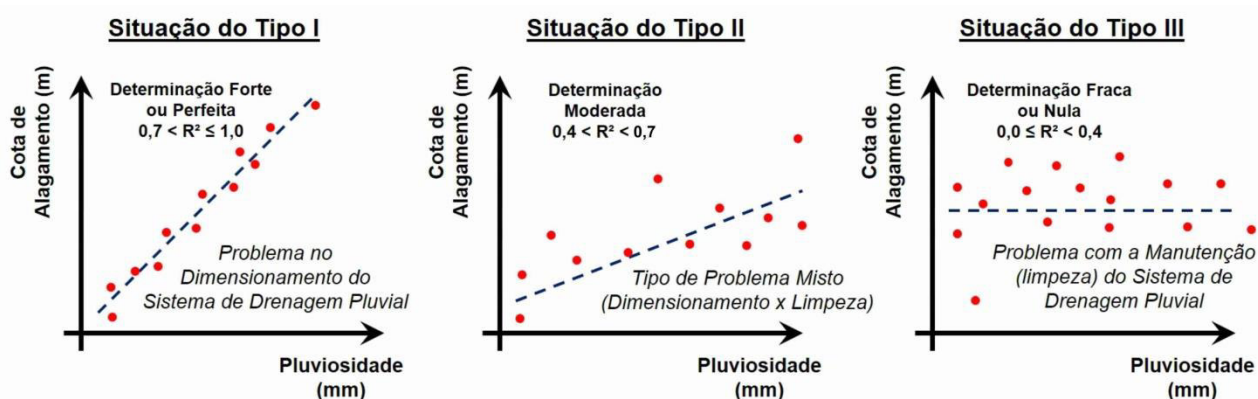
Para avaliar o comportamento das depressões e seus sistemas de drenagem nos setores com alagamentos mais frequentes foi construída uma matriz com valores das cotas das bordas dos alagamentos e das precipitações acumuladas durante a última hora antes do registro fotográfico, nas respectivas datas e horários dos registros fotográficos. Por fim, esse conjunto de dados foi submetido a uma análise de regressão linear, com os valores de precipitação como variável independente e os valores das cotas de alagamento como variável dependente. Os valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e de probabilidade de significância ( $p$ ) foram utilizados como parâmetro para avaliar os modelos de regressão linear.

Partindo do pressuposto que as depressões identificadas possuem aproximadamente 100% de impermeabilidade, a extensão dos alagamentos no Bairro do Tirol e adjacências está intrinsecamente relacionada com a intensidade das chuvas e seu volume de precipitação horária. Entretanto, a presença de outros fatores inerentes do meio urbano, como a quantidade e o posicionamento de bocas de lobo por área de abrangência de depressão e a admissível obstrução do sistema de drenagem pluvial por dejetos sólidos descartados ao longo das vias públicas, pode impedir uma real relação linear

entre o volume precipitado e a extensão dos alagamentos, sobretudo quando se analisa vários eventos no decorrer do tempo.

Portanto, considerando-se esses aspectos, neste estudo foram definidos 3 tipos de possíveis situações para os alagamentos urbanos, com base na magnitude do Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) da Regressão Linear (entre Pluviosidade x Cota de Alagamento), segundo os parâmetros definidos por Seber (1977), como mostra a Figura 4.10: (i) Situação do Tipo I, determinação forte ou perfeita:  $0,7 < R^2 < 1,0$ ; (ii) Situação do Tipo II, determinação moderada:  $0,4 < R^2 < 0,7$ ; e, (iii) Situação do Tipo III, determinação fraca ou nula:  $0 < R^2 < 0,4$ . Os diferentes tipos de situações representam análises hipotéticas do ajustamento de modelos estatísticos lineares generalizados, em relação aos valores observados.

**Figura 4.10:** Principais tipos de situações para alagamentos urbanos identificados no Bairro do Tirol e adjacências.



#### 4.5.2 Extensão dos alagamentos e exposição de elementos urbanos

Nos locais definidos como críticos aos alagamentos foi realizada a análise em escala espacial de 1:5.000 com a finalidade de avaliar a extensão da lâmina d'água em função da sua altura, tomando-se como cota de referência o ponto mais profundo no interior da depressão.

A extensão dos alagamentos foi analisada para 5 classes de alturas de lâminas d'água: 0,15 m; 0,5 m; 1,5 m; 2,5 m; e, superior a 2,5 (> 2,5 m). Apesar disso, nem todas as depressões avaliadas apresentaram todas as classes, visto que a cota máxima de alagamento e transbordamento para bacias

vizinhas não ultrapassa a altura da lâmina de água de 1,5 m em algumas depressões. A extensão dos alagamentos sobre o MDS também foi analisada segundo a presença de bocas de lobo. Tais estruturas, por vezes, não foram posicionadas nos locais mais baixos da depressão, o que torna imperativo uma altura mínima de lâmina de água para que o volume possa ser escoado pelo sistema de drenagem subterrâneo.

Igualmente, a escala 1:5.000 foi empregada no mapeamento de tipos de ocupação dos lotes urbanos nas áreas de abrangências das depressões, conforme as seguintes classes: área comercial; área médica e de estética; área residencial; escola; igreja; posto de combustível e prédio público. A classe área comercial engloba diversos empreendimentos comerciais como restaurantes, lojas de vestimenta, óticas, farmácias, centros comerciais. A classe área médica e estética corresponde aos lotes com a presença de hospitais, clínicas médicas, salões de beleza e estética. O levantamento dessas informações baseou-se em dados de localização cadastrados por empreendedores no aplicativo *Google Maps*, com imagens de satélites do período de janeiro de 2013, assim como nos dados fotográficos do modo *Google Street View* para o período de 2017 a 2018. Também foram realizadas inspeções *in loco* para complementar e validar as informações provenientes desses aplicativos gratuitos.

Por fim, cinco classes de perigo a alagamento foram atribuídas aos lotes, conforme a influência dos alagamentos: perigo muito alto; perigo alto; perigo moderado; perigo baixo; e, perigo muito baixo. Os setores mais baixos nas depressões, com influência direta de lâmina d'água com 0,15 m, foram considerados de mais alto perigo, uma vez que são regiões com alagamentos mais recorrentes. Por conseguinte, os setores mais elevados, afetados apenas por episódios extremos de menor frequência, são os de perigo muito baixo. Nos casos em que o lote estava submetido a mais de uma classe de altura de lâminas de água foi atribuído ao mesmo a classe de maior perigo.

Posto que cada classe de perigo foi definida em virtude da influência dos alagamentos (altura da lâmina d'água), as diferentes classes de perigo também foram associadas a valores de precipitação pluviométrica em função das equações de regressão linear, definidas na etapa anterior, como modelos de prognósticos para as depressões *A* e *B*. Assim, as cotas máximas do terreno

atingidas por alagamentos nas 5 classes de alturas de lâmina d'água foram extraídas do MDS simplificado e inseridas nas equações de regressão linear obtendo-se o volume da precipitação por hora para se atingir a cota topográfica respectiva. Os registros de precipitação por hora, cujo percentil estava entre 50 a 60 % referente à amostra de registros (Apêndice II), foram considerados como a precipitação mínima necessária para gerar alagamentos. Esta consideração foi adotada a fim de amenizar imprecisões nas medidas registradas pelos pluviômetros em relação aos registros feitos *in loco*.

#### **4.5.3 Mapeamento do risco a alagamento**

O conceito de risco envolve a integração de informações referentes a perigo, vulnerabilidade e exposição (UNISDR, 2009; CEPAL, 2011; UNISDR, 2015). Entretanto o fator exposição foi considerado uniforme para todos os lotes urbanos analisados, visto que os setores avaliados nesta etapa do trabalho são referentes especificamente às regiões sujeitas ao fenômeno de alagamento. Assim, a presente seção objetivou a classificação de vulnerabilidades referentes aos lotes de ocupação urbana e sua integração às classes de perigo, resultando no risco a alagamento nas depressões mais críticas.

No tocante a vulnerabilidade, foram definidos 3 níveis: alta; média; e baixa vulnerabilidade, as quais foram atribuídas aos tipos de lotes urbanos. Para classificação do nível de vulnerabilidade relativa ao tipo de lote, levou-se em consideração 4 critérios referentes aos usuários e a estrutura física dos lotes: 1) condições de saúde; 2) maior facilidade de explosão ou incêndio; 3) faixa etária; e 4) frequência de uso. A frequência de uso correspondente a 24 horas por dia e a faixa etária correspondente a crianças e idosos foram consideradas indicativas de alta vulnerabilidade.

Os critérios 1 e 2 foram considerados de primeira ordem, de modo que, quando em pelo menos um deles apresentou-se vulnerabilidade alta, o lote urbano foi considerado de vulnerabilidade final alta, independente dos critérios 3 e 4. Conseqüentemente, estes dois últimos critérios foram considerados de segunda ordem, ou seja, foram consultados somente quando em ambos os critérios de primeira ordem não foi verificado alta vulnerabilidade. Desta

maneira, quando o lote apresentou em ambos os critérios de segunda ordem alta vulnerabilidade foi atribuída a classe final de vulnerabilidade alta. Nos casos em que apenas um dos critérios de segunda ordem mostrou alta vulnerabilidade, a classe final de vulnerabilidade média foi atribuída. Por conseguinte, se o lote apresentou em ambos os critérios de segunda ordem baixa vulnerabilidade, sua classe final foi de vulnerabilidade baixa (Quadro 4.1).

**Quadro 4.1:** Sistema de critérios utilizado para atribuir níveis de vulnerabilidade aos tipos de lote urbano. Os prefixos 1º e 2º associados aos critérios são referentes à primeira e à segunda ordem de critérios. A cor vermelha, laranja e verde representam níveis de vulnerabilidade alta, média e baixa, respectivamente. As células em azul claro mostram que determinados critérios não foram empregados, uma vez que critérios de primeira ordem foram suficientes para definir o lote com vulnerabilidade alta.

Critérios	Classes de ocupação de lote urbano						
	Área Comercial	Área médica/estética	Área residencial	Escola	Igreja	Posto de combustível	Prédio público
1º Condições de saúde	Boa	Ruim	Boa	Boa	Boa	Boa	Boa
1º Maior facilidade de explosão ou incêndio	Não	/	Não	Não	Não	Sim	Não
2º Faixa etária	Adultos		Crianças; adultos; idosos	Crianças	Crianças; adultos; idosos	/	Adultos
2º Frequência de uso	Horário comercial	24H	Horário comercial	Horário comercial	Horário comercial		
Vulnerabilidade final	Baixa	Alta	Alta	Média	Média	Alta	Baixa

Com a definição dos níveis de vulnerabilidade de cada lote urbano, segundo o Quadro 4.1, o seu respectivo risco a alagamento foi obtido por meio do produto entre perigo e alagamento (CEPAL, 2011; WISNER *et al.*, 2012; MENDES, 2018), conforme definido na seguinte expressão:

$$R = PV \quad (4.3)$$

em que  $R$  representa o risco a alagamento,  $P$  significa o perigo a alagamento e  $V$  representa a vulnerabilidade dos lotes sujeitos ao fenômeno de alagamento.



As classes de perigo a alagamento muito alto, alto, moderado, baixo e muito baixo foram representadas pelos valores 5, 4, 3, 2 e 1, respectivamente. Por sua vez, as classes de vulnerabilidade alta, média e baixa, foram associadas aos valores 3, 2 e 1, respectivamente. Por meio dessas informações de perigo e vulnerabilidade foram construídas matrizes de risco a alagamento, constituídas por valores numéricos representativos dos produtos das variações destes parâmetros, para cada área crítica identificada. Os possíveis valores obtidos dos produtos destes dois conjuntos numéricos estão apresentados na Tabela 4.2, e foram classificados de modo que os valores de 1 a 3 representam risco baixo, valores de 4 a 6 representam risco moderado e valores de 8 a 15 representam risco alto. Por fim as informações das matrizes foram espacializadas em mapa de risco, de modo a apresentar não só as informações de risco, mas também as condições de vulnerabilidade e perigo que conduziram as classes de risco associadas aos lotes urbanos. As matrizes foram desenvolvidas e espacializadas em ambiente SIG por meio dos softwares ArcMap 10.2 e QGIS 2.14.11.

**Tabela 4.2:** Classes de riscos segundo os conjuntos numéricos obtidos a partir dos produtos entre perigo e vulnerabilidade para as áreas mais críticas do Bairro do Tirol.

<b>Risco a alagamento</b>	<b>Valores representativos dos produtos entre as variações de perigo e vulnerabilidade</b>
Alto	15; 12; 10; 9; 8
Moderado	6; 5; 4
Baixo	3; 2; 1

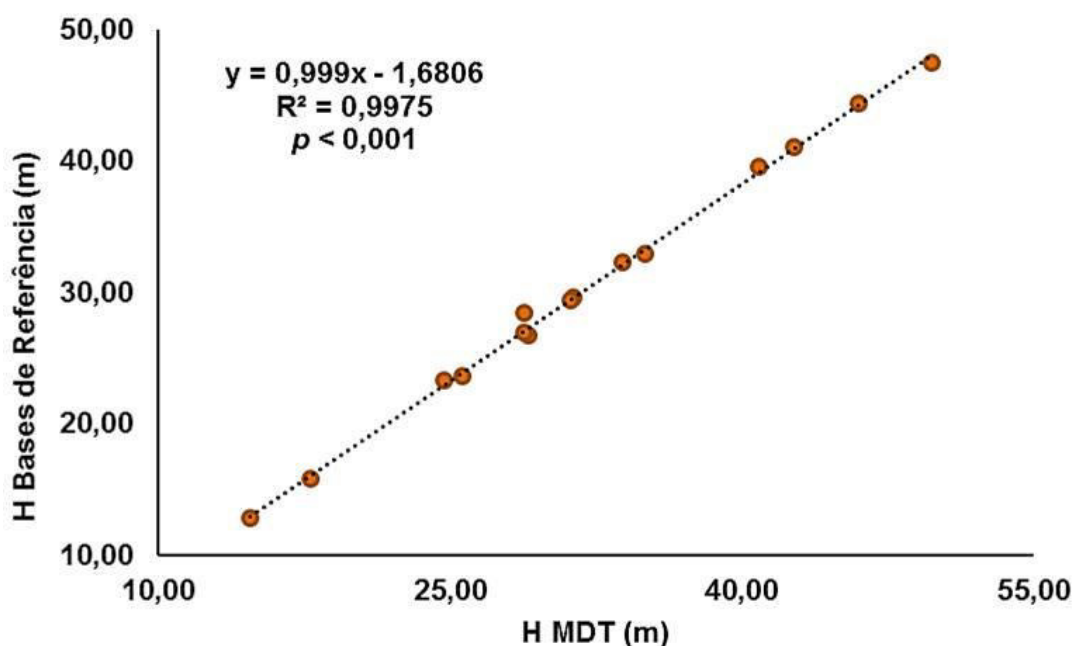
## 5 RESULTADOS

Os resultados alcançados neste estudo, sistematizados a seguir, permitiram definir e avaliar procedimentos baseados em Geotecnologias e Geoprocessamento para a obtenção e análise de dados com alta acurácia para identificar áreas susceptíveis aos alagamentos e, desse modo, aprimorar a compreensão dos processos responsáveis pelos alagamentos, além de fornecer informações detalhadas sobre os setores mais críticos no Bairro do Tirol.

### 5.1 MDT CALIBRADO E MDS SIMPLIFICADO

O método de calibração proposto por Araújo *et al.* (2018) permitiu avaliar e calibrar o MDT confeccionado, a partir das 15 bases de referência geodésicas utilizadas. A análise de Regressão Linear mostrou um modelo bastante robusto com  $R^2 = 0,9975$  (Figura 5.1), ou seja, quase 100% das células do MDT, com mesmas coordenadas planimétricas das bases de referência, possuem grandezas compatíveis com as grandezas dos dados geodésicos coletados. O modelo de correção/calibração do MDT através da Regressão Linear foi dado por  $y = 0,9990x - 1,6806$ .

**Figura 5.1:** Resultado da análise de Regressão Linear entre Modelo Digital de Terreno (MDT) e Bases de Referência.



A estatística descritiva dos dados, para a região de estudo, é apresentada na Tabela 5.1, a qual inclui informações sobre o MDT original e o MDT calibrado. Ao analisar a média de  $\Delta H$ , oriundo da diferença entre as alturas ortométricas do MDT original e as alturas ortométricas das bases de referência, observou-se o valor de -1,71, indicando que o MDT original estava acima do nível das bases de referência. No que diz respeito à média de  $\Delta H$  do MDT calibrado, o valor zero era esperado, em virtude do ajustamento do MDT original ao plano da rede das bases de referência.

O parâmetro de RMSE para o MDT original foi de 1,78 m, enquanto o MDT calibrado mostrou RMSE de 0,47 m, ambos em comparação com as bases de referência. Assim, verificou-se uma melhoria no MDT calibrado de 74% em relação ao MDT original, com aumento de precisão de quase quatro vezes. Com isso, ocorreu um ajustamento do plano do MDT ao plano do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).

Os dados referentes às coordenadas planimétricas, altitudes geométricas e ortométricas das bases de referência geodésica utilizadas neste trabalho podem ser visualizados no Apêndice I.

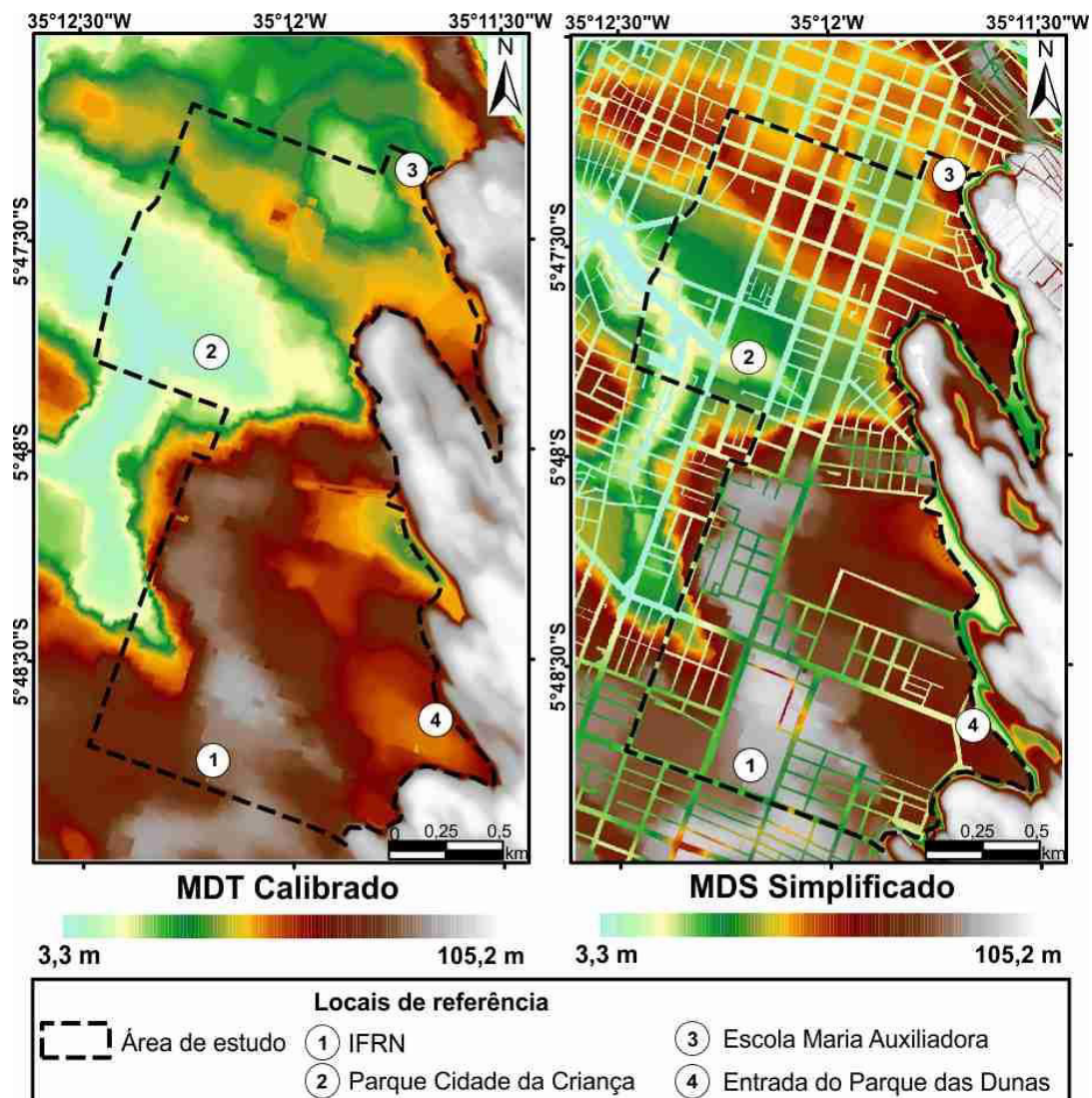
**Tabela 5.1:** Estatística descritiva entre os dados das Bases de Referência, o MDT original e o MDT calibrado.

	HBases (m)	HMDT (m)	$\Delta H = \text{HBases} - \text{HMDT}$	HMDT Calibrado	$\Delta H = \text{HBases} - \text{HMDT Calibrado}$
<b>Média</b>	<b>30,31</b>	<b>32,02</b>	<b>-1,71</b>	<b>30,31</b>	<b>0,00</b>
Erro padrão	2,53	2,53	0,13	2,53	0,13
Mediana	29,39	31,18	-1,79	29,47	-0,08
Des. padrão	9,79	9,79	0,49	9,78	0,49
Variância	95,90	95,86	0,24	95,67	0,24
Intervalo	34,62	35,05	2,00	35,01	2,00
Mínimo	12,83	14,71	-2,34	13,01	-0,63
Máximo	47,45	49,76	-0,35	48,03	1,36
<b>RMSE (m)</b>		<b>1,78</b>		<b>0,47</b>	

O MDS simplificado incorporou as interferências antrópicas do meio urbano para modelagem do arranjo do fluxo superficial, diferentemente do MDT que representa apenas a superfície do solo (Figura 5.2). Desta maneira, ao levar em consideração lotes urbanos, calçadas e canteiros centrais, conseqüentemente, o MDS simplificado apresentou o traçado do sistema de

arruamentos. No MDS as vias de tráfego são as únicas estruturas que possuem altitudes verdadeiras (alturas ortométricas), uma vez que os outros elementos urbanos constituem apenas uma representação altimétrica com valores atribuídos uniformemente.

**Figura 5.2:** Diferenças entre MDT calibrado e MDS simplificado com a inserção do sistema de arruamentos no MDS.



Mesmo com a incorporação dos elementos urbanos ao MDT calibrado, o MDS simplificado preservou visualmente as feições geomorfológicas, visto que a morfologia dos telhados/coberturas dos lotes não foi inserida por tratar-se de uma simulação e não um MDS real. As alturas atribuídas às calçadas e canteiros centrais (0,20 m) são insignificantes diante das variações topográficas regionais no Bairro do Tirol, portanto não interferiu nas análises

qualitativas da geomorfologia. Além disso, as altitudes máximas e mínimas permaneceram as mesmas após a transformação do MDT calibrado em MDS simplificado (Figura 5.2), uma vez que a menor e a maior altitude correspondentes ao Canal do Baldo e a campo dunares no Parque das Dunas, respectivamente, não foram alteradas.

## 5.2 RELAÇÕES ENTRE A GEOMORFOLOGIA LOCAL E DEPRESSÕES TOPOGRÁFICAS

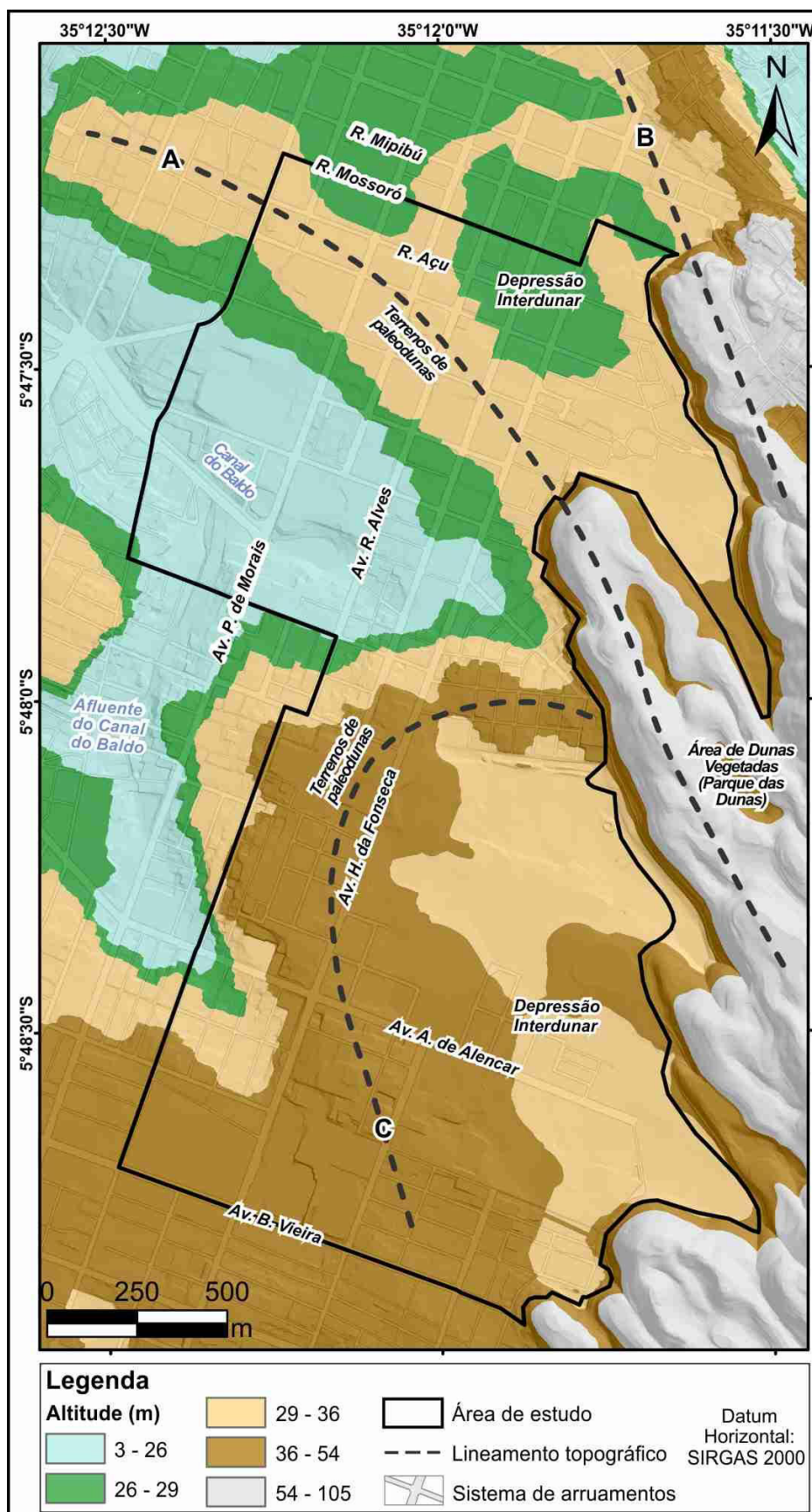
As seções seguintes mostram que o contexto geomorfológico do Bairro do Tirol e áreas adjacentes é um fator determinante para geração dos problemas de alagamentos na região. Embora, a alta impermeabilização do solo seja um fator agravante, o acúmulo de água em depressões topográficas, relacionadas ao contexto geológico-geomorfológico local, é um fator primordial em discussões sobre planejamento urbano diante de problemas de alagamentos urbanos e sistemas de drenagem pluvial.

Inicialmente serão abordadas as variações topográficas que definem feições geomorfológicas. Em segundo momento, serão apresentadas depressões topográficas identificadas ao longo do sistema de arruamentos que são susceptíveis ao acúmulo de água, mas que também se relacionam às feições geomorfológicas.

### 5.2.1 Feições geomorfológicas

A partir do MDT calibrado e discretizado em classes altimétricas, feições geomorfológicas expressivas foram identificadas na área de estudo conforme Figura 5.3. Além disso, a visão sinóptica das variações topográficas da área de estudo favoreceu a compreensão do comportamento geomorfológico do terreno em uma escala de maior detalhe em relação a mapeamentos geológicos e geomorfológicos realizados anteriormente (CPRM, 2012; MOREIRA, 1996).

**Figura 5.3:** Classes altimétricas do MDT calibrado com interpretação de feições geomorfológicas e lineamentos de altos topográficos capazes de favorecer a ocorrência de alagamentos e controlar a dinâmica de escoamento superficial das águas pluviais.



Os setores em azul correspondem às regiões de menor altitude com destaque para o vale do Canal do Baldo e seu afluente no setor oeste da área de estudo (Figura 5.3), ambos constituintes do Sistema Fluvial do Rio Potengi. Estas regiões somente conduziriam a água pluvial para os canais fluviais e sua desembocadura no Rio Potengi, sem gerar acúmulo em situações naturais, caso não houvesse edificações. Contudo quando obstruídas por construções antrópicas podem tornar-se regiões altamente susceptíveis a alagamentos. As outras classes altimétricas mostram feições relacionadas diretamente ao Sistema Depositional de Campos Dunares (Eólico), que predomina em toda Cidade de Natal.

Embora grande parte do terreno de dunas da área de estudo tenha passado por atividades de terraplanagem para fins de ocupação, a morfologia do sistema dunar ainda pode ser observada em escalas de semi-detalhe a menores. Assim, parte dos lineamentos de altos topográficos, sobretudo com direção NW, foram traçados e inferidos neste trabalho como oriundos de terrenos de paleodunas (Figura 5.3), uma vez que estão em concordância com a classificação da CPRM (2012), que definiu estes terrenos como Depósitos Eólicos Litorâneos. Além disso, os lineamentos dos altos topográficos foram definidos por meio de continuidades morfológicas expressas entre os terrenos das dunas vegetadas no Parque das Dunas (cor acinzentada na Figura 5.3) e a topografia do meio urbano, como observado nos lineamentos A e B (Figura 5.3). O vale do Canal do Baldo também está orientado na direção NW, o qual provavelmente teve origem a partir de depressões interdunares de mesma direção. Todos estes fatores corroboram para a interpretação da presença de terrenos de paleodunas na região.

As depressões interdunares (feições pertencentes ao Sistema de Campos Dunares) foram identificadas nos setores norte e sudeste da área de estudo (Figura 5.3). A depressão topográfica no setor norte é delimitada pelos altos topográficos representados pelos lineamentos A e B (Figura 5.3). No setor sul a depressão interdunar é delimitada por alto topográfico com forma parabólica, expressa pelo lineamento C e pelas dunas vegetadas no Parque das Dunas (Figura 5.3). Este tipo de feição representa áreas propícias para acúmulo de água, portanto possui maior probabilidade de ocorrências de alagamentos naturais dentre todas as feições geomorfológicas, com

agravamento da situação quando impermeabilizadas.

O Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais de Natal - PDDMA (NATAL, 2009) atribui a classificação de bacia aberta para toda a Bacia Riacho do Baldo. Entretanto por meio da análise geomorfológica realizada nesta seção, percebe-se que somente no Bairro do Tirol as depressões interdunares, que provocam fluxo de água para o interior do continente (relacionada à sub-bacias fechadas), possui área da ordem de 1,3 km<sup>2</sup>, ou seja, 15% da área da Bacia Riacho do Baldo. Estes números representam apenas uma análise primária, pois não levam em conta as áreas de contribuição dessas depressões, as quais serão apresentadas posteriormente.

### **5.2.2 Depressões topográficas**

A partir da análise geomorfológica apresentada na seção anterior as depressões topográficas ao longo do sistema de arruamentos foram melhor interpretadas e avaliadas por meio da sua integração ao contexto geomorfológico. Assim, na Sub-bacia de Drenagem IX.1 identificou-se quatro baixos topográficos, denominados de depressões *A*, *B*, *C* e *D* (Figura 5.4 A).

A depressão *A* (26,3 m a 29,3 m) localizada no setor norte do Bairro do Tirol, é a feição geomorfológica de maior expressão e influencia algumas das principais vias de tráfego de veículos, como as avenidas Afonso Pena e Hermes da Fonseca. No contexto geomorfológico, a depressão *B* (27,4 m a 29,7 m) está diretamente associada à depressão *A* e ambas relacionam-se às feições de depressões interdunares no setor norte (Figura 5.3), entre altos topográficos alinhados na direção NW que definem o prolongamento das dunas vegetadas presentes no Parque das Dunas, como indica a análise geomorfológica da seção anterior e os depósitos arenosos de dunas mapeados na região (CPRM, 2012).

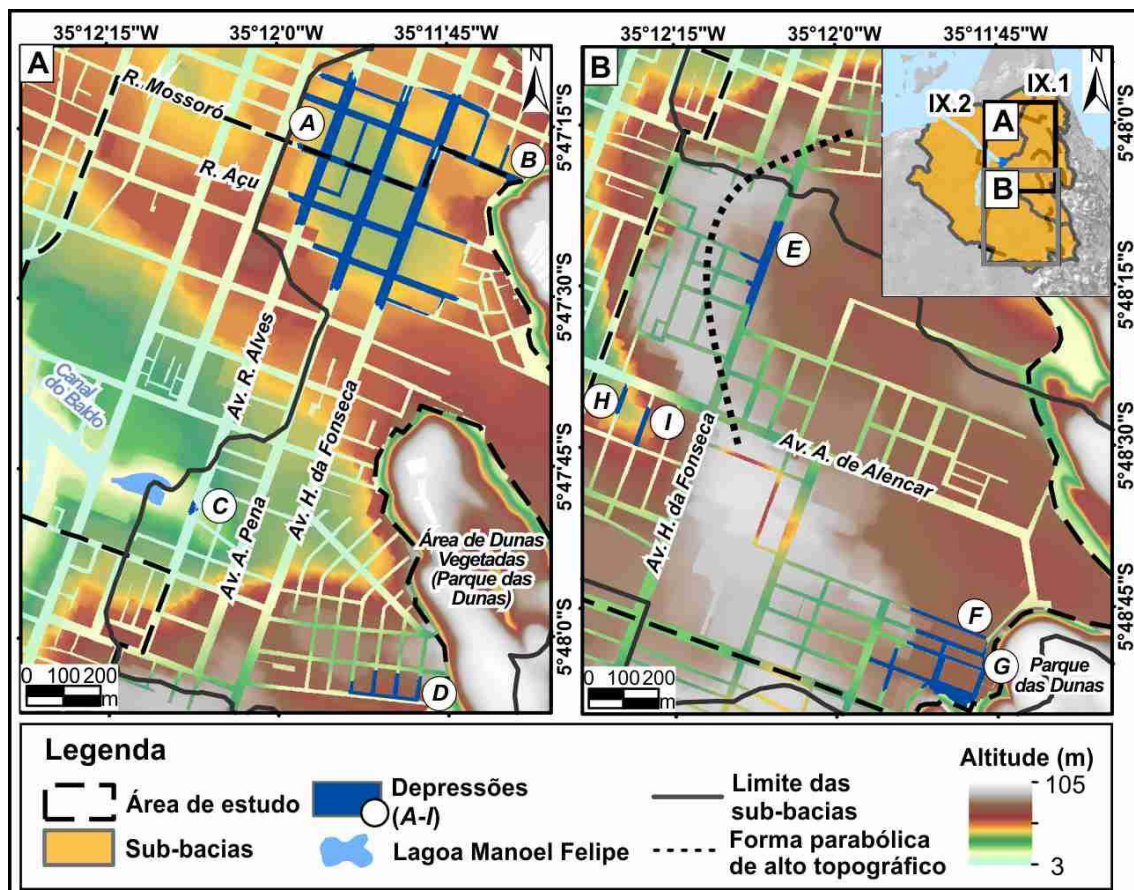
A depressão *C* (15,7 m a 16,3 m) localizada a montante da Lagoa Manoel Felipe está sob a influência do Canal do Baldo e possui pequena área de abrangência, quando comparada às demais depressões, pelo fato da cota mínima para escoamento da água nesta depressão corresponder à altura da calçada que separa a Av. Rodrigues Alves da área da Lagoa Manoel Felipe.



Além disso, trata-se de uma região de maior declividade, diferentemente da depressão A que possui terrenos mais planos.

No setor sul da Sub-bacia de Drenagem IX.1 está localizada a depressão D (34,3 m a 37,5 m) que, como a maior parte dos baixos topográficos na área de estudo, estão relacionados ao contexto geomorfológico de depressões interdunares em meio aos campos de dunas.

**Figura 5.4:** Localização das depressões topográficas identificadas ao longo do sistema de arruamentos, intrinsicamente relacionadas ao contexto geomorfológico local e a disposição espacial das construções urbanas: A) Depressões A, B, C e D presentes na Sub-bacia de drenagem Riacho do Baldo IX.1, setor nordeste do Bairro do Tirol; B) Depressões E, F, G, H e I, localizadas na Sub-bacia de drenagem Riacho do Baldo IX.2, setor sul do Bairro do Tirol.



Na Sub-bacia de Drenagem IX.2 identificou-se cinco baixos topográficos, denominados de depressões E, F, G, H e I (Figura 5.4 B). O baixo topográfico E (37,7 m a 40,7 m) corresponde ao trecho da Av. Hermes da Fonseca que foi construída obliquamente sobre terrenos de dunas com forma parabólica (Figura

5.4 B), ocasionando um vale entre dois cordões arenosos. Os baixos topográficos *F* (36,0 m a 38,5 m) e *G* (34,3 m a 38,5 m), no extremo sul da Sub-bacia IX.2, estão inseridos no contexto das depressões interdunares do setor sul da área de estudo (Figura 5.3). No seu lado oeste encontra-se o alto topográfico de um dos cordões arenosos que dá origem a depressão *E* (Figura 5.4 B), e no seu lado leste estão as dunas vegetadas do Parque das Dunas. As depressões *H* (26,3 m a 27,4 m) e *I* (28,4 m a 30,9 m) possuem influência direta de um canal afluente do Canal do Baldo, pois tratam-se de ruas construídas perpendicularmente ao vale deste canal.

Além disso, verificou-se que todas as depressões, exceto os baixos topográficos *A* e *G*, são controladas por edificações que barraram o escoamento superficial natural da água pluvial. As depressões *A* e *G* mostram morfologia que sugere que tenham sido lagoas interdunares naturais, no passado, enquanto as demais concavidades conduziriam a água para exutórios das sub-bacias.

Dentre todas as depressões identificadas que são susceptíveis aos alagamentos, seis regiões puderam ser validadas por registros fotográficos de alagamentos ou através da lista de pontos críticos de drenagem descrita no Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Natal/RN (Natal, 2014). Na Tabela 5.2 são apresentadas informações específicas sobre cada uma dessas depressões, as quais auxiliam na compreensão do processo de alagamentos frente a eventos de precipitações intensas.

**Tabela 5.2:** Informações para as depressões quanto ao contexto geomorfológico envolvido, presença de registro prévio de alagamentos, tipo de pavimentação, quantidade de bocas de lobo e sua área de abrangência.\*32,3% correspondem à via carroçável com material areno-argiloso.

Depressão	Contexto Geomorfológico	Registro prévio de pontos críticos	Tipo de pavimentação (%)		Bocas de Lobo	Área (m <sup>2</sup> )
			Asfáltica	Paralelepípedo		
<i>A</i>	Zona interdunar	Sim	83,8	16,2	20	80.415,5
<i>B</i>	Zona interdunar	Sim	19,5	80,5	9	6474,2
<i>C</i>	Sistema fluvial	Não	100,0	0	10	531,0
<i>D</i>	Zona interdunar	Sim	0	100,0	5	2518,4
<i>E</i>	Zona interdunar	Sim	97,4	2,6	6	8338,2
<i>F</i>	Zona interdunar	Não	0	100,0	0	1110,6
<i>G</i>	Zona interdunar	Sim	0	67,7*	2	17780,3
<i>H</i>	Sistema fluvial	Não	100	0	5	826,0
<i>I</i>	Sistema fluvial	Sim	0	100	8	1175,0

### 5.3 FLUXO SUPERFICIAL

O método aplicado revelou aspectos sobre a dinâmica de escoamento da água pluvial no Bairro do Tirol e adjacências, tratando-se de análise crucial ao estudo de alagamentos urbanos diante de eventos de precipitação intensa. Trata-se das condições resultantes da interação entre os diferentes comportamentos assumidos pelos diferentes elementos da organização urbana durante eventos de intensas precipitações e mesmo tempestades (OLIVEIRA & RAMOS, 2002; BOONYA-AROONNET *et al.*, 2007; KASPERSEN *et al.*, 2017). Desta maneira a análise sobre o escoamento superficial foi realizada levando em conta o sistema de arruamentos e as áreas de contribuição das depressões alagáveis (microbacias de drenagem) ao longo da área de estudo.

#### 5.3.1 Fluxo superficial sobre o sistema de arruamentos

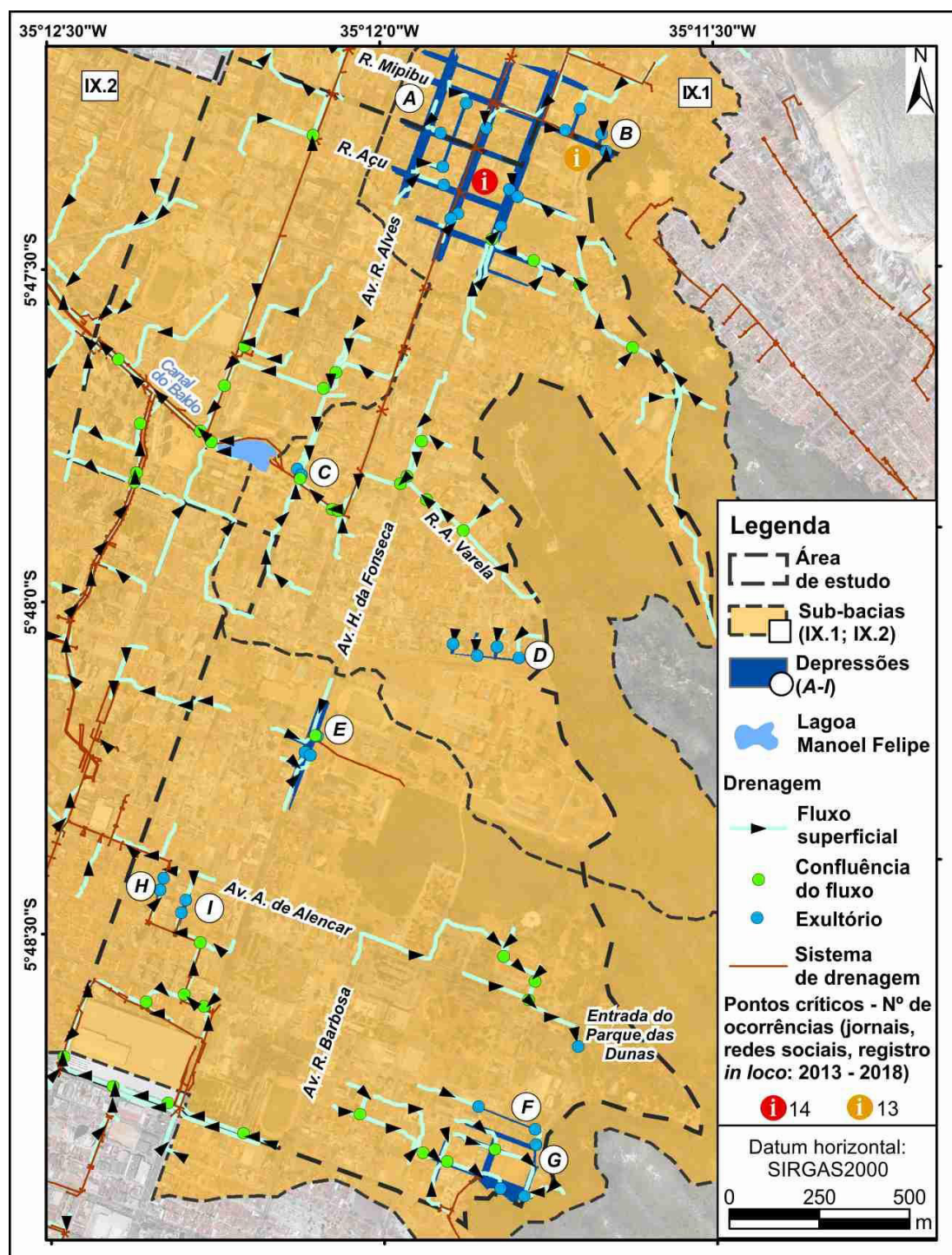
Quanto ao sistema de arruamentos, a Figura 5.5 mostra a influência de elementos do arranjo urbano sobre o fluxo superficial, os sentidos de escoamentos, os locais de confluência e exutórios, com identificação dos pontos críticos que apresentaram maior número de episódios de alagamentos registrados entre os anos de 2013 e 2018, todas informações obtidas a partir do MDS simplificado e de observações *in loco*.

As depressões *A* e *B* são os locais de maior concentração do fluxo superficial e, em virtude de suas formas circulares com fluxo concêntrico, um maior número de ruas atuam como exutórios, canalizando a água para o interior das depressões. Os alagamentos nesses locais são agravados pelo excesso de escoamento superficial, conjuntamente com o sistema de drenagem pluvial subterrâneo em funcionamento ineficiente, seja devido à ausência de manutenção/limpeza e/ou por ter sido subdimensionado (MARAFUZ *et al.*, 2015).

Quando um sistema de drenagem pluvial perde a capacidade de escoar o volume de água que deveria fluir por seu intermédio, a água retorna a superfície, agravando os alagamentos. Além disso, são frequentes as ligações clandestinas de sistemas de esgoto residencial e comercial ao sistema de drenagem. Entretanto, igualmente, o mau funcionamento por ausência de

limpeza periódica ou subdimensionamento dos sistemas de esgotos também pode gerar transbordamentos de água servida para a superfície do terreno em dias de precipitações intensas, como ocorre por vezes em setor onde está localizada a Rua Açú (Figura 5.6).

**Figura 5.5:** Arranjo do fluxo superficial de águas pluviais, setores de confluência e exutórios, diante da localização das depressões e sistema de drenagem no Bairro do Tirol e adjacências. Destaque para os pontos críticos com maior número de episódios de alagamentos registrados entre os anos de 2013 e 2018.



**Figura 5.6:** Transbordamento de poço de visita do sistema de esgoto durante alagamento na Rua Açú após evento de precipitação intensa em 13/04/2018.



Outros setores na área de estudo que se destacam por apresentarem relevante convergência do fluxo superficial estão localizados (Figura 5.5): na região sul, onde o fluxo culmina para as depressões *F* e *G*; na região sudeste, próximo à entrada do Parque das Dunas pelo acesso da Av. Alexandrino de Alencar; e, na região central, a montante da Lagoa Manoel Felipe. Esta última região, no cruzamento entre a Av. Hermes da Fonseca e a Rua Ângelo Varela, apresenta grande convergência do fluxo superficial provenientes destas vias e, apesar de não ser considerada uma depressão no MDS, o fluxo intenso causa transtornos ao trânsito em dias de precipitação intensa.

De acordo com as Tabelas 5.2 e 5.3 nota-se que o modelo de fluxo superficial para depressão *A* apresenta 12 exutórios, quantidade três vezes maior que em qualquer outra depressão no Bairro do Tirol, 2 trechos de confluência de fluxo superficial, além de apresentar cerca de 83,4% de área impermeável devido ao tipo de pavimentação. Tais aspectos corroboram para que a depressão *A* se destaque como uma das mais críticas, por açambarcar grande volume de água superficial, provavelmente com capacidade reduzida ou subdimensionada do sistema de drenagem pluvial para efetivamente atuar no escoamento do volume de água presente, sobretudo em situações de chuvas intensas.

**Tabela 5.3** Número de confluências de fluxo superficial e exutórios relativos a cada depressão identificada no Bairro do Tirol e adjacências.

Depressão	Número de confluências de fluxo	Número de exutórios
<i>A</i>	2	12
<i>B</i>	0	4
<i>C</i>	2	3
<i>D</i>	0	4
<i>E</i>	1	4
<i>F</i>	0	2
<i>G</i>	4	3
<i>H</i>	0	2
<i>I</i>	0	2

Além disso, verifica-se que o padrão das linhas de fluxo superficial é ortogonal nos pontos de confluência, semelhante ao arranjo estabelecido para o sistema de arruamentos do Bairro do Tirol, com ruas ortogonais entre si, elucidando a forte influência dos elementos do arranjo urbano no escoamento de águas superficiais. As áreas de saída de água do Bairro do Tirol concentram-se para as regiões de campo de dunas vegetadas no setor sul e sudeste, e a noroeste seguem para o Canal do Baldo, e seu afluente, e para regiões baixas como os bairros de Cidade Alta e Ribeira. Os exutórios na área de estudo convergem-se aos baixos topográficos, validando os procedimentos metodológicos empregados para a identificação e avaliação do comportamento dinâmico das depressões diante de eventos de precipitação intensa.

### 5.3.2 Áreas de contribuição e microbacias

A metodologia empregada também permitiu a delimitação das microbacias do Bairro do Tirol, além de determinar as áreas de contribuição dos baixos topográficos identificados anteriormente. Apesar do PDDMA definir as Sub-bacias de Drenagem Riacho do Baldo IX.1 e IX.2, a delimitação de microbacias de drenagem, sobretudo das áreas críticas de alagamento, desempenha importante parâmetro para o planejamento da cidade a curto e a longo prazo.

Estas informações podem respaldar a organização do uso e ocupação do solo, uma vez que áreas reservadas para dispositivos de infiltração de

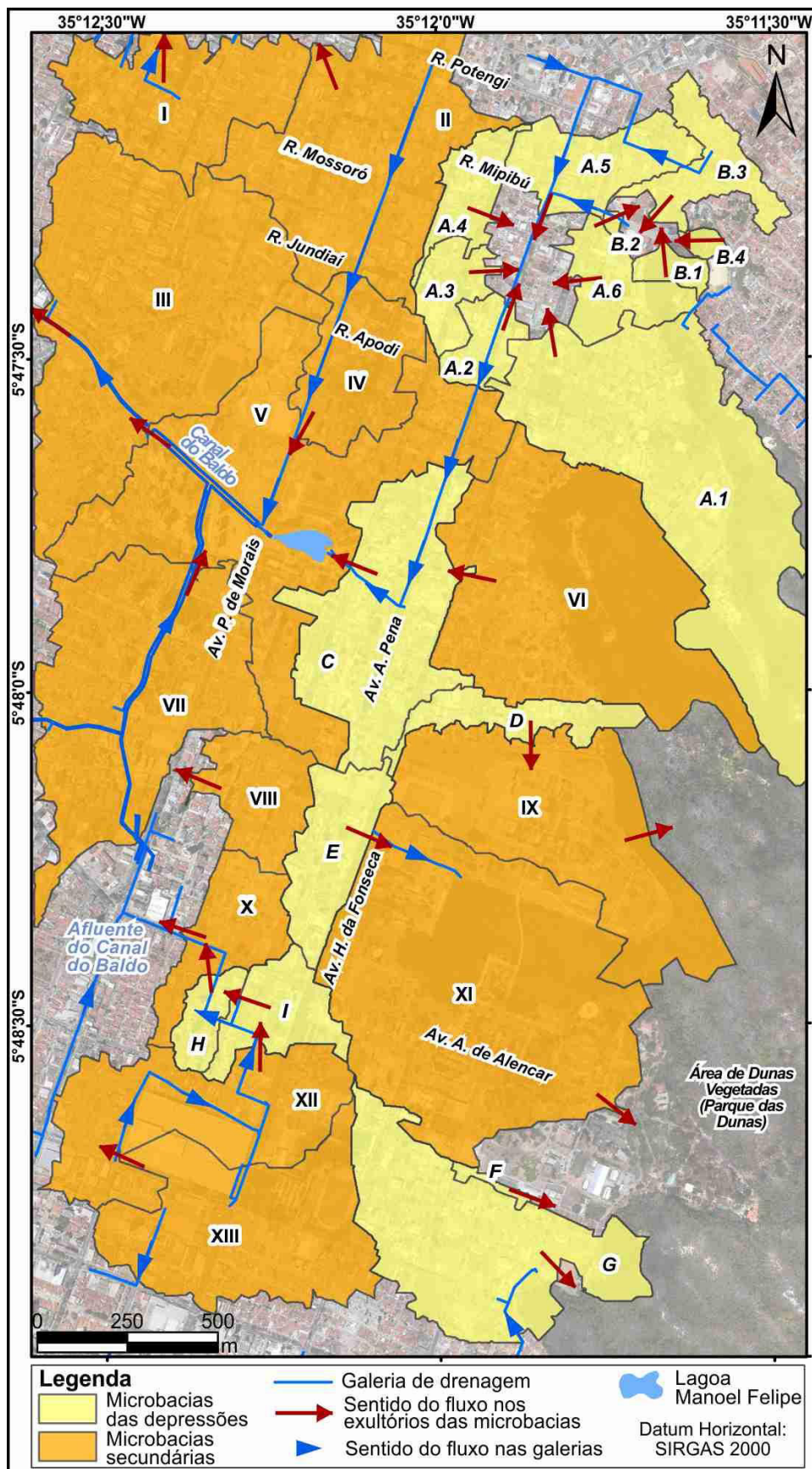
águas pluviais ao longo da microbacia permitem a redução dos volumes de escoamento. Desta maneira, estes dispositivos podem amenizar a sobrecarga do sistema de drenagem, atenuando alagamentos, reduzir problemas de desgastes por erosão, visto que reduz também a vazão do deflúvio, além de ser uma recomendação do PDDMA (NATAL, 2009).

Por meio dos procedimentos realizados em ambiente SIG, 30 microbacias foram delimitadas no Bairro do Tirol, sendo 17 associadas diretamente com as depressões alagáveis (Figura 5.7). As 17 microbacias foram denominadas com a mesma nomenclatura de suas respectivas depressões topográficas. Para as depressões topográficas *A* e *B* foram delimitadas mais de uma microbacia, pois possuem áreas de contribuição concêntricas em seu entorno. Assim foram definidas as seguintes microbacias: *A.1*, *A.2*, *A.3*, *A.4*, *A.5*, *A.6*, *B.1*, *B.2*, *B.3*, *B.4*, *C*, *D*, *E*, *F*, *G*, *H* e *I* (Figura 5.7). As demais microbacias secundárias constituintes da dinâmica hidrológica do Bairro do Tirol receberam as seguintes denominações neste trabalho: I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX, X, XI, XII e XIII.

Dentre todas as 17 microbacias, associadas às depressões topográficas, apenas as microbacias *C*, *I* e *H* foram consideradas de tipo aberta, pois conduzem a água para a Lagoa Manoel Felipe (Microbacia *C*) ou para o Afluente do Canal do Baldo (microbacias *I* e *H*). Contudo, destaca-se que as depressões *I* e *H* são ocasionadas por obstruções do fluxo natural da água, o que pode provocar alagamentos. Por sua vez, as microbacias *A.1*, *A.2*, *A.3*, *A.4*, *A.5*, *A.6*, *B.1*, *B.2*, *B.3*, *B.4*, *D*, *E*, *F* e *G* foram classificadas como fechadas.

Conforme a Tabela 5.4, as microbacias associadas à depressão *A* totalizam 76,31 ha de área de contribuição, o que representa o maior deflúvio dentre as microbacias das depressões topográficas, considerando áreas quase em sua totalidade impermeáveis. Este fato corrobora mais uma vez para que a depressão *A* seja uma das áreas mais críticas de alagamento. A área de contribuição da depressão *B* (9,93 ha) é menor apenas do que a das depressões *C* (24,71 ha) e *G* (28,44 ha) (Tabela 5.4). Apesar disso, tanto a depressão *A* como a depressão *B* foram consideradas as depressões mais críticas quanto aos problemas de alagamento, em virtude do tipo de ocupação do solo e o contexto geomorfológico dos locais onde ocorrem os desagues

**Figura 5.7:** Inter-relação entre fluxos do escoamento superficial de microbacias (relacionadas as depressões alagáveis e microbacias secundárias) do Bairro do Tirol e fluxos subterrâneos em galerias de drenagem.





finais dos fluxos de suas microbacias. Ambas as microbacias são as únicas consideradas fechadas que vertem seus deflúvios sobre terrenos praticamente impermeáveis sem possibilidade de escoamento superficial da água para microbacias vizinhas ou infiltração significativa (Figura 5.7). De maneira diferente, as microbacias *D*, *E*, *F* e *G* vertem o fluxo superficial para áreas de alta capacidade de infiltração que é o solo arenoso do Parque das Dunas ou para microbacias vizinhas com mesmo destino final das águas que o supracitado (Figura 5.7).

Por fim, observa-se, segundo a Figura 5.7, que o sistema de drenagem subterrâneo não obedece às condições naturais de escoamento superficial. As galerias de drenagem apresentam fluxos opostos ao sentido do escoamento superficial nas microbacias II (trecho da Av. Prudente de Moraes entre as ruas Jundiá e Potengi), *A.2* (trecho da Av. Afonso Pena entre as ruas Apodi e Mossoró) e *B.2* (trecho da Rua Mipibú próximo aos exutórios das microbacias *B.1*, *B.3* e *B.4*). Dois trechos em que ocorre a transposição do sistema de drenagem em relação à topografia estão situados nos locais mais críticos de alagamento (depressões *A* e *B*). Além disso, este arranjo do sistema de drenagem contraria orientações do próprio PDDMA, que recomenda a não transposição de divisores de água para evitar grandes profundidades de galerias (NATAL, 2009). As transposições favorecem ainda a fluxos contrários ao projetado para as galerias de drenagem, caso ocorram erros de projeto ou recalques da fundação, o que provocaria acúmulo de água dentro do sistema de drenagem até o extravasamento em superfície (SILVA JR. *et al.*, 2016).

**Tabela 5.4** Informações sobre as microbacias de drenagem associadas às depressões alagáveis.

Microbacia	Área de Contribuição (ha)	Total (ha)	Tipo de microbacia	Terreno de desembocadura final
<i>A.1</i>	46,53	76,31	Fechada	Área altamente Impermeabilizada
<i>A.2</i>	3,92			
<i>A.3</i>	4,54			
<i>A.4</i>	5,18			
<i>A.5</i>	9,52			
<i>A.6</i>	6,62			

<i>B.1</i>	1,80	9,93	Fechada	Área altamente Impermeabilizada
<i>B.2</i>	0,33			
<i>B.3</i>	7,00			
<i>B.4</i>	0,80			
<i>C</i>	24,71	24,71	Aberta	Lagoa Manoel Felipe
<i>D</i>	6,06	6,06	Fechada	Parque das Dunas
<i>E</i>	9,39	9,39	Fechada	Parque das Dunas
<i>F</i>	0,65	0,65	Fechada	Parque das Dunas
<i>G</i>	28,44	28,44	Fechada	Parque das Dunas
<i>H</i>	3,37	3,37	Aberta	Afluente do Canal do Baldo
<i>I</i>	7,27	7,27	Aberta	Afluente do Canal do Baldo

#### 5.4 MAPAS DE PERIGO E RISCO A ALAGAMENTO EM ÁREAS CRÍTICAS

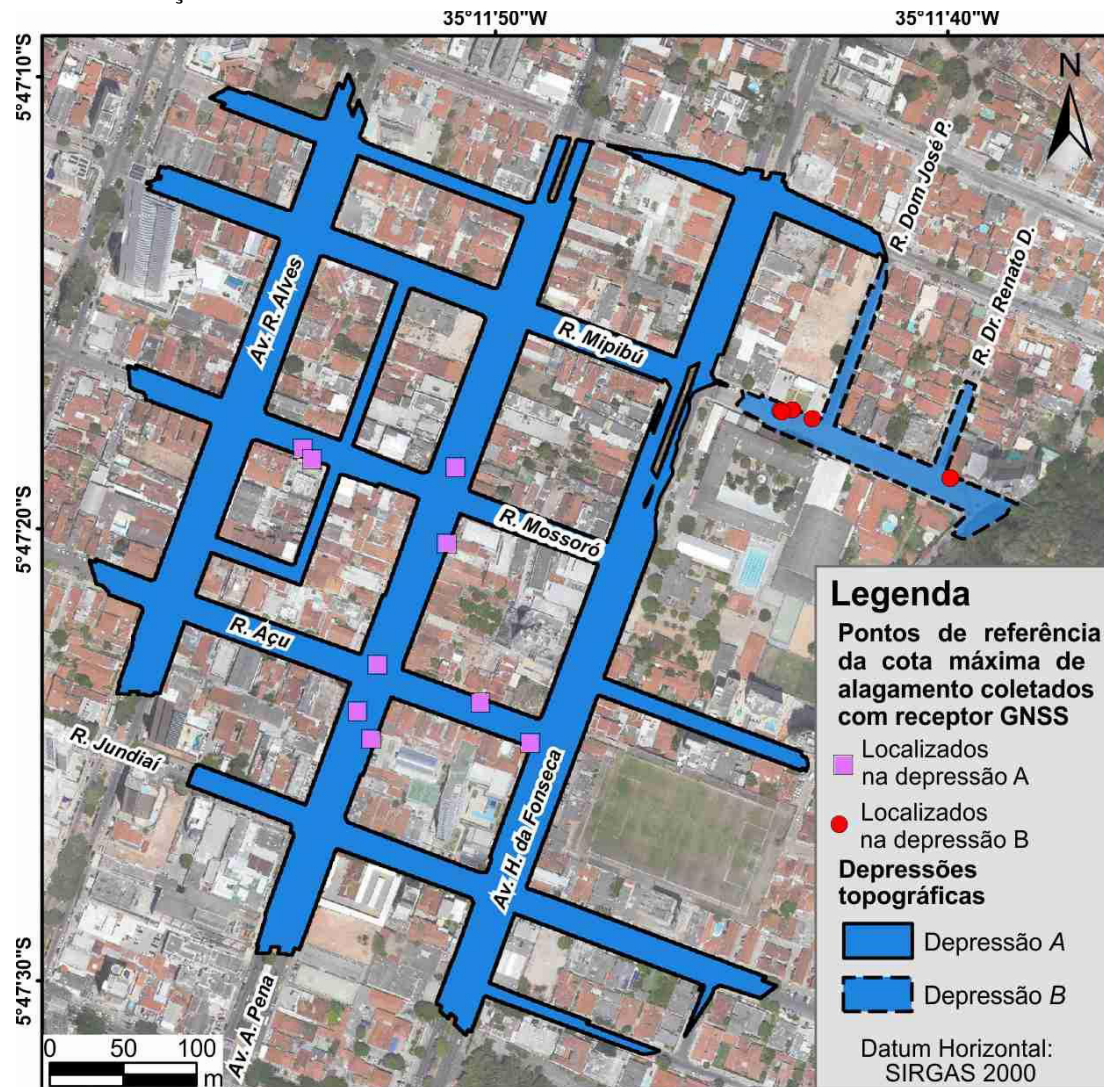
As seguintes análises levaram em conta todos os parâmetros obtidos até esta etapa do estudo (contexto geomorfológico, registros de alagamento, impermeabilização segundo tipos de pavimentação, área da depressão alagável, número de exultórios para cada depressão alagável, área de contribuição, tipo de microbacia e o sistema de drenagem) os quais mostram que as depressões *A* e *B* são as mais críticas no tocante aos alagamentos urbanos.

Portanto, os resultados apresentados são referentes a estas duas áreas críticas em escala de detalhe de 1:5.000. Contudo, a metodologia aplicada também é considerada um resultado deste trabalho, podendo ser aplicada em trabalhos futuros para outras áreas com problemas semelhantes.

##### 5.4.1 Relação entre precipitação horária e cota de alagamentos

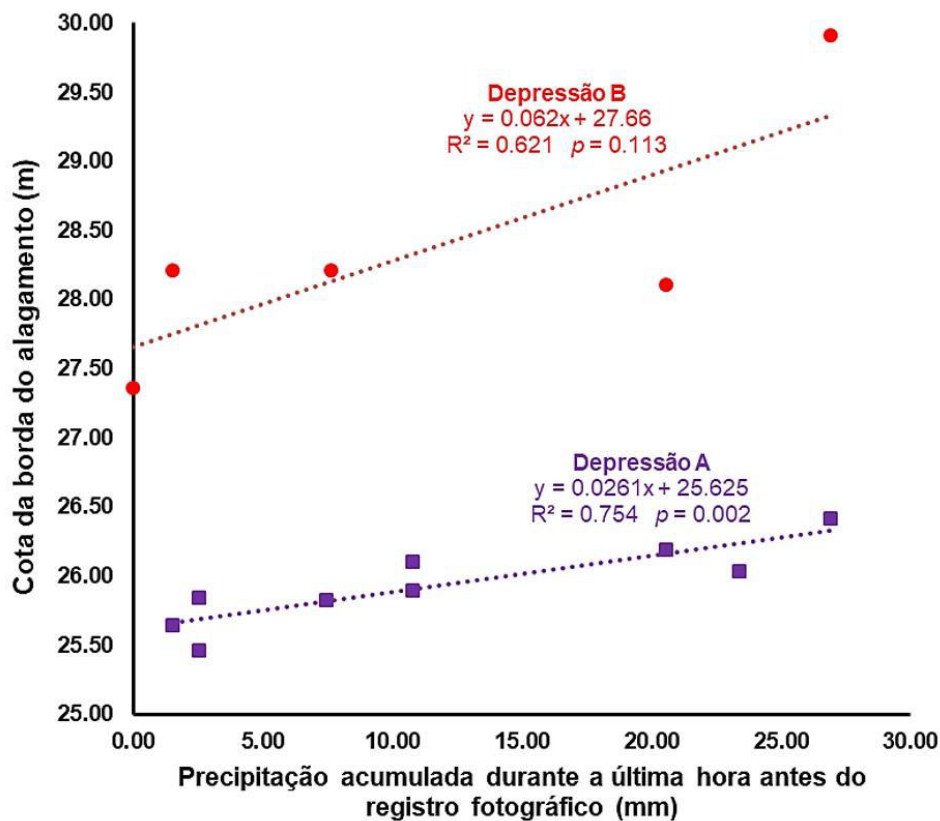
A partir de dados coletados com metodologia baseada em levantamento estático com receptores GNSS (Figura 5.8) para estabelecimento das cotas máximas de alagamentos, e de registros pluviométricos horários em diferentes eventos de precipitação, foram identificados e avaliados os padrões comportamentais de alagamentos nas depressões *A* e *B*. A Regressão Linear realizada com os dados de precipitação (variável independente) e das cotas da

**Figura 5.8:** Localização de pontos de referência da cota máxima de alagamento coletado com receptor GNSS nas depressões A e B. Cada ponto está associado a um evento de precipitação intensa em que foi possível associar fotografias históricas com marcadores de boa identificação *in loco*.



borda do espelho d'água do alagamento (variável dependente) mostrou que na depressão A o aumento das cotas máximas de alagamento é linearmente proporcional à intensidade das chuvas ( $R^2 = 0,754$ ;  $p = 0,002$ ;  $N = 9$ ), como indica a Figura 5.9, representando um modelo extremamente coerente. Logo, observa-se que o problema de alagamento na depressão A está intrinsecamente relacionado ao subdimensionamento do sistema de drenagem pluvial, diante de chuvas intensas e com tempo de duração inferior ou igual à uma hora.

**Figura 5.9:** Modelos de Regressão Linear entre a Precipitação Acumulada e Cota de Alagamento, para as depressões A e B. Na depressão A verifica-se uma forte relação linear entre o volume de precipitação e a variação da cota do espelho d'água (Situação do Tipo I), enquanto na regressão aplicada à depressão B mostra relação linear moderada entre os dois parâmetros aplicados (Situação do Tipo II), segundo valores de  $R^2$  e  $p$ .



Por sua vez, a depressão B mostrou um modelo menos consistente de Regressão Linear, sobretudo, em virtude do valor  $p$  ter ultrapassado o nível de significância estabelecido em 5% ( $R^2 = 0,621$ ;  $p = 0,113$ ;  $N = 5$ ). Para o período temporal em estudo, só foi possível obter 5 fotografias históricas com marcadores de boa identificação *in loco* das cotas de alagamento. Provavelmente, com a adoção de número maior de amostras ( $N$ ), acredita-se que o modelo se tornaria estatisticamente significativo. Entretanto, o modelo apresentou ainda um moderado coeficiente de determinação ( $R^2$ ), fator este que aponta que as causas de alagamento nessa região sejam não somente o subdimensionamento do sistema de drenagem pluvial, mas que estejam também relacionadas às obstruções frequentes por dejetos sólidos em alguns momentos de chuvas intensas. As obstruções no sistema de drenagem pluvial

indicam negligência na manutenção periódica realizada pelos órgãos responsáveis, permitindo a permanência excessiva e/ou o acúmulo de lixo nas bocas de lobo. O acúmulo de diferentes quantidades de lixo no sistema de drenagem pluvial, em vários episódios de alagamentos registrados, certamente, causaram variações na eficiência de todo o sistema de drenagem e, conseqüentemente, impediram elevadas correlações lineares entre as variáveis aplicadas.

Na análise do comportamento das depressões diante de mesmos eventos pluviométricos, verificou-se que na depressão *B* ocorreram variações bem maiores de alturas de lâminas de água em relação à depressão *A*, enquanto nesta última foi observado maiores variações da extensão da lâmina d'água. Este fato aliado à posição das bocas de lobo ao longo das depressões (posição dos setores com bocas de lobo apresentada na próxima seção) mostra que na depressão *B* haverá sempre quantidade inferior de bocas de lobo disponíveis em relação à depressão *A*, mesmo que a depressão *B* seja totalmente preenchida e alcance sua extensão máxima. Por estes motivos, há maior tendência de obstrução no sistema de drenagem pluvial na depressão *B* e conseqüentemente, maior interferência no conjunto do sistema de drenagem desse setor.

Portanto, levando em consideração as causas para alagamentos urbanos com base na magnitude dos Coeficientes de Determinação, a depressão *A* se caracteriza como Situação do Tipo I e a depressão *B* como Situação do Tipo II (Figura 4.10), conforme a proposição metodológica. A Situação do Tipo III, relacionado apenas a falta de manutenção periódica do sistema de drenagem e das bocas de lobo, não foi diretamente identificada nesse setor da área de estudo.

Vale ressaltar que os modelos de regressão linear desenvolvidos para as depressões *A* e *B* são iniciais, podendo ter precisão aprimorada na medida em que o apanhado histórico de precipitações e suas respectivas cotas máximas de alagamento for ampliado. Por vezes, apesar da existência de bons registros fotográficos com a identificação da cota máxima de alagamento, a coleta da cota altimétrica com receptor GNSS não foi possível devido interferências nos sinais dos satélites por elementos urbanos como muros de edificações e árvores. Entretanto, a presente abordagem trata-se de uma

metodologia promissora para tratar de alagamentos urbanos, podendo ser aprimorada por meio do uso de equipamentos topográficos tradicionais em determinados locais e instalação de pluviômetros mais próximos a áreas de interesse.

#### 5.4.2 Mapa de perigo a alagamento

As investigações *in loco* permitiram a junção de evidências que foram úteis na compreensão das principais situações ocorrentes do Bairro do Tirol relacionadas à distribuição e abrangência dos rápidos episódios de alagamentos, frequentemente alardeados em dias de precipitação intensa. Por meio dos dados coletados nos episódios de alagamentos e do tipo de ocupação em cada lote urbano nos setores de influência dos baixos topográficos, foram identificadas as depressões *A* e *B* como aquelas que oferecem o maior perigo entre os alagamentos identificados (Figura 5.10 A). Os locais frequentemente alagados são os cruzamentos da Rua Mossoró com a Av. Afonso Pena (Figura 5.10 B), da Rua Açú com a Av. Afonso Pena, os quais muitas vezes tornam-se um único e extenso alagamento, além da Rua Mipibu no setor entre as ruas Dom José Pereira e Dr. Renato Dantas (Figura 5.10 C).

Além disso, através do registro histórico de precipitação e das seguintes equações obtidas nas análises de regressão linear realizadas para as depressões *A* e *B*:

- $y = 0,0261x + 25,62$  (5.1) Depressão *A*
- $y = 0,0620x + 27,66$  (5.2) Depressão *B*

Em que  $y$  = altitude ortométrica da cota de alagamento e  $x$  = precipitação pluviométrica por hora; foi possível associar as áreas de perigo a alagamento com volumes de precipitação pluviométrica por hora (Tabela 5.5 e 5.6).

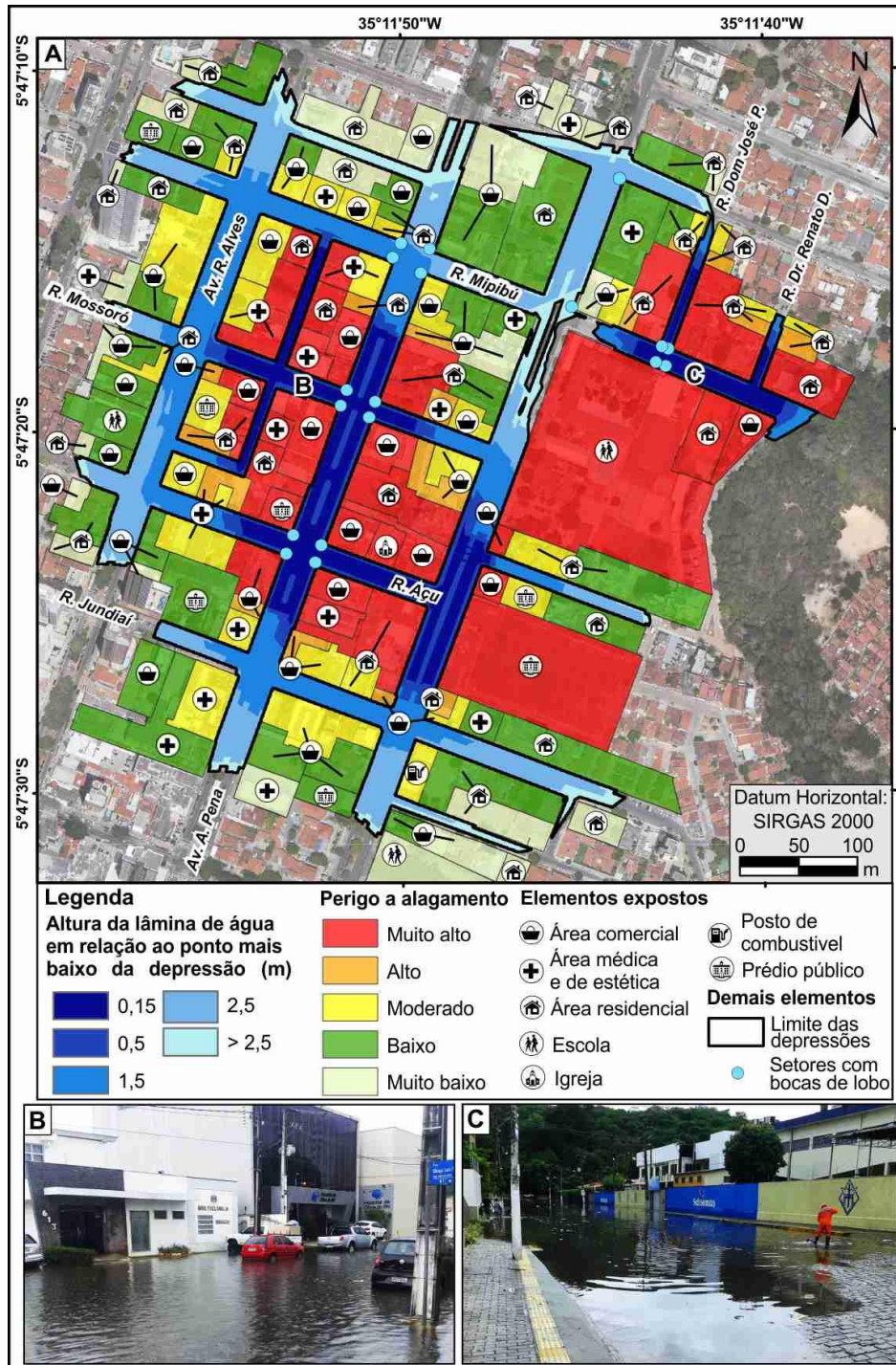
Estas informações poderão ser utilizadas como prognósticos de áreas alagadas, diante de previsões pluviométricas, para intervenções nas áreas de perigo e alertas aos moradores e proprietários por meio dos órgãos e setores públicos responsáveis.

O Bairro do Tirol, predominantemente de classe média a alta, possui grande quantidade de empreendimentos comerciais, de saúde e estética e edifícios residenciais. Estes setores com alta concentração de

empreendimentos têm sido corriqueiramente prejudicados com alagamentos durante os episódios de precipitação intensa. Um desses setores é a Rua Mossoró, no cruzamento com a Av. Afonso Pena, onde há aglomerados de empreendimentos comerciais (lojas de roupas, calçados e óticas), clínicas médicas e hospitais (Figura 5.10 A). De modo semelhante, nas cercanias do cruzamento da Rua Açu com a Av. Afonso Pena, farmácias, pontos comerciais, residências e igrejas são afetados com os alagamentos causados pelas precipitações intensas. A depressão *A* apresenta declives suaves, no entanto possui ampla área de influência com nove vias canalizando o fluxo superficial para esses dois cruzamentos supracitados, o que favorece intensamente aos rápidos alagamentos nesses setores.

No setor crítico de alagamento da Rua Mipibu são os moradores locais os principais afetados, visto que a área é ocupada, na maior parte, por condomínios residenciais e casas, e nos períodos letivos os estudantes e funcionários de escola que está situada no ponto mais baixo da depressão *B* (Figura 5.10 C). Este baixo topográfico apresenta declividades maiores que a depressão *A*, de modo a permitir alagamentos com profundidades de até 1,5 m, com pequena extensão do espelho d'água. A depressão *A*, por sua vez, ao ser alagada até a profundidade de 1,5 m teria espelho d'água com extensão maior quando comparada à depressão *B* e, conseqüentemente, dispõe de treze bocas de lobo para drenagem da água superficial, enquanto a depressão *B* possui apenas nove (Figura 5.10 A). Além disso, as informações das Tabelas 5.5 e 5.6 mostram que na depressão *B* a precipitação mínima horária para gerar alagamento é menor (3,3 mm/h), quando comparada ao valor de precipitação mínima em relação à depressão *A* (10,8 mm/h). Todos estes fatores implicam em comportamentos diferentes das ocorrências de alagamento nas depressões *A* e *B*.

**Figura 5.10:** Detalhe sobre a ocupação urbana e mapeamento dos perigos a alagamento nas depressões A e B: A) Mapa de ocupação urbana e perigo a alagamento, em função das alturas das lâminas de água; as diferentes quantidades de bocas de lobo em ambas as depressões afetam diretamente o comportamento dos alagamentos; B) Alagamento na Rua Mossoró prejudicando clínica médica, hospital e áreas comerciais em 07/05/2018; C) Gari tentando desobstruir boca de lobo diante de alagamento em frente à escola e residências na Rua Mipibú em 17/02/2018.





**Tabela 5.5:** Valores de precipitação acumulada por hora associados às classes de perigo de alagamento nos lotes urbanos da depressão A.

Perigo a alagamento na depressão A	Precipitação acumulada (mm/h)
Muito alto	10,80 – 31,22
Alto	31,23 – 44,63
Moderado	44,64 – 88,69
Baixo	88,70 – 125,09
Muito baixo	125,10 – 140,04

**Tabela 5.6:** Valores de precipitação acumulada por hora associados às classes de perigo de alagamento nos lotes urbanos da depressão B.

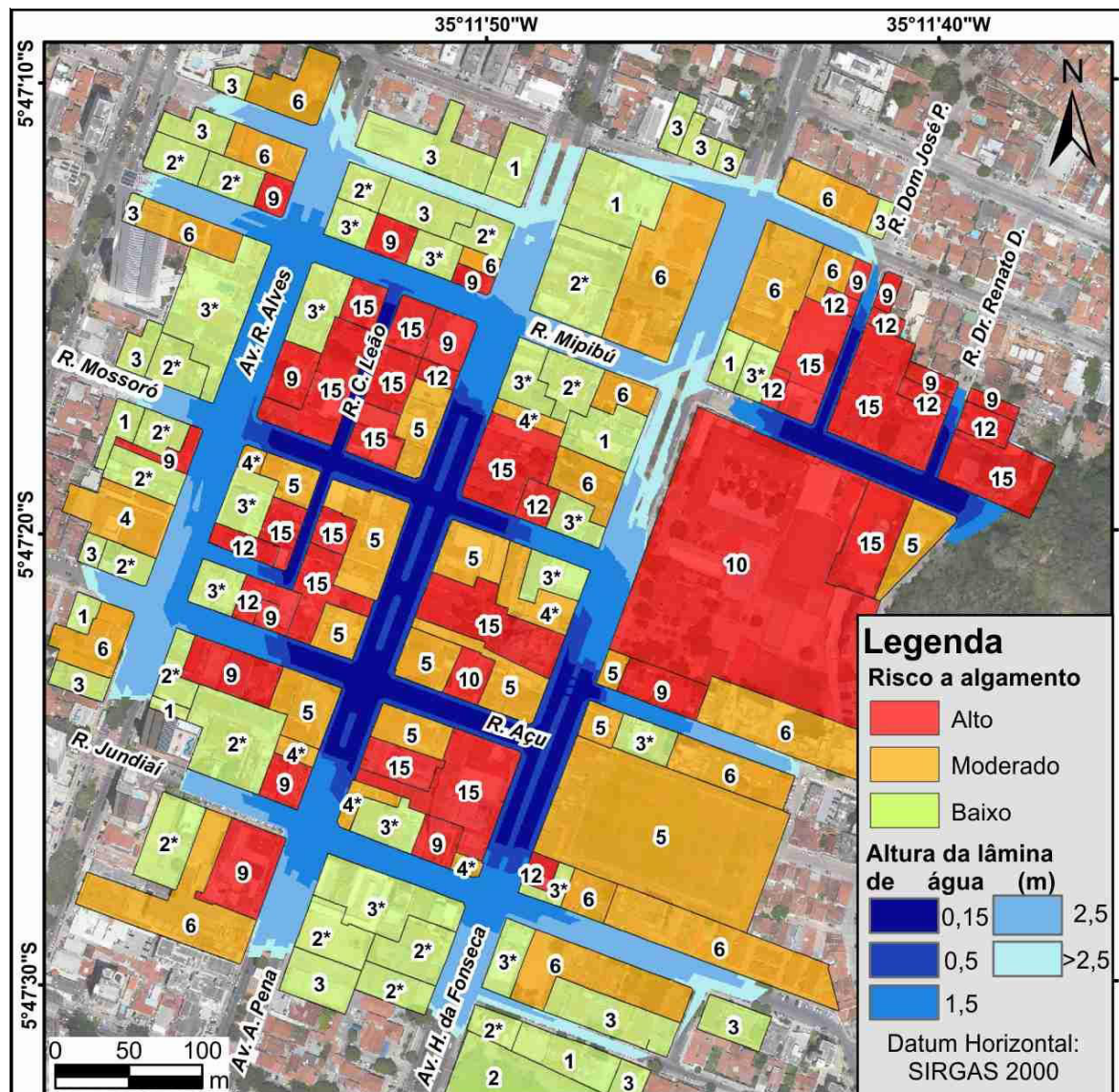
Perigo a alagamento na depressão B	Precipitação acumulada (mm/h)
Muito alto	3,30 – 12,42
Alto	12,43 – 18,06
Moderado	18,07 – 23,71

### 5.4.3 Mapa de risco a alagamento

A partir dos mapeamentos realizados com informações de perigo a alagamento e vulnerabilidade referentes aos lotes urbanos, foi possível definir os graus de riscos a alagamentos das áreas ocupadas nas depressões A e B. Destaca-se que este tipo de abordagem é altamente aplicável para tomadas de decisão por gestores públicos e muito favoráveis a intervenções rápidas por órgãos e secretarias de defesa civil, visto que reúne informações de perigo, vulnerabilidade e risco diante de estimativas de precipitações pluviométricas em único mapa (Figura 5.11).

As matrizes de risco apresentadas na Figura 5.11 foram elaboradas de maneira que cada célula da matriz possui um único valor numérico específico, o qual é expresso no mapa de risco a alagamento. Portanto, os valores de 6, 4, 3 e 2 foram diferenciados dos valores 6\*, 4\*, 3\* e 2\* para representar posições específicas das células das matrizes. Desta forma, além dos resultados sobre os graus de risco associados a cada lote urbano, suas condicionantes,

**Figura 5.11:** Mapa de risco a alagamentos para lotes urbanos ao longo das depressões A e B no Bairro do Tirol.



**Matrizes de risco a alagamento**

<b>Depressão A</b>		Vulnerabilidade Alta 3	Vulnerabilidade Média 2	Vulnerabilidade Baixa 1
Perigo muito alto (10,8 – 31,22mm/h)	5	15	10	5
Perigo alto (31,22 – 44,63mm/h)	4	12	8	4*
Perigo moderado (44,63 – 88,69 mm/h)	3	9	6*	3*
Perigo baixo (88,69 – 125,09 mm/h)	2	6	4	2*
Perigo muito baixo (125,09 – 140,04 mm/h)	1	3	2	1

<b>Depressão B</b>		Vulnerabilidade Alta 3	Vulnerabilidade Média 2	Vulnerabilidade Baixa 1
Perigo muito alto (3,3 – 12,42mm/h)	5	15	10	5
Perigo alto (12,42 – 18,06 mm/h)	4	12	8	4*
Perigo moderado (18,06 – 23,71 mm/h)	3	9	6*	3*

vulnerabilidade e perigo, também foram representadas pelos valores numéricos da matriz. Apesar da representação teórica dos valores de 8 e 6\* nas matrizes, não houve ocorrência destas situações representadas por estes valores nas depressões *A* e *B*. Além disso, a matriz da depressão *B* apresentou menor quantidade de situações no tocante ao perigo, pois as classes de baixo perigo e muito baixo perigo não se aplica para esta depressão. Portanto, as situações representadas pelos valores 6, 4, 3, 2, 2\* e 1 não ocorreram na depressão *B*.

A Figura 5.11 mostra que as áreas de maior risco a alagamento estão concentradas nas cercanias dos cruzamentos da Rua Mossoró com a Av. Afonso Pena e Rua Mossoró com a Rua Cônego Leão, e do cruzamento da Av. Afonso Pena com a Rua Açu, todos ao longo da depressão *A*. Na depressão *B*, os graus de maior risco são observados no trecho da Rua Mipibu entre as ruas Dom José Pereira e Dr. Renato Dantas. Assim, verificou-se grande semelhança entre o mapa de risco e o mapa de perigo a alagamento, visto que as áreas de maior perigo ocorrem muito próximas ou sobrepõem-se aos lotes urbanos de mais alta vulnerabilidade, como áreas hospitalares e residenciais.

Vale destacar que as classes de risco e perigo estão associadas a frequência de episódios de alagamento e, conseqüentemente, à probabilidade de sua ocorrência. Portanto, as regiões classificadas como de menores riscos ou perigos não estão necessariamente livres de possível ocorrência do fenômeno e suas conseqüências danosas no futuro.

A área avaliada dos lotes com ocupação urbana na depressão *A* possui 18,34 ha, das quais 39,58 % são de baixo risco, 40,06 % são de moderado risco e 20,37 % são de alto risco. Por sua vez, a depressão *B* possui 4,33 ha, das quais 1,73% são de baixo risco, 3,26% são de moderado risco e 95,01 % são de alto risco (Tabela 5.7). Estes valores mostram que na depressão *B* a área de alto risco a alagamento (4,11 ha) é maior que a área de alto risco na depressão *A* (3,74 ha), embora a depressão *B* possua a menor extensão. Este fato somado a maior tendência de acúmulo de dejetos sólidos na depressão *B*, conforme a Situação do Tipo II abordada na seção **5.4.1**, e menor volume mínimo de precipitação horária (3,30 mm/h) na depressão *B* para gerar alagamentos, mostram finalmente que a depressão *B* é a mais crítica quanto aos problemas de alagamento urbano no Bairro do Tirol, segundo os parâmetros discutidos neste trabalho.

**Tabela 5.7:** Dimensões das áreas de alto, moderado e baixo risco a alagamento nas depressões A e B no Bairro do Tirol.

<b>Depressão A</b>		
Risco a alagamento	Área (ha)	Porcentagem (%)
Baixo	7,26	39,58
Moderado	7,35	40,06
Alto	3,74	20,37
Total	18,34	100
<b>Depressão B</b>		
Risco a alagamento	Área (ha)	Porcentagem (%)
Baixo	0,07	1,73
Moderado	0,14	3,26
Alto	4,11	95,01
Total	4,33	100

## 5.5 APLICABILIDADE DOS RESULTADOS E RECOMENDAÇÕES

O conjunto de abordagens e resultados desenvolvidos nesta dissertação poderá auxiliar na gestão e planejamento de atividades relacionadas a serviços de varrição, defesa civil, tráfego de veículos, implantação de infraestrutura de drenagens e até influenciar legislações relacionadas ao uso e ocupação do solo na Cidade de Natal.

Por meio de pequenas implementações, como o adensamento de pluviômetros e MDEs oriundos de levantamentos por drones ou VANTs, os resultados deste trabalho poderão ser aprimorados, tornando-se aplicáveis a escalas de trabalho de ultra detalhe como utilizados em projetos de engenharia.

### 5.5.1 Aplicabilidade dos resultados

O MDT e MDS calibrados e integrados ao modelo de escoamento superficial permitem identificar áreas sob influência de torrentes de água, durante precipitações intensas, que podem arrastar dejetos sólidos e

concentrá-los em baixos topográficos, provocando obstruções de bocas de lobo. Assim, estes dados podem ser utilizados para planejamentos de pontos de varrições estratégicos, a fim de evitar problemas no sistema de drenagem que agravam os fenômenos de alagamento. Além disso, as legislações específicas que regem o descarte de lixo pela população poderiam ser reavaliadas em áreas críticas com respaldo desta pesquisa, a fim de melhorar o manejo de dejetos sólidos e amenizar tais problemas.

Durante a ocorrência de episódios de alagamento é comum a interdição de trechos do sistema de arruamentos por agentes de trânsito no Bairro do Tirol e em outras áreas da cidade de Natal, além disso, pessoas dentro dos lotes afetados pelo alagamento ficam ilhadas. Assim, os mapas da extensão e profundidade do alagamento com o uso dos MDEs são muito úteis para elaboração de planos de evacuação e interdição de áreas de risco a alagamento. Vale destacar que as abordagens aplicadas com foco na identificação e avaliação de áreas susceptíveis a alagamentos são altamente aplicáveis em outros bairros da cidade com características do terreno e do fenômeno de alagamento similares ao encontrado no Bairro do Tirol.

A delimitação de microbacias de drenagem e suas respectivas áreas de contribuição, associadas a depressões topográficas, são parâmetros muito importantes para discussões sobre áreas ocupadas, de expansão urbana e de preservação com dispositivos de infiltração de águas pluviais no solo. Portanto, tais parâmetros deveriam ser levados em conta para avaliação do plano diretor da cidade.

Os MDEs elaborados nesta pesquisa foram calibrados com uso de tecnologia GNSS de alta acurácia e precisão, entretanto, em virtude de ser oriundo de interpolações de curvas de nível com equidistância de 1 m, o MDT apresentou precisão de 47 cm. Ao analisar toda extensão do MDT e MDS as regiões de menores cotas dentro dos baixos topográficos apresentaram menor precisão, devido o menor adensamento de curvas de nível nestes setores, com tendência a planificação dos terrenos. Os MDEs possuem várias aplicabilidades conforme discutido anteriormente, contudo destaca-se que para análises e projetos de engenharia com escalas maiores que 1:5.000, sobretudo nas etapas de execução das obras, é necessário modelos de elevação com maior precisão (ordem de milímetros).

### 5.5.2 Recomendações

Em pesquisas futuras, o adensamento de pluviômetros com alta resolução temporal (registro de volume precipitado por hora ou minuto), associado ao adensamento de cotas máximas de alagamento, podem favorecer significativamente a geração de prognósticos precisos de episódios de alagamento e sua área afetada.

No meio urbano os sinais coletados pelos receptores GNSS são bastante susceptíveis a interferências eletromagnéticas (fios de alta tensão) ou por barreiras físicas (edificações). Portanto o uso integrado da tecnologia GNSS em locais de pouca interferência, com a coleta de pontos de referência, associado a equipamentos de topografia tradicional, como nível ou teodolito, em locais de alta interferência para receptores GNSS podem fornecer dados cruciais com alta precisão. Além disso, esta integração pode economizar tempo durante coleta dos dados.

Outra maneira de aprimorar informações altimétricas de MDEs para estudos hidrológicos é por meio de levantamentos aéreos com drones ou VANTs. Esta tecnologia pode gerar MDEs mais precisos que os MDEs elaborados neste trabalho, sobretudo nas regiões de menores cotas topográficas dentro das depressões, desde que critérios de calibração adequados sejam adotados.

Trabalhos futuros poderão usar os resultados desta pesquisa para aprimorar análises no tocante ao comportamento hidrológico superficial e até mesmo nas galerias de drenagem e no pacote sedimentar em subsuperfície. Tais abordagens são possíveis atualmente por meio da integração entre softwares de geoprocessamento e de modelagens hidrológicas, como ArcMap, QGIS, SWMM, HEC-RAS, EPANET, os quais apresentam interação cada vez maior entre si. Outro procedimento importante a ser realizado é a avaliação da qualidade da água acumulada durante os alagamentos para investigar seu potencial poluidor ao ambiente e capacidade para proliferação de doenças. Estas informações também podem ser integradas em softwares de modelagens hidrológicas.

## 6 CONCLUSÕES

As etapas de Geoprocessamento, análise estatística e levantamentos *in loco*, sequencialmente aplicadas neste estudo, consistiram em procedimentos metodológicos eficazes para identificar e avaliar as situações de alagamentos em meio urbano, em escala de detalhe, conforme o nível de acurácia e precisão das informações nos modelos altimétricos obtidos com levantamento GNSS estático e complementados por informações obtidas em imagens de Sensoriamento Remoto. Esta abordagem metodológica se mostrou de alto desempenho, pois permite realizar análises robustas a partir da integração de dados altimétricos de alta acurácia e precisão, dados de precipitação horária, características do fluxo superficial, informações de uso e ocupação de lotes urbanos, além de registros de episódios de alagamento provenientes de várias fontes.

A partir de dados gratuitos e disponíveis em órgãos públicos, a metodologia aplicada possibilitou a construção de um Modelo Digital de Superfície (MDS) do Bairro do Tirol para identificação de ruas e avenidas favoráveis a concentração do escoamento superficial, utilizando técnicas de geoprocessamento. Por meio apenas de uma análise preliminar sobre a geomorfologia da região, com o MDT calibrado, área favoráveis a alagamentos na região norte e sudeste do Bairro do Tirol foram identificadas, as quais estão associadas a feições de depressões interdunares.

A estratégia metodológica aplicada, baseada em técnicas de Geoprocessamento com uso de dados disponíveis em órgãos públicos municipais e oriundos de levantamentos de campo, possibilitou a construção do MDS do Bairro do Tirol para identificação de ruas e avenidas favoráveis ao acúmulo de água. Assim, 9 depressões foram identificadas e correlacionadas ao contexto geomorfológico de terrenos interdunares planos e baixos e de vales fluviais, os últimos relacionados aos afluentes, hoje em ambiente urbano, do Rio Potengi. Dentre os baixos topográficos identificados destacaram-se as depressões *A* e *B* por apresentarem maior número de episódios de alagamentos registrados no período de 2013 a 2018, além de despontarem com características como elevada impermeabilização do solo, grande concentração de águas pluviais – 12 e 4 exultórios, nas depressões *A* e *B*,

respectivamente – e grandes áreas de contribuição, fatos que ratificam os registros históricos.

O modelo de fluxo superficial das águas pluviais mostrou forte correlação com as infraestruturas instaladas no meio urbano atual, uma vez que as linhas de fluxo possuem padrões de confluência ortogonais entre si, semelhante ao traçado do sistema de arruamentos do Bairro do Tirol também predominantemente ortogonal. Este fato elucida a importância de se considerar no planejamento urbano o arranjo dos elementos urbanos em modelagens de fluxos superficiais e igualmente comprova que os MDE, vinculados ao SGB conforme a metodologia empregada, proporcionam resultados extremamente confiáveis para a gestão urbana.

Tais abordagens possuem alta acurácia e aplicabilidade na elaboração de projetos de sistemas de drenagem pluvial urbana, visto que fornecem parâmetros relevantes para definição de alta eficiência para essas estruturas de engenharia, como na identificação de trechos de vias públicas propensas a maior concentração de água, o percurso do fluxo superficial e a extensão de possíveis alagamentos, em função do alcance e altura da lâmina d'água, sob as condições de precipitações intensas.

A delimitação de microbacias para a área de estudo revelou que somente no Bairro do Tirol 15 % da área da Bacia Riacho do Baldo correspondem a microbacias fechadas capazes de provocar alagamentos. Além disso, os sentidos dos fluxos superficiais entre cada microbacia mostram divergências em relação aos sentidos dos fluxos subterrâneos nas galerias de drenagem, em virtude da transposição realizada nas microbacias II, *A.2* e *B.2*. Este tipo de arranjo no sistema de drenagem pode ter influências nos alagamentos das depressões *A* e *B*.

O modelo de ajustamento, oriundo da regressão linear entre a precipitação horária e a cota de alagamento, revelou que os alagamentos ocorrentes na depressão *A* estão, sobretudo, relacionados ao subdimensionamento do sistema de drenagem. Enquanto a depressão *B*, além do subdimensionamento, também está submetido aos problemas de entupimento e/ou obstruções das bocas de lobo instaladas no setor de abrangência da depressão.



Como a análise do comportamento dos alagamentos requer dados de cotas máximas do espelho d'água e seus respectivos registros pluviométricos horários torna, portanto, esta abordagem metodológica aplicável para outras áreas urbanas que detenham tipos semelhantes de informações. Além disso, se a quantidade desses dados representa uma série histórica, a mesma abordagem poderá ser aplicada para elaboração de prognósticos mais precisos de alagamentos em função de previsões de eventos pluviométricos servindo, assim, para a previsão (variáveis Precipitação x Cota de Alagamento) e, conseqüentemente, de grande auxílio em futuras ações emergenciais e de Defesa Civil. Entretanto, vale lembrar que a análise proposta pressupõe total impermeabilidade para as depressões na área de estudo, situação comum em grandes áreas urbanas.

As áreas de maior perigo a alagamentos, identificadas por meio de análises na escala de detalhe nas depressões *A* e *B*, correspondem a setores do Bairro do Tirol com inúmeros empreendimentos comerciais, hospitais, clínicas médicas e áreas residenciais. As análises finais sobre risco a alagamento mostraram que na depressão *B* há maiores áreas com alto risco sujeitas a este fenômeno, o que permitiu, juntamente com todas as outras informações levantadas neste trabalho, definir a depressão *B* como a região mais crítica quanto aos problemas de alagamento no Bairro do Tirol.

Os resultados deste estudo podem corroborar como suporte à implementação de planos de gestão de risco a alagamentos e também para estudos futuros de avaliação do mercado imobiliário sobre a vulnerabilidade dos lotes urbanos aos alagamentos, uma vez que estes fenômenos afetam diretamente áreas de importância econômica em Natal/RN, além da exposição de vidas humanas ao risco e à perda financeira.

Este estudo também mostrou que procedimentos e técnicas elaboradas no âmbito das Geotecnologias, tais como o Sensoriamento Remoto, o SIG e a Geodésia de alta acurácia e precisão, propiciam resultados eficazes para a gestão urbana e rural, com baixo custo operacional e de investimentos, fornecendo informações específicas e extremamente confiáveis sobre as áreas de interesse. Demonstrou ainda a utilidade na mitigação de problemas de alagamentos em geral, favorecendo na redução de gastos públicos em

assistência a população afetada com os severos episódios de alagamentos e suas consequências.

## REFERÊNCIAS

ABEDIN, S. J. H.; STEPHEN, H. GIS Framework for Spatiotemporal Mapping of Urban Flooding. **Geosciences**, v. 77, n. 9, p. 1–18, 2019.

AGUIAR, L. DE S.; AMARO, V. E.; ARAÚJO, P. V. DO N.; SANTOS, A. L. S. Geotecnologias de baixo custo aplicadas à avaliação de risco por inundação em áreas urbanas costeiras em cenários de mudanças climáticas. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, 2019 (*no prelo*).

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ALVES, D. B. M.; SOUZA, E. M. DE; KANESHIRO, V. Y.; SOUZA, J. S. Análise de séries temporais de multicaminho em estações de monitoramento contínuo. **Boletim de Ciências Geodésicas**, p. 353–373, ago. 2013. Curitiba.

ALVES, P. B. R.; MELO FILHO, H.; TSUYUGUCHI, B. B.; RUFINO, I. A. A.; FEITOSA, P. H. C. Mapping of flood susceptibility in Campina Grande County – PB: A spatial multicriteria approach. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 24, n. 1, p. 28–43, 2018.

AMARO, V. E.; **Análise Conjunta de dados geológicos, geofísicos e de sensoriamento remoto do setor extremo nordeste da Província Borborema, Nordeste do Brasil, com ênfase nas zonas de cisalhamento dúcteis neoproterozóicas**. 397 f. Tese (Doutorado) - Curso de Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

AMARO, V. E.; LIMA, F. G. F. DE; SANTOS, M. S. T. An Evaluation of Digital Elevation Models to Short-Term Monitoring of a High Energy. **International Journal of Environmental, Chemical, Ecological, Geological and Geophysical Engineering**, v. 7, n. 4, p. 132–139, 2013.

AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T.; SOUTO, M. V. S. **Geotecnologias Aplicadas ao Monitoramento Costeiro: Sensoriamento Remoto e Geodésia de Precisão**. Natal: Do Autor, 2012. 120 p.

AMORIM, A. C. B.; SCUDELARI, A. C.; AMARO, V. E.; MATOS, M. F. A. Variabilidade dos extremos de precipitação diária na cidade de Natal, Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, 2019 (*no prelo*).

ANA. **Divisões de Bacias**. Disponível em: <<http://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/webappviewer/index.html?id=9cc5900ceb0d4c279305d43197980dd8>>. Acesso em: 01 mar. 2018.

ARAÚJO, F. F. Empresários urbanos e produção do espaço residencial: condomínios-clubes na Zona Sul de Natal (RN). **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 7, n. 1, p. 106–121, 2015. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2175-](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2175-)

33692015000100106&lng=pt&tlng=pt>.

ARAÚJO, P. V. N.; AMARO, V. E.; ALCOFORADO, A. V. C.; SANTOS, A. L. S. Acurácia Vertical e Calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) para a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, Rio Grande do Norte, Brasil. **Anuario do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 41, n. 1, p. 351–364, 2018.

ARAÚJO, P. V. N.; AMARO, V. E.; SILVA, R. M.; LOPES, A. B. Delimitation of Flood Areas Based on Calibrated DEM and Geoprocessing: Case Study on Uruguay River, Itaqui City, Southern Brazil. **Natural Hazard and Earth System Sciences**, v. 19, p. 237–250, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.5194/nhess-2018-212>>.

BARBOSA, J. A.; LIMA FILHO, M. Aspectos estruturais e estratigráficos da faixa costeira Recife-Natal: observações em dados de poços. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v. 14, n. 2, p. 287–306, 2006.

BARRETO, A. M. F.; SUGUIO, K.; BEZERRA, F. H. R.; et al. Geologia e Geomorfologia do Quaternário Costeiro do Estado do Rio Grande do Norte. **Revista do Instituto de Geociências - USP**, v. 4, n. 2, p. 1–12, 2004.

BARROS, M. T. L.; CONDE, F. Urban Flood Warning System Social Benefits Mario. World Environmental and Water Resources Congress. **Anais...** . p.642–653, 2017. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/9780784409763.fm>>.

BERVEGLIERI, A.; MORAES, M. V. A.; TOMMASELLI, A. M. G. Orientação e ortorretificação de imagens. **Boletim de Ciências Geodésicas** p. 149–168 , fev. 2015.

BESKOW, S.; VARGAS, M. M.; NUNES, G. S.; et al. Geomorphology-based unit hydrograph models for flood risk management: Case study in Brazilian watersheds with contrasting physiographic characteristics. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2, p. 1873–1890, 2018.

BOONYA-AROONNET, S.; MAKSIMOVIC, Č.; PRODANOVIC, D.; DJORDJEVIC, S. Urban Pluvial Flooding : Development of GIS Based Pathway Model for Surface Flooding and Interface with Surcharged Sewer Model. **Novatech**, p. 481–488, 2007.

BRASIL. **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: IPT, 2007. 176 p.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R.A. **Principles of geographical information systems**. Oxford, Oxford University Press, 1998.

CABRAL, S. L.; CAMPOS, J. N. B.; SILVEIRA, C. DA S.; TEIXEIRA, F. A. DE A. Hydrologic and hydraulic modelling integrated with gis : a study of the acarajú river basin-ce. **Journal of Urban Environmental Engineering**, v. 8, p. 167–174, 2014.

CÂMARA, G.; ORTIZ, M. J.: Sistemas de informação geográfica para aplicações ambientais e cadastrais:uma visão geral. **INPE**. 1998. Disponível em

<http://www.dpi.inpe.br/geopro/trabalhos/analise.pdf>.

CAMPOS, S.; FELIPE, A. C.; CAMPOS, M.; RECHE, A. M. Geoprocessamento aplicado na caracterização morfométrica da Microbacia do Ribeirão Descalvado – Botucatu, SP. **Revista Irriga**, p. 52–65, maio 2015. Botucatu.

CEPAL - Comisión Económica para América Latina el Caribe. **Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe: Guía Metodológica**. Naciones Unidas: Santiago de Chile. 2011

CHAVES, C. J.; REIS, F. A. G. V.; GIORDANO, L. DO C.; AMARAL, A. M. C.; CORRÊA, C. V. DOS S. Aplicação da compartimentação fisiográfica e da abordagem multitemática para elaboração de mapa geoambiental: estudo de caso nos municípios de Espírito Santo do Pinhal e Santo Antônio do Jardim (SP). **Revista do Instituto de Geociências - USP**, p. 3–24, jun. 2015. São Paulo.

COOK, A.; MERWADE, V. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1–2, p. 131–142, 2009. Elsevier B.V.

CORREIA, E. F. G.; RIBEIRO, G. P.; BAPTISTA, A. C. Modelagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Bengalas , Nova Friburgo , RJ , utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco à inundação. **Revista Brasileira de Cartografia** p. 1183–1202 , nov. 2015.

COSTA, J. D. **Evolução espaço-temporal da ocupação urbana sobre áreas naturais no município de Natal-RN**. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

CPRM. **Folha Natal Sb-25-V-C-V, Escala 1:100.000.** , 2012. Natal.

DEMIR, V.; KISI, O. Flood hazard mapping by using geographic information system and hydraulic model: Mert River, Samsun, Turkey. **Advances in Meteorology**, v. 2016, p. 1–9, 2016. Disponível em: <<http://downloads.hindawi.com/journals/amete/aip/586543.pdf>>.

DINDAROĞLU, T.; REIS, M.; AKAY, A. E.; TONGUÇ, F. Hydroecological approach for determining the width of riparian buffer zones for providing soil conservation and water quality. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 12, n. 1, p. 275–284, 2015.

DOTTORI, F; BALDASSARRE, G. D.; TODINI, E. Detailed data is welcome , but with a pinch of salt: Accuracy , precision , and uncertainty in flood inundation modeling. **Water Resources Research** v. 49, n. August 2012, p. 6079–6085 , 2013.

EGGIMANN, S.; MUTZNER, L.; WANI, O.; et al. The Potential of Knowing More: A Review of Data-Driven Urban Water Management. **Environmental Science & Technology**, v. 51, p. 2538–2553, 2017.

ESRI. **Arc Hydro Tools – Tutorial: Version 2.0**. New York: ESRI, 2011.184p.

FEATHERSTONE, W. E.; DENTITH, M. C.; KIRBY, J.F. Strategies for the Accurate Determination of Orthometric Heights from GPS. **Survey Review** v. 34, p. 278–295, 1998.

FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. DA S. Principais Sistemas Atmosféricos Atuantes Sobre a Região Nordeste Do Brasil E a Influência Dos Oceanos Pacífico E Atlântico No Clima Da Região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, p. 15–28, 2015. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/25215>>. .

FEWTRELL, T. J.; BATES, P. D.; HORRITT, M.; HUNTER, N. M. Evaluating the effect of scale in flood inundation modelling in urban environments. **Hydrological Processes**, v. 5118, n. November, p. 5107–5118, 2008.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento**: sem complicação. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 160 p.

FRANCI, F.; BITELLI, G.; MANDANICI, E.; HADJIMITSIS, D.; AGAPIOU, A. Satellite remote sensing and GIS-based multi-criteria analysis for flood hazard mapping. **Natural Hazards**, v. 83, n. 1, p. 31–51, 2016. Springer Netherlands.

GESCH, D.; OIMOEN, M.; DANIELSON, J.; MEYER, D. Validation of the Aster Global Digital Elevation Model Version 3 Over the Conterminous United States. **ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLI-B4, p. 143–148, 2016. Disponível em: <<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B4/143/2016/isprs-archives-XLI-B4-143-2016.pdf>>.

GESCH, D.; OIMOEN, M.; ZHANG, Z.; MEYER, D.; DANIELSON, J. Validation of the Aster Global Digital Elevation Model Version 2 Over the Conterminous United States. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XXXIX-B4, p. 281–286, 2012. Disponível em: <<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXIX-B4/281/2012/>>.

GOMES, D. **Delimitação de Bacias Hidrográficas com TauDEM**. Processamento Digital: Geotecnologias e software livres, 2015. 27 p.

GONÇALVES, L. F. S. **Navegação autônoma por GNSS**. 193 f. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, 2011.

GUERRA, M.; ABEBE, Y. Pairwise Elicitation for a Decision Support Framework to Develop a Flood Risk Response Plan. **ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering**, v. 5, n. 1, p. 11004, 2018. Disponível em: <<http://risk.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?doi=10.1115/1.4040661>>.

HSU, M. H; CHEN, S. H; CHANG, T. J. Inundation simulation for urban drainage basin with storm sewer system. **Journal of Hydrology** v. 234, p. 21–37, 2000.

IBGE. **Distribuições das Estações da RBMC.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16258-rede-brasileira-de-monitoramento-continuo-dos-sistemas-gnss-rbmc.html?=&t=downloads>>. Acesso em: mar. 2019.

IBGE. **Modelo de Ondulação Geoidal.** Disponível em : <[https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo\\_geoidal.shtm](https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/modelo_geoidal.shtm)> Acesso em jan. 2018.

IBGE. **Recomendações para levantamentos relativos estáticos - SP.** São Paulo: Ibge, 2008. 35 p.

IBGE. **Rede Altimétrica.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias-novoportal/informacoes-sobre-posicionamento-geodesico/rede-geodesica/16283-rede-altimetrica.html>>. Acesso em: nov. 2017b.

IBGE. **Rede Brasileira de Monitoramento contínuo dos Sistemas GNSS.** Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/rbmc/rbmc.shtm>>. Acesso em: nov. 2017a.

INCRA. **Manual Técnico de posicionamento:** Georreferenciamento de Imóveis Rurais. Brasília: Incra, 2013. 37 p.

INMET. **Dados Históricos:** BDMEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. 2018. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 10 mar. 2018.

JARDIM DE SÁ, E. F.; MACEDO, M. H. F.; FUCK, R. A.; KAWASHITA, K. Terrenos Proterozóicos na Província Borborema e a margem norte do Cráton São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 4, 1992.

KALAYCI, I.; OGUTCU, S. A NOVEL APPROACH FOR DETAIL SURVEYS BY THE MOTORIZED GPSSIT CONCEPT IN RESIDENTIALS AREAS. **Boletim de Ciências Geodésicas** v. 20, p. 70–83 , fev. 2014.

KASPERSEN, P. S.; RAVN, N. H.; ARNBJERG-NIELSEN, K.; MADSEN, H.; DREWS, M. Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 8, p. 4131–4147, 2017.

KOURGIALAS, N. N.; KARATZAS, G. P. A national scale flood hazard mapping methodology: The case of Greece – Protection and adaptation policy approaches. **Science of the Total Environment** v. 601–602, p. 441–452 , 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.197>>.

LEE, S.; NAKAGAWA, H.; KAWAIKE, K.; ZHANG, H. Urban inundation simulation considering road network and building configurations. **Flood Risk Management**, v. 9, p. 224–233, 2016.

LEITÃO, J. P.; VITRY, M. M. DE; SCHEIDEGGER, A.; RIECKERMANN, J. Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini unmanned

aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas. **Hidrology and Earth System Sciences**, v. 20, p. 1637–1653, 2016.

LIMA, A. Chuvas: Prefeitura de Natal decreta calamidade pública. **Folha de S. Paulo**. São Paulo, p. 1-2. 31 jul. 1998.

MABESOONE, J. M.; ALHEIROS, M. M. Origem da bacia sedimentar costeira Pernambuco-Paraíba. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 18, n. 4, p. 476–482, 1988.

MAHMOOD, I. M.; ELAGIB, N. A.; HORN, F.; SAAD, S. A. G. Lessons learned from Khartoum flash flood impacts: An integrated assessment. **Science of the Total Environment**, v. 601–602, p. 1031–1045, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.260>>. .

MARAFUZ, I.; RODRIGUES, C.; GOMES, A. Analysis and assessment of urban flash floods on areas with limited available altimetry data ( Arouca , NW Portugal ): a methodological approach. p. 2937–2949 , 2015.

MENDES, J. M. Risco, vulnerabilidade social e resiliência: conceitos e desafios. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, p. 463–491, 2018.

MENDONÇA, F. J. B.; GONÇALVES, R. M.; AWANGE, J.; SILVA, L. M. DA; GREGÓRIO, M. DAS N. Temporal shoreline series analysis using gnss. **Boletim de Ciências Geodésicas**, p. 701–719, 2014. Curitiba.

MONICO, J. F. G. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. São Paulo: Editora Unesp, p.477, 2008.

MOREIRA, M. M. **Mapeamento Geotécnico do Município de Natal-RN e Áreas Adjacentes**. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 1996.

MOREIRA, M. M.; SOUZA, N. M. DE; CUELLAR, M. D. Z.; ARRAES, K. A. Carta Geotécnica do Município de Natal-RN: Áreas de Risco de Deslizamentos e Inundações. **COMBRAMSEG 2014**, p. 1–8, 2014.

MOURA, L. Z.; BIAS, E. D. S.; BRITES, R. Avaliação da acurácia vertical de modelos digitais de elevação ( MDEs ) nas bacias do Paranoá e São Bartolomeu. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 66, n. 1, p. 1–14, 2014.

MUIS, S.; GÜNERALP, B.; JONGMAN, B.; AERTS, J. C. J. H.; WARD, P. J. Flood risk and adaptation strategies under climate change and urban expansion: A probabilistic analysis using global data. **Science of the Total Environment**, v. 538, p. 445–457, 2015. Elsevier B.V.

MUKUL, M.; SRIVASTAVA, V.; JADE, S.; MUKUL, M. Uncertainties in the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula. **Scientific Reports**, v. 7, p. 1–10, 2017. Nature Publishing Group. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/srep41672>>.

MUKUL, M.; SRIVASTAVA, V.; MUKUL, M. Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network. **Journal of Earth System**



**Science**, v. 124, n. 6, p. 1343–1357, 2015.

MUKUL, M.; SRIVASTAVA, V.; MUKUL, M. Accuracy analysis of the 2014–2015 global shuttle radar topography mission (SRTM) 1 arc-sec C-Band height model using international global navigation satellite system service (IGS) network. **Journal of Earth System Science**, v. 125, n. 5, p. 909–917, 2016.

NATAL. **Anuário 2015**. Natal: Semurb, 2015.

NATAL. **Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Natal**. Natal, 2009.

NATAL. **Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Natal: situação dos serviços de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas**. Natal: Prefeitura do Natal, 2014. 142 p

NETO, D. S.; SEABRA, V. S.; CORREIA, M. R.; SANTOS, A. A. B. Identificação de áreas susceptíveis a eventos de alagamento no município de Niterói - RJ. **Revista Geonorte**, v. 10, n. 4, p. 473–477, 2014.

NIWA. **Impacts of Climate Change on urban infrastructure and the built environment: Toolbox Handbook**. Nova Zelândia, 2012.

NRCS. **Design Hydrographs**. 1972. Disponível em: <<https://www.wcc.nrcs.usda.gov/ftpref/wntsc/H&H/NEHhydrology/ch21.pdf>>.

OLIVEIRA, R. G. **Arcabouço Geofísico, Isostasia e Causas do Magmatismo Cenozóico da Província Borborema e de sua Margem Continental (Nordeste do Brasil)**. 415 f. Tese (doutorado) - Geoinâmica e Geofísica, Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.

OLIVEIRA, P. E.; RAMOS, C. Inundações na cidade de Lisboa durante o século XX e seus factores agravantes. **Finisterra**, v. 37, n. 74, p. 33–54, 2002.

OLLIKAINEN, M. Accuracy of GPS levelling. In: THE XIII GENERAL MEETING OF THE NORDIC GEODETIC COMMISSION. Sweden. *Anais 1*: p.25-29, 1998.

OMRAN, A.; DIETRICH, S.; ABOUELMAGD, A.; MICHAEL, M. New ArcGIS tools developed for stream network extraction and basin delineations using Python and java script. **Computers and Geosciences**, v. 94, p. 140–149, 2016. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2016.06.012>>.

OZDEMIR, H.; SAMPSON, C. C.; ALMEIDA, G. A. M. DE; BATES, P. D. Evaluating scale and roughness effects in urban flood modelling using terrestrial LIDAR data. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 17, p. 4015–4030, 2013.

PATEL, A.; KATIYAR, S. K.; PRASAD, V. Performances evaluation of different open source DEM using Differential Global Positioning System (DGPS). **Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 19, n. 1, p. 7–16, 2016. Authority for Remote Sensing and Space Sciences. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.004>>.

PILLA, F.; GHARBIA, S. S.; LYONS, R. How do households perceive flood-risk? The impact of flooding on the cost of accommodation in Dublin, Ireland. **Science of The Total Environment**, v. 650, p. 144–154, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969718334156>>.

PREGNOLATO, M.; FORD, A.; GLENIS, V.; WILKINSON, S.; DAWSON, R. Impact of Climate Change on Disruption to Urban Transport Networks from Pluvial Flooding. **Journal of Infrastructure System**, v. 23, n. Webb 2005, p. 1–13, 2017.

RECANATESI, F.; PETROSELLI, A.; NICOLINA, M.; LEONE, A. Assessment of stormwater runoff management practices and BMPs under soil sealing : A study case in a peri-urban watershed of the metropolitan area of Rome ( Italy ). **Journal of Environmental Management**, v. 201, p. 6–18, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.06.024>>.

RIBEIRO, M. F.; COSTA, V. C.; MAGALHÃES NETO, N. DE; FREITAS, M. A. V. An analysis of monthly rainfall and its relationship to the occurrence of mass movement and flooding in Pedra Branca Massif in the city of Rio de Janeiro, Brazil. **Geographical Research**, v. 51, n. 4, p. 398–411, 2013.

RISI, R. DE; JALAYER, F.; PAOLA, F. DE; LINDLEY, S. Delineation of flooding risk hotspots based on digital elevation model , calculated and historical flooding extents: the case of Ouagadougou. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, 2017. Springer Berlin Heidelberg.

RN. **Elaboração da base cartográfica dos municípios do Pólo Costa das Dunas Estado do Rio Grande do Norte**: relatório técnico de planejamento da cobertura aerofotogramétrica 1:25.000 e ortofotocartas 1:25.000. Brasília: Topocart, 2006.

RN. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte**. 1998. Natal.

ROSALEN, D. L. Influence of distance, geometry and number of control stations on quality of local geodetic networks for the purpose of georeferencing of rural properties. **Engenharia Agrícola** p. 311–321 , mar. 2014.

ROSENZWEIG, B. R.; MCPHILLIPS, L.; CHANG, H.; et al. Pluvial flood risk and opportunities for resilience. **Wires Water** , n. June, p. 1–18, 2018.

SANTOS, A. L. S.; AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T. Avaliação de metodologia de aquisição de dados para representação de feições morfológicas de praias arenosas através de modelo digital de elevação. **Mercator** p. 137–155 , ago. 2015.

SANTOS, A. L. S. DOS; AMARO, V. E.; SANTOS, M. S. T. Geodésia de Precisão Aplicada à Análise da Evolução Morfodinâmica de Curto Prazo na Ilha Barreira do Corta Cachorro, Litoral do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 3, p. 18, 2014. Disponível em: <[http://lsie.unb.br/rbg/index.php?journal=rbg&page=article&op=view&path\[\]=514](http://lsie.unb.br/rbg/index.php?journal=rbg&page=article&op=view&path[]=514)> . .

SANTO, A. R. S. E.; SILVA, C. M. S. Características Climáticas da Cidade de Natal. **Parque da Cidade em Revista**, v. 2, n. 1, p. 23–27, 2016.

SANTOS JÚNIOR., O. F.; SEVERO, R. N. F.; FREITAS NETO, O. Movimentos de massas em encostas na cidade de Natal/RN. In: NUNES, Anna Laura Lopes da Silva et al. **WILLY LACERDA: Doutor no saber e na arte de viver**. Rio de Janeiro: Coope, 2016. p. 468-478.

SANTOS JÚNIOR, V. J.; SANTOS, C. O. Aplicação de indicadores de fragilidade do sistema de natureza ambiental na bacia hidrográfica do rio Cintra-MG. **Revista Monografias Ambientais**, v. 13, n. 5, p. 3872–3880, 2014.

SANTOS, K. A.; RUFINO, I. A. A.; BARROS FILHO, M. N. M. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande - PB. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 22, n. 5, p. 943–952, 2017. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1413-41522017005004103&lng=pt&tlng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522017005004103&lng=pt&tlng=pt)>.

SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E.; FERREIRA, A. T. DA S.; SANTOS, A. L. S. Mapeamento de precisão da dinâmica costeira de curta duração em áreas de alta taxa de erosão no Nordeste do Brasil. **HIDROSEMA-UFRN**, v. 25, p. 7–19, 2012.

SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E.; FERREIRA, A. T. S.; SANTOS, A. L. S. Altimetria GNSS de precisão aplicada ao monitoramento da dinâmica sedimentar costeira de curta duração em escala regional. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 19, n. 4, p. 624–638, 2013.

SANTOS, M. S. T.; AMARO, V. E. REDE GEODÉSICA PARA O MONITORAMENTO COSTEIRO DO LITORAL SETENTRIONAL DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE. **Boletim de Ciências Geodésicas** p. 571–585, nov. 2011.

SANTOS, M. S. T.; SÁ, N. C. O uso do gps em levantamentos geofísicos terrestres. **Revista Brasileira de Geofísica** v. 24, p. 63–80, fev. 2006.

SEBER, G. A. F. **Linear Regression Analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1977. 465 p.

SIGUEL, A. R.; FAGGION, P. L.; VEIGA, L. A. K.; et al. APLICAÇÃO DO MÉTODO DE IRRADIAÇÃO TRIDIMENSIONAL NO MONITORAMENTO DE BARRAGENS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, p. 391–406, 2013. Curitiba.

SILVA, E. A. J. **As dunas eólicas de Natal/RN: Datação e Evolução**. 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geodinâmica, Geologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

SILVA, C. V. F.; SCHARDONG, A.; GARCIA, J. I. B.; OLIVEIRA, C. DE P. M. Climate change impacts and flood control measures for highly developed urban watersheds. **Water (Switzerland)**, v. 10, n. 7, p. 1–18, 2018.

SILVA JR., M. A. B.; SILVA, S. R.; ALCOFORADO, R. DE M. G. Avaliação do sistema de microdrenagem visando à sustentabilidade de área urbana com problemas de alagamentos e influência das marés. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 4, n. 24, p. 1–17, 2016.

SMITH, A.; MARTIN, D.; COCKINGS, S. Spatio-Temporal Population Modelling for Enhanced Assessment of Urban Exposure to Flood Risk. **Applied Spatial Analysis and Policy**, v. 9, p. 145–163, 2016. Applied Spatial Analysis and Policy. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12061-014-9110-6>>.

SOARES, C. Chuvas deste sábado alagam ruas de um dos bairros mais chiques de Natal. **Fotojornalismo**: 2017. Disponível em: <<http://canindesoares.com/chuvas-alagam-ruas-de-um-dos-bairros-mais-chiques-de-natal>>. Acesso em dez. 2018.

SOUZA, E. M. **Análise de Wavelets para detecção e correção do multicaminho no posicionamento relativo GNSS**. 166 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográfica, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

TARGA, M. DOS S.; BATISTA, G. T.; DINIZ, H. N.; DIAS, N. W.; MATOS, F. C. Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, n. 2, p. 120–142, 2012.

TEIXEIRA, A. L. A.; MORETTI, E.; CHRISTOFOLETTI, A. **Introdução aos Sistemas de Informações Geográfica**. Rio Claro: Edição do Autor, 1992. 80 p.

TIKKANEN, H. **Hydrological modeling of a large urban catchment using a stormwater management model (SWMM)**. 80f. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia) - Programa em Transporte e Engenharia Ambiental, School of Engineering, Aalto University, Espoo, Finlândia, 2013.

UNISDR - United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres**. Naciones Unidas: Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres de las Naciones Unidas, Ginebra, Suíza. 2009.

UNISDR - United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **Proposed updated terminology on disaster risk reduction: a technical review**. UNISDR. 2015.

UNISDR - United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **Terminology related to Disaster Risk Reduction: updated technical non-paper**. UNISDR. 2016.

UVO, C. B.; REPELLI, C. A.; ZEBIAK, S. E.; KUSHNIR, Y. The relationships between tropical Pacific and Atlantic SST and northeast Brazil monthly precipitation. **Journal of Climate**, v. 11, n. 4, p. 551–562, 1995.

UVO, C.; BERNDTSSON, R. Regionalization and spatial properties of Ceará State rainfall in northeast Brazil. **Journal of Geophysical Research**, v. 101, n. 2, p. 4221–4233, 1996.

WISNER, B., GAILLARD, J.C., KELMAN, I. Framing disaster: theories and stories seeking to understand hazards, vulnerability and risk. In: **The handbook of hazards and disaster risk reduction**. London: Routledge, p. 18-33, 2012.

XAVIER DA SILVA, J. O que é Geoprocessamento? **Revista do CREA-RJ**, p. 42–44, 2009.

ZANIN, V. L.; MELLO, I. S.; PITHAN, P. A. Identificação de áreas com risco de inundação por meio de análise ambiental e geoprocessamento. Congresso de Cadastro Técnico Multifinalitário e Gestão Territorial. **Anais...** . p.1–11, 2016.

ZHANG, S.; PAN, B. An urban storm-inundation simulation method based on GIS. **Journal of Hydrology** v. 517, p. 260–268 , 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.044>>.

## APÊNDICE I – DADOS GEODÉSICOS UTILIZADOS PARA CALIBRAÇÃO DE MDT

Coordenadas planimétricas e altitudes geométricas e ortométricas, fornecidas pelo Laboratório de Geoprocessamento e IBGE.

<b>RN - IBGE</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Altitude geométrica</b>	<b>Altitude Ortométrica</b>
RN2592M	9.357.130,566	255.876,759	36,689	39,573
RN2592N	9.357.995,240	255.386,538	25,522	28,484

Coordenadas planimétricas e altitudes geométricas, obtidas com receptor GNSS; desvio padrão, referente ao pós-processamento das altitudes geométricas; e alturas ortométricas vinculadas ao SGB.

<b>Pontos de controle</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Altitude geométrica</b>	<b>Altitude Ortométrica</b>	<b>Desvio Padrão</b>
1	9.357.290,515	256.853,039	29,998	32,906	0,009
2	9.357.305,451	256.277,059	44,546	47,454	0,024
3	9.357.729,706	255.725,858	20,748	23,656	0,008
4	9.357.983,588	255.960,450	41,522	44,430	0,010
5	9.358.957,812	255.852,251	9,912	12,830	0,016
6	9.360.182,441	255.697,348	23,8	26,718	0,025
7	9.359.756,421	255.895,683	26,714	29,632	0,021
8	9.358.964,306	256.188,486	20,417	23,335	0,011
9	9.358.784,926	256.166,111	12,931	15,849	0,015
10	9.359.724,322	256.511,121	23,998	26,916	0,016
11	9.359.089,096	256.551,979	26,474	29,392	0,013
12	9.358.300,542	256.284,566	38,161	41,079	0,014
13	9.359.117,281	257.144,931	29,434	32,352	0,014

## APÊNDICE II – DADOS UTILIZADOS NAS ANÁLISES PLUVIOMÉTRICAS E DE ALAGAMENTO NAS DEPRESSÕES A E B

Dados de precipitação acumulada durante a última hora antes do registro fotográfico, data do fenômeno de alagamento e horário do registro fotográfico na depressão A.

Local	Data do alagamento	Precipitação (mm/h)	Pluviômetro	Horário do registro fotográfico
Depressão A	29/05/2014	7,46	CEMADEN	07:00
Depressão A	22/04/2017	10,80	CEMADEN	07:20
Depressão A	14/02/2018	1,52	FLOCA	14:45
Depressão A	16/02/2018	0,25	FLOCA	16:50
Depressão A	17/02/2018	7,62	FLOCA	13:00
Depressão A	03/03/2018	20,57	FLOCA	05:30
Depressão A	17/04/2018	23,37	FLOCA	13:00
Depressão A	07/05/2018	26,92	FLOCA	14:00

Dados de precipitação acumulada durante a última hora antes do registro fotográfico, data do fenômeno de alagamento e horário do registro fotográfico na depressão B.

Local	Data do alagamento	Precipitação (mm/h)	Pluviômetro	Horário do registro fotográfico
Depressão B	03/03/2017	0	FLOCA	07:00
Depressão B	11/04/2017	5,52	CEMADEN	07:30
Depressão B	14/02/2018	1,524	FLOCA	14:45
Depressão B	16/02/2018	0,254	FLOCA	16:50
Depressão B	17/02/2018	7,62	FLOCA	13:00
Depressão B	03/03/2018	20,57	FLOCA	05:30
Depressão B	12/04/2018	0	FLOCA	07:00
Depressão B	17/04/2018	3,302	FLOCA	07:00
Depressão B	07/05/2018	26,924	FLOCA	14:00

Coordenadas planimétricas e altitudes geométricas das cotas máximas atingidas por alagamentos, obtidas com receptor GNSS; desvio padrão, referente ao pós-processamento das altitudes geométricas; e alturas ortométricas vinculadas ao SGB. As precipitações associadas às cotas de alagamento e o horário dos registros fotográficos, através do qual foram identificadas cotas máximas de alagamento, também estão elencadas na tabela abaixo. Dados referentes a dados coletados ao longo das ruas Açú e Mossoró na depressão A.

Depressão	Rua	Data do alagamento	X	Y	Altitude geométrica	Altitude ortométrica	Desvio Padrão	Precipitação (mm/h)	Horário do registro fotográfico
A	Açú	29/05/14	256605,634	9359517,023	22,908	25,826	0,005	7,46	07:00
A	Açú	22/04/17	256596,330	9359535,727	22,977	25,895	0,072	10,8	07:20
A	Açú	03/03/18	256714,130	9359514,390	23,273	26,191	0,045	20,57	05:30
A	Açú	13/04/18	256680,257	9359541,982	22,722	25,640	0,066	1,524	12:00
A	Açú	29/04/18	256610,089	9359567,577	22,923	25,841	0,02	2,54	22:00
A	Mossoró	22/04/17	256663,139	9359702,143	23,184	26,102	0,01	10,8	07:20
A	Mossoró	17/04/18	256656,972	9359650,353	23,112	26,030	0,008	23,368	13:00
A	Mossoró	29/04/18	256559,083	9359714,602	22,546	25,464	0,101	2,54	22:00
A	Mossoró	07/05/18	256565,507	9359707,730	23,499	26,417	0,048	26,924	14:00

Coordenadas planimétricas e altitudes geométricas das cotas máximas atingidas por alagamentos, obtidas com receptor GNSS; desvio padrão, referente ao pós-processamento das altitudes geométricas; e alturas ortométricas vinculadas ao SGB. As precipitações associadas às cotas de alagamento e o horário dos registros fotográficos, através do qual foram identificadas cotas máximas de alagamento, também estão elencadas na tabela abaixo. Dados referentes a dados coletados ao longo da Rua Mipibu na depressão B.

Depressão	Rua	Data do alagamento	X	Y	Altitude geométrica	Altitude Ortométrica	Desvio Padrão	Precipitação (mm/h)	Horário do registro fotográfico
B	Mipibu	14/02/18	256884,120	9359740,431	25,298	28,216	0,009	1,524	14:45
B	Mipibu	17/02/18	256892,291	9359741,059	25,294	28,212	0,007	7,62	13:00
B	Mipibu	03/03/18	256885,419	9359739,676	25,19	28,108	0,008	20,57	05:30
B	Mipibu	12/04/18	256905,971	9359735,038	24,444	27,362	0,009	0	07:00
B	Mipibu	07/05/18	256999,869	9359694,971	26,993	29,911	1,587	26,924	14:00



**APÊNDICE III – ARTIGO SUBMETIDO NO ANUÁRIO DO INSTITUTO DE  
GEOCIÊNCIAS – UFRJ**

**Identificação e Avaliação de Zonas de Alagamentos Urbanos, com o Suporte de  
Geotecnologias, na Cidade de Natal, Nordeste do Brasil**

*Identification and evaluation of urban flooding zones with the support of Geotechnologies, in  
Natal City, Northeast Brazil*

Caio Cortez de Lima<sup>1</sup>; Venerando Eustáquio Amaro<sup>1,3</sup>; Paulo Victor do Nascimento Araújo<sup>2,3</sup>  
& André Luís Silva dos Santos<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, Complexo Tecnológico de Engenharia, Laboratório de Geotecnologias  
Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica. Campus Universitário Lagoa Nova, 59078-970,  
Natal-RN, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
*Campus Macau*. Rua das Margaridas, 300, Conjunto COHAB, 59500-000, Macau-RN,  
Brasil

<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-graduação em Geodinâmica  
e Geofísica, Laboratório de Geoprocessamento. Caixa Postal 1524, Campus Universitário  
Lagoa Nova, 59078-970, Natal-RN, Brasil

<sup>4</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão  
Campus São Luís Monte Castelo. Av. Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, 65030-005,  
São Luís-MA, Brasil

E-mails: [caioc.lima@hotmail.com.br](mailto:caioc.lima@hotmail.com.br); [venerandoamaro@gmail.com](mailto:venerandoamaro@gmail.com);  
[paulo.araujo@ifrn.edu.br](mailto:paulo.araujo@ifrn.edu.br); [andresantos@ifma.edu.br](mailto:andresantos@ifma.edu.br)

## Resumo

Alagamentos urbanos provocados por chuvas intensas têm causado significativa perda de vidas e danos econômicos em diversas áreas urbanas do mundo. Esse tipo de alagamento vem se tornando frequente em muitas cidades brasileiras. Na cidade de Natal, capital do Estado do Rio Grande do Norte (RN), região Nordeste do Brasil, o processo de urbanização ocorrido nas últimas quatro décadas promoveu significativa impermeabilização do solo, que tem se refletido em inúmeros alagamentos urbanos por ano. Este estudo objetiva identificar e avaliar áreas susceptíveis a alagamentos em Natal, especificamente no Bairro do Tirol, considerando a integração de variáveis como Modelo Digital de Terreno (MDT) e Modelo Digital de Superfície (MDS) de alta precisão, sistema de drenagem pluvial, registros históricos de alagamentos e precipitações horárias, além de considerar o tipo de ocupação dos lotes urbanos no bairro. As abordagens metodológicas foram conduzidas e integradas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), com o apoio de base de dados de alta acurácia e precisão obtidos *in loco* com *Global Navigation Satellite System* (GNSS) para as análises de alagamento urbano. Os resultados mostraram que na área de estudo duas depressões topográficas em locais de intensa atividade comercial e social se destacam por apresentarem características geomorfológicas e antrópicas altamente favoráveis aos alagamentos em eventos de precipitação intensa. Além disso, os resultados permitiram a geração de modelos de fluxo superficial com parâmetros de alta aplicabilidade para o aprimoramento de projetos de sistemas de drenagem urbana e da gestão urbana. Este estudo demonstrou ainda que as abordagens metodológicas baseadas no uso de Geotecnologias podem subsidiar planos de gestão de riscos e reduzir gastos públicos com obras e ações emergenciais mais eficazes.

**Palavras-chaves:** Georisco; MDE; MDS; SIG; GNSS

## Abstract

Urban floods motivated by heavy rains have caused significant loss of life and economic damage in several urban areas of the world. This flooding type have become frequent in many Brazilian cities. In Natal City, Rio Grande do Norte (RN) State Capital, Northeast Brazil, the urbanization process over the last four decades promoted significant soil sealing, which has reflected in numerous urban floods per year. This study aims to identify and evaluate areas susceptible to flooding in Natal, specifically in the region of Tirol, considering Digital Terrain Model (DTM), Digital Surface Model (DSM) of high precision,

pluvial drainage system, historical records of flooding and hourly precipitations, in addition to reflecting the type of occupation of urban lots in the neighborhood. Methodological approaches were conducted and integrated into the Geographic Information System (GIS) environment, with the support of *in loco* high accuracy database of *Global Navigation Satellite System* (GNSS) for urban flooding analyses. The results showed that in the study area two topographic depressions in sectors of intense commercial and social activities stand out because they present geomorphological and anthropic characteristics highly favorable to flooding in events of Intense precipitation. Furthermore, the results allowed the generation of a superficial flow models with parameters of high applicability for the improvement of projects of urban drainage systems and urban management. This study also demonstrated that methodological approaches based on the use of Geotechnologies can subsidize risk management plans and reduce public expenditures with more effective works and emergency actions.

**Keywords:** Geohazard; DEM; DSM; GIS; GNSS

## 1 Introdução

A urbanização crescente e desordenada, aliada ao crescimento populacional desregrado, tem acarretado a expressiva impermeabilização dos solos urbanos em cidades brasileiras (Targa *et al.*, 2012; Santos Júnior & Santos, 2014; Santos *et al.*, 2017). Outro fator relevante é que a impermeabilização dos solos urbanos, por reduzir a infiltração natural e, conseqüentemente, aumentar o escoamento superficial quando sob as condições de precipitações elevadas, decorrente de alterações climáticas, são responsáveis por constantes alagamentos e inundações, igualmente em várias cidades do mundo, com expressivas perdas socioeconômicas e de vidas humanas (Correia *et al.*, 2015; Smith *et al.*, 2016; Recanatesi *et al.*, 2017; Pilla *et al.*, 2019). Zonas urbanas são particularmente vulneráveis a estes fenômenos em virtude do elevado número de pessoas e grandes áreas construídas, o que torna recorrente as perdas de vida e danos econômicos durante eventos extremos de precipitação (Santos Jr. *et al.*, 2016; Barros & Conde, 2017; Silva *et al.*, 2018). A frequência e a magnitude destes eventos dependem de vários parâmetros como topografia, escoamento superficial, arranjo urbano e ocupação do solo (Ribeiro *et al.*, 2013), os quais devem ser analisados de maneira integrada para a elaboração de um sistema de drenagem pluvial eficaz ou outras soluções e planos de mitigação adequados aos problemas decorrentes.

Na última década, os estudos sobre modelagens computacionais aplicados às enchentes e alagamentos urbanos com uso de ferramentas de Geoprocessamento têm crescido significativamente (Santos *et al.*, 2017; Kourgialas & Karatzas, 2017; Beskow *et al.*, 2018; Araújo *et al.*, 2019; Aguiar *et al.*, 2019). Um dos parâmetros primordiais em modelagens hidrológicas são Modelos Digitais de Elevação (MDE), que permitem a determinação de características morfométricas das bacias hidrográficas e influenciam diretamente no entendimento sobre o escoamento superficial e, igualmente, em parte do seu ciclo hidrológico (Campos *et al.*, 2015, Omran *et al.*, 2016). Além disso, o uso de Geotecnologias, entre as quais o Sensoriamento Remoto, a Geodésia e o Sistema de Informações Geográficas (SIG), potencializam a compreensão de riscos complexos através da sua capacidade em integrar informações multifontes e associar ferramentas de modelagens e gestão de recursos hídricos (Franci *et al.*, 2016; Alves *et al.*, 2018; Guerra & Abebe, 2019).

O desenvolvimento de mapas de risco ou perigo aplicados aos fenômenos de inundações, enchentes ou alagamentos é uma ferramenta importante para evitar e reduzir a ocorrência destes eventos ao fornecer informações seguras aos gestores responsáveis pelas ações emergenciais e ao público em geral (Demir & Kisi, 2016; Araújo *et al.*, 2019). Informações contidas em mapas sobre a extensão dos alagamentos urbanos são cruciais na

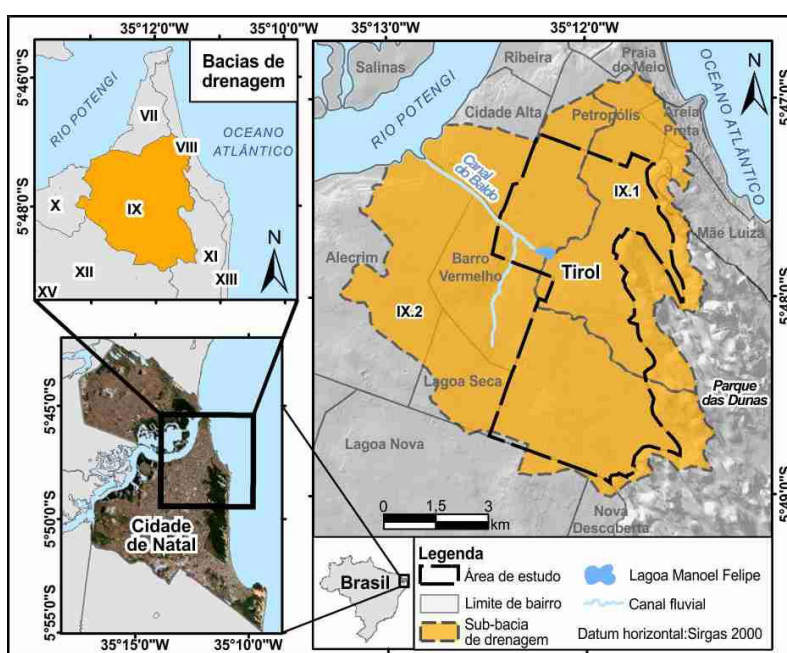
avaliação de risco em áreas populosas e propensas a estes fenômenos, pois auxiliam as decisões nas operações de resgate e ações emergenciais durante os eventos de alagamentos (Cook & Merwade, 2009). Portanto, mapas de risco ou perigo a alagamentos urbanos são fundamentais como ferramenta de planejamento urbano e mitigação das consequências de chuvas intensas, embora a maioria dos municípios brasileiros não possuam este tipo de informação.

Neste contexto, a cidade de Natal, capital do Estado do Rio Grande do Norte (RN), sofre frequentemente com alagamentos durante os fenômenos de chuvas intensas, que provocam obstruções de ruas, perdas de bens materiais, além de paralisar atividades comerciais e a circulação da população nos bairros afetados. Dentre esses bairros, o Tirol se destaca por possuir 96% de infraestrutura de drenagem já instalada (Natal, 2015) e ser uma das áreas com preços mais altos no mercado imobiliário da cidade (Araújo, 2015). Entretanto, há anos o Bairro do Tirol enfrenta problemas com alagamentos frequentes, como indicam os constantes relatos nos noticiários. Portanto, este estudo apresenta procedimentos com uso de Geotecnologias para identificar e avaliar áreas susceptíveis aos alagamentos no Bairro do Tirol, a partir de Modelo Digital do Terreno (MDT), Modelo Digital de Superfície (MDS), arranjo do sistema de drenagens pluviais, registros históricos de alagamentos e de precipitações horárias, todos dados integrados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Além disso, considerou-se o arranjo e o tipo ocupacional de lotes urbanos na área de interesse.

## **2 Área de Estudo**

A cidade de Natal (RN) representa um importante polo econômico, educacional e tecnológico para toda a região Nordeste do Brasil com população estimada em 877.640 habitantes e densidade demográfica de 4.805 habitantes/km<sup>2</sup> (IBGE, 2019). O Bairro do Tirol ocupa área de 3,6 km<sup>2</sup> na Zona Leste de Natal (Figura 1) e possui população de 17.011 habitantes e densidade demográfica de 4.725 habitantes/km<sup>2</sup> (Natal, 2016). O bairro está inserido no domínio da Bacia de Drenagem Riacho do Baldo (IX), conforme o estabelecido pelo Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Cidade do Natal (PDDMA) (Natal, 2009). A Bacia Riacho do Baldo tem área aproximada de 8,8 km<sup>2</sup>, sendo o seu principal exutório o Rio Potengi, e abrange outros bairros importantes de Natal: Petrópolis, Cidade Alta, Alecrim, Lagoa Seca e Barro Vermelho, além de compreender na porção leste uma parte do Parque das Dunas.

Portanto, em decorrência da influência da Bacia Riacho do Baldo, a área de estudo compreendeu, além do Bairro do Tirol, os terrenos imediatamente circunvizinhos. De acordo com o PDDMA, a Bacia Riacho do Baldo foi subdividida na sub-bacia Riacho do Baldo IX.1 no setor nordeste do Bairro do Tirol, e sub-bacia Riacho do Baldo IX.2 que ocupa o setor sul e noroeste do bairro (Natal, 2009), como mostra a Figura 1. A sub-bacia Riacho do Baldo IX.2 abriga os corpos hídricos Canal do Baldo e a Lagoa Manoel Felipe, por onde escoam boa parte do fluxo superficial da bacia de drenagem. Um fato de destaque é que o Riacho do Baldo foi convertido em canal retificado onde se verte tanto a água pluvial, quanto efluentes clandestinos domésticos e comerciais não tratados.



**Figura 1** Localização geográfica da área de estudo no Bairro do Tirol da cidade de Natal/RN, com destaque para as sub-bacias de drenagem Riacho do Baldo IX.1, IX.2 e bairros circunvizinhos, na Zona Leste de Natal. Os principais corpos d'água são o Rio Potengi e o Canal do Baldo, que é interligado à Lagoa Manoel Felipe.

Entre as décadas de 1980 e 2010, a cidade de Natal cresceu expressivamente em locais de baixos topográficos e regiões de entorno de lagoas naturais (Costa, 2015), desenvolvidas em terrenos interdunares, no contexto geomorfológico, que são áreas naturalmente alagáveis. Desta maneira, com a urbanização favorecendo a intensa impermeabilização do solo, em períodos de intensas precipitações, as lagoas naturais transbordam e os entornos dessas depressões são alagadas, fazendo com que as águas ultrapassem os limites impostos pela urbanização e alcancem as edificações. Dentre os vários tipos de ocupação no Bairro do Tirol, destacam-se nos setores afetados pelos alagamentos: hospitais, escolas, empreendimentos

comerciais e áreas residenciais. Apesar da ampla infraestrutura de drenagem instalada, o Bairro do Tirol tem sido, corriqueiramente, apontado nos noticiários por padecer com alagamentos em diversos setores, sobretudo, em cruzamentos de ruas com alto volume de tráfego de veículos (Figura 2).

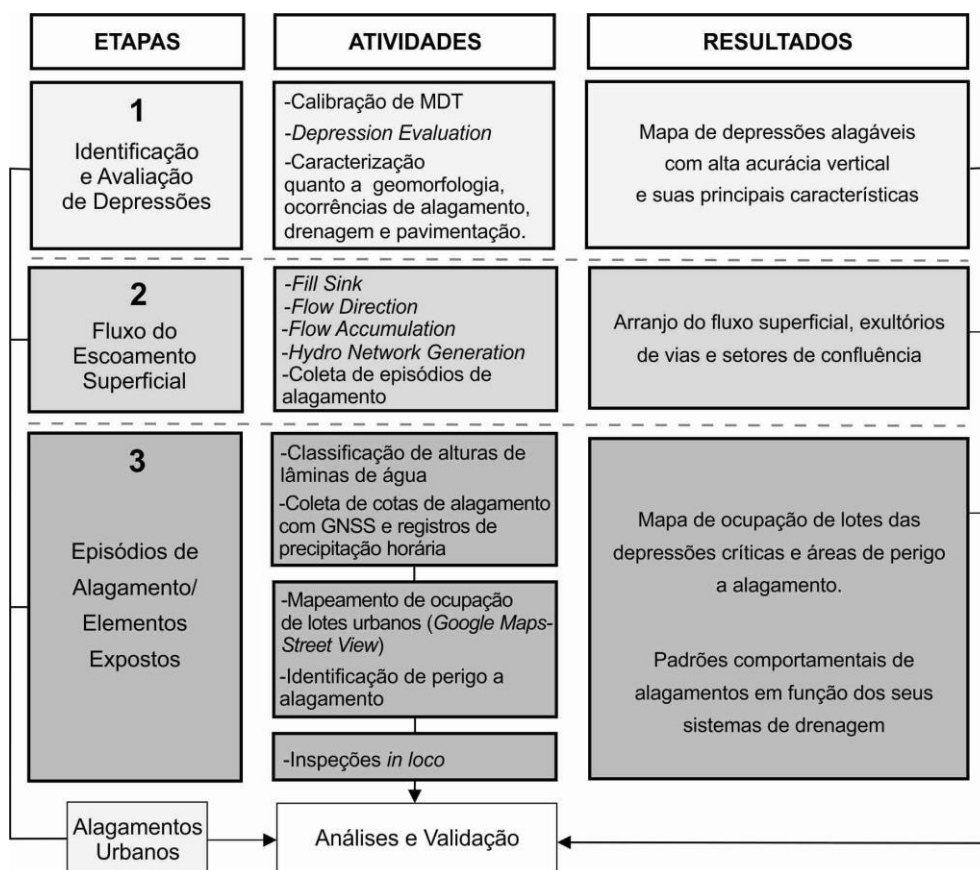
No contexto climatológico, que corresponde à faixa costeira oriental do RN, o clima predominante na região de Natal é o Tropical com Verão Seco, que se caracteriza por concentrar as chuvas entre os meses de maio a julho, com uma estação intensamente seca no período de setembro a dezembro (Alvares *et al.*, 2013). Os registros de precipitações com 253 e 222 mm/dia nos anos de 1998 e 2014 (INMET, 2018) mostram que fenômenos dessa intensidade são recorrentes. Cenários futuros preocupantes são factíveis, posto que chuvas intensas de pelo menos 20 mm/hora são capazes de provocar alagamentos em diversas áreas de Natal. As intensas precipitações tornam-se um elemento crítico quando combinados aos solos urbanos impermeabilizados, devido à urbanização conspícua, e dos baixos topográficos característicos de campos dunares, lagoas interdunares e vales fluviais, como ocorre no Bairro do Tirol (CPRM *et al.*, 2012).



**Figura 2** Consequências de alagamentos nas depressões topográficas identificadas na área de estudo: A. Alagamento em área com hospitais, clínicas médicas e lojas comerciais na Rua Mossoró; B. Problema de subsidência da pavimentação exatamente em local de alagamento no cruzamento da Rua Mossoró com a Av. Afonso Pena; C. Submersão de cômodos de residência no cruzamento da Rua Mossoró com a Av. Afonso Pena; D. Submersão de veículo na Rua Mipibu; E. Grandes trechos de vias obstruídas pelas águas pluviais nas proximidades da Rua Mipibu (Soares, 2017).

### 3 Materiais e Métodos

Os procedimentos metodológicos empregados consideraram a interferência das construções antrópicas no fluxo superficial de água no Bairro do Tirol e adjacências, por meio de abordagens operacionais em Geoprocessamento, para manipulação de dados multifontes com as ferramentas disponíveis em ambiente SIG. A abordagem metodológica estabeleceu um conjunto de análises e interações relacionadas para a identificação e avaliação de depressões topográficas susceptíveis aos alagamentos, definição do fluxo de escoamento superficial de águas pluviais, episódios de alagamentos com registros horários de precipitação frente às infraestruturas urbanas (Figura 3).



**Figura 3** Fluxo metodológico aplicado a identificação e avaliação de zonas de alagamentos no Bairro do Tirol, Natal-RN.

#### 3.1 Modelo Digital de Elevação

Os dados topográficos com curvas de nível equidistantes de 1 m, provenientes de levantamentos aerofotogramétricos e disponibilizados pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo (SEMURB), foram interpolados com a técnica *Triangular Irregular Network* (TIN) para confecção de Modelo Digital de Terreno (MDT), com malha de dados a



cada 0,5 m. Em seguida, o MDT foi submetido a uma calibração vertical, para ajustamento do plano modelado ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), com 15 pontos de controles no terreno com alta acurácia vertical. Os pontos de controle foram coletados com receptor *Global Navigation Satellite System (GNSS)* e, juntamente ao MDT, submetidos ao procedimento de calibração proposta por Araújo *et al.* (2018). A média da Variação da Altura Ortométrica ( $\Delta H$ ) e a Raiz do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Square Error*, RMSE) foram utilizadas como indicadores de acurácia do MDT calibrado.

Considerando-se que as simulações hidrológicas urbanas e as informações do sistema de arruamentos e construções se aproximam da realidade, as informações espaciais sobre as calçadas, canteiros centrais e lotes edificados foram vetorizados. Foram atribuídos valores altimétricos de 0,2 m para calçadas e canteiro centrais, e 20 m para os lotes urbanos, os quais foram somados ao MDT calibrado para obtenção de um Modelo Digital de Superfície (MDS) simplificado, conforme proposta de Lee *et al.* (2016). Assim, os processamentos seguintes foram realizados a partir das informações topográficas desse MDS simplificado, que serviu como base para as simulações sobre os alagamentos e os fluxos de escoamento superficial, integrando esses elementos da infraestrutura urbana.

### **3.2 Registros pluviométricos**

Dados sobre volume de chuva foram obtidos através de duas estações pluviométricas. Uma das estações era localizada na Escola Estadual Desembargador Floriano Cavalcante (FLOCA) no Bairro de Capim Macio, a aproximadamente 3km a sul do Bairro do Tirol. A segunda estação estava sob supervisão do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e se localizava no Bairro de Cidade Alta, área vizinha a oeste do Bairro do Tirol. O conjunto de dados analisados correspondeu ao período de maio de 2014 a maio de 2018, com valores de precipitação horária, o que favoreceu a análise dos alagamentos provocados por chuvas intensas.

### **3.3 Registros de alagamentos**

Um levantamento histórico de registros de alagamentos ocorridos em Natal, especificamente no Bairro do Tirol, foi realizado entre os anos de 2013 a 2018, através de notícias em jornais locais, publicações em redes sociais e inspeções *in loco*. Tais informações serviram de base para a validação dos processamentos realizados em ambiente SIG, uma vez que a maioria dos episódios dispunha de registros fotográficos onde foi possível estabelecer

marcadores (pontos de referência) da cota máxima de alcance do alagamento, definido através do limite de borda da lâmina de água. Com essa estratégia foi possível a espacialização da extensão do espelho d'água e da frequência dos episódios em pontos críticos de alagamento no Bairro do Tirol.

### 3.4 Identificação das depressões no terreno

A identificação das depressões ao longo dos arruamentos é uma etapa essencial para a modelagem do fluxo superficial, sobretudo para setores onde o fluxo concentra-se em áreas urbanas susceptíveis aos alagamentos. Para a identificação dos baixos topográficos foi aplicada sobre o MDS a função *Depression Evaluation* do software ArcMap 10.2, na extensão ArcHydro 2.0 (ESRI, 2011). Com a finalidade de eliminar depressões falsas e/ou insignificantes, apenas os baixos topográficos que apresentaram pelo menos 1 m de profundidade entre a menor cota no interior da depressão e a menor cota em relação a sua borda foram considerados.

Os locais mais propícios para ocorrência de alagamentos foram ratificados com a análise integrada entre os registros prévios de alagamento, o arranjo do sistema de drenagem pluvial, a extensão da depressão ao longo das ruas e avenidas, a correlação com o contexto geomorfológico do Bairro do Tirol e o nível de impermeabilização do solo, com pavimentos e construções. Quanto ao sistema de drenagem pluvial, a sua ausência nos baixos topográficos favorece a ocorrência de alagamentos, mas a sua presença não indica, fundamentalmente, que o sistema instalado comporte todo o volume de água acumulado durante chuvas intensas nem que o mesmo esteja em perfeitas condições de desobstrução e escoamento.

### 3.5 Fluxo superficial

Ainda no MDS, e suas depressões predeterminadas em etapa anterior, foi utilizada a função *Fill Sinks* também na extensão ArcHydro do ArcMap 10.2 para a geração de linhas de fluxos superficiais contínuas, que fornecem modelos de escoamentos superficiais mais precisos (Dindaroglu *et al.*, 2015). O MDS foi submetido às rotinas de geoprocessamentos em ambiente SIG (ArcMap 10.2) para os cálculos da direção e acúmulo do fluxo superficial e geração da rede de drenagem (funções de *Flow Direction*, *Flow Accumulation* e *Hydro Network Generation*, todas no ArcHydro) o que possibilitou a localização de pontos críticos de acúmulo de água nas depressões urbanas (Recanatesi *et al.*, 2017). Tais rotinas avaliaram o MDS na dimensão do pixel, comparando as diferenças altimétricas entre eles e gerando, como resultante, o sentido do fluxo para cada pixel, na disposição da rede de canais preferenciais

para o escoamento superficial. Além disso, permitiu evidenciar os setores onde ocorreu confluência de canais e pontos de descarga final de volume d'água sobre a superfície no arranjo estrutural do sistema arruamento. A acomodação das linhas de fluxos superficiais foi calculada para áreas de influência com dimensão média de 7.500 m<sup>2</sup>, em função da escala espacial de 1:16.000 empregada nas análises para a dimensão total do Bairro do Tirol e adjacências.

### **3.6 Extensão dos alagamentos e exposição de elementos urbanos**

Nos locais definidos como críticos aos alagamentos foi realizada a análise em escala espacial de 1:5.000 com a finalidade de avaliar a extensão da lâmina d'água em função da sua altura, tomando-se como cota de referência o ponto mais profundo no interior da depressão.

A extensão dos alagamentos foi analisada para 5 classes de alturas de lâminas de água: 0,15 m; 0,5 m; 1,5 m; 2,5 m; e, superior a 2,5 (> 2,5 m). Apesar disso, nem todas as depressões avaliadas apresentaram todas as classes, visto que a cota máxima de alagamento e transbordamento para bacias vizinhas não ultrapassa a altura da lâmina de água de 1,5 m em algumas depressões. A extensão dos alagamentos sobre o MDS também foi analisada segundo a presença de bocas de lobo, denominação local dada à estrutura de captação de águas pluviais. Tais estruturas, por vezes, não foram posicionadas nos locais mais baixos da depressão, o que torna imperativo uma altura mínima de lâmina de água para que o volume possa ser escoado pelo sistema de drenagem subterrâneo.

Igualmente, a escala 1:5.000 foi empregada no mapeamento de tipos de ocupação dos lotes nas áreas de abrangências das depressões, seguindo as seguintes classes: área comercial; área médica e de estética; área residencial; escola; igreja; posto de combustível; e, prédio público. A classe área comercial engloba diversos empreendimentos comerciais como restaurantes, lojas de vestimenta, óticas, farmácias, centros comerciais. A classe área médica e estética corresponde aos lotes com a presença de hospitais, clínicas médicas, salões de beleza e estética. O levantamento dessas informações baseou-se em dados de localização cadastrados por empreendedores no aplicativo *Google Maps*, com imagens de satélites do período de janeiro de 2013, assim como nos dados fotográficos do modo *Google Street View* para o período de 2017 a 2018. Também foram realizadas inspeções *in loco* para complementar e validar as informações provenientes desses aplicativos gratuitos.

Por fim, cinco classes de perigo a alagamento foram atribuídas aos lotes, conforme a influência dos alagamentos: perigo muito alto; perigo alto; perigo moderado; perigo baixo; e, perigo muito baixo. Os setores mais baixos nas depressões, com influência direta de lâmina

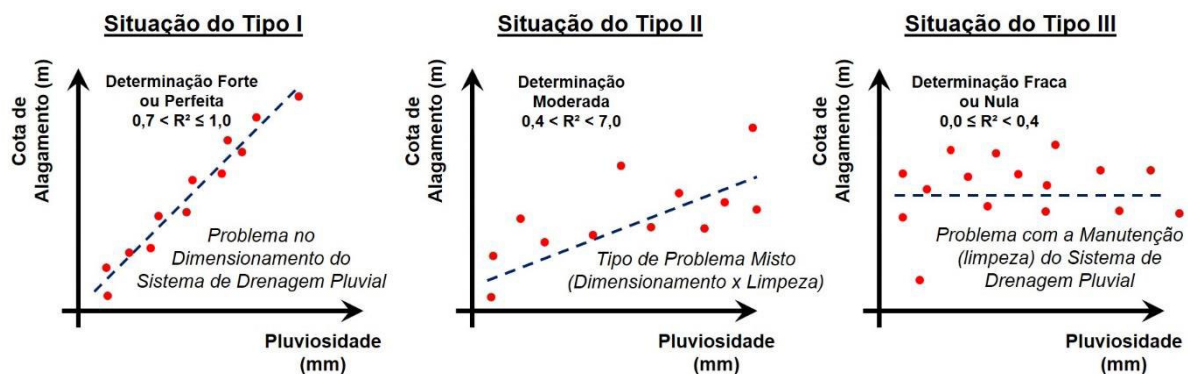
d'água com 0,15 m, foram considerados de mais alto perigo, uma vez que são regiões com alagamentos mais recorrentes. Por conseguinte, os setores mais elevados, afetados apenas por episódios extremos de menor frequência, são os de perigo muito baixo. Nos casos em que o lote estava submetido a mais de uma classe de altura de lâminas de água foi atribuído ao mesmo a classe de maior perigo.

### **3.7 Relação entre precipitação horária e cota de alagamentos**

Dentre os registros fotográficos do apanhado histórico de alagamentos, pontos de referência da cota máxima de alagamento foram identificados em campo. Em seguida, dados altimétricos com alta acurácia geodésica dos limites de bordas das lâminas de água (representando o nível máximo da cota do fenômeno por cada episódio de alagamento) foram coletados nas regiões críticas através de receptor *GNSS*. Esses dados coletados em campo foram pós-processados em laboratório e vinculados ao Sistema Geodésico Brasileiro (SGB). Para avaliar o comportamento das depressões e seus sistemas de drenagem nos setores com alagamentos mais frequentes foi construída uma matriz com valores das cotas das bordas dos alagamentos e das precipitações acumuladas durante a última hora antes do registro fotográfico, nas respectivas datas e horários dos registros fotográficos. Por fim, esse conjunto de dados foi submetido a uma análise de regressão linear, com os valores de precipitação como variável independente e os valores das cotas de alagamento como variável dependente. Os valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e de probabilidade de significância ( $p$ ) foram utilizados como parâmetro para avaliar os modelos de regressão linear.

Partindo do pressuposto que as depressões identificadas possuem aproximadamente 100% de impermeabilidade, a extensão dos alagamentos no Bairro do Tirol e adjacências está intrinsecamente relacionada com a intensidade das chuvas e seu volume de precipitação horária. Entretanto, a presença de outros fatores inerentes do meio urbano, como a quantidade e o posicionamento de bocas de lobo por área de abrangência de depressão e a admissível obstrução do sistema de drenagem pluvial por dejetos sólidos descartados ao longo das vias públicas, pode impedir uma real relação linear entre o volume precipitado e a extensão dos alagamentos, sobretudo quando se analisa vários eventos no decorrer do tempo. Portanto, considerando-se esses aspectos, neste estudo foram definidos 3 tipos de possíveis situações para os alagamentos urbanos, com base na magnitude do Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) da Regressão Linear (entre Pluviosidade x Cota de Alagamento), segundo os parâmetros definidos por Seber (1977), como mostra a Figura 4: (i) Situação do Tipo I, determinação forte ou perfeita:  $0,7 < R^2 < 1,0$ ; (ii) Situação do Tipo II, determinação moderada:  $0,4 < R^2 <$

0,7; e, (iii) Situação do Tipo III, determinação fraca ou nula:  $0 < R^2 < 0,4$ . Os diferentes tipos de situações representam análises hipotéticas do ajustamento de modelos estatísticos lineares generalizados, em relação aos valores observados.



**Figura 4** Principais tipos de situações para alagamentos urbanos identificados no Bairro do Tirol e adjacências.

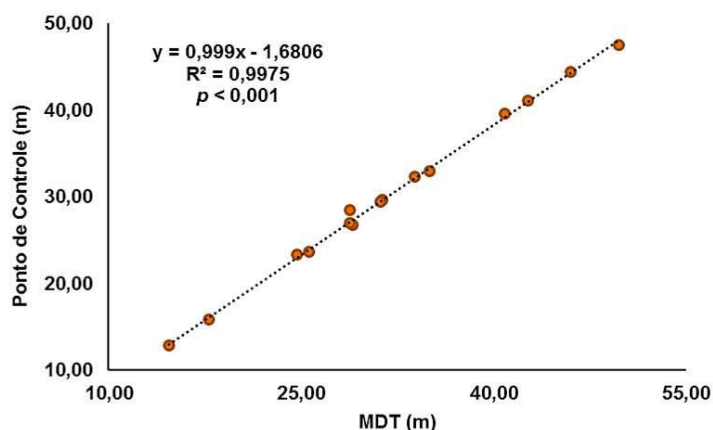
## 4 Resultados e Discussões

Os resultados alcançados neste estudo, sistematizados a seguir, permitiram definir e avaliar uma metodologia baseada em Geotecnologias de obtenção e análise de dados com alta acurácia para identificar áreas susceptíveis a alagamentos e, desse modo, aprimorar a compreensão dos processos responsáveis pelos alagamentos, além de fornecer informações detalhadas sobre os setores mais críticos.

### 4.1 Acurácia do Modelo Digital de Terreno

O método de calibração proposto por Araújo *et al.* (2018) permitiu a elaboração de um MDT calibrado, por meio da análise de Regressão Linear ( $R^2 = 0,997$ ;  $p < 0,001$ ;  $y = 0,9990x - 1,6806$ ), que correlacionou os pontos de controle no terreno de alta acurácia vertical e as respectivas altitudes no MDT original (Figura 5).

Na análise da média de  $\Delta H$ , oriundo da diferença entre as alturas do MDT original e as alturas ortométricas dos pontos de controle no terreno, observou-se o valor de -1,71, indicando que o MDT original estava acima do nível de referência dos pontos de controle, e com RMSE igual a 1,78 m. Após o ajuste, o MDT calibrado apresentou média de  $\Delta H$  igual a zero e RMSE igual a 0,47 m, ou seja, houve uma melhoria de 74% na precisão quando comparado ao MDT original, com aumento de quase quatro vezes na precisão altimétrica. Com isso, ocorreu um ajustamento do plano do MDT ao plano do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB).



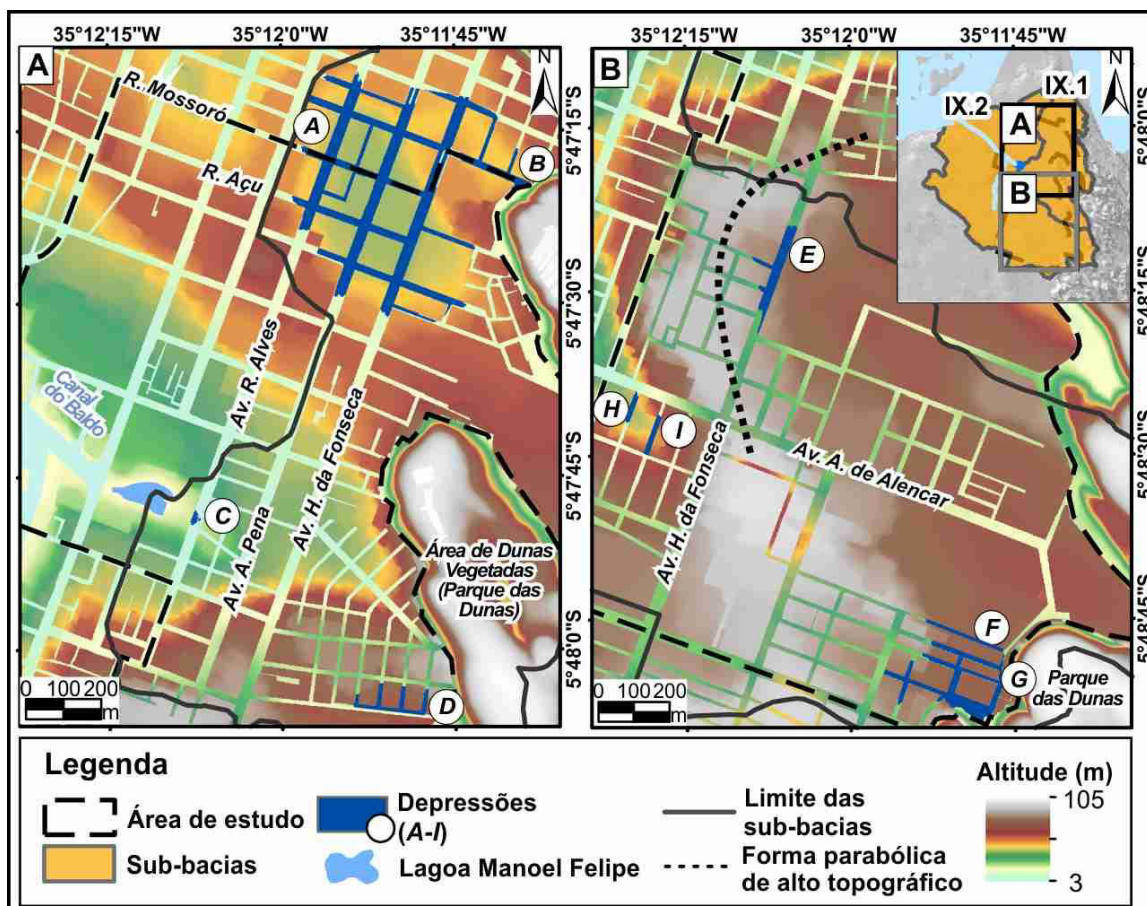
**Figura 5** Resultado da análise de Regressão Linear entre Modelo Digital de Terreno (MDT) e Pontos de Controle no Terreno.

#### 4.2 Depressões no Terreno

Na Sub-bacia de Drenagem IX.1 identificou-se quatro baixos topográficos, denominados de depressões *A*, *B*, *C* e *D* (Figura 6A). A depressão *A* localizada no setor norte do Bairro do Tirol, é a feição geomorfológica de maior expressão e influencia algumas das principais vias de tráfego de veículos, como as avenidas Afonso Pena e Hermes da Fonseca. No contexto geomorfológico, a região *B* está diretamente relacionada à depressão *A* e ambas são definidas como depressões interdunares, entre altos topográficos alinhados na direção NW que definem o prolongamento das dunas vegetadas presentes no Parque das Dunas, como indica o mapeamento geológico realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM, 2012).

A depressão *C* localizada a montante da Lagoa Manoel Felipe está sob a influência do Canal do Baldo e possui pequena área de abrangência, quando comparada às demais depressões, pelo fato da cota mínima para escoamento da água nesta depressão corresponder à altura da calçada que separa a Av. Rodrigues Alves da área da Lagoa Manoel Felipe. Além disso, trata-se de uma região de maior declividade, diferentemente da depressão *A* que possui terrenos mais planos.

No setor sul da Sub-bacia de Drenagem IX.1 está localizada a depressão *D* que, como a maior parte dos baixos topográficos na área de estudo, estão relacionados ao contexto geomorfológico de depressões interdunares em meio aos campos de dunas.



**Figura 6** Localização das depressões topográficas identificadas ao longo do sistema de arruamentos, intrinsecamente relacionadas ao contexto geomorfológico local e à disposição espacial das construções urbanas: A. Depressões A, B, C e D presentes na Sub-bacia de Drenagem Riacho do Baldo IX.1, setor nordeste do Bairro do Tirol; B. Depressões E, F, G, H e I, localizadas na Sub-bacia de Drenagem Riacho do Baldo IX.2, setor sul do Bairro do Tirol.

Na Sub-bacia de Drenagem IX.2 identificou-se cinco baixos topográficos, denominados de depressões E, F, G, H e I (Figura 6B). O baixo topográfico E corresponde ao trecho da Av. Hermes da Fonseca que foi construída obliquamente sobre terrenos de dunas parabólicas (Figura 6B), ocasionando um vale entre dois cordões arenosos. Os baixos topográficos F e G, no extremo sul da Sub-bacia IX.2, também estão inseridos no contexto das depressões interdunares entre altos topográficos de cordões arenosos e as dunas vegetadas do Parque das Dunas (Figura 6B). As depressões H e I possuem influência direta de um canal afluente do Canal do Baldo, pois tratam-se de ruas construídas perpendicularmente ao vale definido por este canal.

Além disso, verificou-se que todas as depressões, exceto os baixos topográficos A e G, são controladas por edificações que barraram o escoamento superficial natural da água

pluvial. As depressões *A* e *G* mostram morfologia que sugere que tenham sido lagoas interdunares naturais, no passado, enquanto as demais concavidades conduziriam a água para exutórios das sub-bacias.

Dentre todas as depressões identificadas que são susceptíveis aos alagamentos, seis regiões puderam ser validadas por registros fotográficos de alagamentos ou através da lista de pontos críticos de drenagem descrita no Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Natal/RN (Natal, 2014). A Tabela 1 apresentou informações específicas sobre cada uma dessas depressões, as quais auxiliam na compreensão do processo de alagamentos frente a eventos de precipitações intensas.

Depressão	Contexto Geomorfológico	Registro prévio de pontos críticos	Tipo de pavimentação (%)		Bocas de Lobo	Área (m <sup>2</sup> )
			Asfáltica	Paralelepípedo		
<i>A</i>	Zona interdunar	Sim	83,8	16,2	20	80.415,5
<i>B</i>	Zona interdunar	Sim	19,5	80,5	9	6474,2
<i>C</i>	Sistema fluvial	Não	100,0	0	10	531,0
<i>D</i>	Zona interdunar	Sim	0	100,0	5	2518,4
<i>E</i>	Zona interdunar	Sim	97,4	2,6	6	8338,2
<i>F</i>	Zona interdunar	Não	0	100,0	0	1110,6
<i>G</i>	Zona interdunar	Sim	0	67,7*	2	17780,3
<i>H</i>	Sistema fluvial	Não	100	0	5	826,0
<i>I</i>	Sistema fluvial	Sim	0	100	8	1175,0

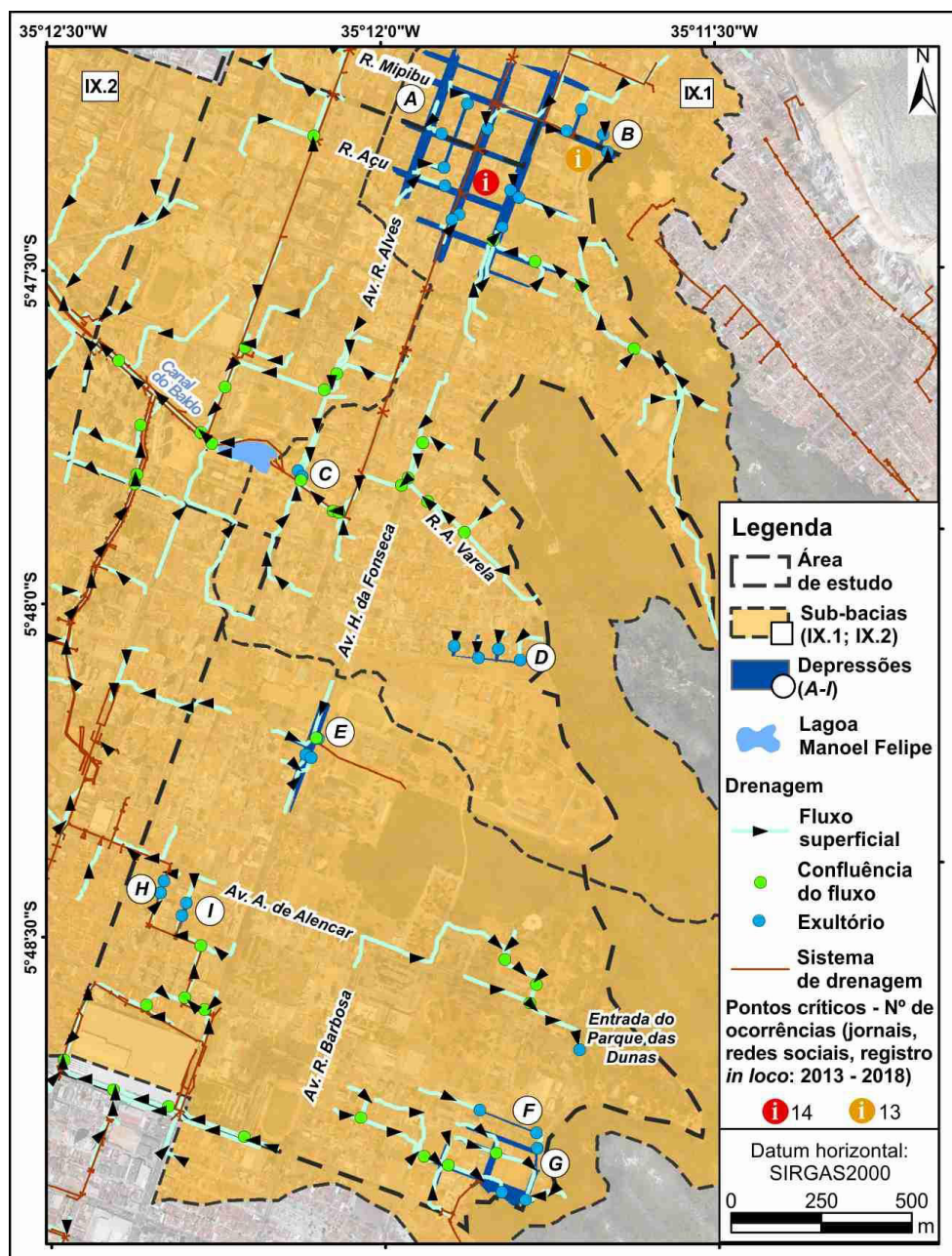
**Tabela 1** Informações para as depressões quanto ao contexto geomorfológico envolvido, presença de registro prévio de alagamentos, tipo de pavimentação, quantidade de bocas de lobo e sua área de abrangência.\*32,3% correspondem à via carroçável com material areno-argiloso.

### 4.3 Fluxo Superficial

O método aplicado para identificação do fluxo superficial revelou aspectos sobre a dinâmica de escoamento da água pluvial no Bairro do Tirol e adjacências, tratando-se de análise crucial ao estudo de alagamentos urbanos diante de eventos de precipitação intensa. Trata-se das condições resultantes da interação entre os diferentes comportamentos assumidos pelos diferentes elementos da organização urbana durante eventos de intensas precipitações e



mesmo tempestades (Oliveira & Ramos, 2002; Boonya-Aroonnet *et al.*, 2007; Kaspersen *et al.*, 2017). A Figura 7 mostra a influência de elementos do arranjo urbano sobre o fluxo superficial no Bairro do Tirol e adjacências, os sentidos de escoamentos, os locais de confluência e exutórios, com identificação dos pontos críticos que apresentaram maior número de episódios de alagamentos registrados entre os anos de 2013 e 2018, todas informações obtidas a partir do MDS simplificado e de observações *in loco*.



**Figura 7** Arranjo do fluxo superficial de águas pluviais, setores de confluência e exutórios, diante da localização das depressões e sistema de drenagem no Bairro do Tirol e adjacências. Destaque para os pontos críticos com maior número de episódios de alagamentos registrados entre os anos de 2013 e 2018.

As depressões *A* e *B* são os locais de maior concentração do fluxo superficial e, em virtude de suas formas circulares com fluxo concêntrico, um maior número de ruas atuam como exutórios, canalizando a água para o interior das depressões. Os alagamentos nesses locais são agravados pelo excesso de escoamento superficial, conjuntamente com o sistema de drenagem pluvial subterrâneo em funcionamento ineficiente, seja devido à ausência de manutenção/limpeza e/ou por ter sido subdimensionado (Marafuz, 2015). Quando um sistema de drenagem pluvial perde a capacidade de escoar o volume de água que deveria fluir por seu

intermédio, a água retorna a superfície, agravando os alagamentos. Além disso, são frequentes as ligações clandestinas de sistemas de esgoto residencial e comercial ao sistema de drenagem. Entretanto, igualmente, o mau funcionamento por ausência de limpeza periódica ou subdimensionamento dos sistemas de esgotos também pode gerar transbordamentos de água servida para a superfície do terreno em dias de precipitações intensas, como ocorre por vezes em setor onde está localizada a Rua Açu (Figura 8).



**Figura 8** Transbordamento de poço de visita do sistema de esgoto durante alagamento na Rua Açu após evento de precipitação intensa.

Outros setores na área de estudo que se destacam por apresentarem relevante convergência do fluxo superficial estão localizados (Figura 7): na região sul, onde o fluxo culmina para as depressões *F* e *G*; na região sudeste, próximo à entrada do Parque das Dunas pelo acesso da Av. Alexandrino de Alencar; e, na região central, a montante da Lagoa Manoel Felipe. Esta última região, no cruzamento entre a Av. Hermes da Fonseca e a Rua Ângelo Varela, apresenta grande convergência do fluxo superficial provenientes destas vias e, apesar de não ser considerada uma depressão no MDS, o fluxo intenso causa transtornos ao trânsito em dias de precipitação intensa.

De acordo com as Tabelas 1 e 2 nota-se que o modelo de fluxo superficial para depressão *A* apresenta 12 exutórios, quantidade três vezes maior que em qualquer outra depressão no Bairro do Tirol, 2 trechos de confluência de fluxo superficial, além de apresentar cerca de 83,4% de área impermeável devido ao tipo de pavimentação. Tais aspectos corroboram para que a depressão *A* se destaque como uma das mais críticas, por açambarcar

grande volume de água superficial, provavelmente com capacidade reduzida ou subdimensionada do sistema de drenagem pluvial para efetivamente atuar no escoamento do volume de água presente, sobretudo em situações de chuvas intensas.

Depressão	Número de confluências de fluxo	Número de exutórios
A	2	12
B	0	4
C	2	3
D	0	4
E	1	4
F	0	2
G	4	3
H	0	2
I	0	2

**Tabela 2** Número de confluências de fluxo superficial e exutórios relativos a cada depressão identificada no Bairro do Tirol e adjacências.

Ademais, verifica-se que o padrão das linhas de fluxo superficial é ortogonal nos pontos de confluência, semelhante ao arranjo estabelecido para o sistema de arruamentos do Bairro do Tirol, com ruas ortogonais entre si, elucidando a forte influência dos elementos do arranjo urbano no escoamento de águas superficiais. As áreas de saída de água do Bairro do Tirol concentram-se para as regiões de campo de dunas vegetadas no setor sul e sudeste, e a noroeste seguem para o Canal do Baldo, e seu afluente, e para regiões baixas como os bairros de Cidade Alta e Ribeira. Os exutórios na área de estudo convergem-se aos baixos topográficos, validando os procedimentos metodológicos empregados para a identificação e avaliação do comportamento dinâmico das depressões diante de eventos de precipitação intensa.

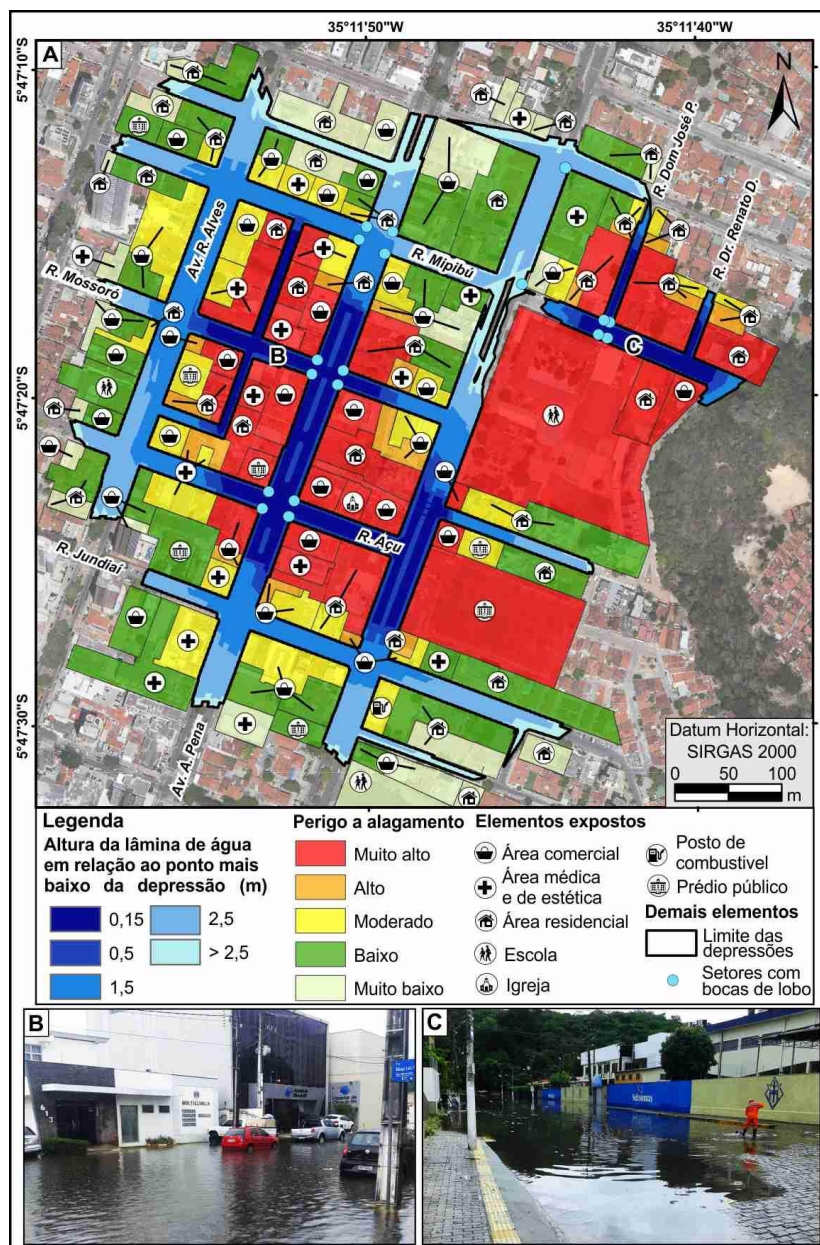
#### 4.4 Pontos críticos e elementos urbanos expostos

As investigações *in loco* permitiram a junção de evidências que foram úteis na compreensão das principais situações ocorrentes do Bairro do Tirol relacionadas à distribuição e abrangência dos rápidos episódios de alagamentos, frequentemente alardeados

em dias de precipitação intensa. Por meio dos dados coletados nos episódios de alagamentos e do tipo de ocupação em cada lote urbano nos setores de influência dos baixos topográficos, foram identificadas as depressões *A* e *B* como aquelas que oferecem o maior perigo entre os alagamentos identificados (Figura 9A). Os locais frequentemente alagados são os cruzamentos da Rua Mossoró com a Av. Afonso Pena (Figura 9B), da Rua Açú com a Av. Afonso Pena, os quais muitas vezes tornam-se um único e extenso alagamento, além da Rua Mipibu no setor entre as ruas Dom José Pereira e Dr. Renato Dantas (Figura 9C).

O Bairro do Tirol, predominantemente de classe média a alta, possui grande quantidade de empreendimentos comerciais, de saúde e estética e edifícios residenciais. Estes setores com alta concentração de empreendimentos têm sido corriqueiramente prejudicados com alagamentos durante os episódios de precipitação intensa. Um desses setores é a Rua Mossoró, no cruzamento com a Av. Afonso Pena, onde há aglomerados de empreendimentos comerciais (lojas de roupas, calçados e óticas), clínicas médicas e hospitais (Figura 9A). De modo semelhante, nas cercanias do cruzamento da Rua Açú com a Av. Afonso Pena, farmácias, pontos comerciais, residências e igrejas são afetados com os alagamentos causados pelas precipitações intensas. A depressão *A* apresenta declives suaves, no entanto possui ampla área de influência com nove vias canalizando o fluxo superficial para esses 2 cruzamentos supracitados, o que favorece intensamente aos rápidos alagamentos nesses setores.

No setor crítico de alagamento da Rua Mipibu são os moradores locais os principais afetados, visto que a área é ocupada, na maior parte, por condomínios residenciais e casas, e nos períodos letivos os estudantes e funcionários de escola que está situada no ponto mais baixo da depressão *B* (Figura 9C). Este baixo topográfico apresenta declividades maiores que a depressão *A*, de modo a permitir alagamentos com profundidades de até 1,5 m, com pequena extensão do espelho d'água. A depressão *A*, por sua vez, ao ser alagada até a profundidade de 1,5 m teria espelho d'água com extensão maior quando comparada à depressão *B* e, conseqüentemente, dispõe de treze bocas de lobo para drenagem da água superficial, enquanto a depressão *B* possui apenas nove (Figura 9A). Todos estes fatores implicam em comportamentos diferentes das ocorrências de alagamento nas depressões *A* e *B*.



**Figura 9** Detalhe sobre a ocupação urbana e mapeamento dos perigos a alagamento nas depressões A e B: A. Mapa de ocupação urbana e perigo a alagamento, em função das alturas das lâminas de água; as diferentes quantidades de bocas de lobo em ambas as depressões afetam diretamente o comportamento dos alagamentos; B. Alagamento na Rua Mossoró prejudicando clínica médica, hospital e áreas comerciais; C. Agente público de limpeza tentando desobstruir boca de lobo diante de alagamento em frente à escola e residências na Rua Mipibu.

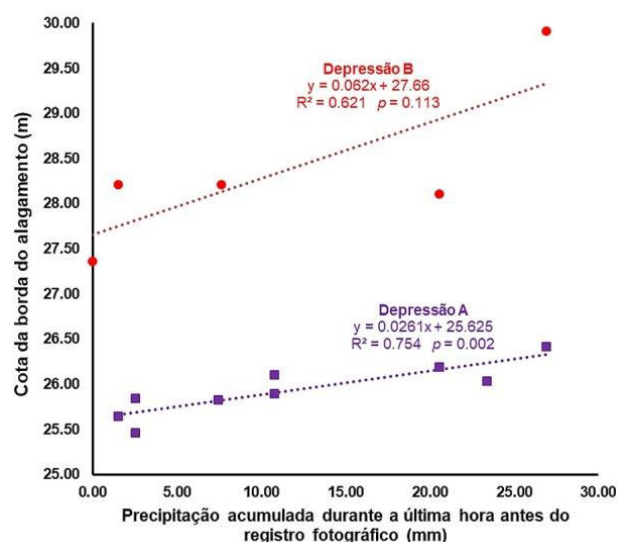
#### 4.5 Relação entre precipitação horária e cota de alagamentos

A partir de dados coletados com metodologia baseada em levantamento estático com receptores *GNSS* para estabelecimento das cotas máximas de alagamentos, e de registros pluviométricos horários em diferentes eventos de precipitação, foram identificados e avaliados os padrões comportamentais de alagamentos nas depressões A e B. A Regressão

Linear realizada com os dados de precipitação (variável independente) e das cotas da borda do espelho d'água do alagamento (variável dependente) mostrou que na depressão A o aumento das cotas máximas de alagamento é linearmente proporcional à intensidade das chuvas ( $R^2 = 0,754$ ;  $p = 0,002$ ;  $N= 9$ ), como indica a Figura 10, representando um modelo extremamente coerente. Logo, observa-se que o problema de alagamento na depressão A está intrinsecamente relacionado ao subdimensionamento do sistema de drenagem pluvial, diante de chuvas intensas e com tempo de duração inferior ou igual à uma hora.

Por sua vez a depressão B mostrou um modelo menos consistente de Regressão Linear, sobretudo, em virtude do valor  $p$  ter ultrapassado o nível de significância estabelecido em 5% ( $R^2 = 0,621$ ;  $p = 0,113$ ;  $N= 5$ ). Para o período temporal em estudo, só foi possível obter 5 fotografias históricas com marcadores de boa identificação *in loco* das cotas de alagamento. Provavelmente, com a adoção de número maior de amostras ( $N$ ), acredita-se que o modelo se tornaria estatisticamente significativo. Entretanto, o modelo apresentou ainda um moderado coeficiente de determinação ( $R^2$ ), fator este que aponta que as causas de alagamento nessa região sejam não somente o subdimensionamento do sistema de drenagem pluvial, mas que estejam também relacionadas às obstruções frequentes por dejetos sólidos em alguns momentos de chuvas intensas. As obstruções no sistema de drenagem pluvial indicam negligência na manutenção periódica realizada pelos órgãos responsáveis, permitindo a permanência excessiva e/ou o acúmulo de lixo nas bocas de lobo. O acúmulo de diferentes quantidades de lixo no sistema de drenagem pluvial, em vários episódios de alagamentos registrados, certamente, causaram variações na eficiência de todo o sistema de drenagem e, conseqüentemente, impediram elevadas correlações lineares entre as variáveis aplicadas.

Ademais, o modelo das diferentes extensões de alagamento (Figura 9A) mostra que a depressão B em todas as diferentes alturas de lâminas de água possui quantidade sempre inferior de bocas de lobo disponíveis em relação à depressão A, embora sejam comparadas colunas de água com alturas similares. Dessa maneira, há maior tendência de obstrução no sistema de drenagem pluvial na depressão B e, conseqüentemente, maior interferência no conjunto do sistema de drenagem desse setor. Portanto, levando em consideração as causas para alagamentos urbanos com base na magnitude dos Coeficientes de Determinação, a depressão A se caracteriza como Situação do Tipo I e a depressão B como Situação do Tipo II (Figura 10), conforme a proposição metodológica. A Situação do Tipo III, relacionado apenas a falta de manutenção periódica do sistema de drenagem e das bocas de lobo, não foi diretamente identificado nesse setor da área de estudo.



**Figura 10** Modelos de Regressão Linear entre a Precipitação Acumulada e Cota de Alagamento, para as depressões A e B. Na depressão A verifica-se uma forte relação linear entre o volume de precipitação e a variação da cota do espelho d'água (Situação do Tipo I), enquanto na regressão aplicada à depressão B mostra relação linear moderada entre os dois parâmetros aplicados (Situação do Tipo II), segundo valores de  $R^2$  e  $p$ .

## 5 Conclusões

As etapas de Geoprocessamento, análise estatística e levantamentos *in loco*, sequencialmente aplicadas neste estudo, consistiram em procedimentos metodológicos eficazes para identificar e avaliar as situações de alagamentos em meio urbano, em escala de detalhe, conforme o nível de acurácia e precisão das informações nos modelos altimétricos obtidos com levantamento GNSS estático. Esta abordagem metodológica se mostrou de alto desempenho, pois requer pouco tempo para execução e permite realizar análises robustas a partir da integração de dados altimétricos de alta acurácia e precisão, dados de precipitação horária, características do fluxo superficial, informações de uso e ocupação de lotes urbanos, além de registros de episódios de alagamento provenientes de várias fontes.

A partir de dados disponíveis em órgãos públicos municipais e levantamentos de campo, a estratégia metodológica aplicada, baseada em técnicas de Geoprocessamento, possibilitou a construção do MDS do Bairro do Tirol para identificação de ruas e avenidas favoráveis ao acúmulo de água, em caso de necessidade de escoamento superficial no sistema de drenagem pluvial. Assim, 9 depressões foram identificadas e correlacionadas ao contexto geomorfológico de terrenos interdunares planos e baixos e de vales fluviais, os últimos relacionados aos afluentes, hoje em ambiente urbano, do Rio Potengi. Dentre os baixos topográficos identificados destacaram-se as depressões A e B por apresentarem maior número



de episódios de alagamentos registrados no período entre 2013 a 2018, além de despontarem com características como a elevada impermeabilização do solo e a grande concentração de águas pluviais - 12 e 4 exutórios, nas depressões *A* e *B*, respectivamente – fatos que ratificaram os registros históricos.

O modelo de fluxo superficial das águas pluviais mostrou forte correlação com as infraestruturas instaladas no meio urbano atual, uma vez que as linhas de fluxo possuem padrões de confluência ortogonais entre si, semelhante ao traçado do sistema de arruamentos do Bairro do Tirol também predominantemente ortogonal. Este fato elucidada a importância de se considerar no planejamento urbano o arranjo dos elementos urbanos em modelagens de fluxos superficiais e igualmente comprova que os MDE, vinculados ao SGB conforme a metodologia empregada, proporcionam resultados extremamente confiáveis para a gestão urbana.

Tais abordagens possuem alta acurácia e aplicabilidade na elaboração de projetos de sistemas de drenagem pluvial urbana, visto que fornecem parâmetros relevantes para definição de alta eficiência para essas estruturas de engenharia, como na identificação de trechos de vias públicas propensas a maior concentração de água, o percurso do fluxo superficial e a extensão de possíveis alagamentos, em função do alcance e altura da lâmina d'água, sob as condições de precipitações intensas.

As áreas de maior perigo a alagamentos, identificadas por meio de análises na escala de detalhe nas depressões *A* e *B*, correspondem a setores do Bairro do Tirol com inúmeros empreendimentos comerciais, hospitais, clínicas médicas e áreas residenciais. Os resultados deste estudo podem corroborar no suporte à implementação de planos de gestão de risco a alagamentos e também para estudos futuros de avaliação do mercado imobiliário sobre a vulnerabilidade dos lotes urbanos aos alagamentos, uma vez que os alagamentos afetam diretamente áreas de importância econômica em Natal/RN, além da exposição de vidas humanas ao risco e à perda financeira.

O modelo de ajustamento, oriundo da Regressão Linear entre a precipitação horária e a cota de alagamento, revelou que os alagamentos ocorrentes na depressão *A* estão, sobretudo, relacionados ao subdimensionamento do sistema de drenagem, enquanto a depressão *B*, além do subdimensionamento, também está submetido aos problemas de entupimento e/ou obstruções das bocas de lobo instaladas no setor de abrangência da depressão.

Como a análise do comportamento dos alagamentos requer dados de cotas máximas do espelho d'água e seus respectivos registros pluviométricos horários torna, portanto, esta abordagem metodológica aplicável para outras áreas urbanas que detenham tipos semelhantes

de informações. Além disso, se a quantidade desses dados representa uma série histórica, a mesma abordagem poderá ser aplicada para elaboração de prognósticos de alagamentos em função de previsões de eventos pluviométricos servindo, assim, para a previsão (variáveis Precipitação x Cota de Alagamento) e, conseqüentemente, de grande auxílio em futuras ações emergenciais e de Defesa Civil. Entretanto, vale lembrar que a análise proposta pressupõe total impermeabilidade para as depressões na área de estudo, situação comum em grandes áreas urbanas.

Este estudo também mostrou que procedimentos e técnicas elaboradas no âmbito das Geotecnologias, tais como o Sensoriamento Remoto, o SIG e a Geodésia de alta acurácia e precisão, propiciam resultados eficazes para a gestão urbana e rural, com baixo custo operacional e de investimentos, fornecendo informações específicas e extremamente confiáveis sobre as áreas de interesse. Demonstrou ainda a utilidade na mitigação de problemas de alagamentos em geral, favorecendo na redução de gastos públicos em assistência a população afetada com os severos episódios de alagamentos e suas conseqüências.

## **6 Agradecimentos**

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) por concessão de bolsa de pesquisa ao primeiro autor, proveniente da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). Além desses, reconhecem o Laboratório de Geoprocessamento (GEOPRO), ao Laboratório de Geotecnologias Aplicadas, Modelagens Costeira e Oceânica (GNOMO) e as Secretarias Municipais de Meio Ambiente (SEMURB) e de Obras Públicas e Infraestrutura (SEMOPI) do Município de Natal como apoiadores da pesquisa e por fornecerem equipamentos e dados.

## **7 Referências**

- Aguiar, L.S.; Amaro, V.E.; Araújo, P.V.N. & Santos, A.L.S. 2019. Geotecnologias de baixo custo aplicadas à avaliação de risco por inundação em áreas urbanas costeiras em cenários de Mudanças climáticas. *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ (no prelo)*.
- Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Gonçalves, J.L.D.M. & Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22 (6):711–728.

- Alves, P.B.R.; Melo Filho, H.; Tsuyuguchi, B.B.; Rufino, I.A.A. & Feitosa, P.H.C. 2018. Mapping of flood susceptibility in Campina Grande County – PB: A spatial multicriteria approach. *Boletim de Ciencias Geodesicas*, 24 (1):28–43.
- Araújo, F.F. 2015. Empresários urbanos e produção do espaço residencial: condomínios-clubes na Zona Sul de Natal (RN). *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 7 (1):106–121.
- Araújo, P.V.N.; Amaro, V.E.; Alcoforado, A.V.C. & Santos, A.L.S. 2018. Acurácia Vertical e Calibração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) para a Bacia Hidrográfica Piranhas-Açú, Rio Grande do Norte, Brasil. *Anuario do Instituto de Geociencias - UFRJ*, 41 (1):351–364.
- Araújo, P.V.N.; Amaro, V.E.; Silva, R.M. & Lopes, A.B. 2019. Delimitation of Flood Areas Based on Calibrated DEM and Geoprocessing: Case Study on Uruguay River, Itaquí City, Southern Brazil. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 19 :237–250.
- Barros, M.T.L. & Conde, F. 2017. Urban Flood Warning System Social Benefits Mario. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS, California, 2017. *Selected Papers from the Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress 2017*, Sacramento, California, p. 642–653.
- Beskow, S.; Vargas, M.M.; Nunes, G.S.; Steinmetz, A.A.; Ávila, L.F.; De, M.; Caldeira, T.L. & Norton, L.D. 2018. Geomorphology-based unit hydrograph models for flood risk management: Case study in Brazilian watersheds with contrasting physiographic characteristics. *Anais da Academia Brasileira de Ciencias*, 90 (2):1873–1890.
- Boonya-Aroonnet, S.; Maksimovic, Č.; Prodanovic, D. & Djordjevic, S. 2007. Urban Pluvial Flooding: Development of GIS Based Pathway Model for Surface Flooding and Interface with Surcharged Sewer Model. *Novatech*, 481–488.
- Campos, S.; Felipe, A.C.; Campos, M. & Reche, A.M. 2015. Geoprocessamento aplicado na caracterização morfométrica da Microbacia do Ribeirão Descalvado - Botucatu, SP. *Revista Irriga*, 20 :52–65.
- Cook, A. & Merwade, V. 2009. Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 377 (1–2):131–142.
- Correia, E.F.G.; Ribeiro, G.P. & Baptista, A.C. 2015. Modelagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco à inundação. *Revista Brasileira de Cartografia*, 67 (6):1183–1202.

- Costa, J. D. 2015. *Evolução espaço-temporal da ocupação urbana sobre áreas naturais no município de Natal-RN*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Dissertação de Mestrado, 95 p.
- CPRM. 2012. *Carta Geológica: Folha Natal SB-25-V-C-V Escala 1:100.000*. Natal, CPRM.
- Demir, V. & Kisi, O. 2016. Flood hazard mapping by using geographic information system and hydraulic model: Mert River, Samsun, Turkey. *Advances in Meteorology*, 2016 :1–9.
- Dindaroğlu, T.; Reis, M.; Akay, A.E. & Tonguç, F. 2015. Hydroecological approach for determining the width of riparian buffer zones for providing soil conservation and water quality. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12 (1):275–284.
- ESRI. 2011. *Arc Hydro Tools – Tutorial: Version 2.0*. New York, ESRI. 184p.
- Franci, F.; Bitelli, G.; Mandanici, E.; Hadjimitsis, D. & Agapiou, A. 2016. Satellite remote sensing and GIS-based multi-criteria analysis for flood hazard mapping. *Natural Hazards*, 83 (1):31–51.
- Guerra, M. & Abebe, Y. 2019. Pairwise Elicitation for a Decision Support Framework to Develop a Flood Risk Response Plan. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 5 (1):11004.
- IBGE. 2019. *Panorama Brasil - Rio Grande do Norte - Natal*. IBGE. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/natal/panorama>. Acesso em: 05/02/2019.
- INMET. 2018. *Instituto Nacional de Meteorologia*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 12/01/2018.
- Natal. 2009. *Plano Diretor de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais da Cidade de Natal: Manual de Drenagem*. Natal, SEMOPI. 254 p.
- Natal. 2014. *Plano Municipal de Saneamento Básico do Município de Natal/RN: Situação dos serviços de drenagem e manejo de águas pluviais urbanas*. Natal, Start. 142 p.
- Natal. 2015. *Anuário Natal 2015*. Natal, SEMURB. 246 p.
- Natal. 2016. *Anuário Natal 2016*. Natal, SEMURB. 292 p.
- Kaspersen, P.S.; Ravn, N.H.; Arnbjerg-Nielsen, K.; Madsen, H. & Drews, M. 2017. Comparison of the impacts of urban development and climate change on exposing European cities to pluvial flooding. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21 (8):4131–4147.
- Kourgialas, N.N. & Karatzas, G.P. 2017. A national scale flood hazard mapping methodology: The case of Greece – Protection and adaptation policy approaches.

- Science of the Total Environment*, 601–602 :441–452.
- Lee, S.; Nakagawa, H.; Kawaike, K. & Zhang, H. 2016. Urban inundation simulation considering road network and building configurations. *Flood Risk Management*, 9 :224–233.
- Marafuz, I.; Rodrigues, C. & Gomes, A. 2015. Analysis and assessment of urban flash floods on areas with limited available altimetry data ( Arouca , NW Portugal ): a methodological approach. 2937–2949.
- Oliveira, P.E. & Ramos, C. 2002. Inundações na cidade de Lisboa durante o século XX e seus factores agravantes. *Finisterra*, 37 (74):33–54.
- Omran, A.; Dietrich, S.; Abouelmagd, A. & Michael, M. 2016. New ArcGIS tools developed for stream network extraction and basin delineations using Python and java script. *Computers and Geosciences*, 94 :140–149.
- Pilla, F.; Gharbia, S.S. & Lyons, R. 2019. How do households perceive flood-risk? The impact of flooding on the cost of accommodation in Dublin, Ireland. *Science of The Total Environment*, 650 :144–154.
- Recanatesi, F.; Petroselli, A.; Nicolina, M. & Leone, A. 2017. Assessment of stormwater runoff management practices and BMPs under soil sealing: A study case in a peri-urban watershed of the metropolitan area of Rome ( Italy ). *Journal of Environmental Management*, 201 :6–18.
- Ribeiro, M.F.; Costa, V.C.; Magalhães Neto, N. De & Freitas, M.A.V. 2013. An analysis of monthly rainfall and its relationship to the occurrence of mass movement and flooding in Pedra Branca Massif in the city of Rio de Janeiro, Brazil. *Geographical Research*, 51 (4):398–411.
- Santos JR., O. F.; Severo, R. N. F. & Freitas Neto, O. 2016. Movimentos de massas em encostas na cidade de Natal/RN. In: LACERDA, W. *Doutor no saber e na arte de viver*. p. 468-478.
- Santos JR., V.J. & Santos, C.O. 2014. Aplicação de indicadores de fragilidade do sistema de natureza ambiental na bacia hidrográfica do rio Cintra-MG. *Revista Monografias Ambientais - REMOA*, 13 (5): 3872-3880.
- Santos, K.A.; Rufino, I.A.A. & Barros Filho, M.N.M. 2017. Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande - PB. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22 (5):943–952.
- Seber, G. A. F. 1977. *Linear Regression Analysis*. John Wiley & Sons, New York, 465 p.
- Silva, C.V.F.; Schardong, A.; Garcia, J.I.B. & Oliveira, C. de P.M. 2018. Climate change

- impacts and flood control measures for highly developed urban watersheds. *Water (Switzerland)*, 10 (7):1–18.
- Smith, A.; Martin, D. & Cockings, S. 2016. Spatio-Temporal Population Modelling for Enhanced Assessment of Urban Exposure to Flood Risk. *Applied Spatial Analysis and Policy*, 9 :145–163.
- Soares, C. 2017. *Chuvas deste sábado alagam ruas de um dos bairros mais chiques de Natal. Fotojornalismo*. Disponível em: <http://canindesoares.com/chuvas-alagam-ruas-de-um-dos-bairros-mais-chiques-de-natal>. Acesso em 15/12/2018.
- Targa, M.S.; Getulio, T.B.; Diniz, H.N.; Dias, N.W. & Matos, F.C. 2012. Urbanização e escoamento superficial na bacia hidrográfica do Igarapé Tucunduba, Belém, PA, Brasil. *Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 7(2): 120-142.