

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
TECNOLOGIA EM GEOPROCESSAMENTO**

BRUNO DE CASTRO SOUSA

**MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO A PARTIR DE IMAGENS DE VANT
APLICADO NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A ALAGAMENTOS
EM UMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DA CIDADE DE TERESINA – PIAUÍ**

**TERESINA - PI
2017**

BRUNO DE CASTRO SOUSA

**MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO A PARTIR DE IMAGENS DE VANT
APLICADO NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A ALAGAMENTOS
EM UMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DA CIDADE DE TERESINA – PIAUÍ**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Tecnologia em Geoprocessamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí. Campus Teresina Central.

Orientador (a): Prof.^a Msc. Amanda Bezerra Matias.

Coorientador (a): Prof.^o Esp. Adriano d'Carlos Batista Oliveira.

**TERESINA - PI
2017**

FICHA CATALOGRÁFICA

Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S725 Sousa, Bruno de Castro
m Modelo digital de elevação a partir de imagens de VANT aplicado na identificação de áreas suscetíveis a alagamentos em uma sub-bacia hidrográfica da cidade de Teresina, Piauí. / Bruno de Castro Sousa - 2017.
55 p. : il. color.

Trabalho de conclusão de curso (Tecnologia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, Tecnologia em Geoprocessamento, 2017.

Orientadora : Profa Ma. Amanda Bezerra Matias.

Coorientador : Prof Esp. Adriano D'Carlos Batista Oliveira.

1. Alagamento. 2. Bacia Hidrográfica. 3. VANT. 4. Aerofotogrametria. 5. MDE.
I.Título.

CDD 621.3678

BRUNO DE CASTRO SOUSA

MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO A PARTIR DE IMAGENS DE VANT
APLICADO NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A ALAGAMENTOS
EM UMA SUB-BACIA HIDROGRÁFICA DA CIDADE DE TERESINA – PIAUÍ

Monografia apresentada ao Curso de Tecnologia em Geoprocessamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI, como requisito para a obtenção do grau de Tecnólogo em Geoprocessamento.

Monografia aprovada em 18 de agosto de 2017.

BANCA EXAMINADORA

Assinado no original

Prof^a. Msc. Amanda Bezerra Matias

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPI)
(Orientadora)

Assinado no original

Prof. Esp. Adriano D'Carlos Batista Oliveira

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPI)
(Co-Orientador)

Assinado no original

Prof. Esp. Daniel Silva Veras

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFPI)
(Avaliador)

Dedico esse trabalho aos meus pais Zacaria e Neoci, meus irmãos Igor e Juliana, meus sobrinhos Iasmyn, Isabele e Nicolas, e à minha noiva Gaby, pelo amor, carinho e paciência durante o longo tempo dedicado a este trabalho.

AGRADECIMENTOS

À professora Amanda Bezerra Matias pela orientação e apoio na realização deste trabalho.

Ao professor Adriano D'Carlos Batista Oliveira pelo apoio, sugestões e valiosas discussões.

Ao Instituto Federal do Piauí e a todos os professores do curso de Tecnologia em Geoprocessamento pelo ensino e qualificações necessárias para a realização desta pesquisa.

À minha família pelo investimento e por acreditar em mim durante todos esses anos de estudo.

Aos meus cunhados, Lenara e Jairo, pela dedicação e tempo empregado nas revisões e sugestões.

Em especial à minha digníssima noiva, Gaby, pelo apoio e pela psicologia reversa dizendo que eu não iria terminar.

Finalmente, a todos que, direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

As ocorrências de alagamentos urbanos vêm ganhando proporções alarmantes nos últimos anos, trazendo como consequência prejuízos sociais e econômicos. Considerando a versatilidade que a fotogrametria por VANT e os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) possuem para a geração de informações e tomadas de decisões, é possível afirmar que essas geotecnologias constituem-se em ferramentas que podem auxiliar no entendimento e planejamento do espaço geográfico. Sendo assim, a partir da Modelagem Digital de Superfície (MDS) de uma sub-bacia localizada na cidade de Teresina-PI e de uma metodologia de detecção de depressões topográficas, a presente pesquisa busca identificar áreas passíveis de alagamentos. Para isso, procedeu-se o mapeamento aerofotogramétrico e processamento das imagens capturadas. A análise dos dados obtidos resultou na geração de pontos e polígonos correspondentes às depressões presentes no terreno. Assim, mediante as variáveis geradas como área e profundidade, realizou-se uma classificação das áreas encontradas. A partir dessa classificação, foi possível estimar a relevância de cada área, de forma a facilitar a observação e o entendimento das informações. Com base nos resultados, acredita-se que as técnicas e os métodos utilizados possam fornecer subsídios e embasamentos para futuras pesquisas.

Palavras-chave: Alagamento. Bacia Hidrográfica. VANT. Aerofotogrametria. MDE. SIG.

ABSTRACT

The occurrence of urban flooding has gained alarming proportions in the last few years, leaving economics and social losses as consequence. Considering the versatility that UAV photogrammetry and Geographic Information Systems (GIS) have for information generation and decision-making, it is possible to ensure that these geotechnologies constitute important tools for planning and understanding the geographic space. Therefore, this research aimed to identify possible flooding areas in a sub-basin located in the city of Teresina, Piauí, through Digital Surface Modeling (DSM) and through topographic depression detection methodology. For this purpose, the area was aerial surveyed and the images taken were processed. The acquired data analysis resulted in the generation of points and polygons corresponding to depressions on the terrain. Thereby, the acquired data was classified through generated variables, such as area and depth. From this classification, it was possible to estimate the relevance of each area, in order to simplify the viewing and understanding of the information. Based on the results, it is believed that the techniques and methods used are reliable and can provide background for future researches.

Key-words: Flooding. Watershed. UAV. Aerophotogrammetry. DEM. GIS.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Depressões Topográficas simples e compostas	15
Figura 2 - Exemplos de Inundação, enchente e alagamento	15
Figura 3 - Componentes do Geoprocessamento.....	17
Figura 4 - Diagrama da arquitetura básica de um VANT quadricóptero.	19
Figura 5 - Ilustração de faixas de voo e recobrimento longitudinal e lateral.	21
Figura 6 - Comparação entre imagens com diferentes resoluções espaciais	22
Figura 7 - Esquema representando a relação dos componentes para o cálculo do GSD	23
Figura 8 - Rede Triangular Irregular (TIN)	27
Figura 9 - Exemplo de ortomosaico mostrando as seamlines.	27
Figura 10 - Modelo Digital de Terreno e Modelo Digital de Superfície.	28
Figura 11 - Mapa das sub-bacias suscetíveis à inundação na cidade de Teresina...30	
Figura 12 - Mapa de localização da área de estudo.....	31
Figura 13 - Micro VANT DJI Phantom 3 Professional	32
Figura 14 - Fluxograma Metodológico	33
Figura 15. Planejamento de voo.....	34
Figura 16 - Uso de característica urbana para coleta de GCP	35
Figura 17 - Tie Points detectados nas imagens	36
Figura 18 - Identificação de GCP e inserção de marco no Photosocan	37
Figura 19 - Nuvem densa de pontos	38
Figura 20 - Nuvem de pontos classificada	38
Figura 21 - Junção do MDT (vias) com o MDS (quadras)	39
Figura 22 - Pontos de acúmulo encontrados Fonte: Autor	44
Figura 23 - Mapa de relevância dos pontos de alagamento.....	45
Figura 24 - Esquema com informações sobre o acúmulo N° 26	47
Figura 25 - Bueiro e bocas de lobo presentes na área.....	48
Figura 26 - Esquema com informações sobre o acúmulo N° 20	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos acúmulos por tamanho.	42
Tabela 2 - Classificação dos acúmulos por profundidade.	42
Tabela 3 - Esquema para classificação de relevância dos acúmulos.	42
Tabela 4 - Porcentagem das classes de relevância dos acúmulos.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABA	–	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE AEROMODELISMO
ESC	–	ELECTRONIC SPEED CONTROL
GCP	–	GROUND CONTROL POINT
GNSS	–	GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM
GPS	–	GLOBAL POSITION SYSTEM
GSD	–	GROUND SAMPLE DISTANCE
IBGE	–	INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA ESTATÍSTICA
MDE	–	MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO
MDS	–	MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE
MDT	–	MODELO DIGITAL DE TERRENO
P	–	PARNAÍBA
PD	–	POTI DIREITA
PDDrUr/THE	–	PLANO DIRETOR DE DRENAGENS URBANAS DE TERESINA
PE	–	POTI ESQUERDA
PEC	–	PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA
P3P	–	PHANTOM 3 PROFESSIONAL
SIG	–	SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS
TIN	–	TRIANGULAR IRREGULAR NETWORK
VANT	–	VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos da pesquisa	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
2 TECNOLOGIA DA GEOINFORMAÇÃO APLICADA AO ESTUDO DE ALAGAMENTOS	14
2.1 Tecnologias da Geoinformação	16
2.2 VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado.....	18
2.3 Fotogrametria com VANTs	20
2.3.1 Planejamento da missão.....	21
2.3.2 Georreferenciamento	25
2.3.3 Processamento das imagens.....	26
2.4 Produtos do Mapeamento aéreo por VANT	26
2.4.1 Modelos 3D.....	26
2.4.2 Mosaicos ortorretificados	27
2.4.3 Modelo Digital de Elevação	28
3 METODOLOGIA DA PESQUISA.....	29
3.1 Área de estudo	29
3.2 Equipamentos Tecnológicos	32
3.3 Etapas Metodológicas.....	33
3.4 Aerolevantamento	33
3.4.1 Planejamento de voo	33
3.4.2 Voo e coleta das imagens aéreas.....	35
3.4.3 Coleta dos Pontos de controle (GCP).....	35
3.5 Processamento das imagens	36
3.6 Análises Espaciais em SIG.....	39
3.6.1 “Zonal Statistics”	40
3.6.2 “Raster Calculator”	40
3.6.3 “Raster to Point”.....	41
3.7 Classificação dos Acúmulos.....	41
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1 Qualidade e precisão do aerolevantamento	43
4.2 Resultados das análises espaciais.....	43

4.3 Alagamentos conhecidos	46
5 CONCLUSÃO	50
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	52
APÊNDICE A – Lista das coordenadas dos acúmulos de Alta Relevância.	54
APÊNDICE B – Listas da quantidade de acúmulos por logradouro.	55

1 INTRODUÇÃO

O crescimento desordenado das cidades ocasionado por assentamentos irregulares, invasões de propriedades, ocupação de áreas de riscos socioambientais, loteamentos mal projetados, entre outros, vem gerando preocupações acerca de desastres associados a eventos naturais (FERNANDES, 2016). Quando esses eventos são responsáveis por desastres em áreas ocupadas, podem acarretar em consequências econômicas, sociais e ambientais de significativa dimensão (MENEZES, 2014).

Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizada em 2008 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pelo menos 51,3% dos municípios brasileiros sofreram com inundações ou alagamentos no período de 5 anos. Ainda segundo a pesquisa, na região Nordeste, 45,8% dos municípios atingidos tiveram como fator agravante a ocupação desordenada do solo (IBGE, 2010). De acordo com Chaves (2015), apenas na cidade Teresina, no Piauí, aproximadamente 100 mil pessoas foram prejudicadas por inundações ou alagamentos em um período de 20 anos.

A compactação e impermeabilização desordenada do solo nesses municípios, gerados pela construção de edificações, asfaltamento de ruas e vias e pela construção de calçadas, alteram o fluxo superficial da água, podendo criar ou intensificar as depressões topográficas presentes no terreno e, como consequência, intensificar o acúmulo de água em vias urbanas.

Para que seja possível detectar depressões topográficas, faz-se necessário analisar e modelar a superfície terrestre de forma a melhor compreender os aspectos e dimensões de áreas de acúmulo conhecidas e também identificar novas áreas potencialmente alagáveis.

Nesse contexto, as Geotecnologias são de fundamental importância, pois constituem-se em instrumentos de representação cartográfica como também utilizam métodos para gerenciar, organizar, armazenar, manusear e sintetizar as informações espaciais, tornando simples a tarefa dos gestores na busca de meios para tomada de decisões estratégicas e de ações na resolução de problemas (FRANCISCO, 2014).

Com os avanços tecnológicos, as técnicas de aquisição de dados da superfície terrestre têm melhorado no que se refere à qualidade, quantidade e tempo de atualização dos dados. Um dos métodos de mapeamento que mais tem crescido

nos últimos anos é o realizado por aerolevantamento, que tem por requisito a utilização de aeronaves e câmeras especializadas (SOUZA, 2015). Os Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs) são exemplos dessas aeronaves.

De acordo com Souza (2015), o uso do VANT na obtenção de dados espaciais tem crescido em razão da sua facilidade de operação, baixo custo, economia de tempo e da alta resolução espacial que pode variar de acordo com as necessidades do usuário.

Diante do exposto, a presente pesquisa tem por objetivo aplicar uma metodologia para identificar depressões topográficas suscetíveis a acúmulo a partir da análise espacial de modelos digitais de superfície gerados pelo processamento de imagens aéreas obtidas por VANT.

1.1 Objetivos da pesquisa

1.1.1 Objetivo Geral

Identificar, através de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), áreas suscetíveis a alagamentos a partir de Modelos Digitais de Elevação produzidos pelo processamento de imagens aéreas obtidas por Veículo Aéreo não Tripulado (VANT).

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar aerolevantamento da área de estudo com VANT;
- Processar e georreferenciar as imagens produzidas pelo aerolevantamento;
- Gerar modelos digitais de elevação da área estudada;
- Identificar as áreas de acúmulo.

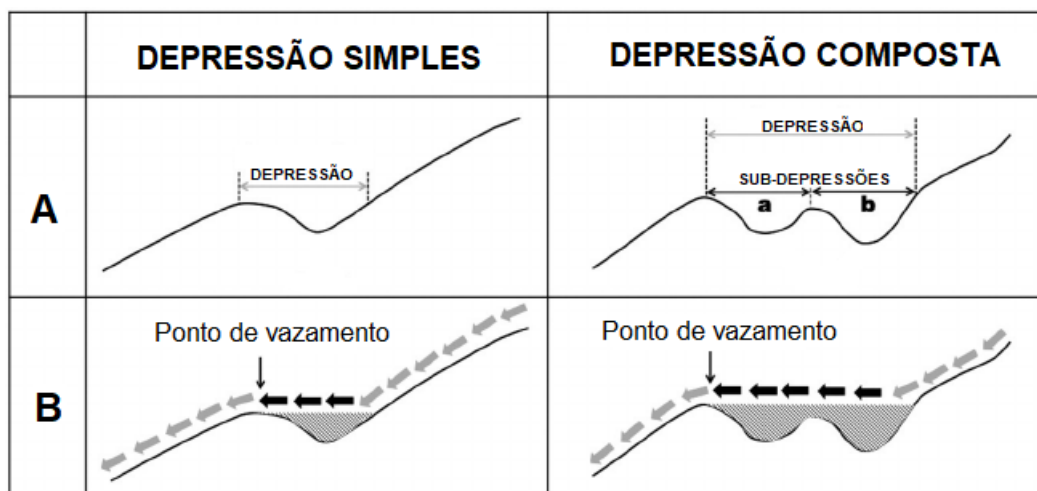
2 TECNOLOGIA DA GEOINFORMAÇÃO APLICADA AO ESTUDO DE ALAGAMENTOS

Muitos são os problemas ocasionados pela urbanização das cidades. Existe uma frequente preocupação dos gestores públicos em buscar alternativas de melhorar a qualidade de vida da população. Um dos problemas percebidos pela rápida urbanização são os constantes impactos causados por alagamentos como, por exemplo, o impedimento da livre circulação de pessoas, paralisação dos serviços de transporte e do fluxo comercial nas áreas afetadas causando prejuízos financeiros e perdas materiais, além de lesões físicas e/ou proliferação de doenças infectocontagiosas (XIMENES, 2010).

Os alagamentos em centros urbanos, algumas vezes erroneamente chamados de enchentes ou inundações, ocorrem quando os escoamentos superficiais de chuvas intensas se acumulam em certas áreas. Logo, alagamentos são os acúmulos de águas nas ruas, que podem ocorrer em decorrência do mal planejamento do zoneamento urbano e falta de uma infraestrutura eficiente de drenagem de águas superficiais como também devido a topografia do terreno (FERNANDES, 2016).

As características topográficas do terreno que estão diretamente associadas à formação de alagamentos são as depressões topográficas, que podem ser simples ou compostas. Durante a ocorrência de uma chuva, as águas superficiais em fluxo preenchem as depressões até o seu ponto de vazamento. Quando o fluxo termina, a depressão permanece preenchida até que a água seja drenada através da permeabilização ou sistemas de drenagens. A Figura 1 ilustra a diferença entre depressões simples e compostas e também como as depressões influenciam no fluxo da água:

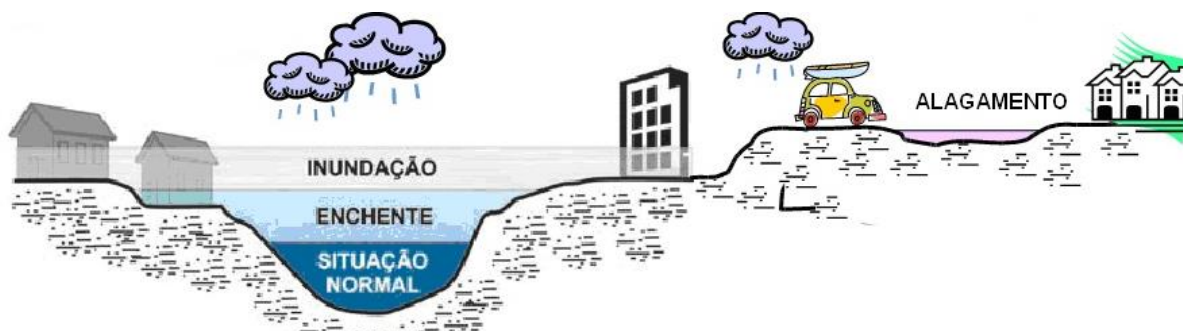
Figura 1 - Depressões Topográficas simples e compostas



Fonte: Adaptado de Byun e Seong (2015)

As enchentes ou cheias, por outro lado, são os aumentos temporários do nível d'água no canal de drenagem devido a vazão, atingindo a cota máxima do canal, porém sem transbordar. E a inundação é o transbordamento das águas de um canal de drenagem, atingindo as áreas marginais (FERNANDES, 2016). A diferença entre esses três termos pode ser melhor visualizada na Figura 2.

Figura 2 - Exemplos de Inundação, enchente e alagamento



Fonte: Ministério das Cidades (2007)

Os estudos das dinâmicas dos centros urbanos têm melhorado com o auxílio dos Sistemas de Informações Geográficas combinados com tecnologias de aquisição de imagens aéreas, como por exemplo os VANTs.

O emprego de VANTs na aquisição de imagens aéreas para produção de informações espaciais vem crescendo em razão da sua versatilidade, baixo custo operacional, alta precisão dos dados e da alta resolução espacial, que pode variar de acordo com a finalidade do projeto. De maneira geral, o uso do VANT se limita em

áreas consideradas pequenas para serem mapeadas com o uso de aeronaves tradicionais, porém extensas demais para serem mapeadas por métodos topográficos.

Dentre as aplicações mais recentes, podemos citar os estudos realizados por Buffon, Paz e Sampaio (2017) que buscaram analisar os riscos de inundações por meio da utilização de imagens obtidas por VANT e concluíram que esta tecnologia se mostrou eficaz em auxiliar o aumento no nível de aproximação da realidade dos dados digitais.

Nex e Remondino (2014) também tiveram bons resultados ao combinar SIG com VANT, no qual realizaram um mapeamento 3D das imagens e tiveram como produto final informações de alta resolução temporal e espacial permitindo uma resposta rápida em diferentes situações críticas.

Almeida et al.. (2015) utilizaram as imagens de VANT para gerar, dentro do SIG, Modelos Digitais de Superfícies com uma elevada qualidade geométrica e cartográfica e concluíram ser os VANTs uma alternativa de aquisição de dados espaciais de baixo custo e alta qualidade em relação aos métodos clássicos de aerofotogrametria e imagens de satélite de alta resolução espacial, que possuem alto custo financeiro.

Com isso, pode-se perceber que o uso de tecnologias da geoinformação aplicadas sobre a prevenção e monitoramentos das dinâmicas geográficas no ambiente urbano, no que se refere a estudos sobre eventos hídricos, tem se mostrado como eficientes ferramentas de aquisição, de processamento e de análise de dados.

2.1 Tecnologias da Geoinformação

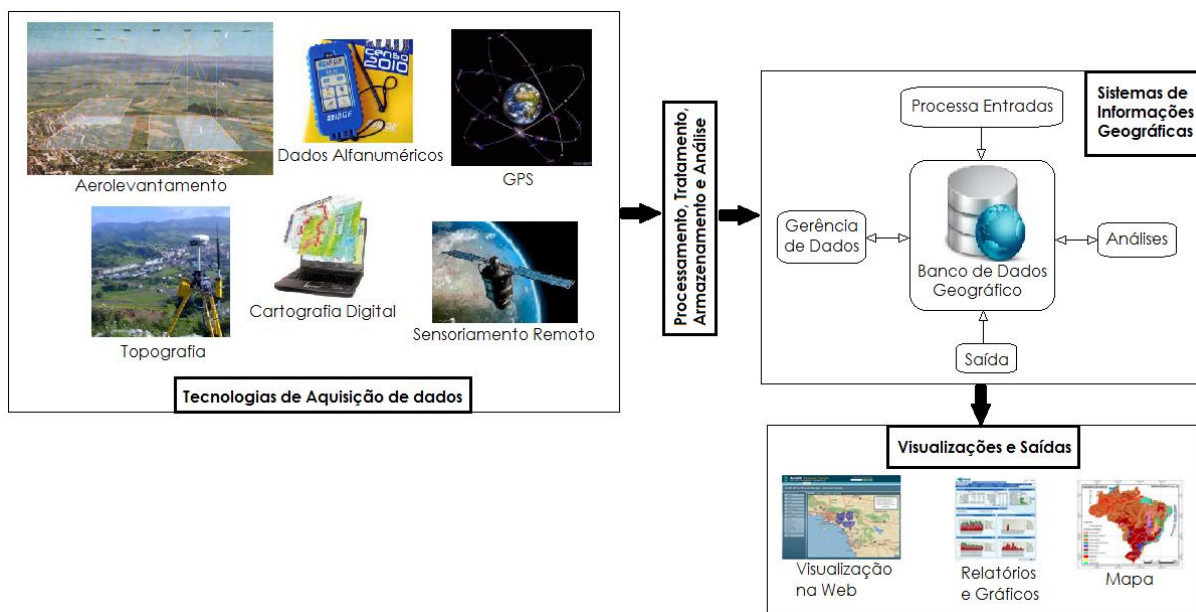
Até o advento da informática, a manipulação de dados geográficos era feita através de mapas e outros documentos impressos ou desenhados em uma base de papel. Esta característica impunha algumas limitações, como na análise combinada de mapas oriundos de diversas fontes, temas e escalas e na atualização dos dados (FRANCISCO, 2014).

A partir da segunda metade do século XX, os dados geográficos passaram a ser tratados por um conjunto de técnicas matemáticas e computacionais denominadas de Geoprocessamento. Para Câmara et al. (2005), uma nova ciência estaria surgindo, denominada de Ciência da Geoinformação, que teria como objetivo “o estudo e a implementação de diferentes formas de representação computacional do espaço geográfico”.

O Geoprocessamento busca a geração e tratamento das informações espaciais por meio de tecnologias que envolvem desde o processo de aquisição de dados espaciais e não espaciais, a sua modelagem, atualização, análises e tratamento, até os mecanismos de visualização e saída (NITER, 1995).

No que se refere a aquisição dos dados em geoprocessamento, podemos destacar algumas tecnologias como a topografia, aerolevantamentos, Sistemas Globais de Posicionamento por Satélite (GNSS), Sensoriamento Remoto e a cartografia digital. As etapas de modelagem, atualização e análises acontecem pela integração dos Sistemas de Informações Geográficas. E por último, temos a visualização e saída dos dados, que podem ser em forma de mapas, gráficos ou relatórios, até mesmo em navegadores online na Web. A Figura 3 mostra os componentes e as tecnologias de geoprocessamento.

Figura 3 – Componentes e tecnologias de Geoprocessamento



Fonte: Adaptado de Miranda (2015)

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) correspondem às ferramentas computacionais de Geoprocessamento, que permitem a realização de “análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados” (CÂMARA et al., 2005)

De acordo com Miranda (2015), os componentes dos sistemas de informações geográficas podem ser classificados de diversas formas, uma delas é quanto aos modelos de programação das aplicações que se dividem em quatro subsistemas:

- **Subsistema de entrada de dados:** compreende as etapas de entrada e pré-coleta dos dados espaciais e não espaciais no ambiente SIG. Alguns dados precisam ser convertidos para outros formatos ou os valores de precisão devem ser corrigidos;
- **Subsistema de gerência de dados:** envolve o processo de organização e armazenamento em base de dados, de forma a permitir que os dados sejam recuperados e atualizados;
- **Subsistema de análises espaciais:** tem por função agregar e desagregar dados, estimar parâmetros, modelar geometrias, entre outras tarefas. Nele estão os operadores de criação de novos mapas, modelagem dos dados, consultas espaciais, operadores de sobreposição, reclassificação, entre outros;
- **Subsistema de saída dos dados:** contém as ferramentas que permitem a produção dos resultados, sejam eles gráficos, mapas, relatórios, tabelas, e muitos outros.

Para Aronoff (1989) os SIG são projetados para a entrada, gerenciamento (armazenamento e recuperação), análise e saída de dados, e devem ser utilizados em estudos onde a localização geográfica seja uma questão fundamental na análise a ser realizada.

A precisão dos dados, finalidade do produto, equipamentos, recursos humanos, condições de tempo e clima, custos, e o tempo de levantamento e processamento dos dados são fatores que facilitam a escolha de qual tecnologia de aquisição melhor se adapta às informações que se deseja alcançar.

Os métodos de mapeamento são diversos e aprimorados constantemente. O aerolevanteamento, por exemplo, é uma tecnologia de aquisição de dados espaciais para o geoprocessamento que vem ganhando espaço devido ao aumento da utilização de VANT, uma alternativa de baixo custo e rapidez de levantamento se comparado aos levantamentos fotogramétricos convencionais, realizados por aeronaves tripuladas.

2.2 VANT - Veículo Aéreo Não Tripulado

O termo “Veículo Aéreo Não Tripulado” é globalmente utilizado e inclui uma grande gama de aeronaves que são autônomas, semiautônomas ou remotamente operadas. Segundo a Associação Brasileira de Aeromodelismo (ABA), a definição

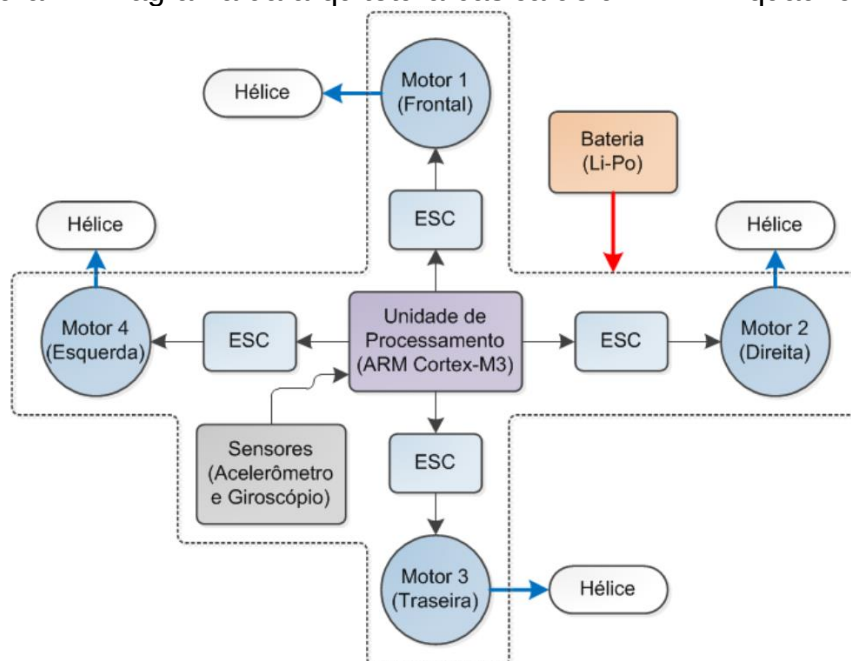
para VANT é: “um veículo capaz de voar na atmosfera, fora do efeito de solo, que foi projetado ou modificado para não receber um piloto humano e que é operado por controle remoto ou autônomo” (JORGE E INAMASU, 2013).

Esse tipo de aeronave foi primeiramente concebido para ser utilizado em aplicações militares, sendo que os primeiros usos do conceito de VANT datam épocas da guerra civil americana (1861 – 1865), onde os exércitos do Sul e do Norte lançavam balões uns contra os outros carregados de explosivos para cair em depósitos de combustível e munição (PAULA, 2012).

Devido à complexidade e altos custos envolvidos, essa foi uma tecnologia que se manteve restrita para uso militar por várias décadas. Os VANTs comerciais só começaram a surgir na década de 80 e atualmente, com a tecnologia cada vez mais acessível, eles estão sendo utilizados largamente nas mais diversas aplicações civis (PAULA, 2012).

Os componentes básicos de um VANT são: motores, hélices, controladores de velocidade, unidade de processamento, acelerômetro, giroscópio e bateria. A Figura 4 mostra a disposição de cada componente da arquitetura básica de um VANT do tipo quadricóptero, semelhante ao utilizado nesta pesquisa.

Figura 4 - Diagrama da arquitetura básica de um VANT quadricóptero.



Fonte: (PAULA, 2012)

Cada componente pode ser descrito da seguinte forma:

- **Quatro motores elétricos:** responsáveis por fornecer a velocidade de rotação para as hélices;
- **Quatro hélices, duas de passo normal e duas de passo invertido:** responsáveis pela sustentação da aeronave no ar;
- **Quatro controladores de velocidade (ESC – Eletronic Speed Controllers):** responsáveis pelo controle dos motores elétricos;
- **Uma unidade de processamento:** responsável pela aquisição de dados dos sensores, processamento de controle e comando dos motores;
- **Um acelerômetro e um giroscópio de três eixos:** responsável pela aquisição da aceleração linear e velocidade angular da aeronave;
- **Uma bateria:** responsável pela alimentação dos demais componentes.

Para que uma aeronave não tripulada possa realizar um voo autônomo, ela precisa ainda de receptor de posicionamento por satélite a bordo. As coordenadas obtidas por esse receptor podem ainda ser atreladas às imagens que, quando inseridas em software de processamento, auxiliam no pré-georreferenciamento dos dados.

VANTs de baixo custo são capazes de produzir mapas sofisticados. Pequenos e portáteis, podem ser rapidamente preparados para voo. Transportam câmeras digitais de baixo peso, que podem capturar imagens de boa qualidade. Estas câmeras podem ser configuradas para tirar fotos em intervalos regulares (KAKAES et al., 2015)

2.3 Fotogrametria com VANTs

Fotogrametria pode ser definida como sendo a arte, a ciência e a tecnologia de se obter informações seguras sobre objetos físicos e do meio ambiente por meio de processos de registros, medição e interpretação de imagens fotográficas (PEGORARO, 2013).

A importância da Fotogrametria é mundialmente reconhecida e vem sendo continuamente aprimorada. Pode ser empregada em diversas áreas como: mapeamento, geologia, engenharia agrônoma e florestal, projetos e construção civil, cadastro urbano e rural, arquitetura, arqueologia, meteorologia, oceanografia, medicina e criminologia (GALVÃO, 2014).

Segundo Galvão (2014) o Sensoriamento Remoto e a Fotogrametria classificam-se em três níveis de coleta de dados: terrestre, aéreo e espacial. No nível terrestre tem-se uma visão horizontal, pois são obtidas através de câmeras métricas acopladas ou não a teodolitos. Destaca-se que a tecnologia atual permite a realização de Fotogrametria Terrestre com Scanners terrestres ou ainda com Estações Totais equipadas com câmeras. O nível aéreo (aerofotogrametria) é viabilizado com a utilização de câmeras fixadas em aviões ou, atualmente, em veículos aéreos não tripulados. Já o nível espacial é obtido por satélites ou outros veículos espaciais. Neste estudo a Fotogrametria aplica-se à área do Sensoriamento Remoto, através do uso de VANTs.

Como descrito por Kakaes et al., (2015) e por Munaretto (2017) o processo de aquisição de dados com VANT consiste em três passos principais, sendo eles o planejamento da missão/voo, o georreferenciamento e o processamento das imagens capturadas.

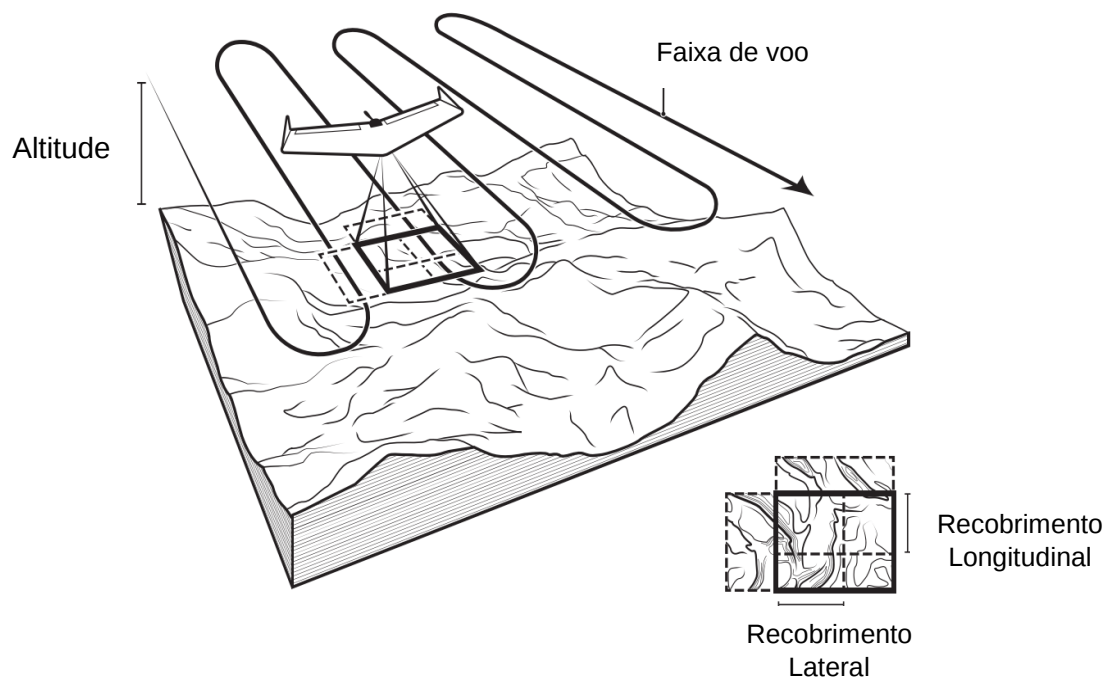
2.3.1 Planejamento da missão

O planejamento da missão é feito levando em consideração a área a ser mapeada, devendo-se analisar as condições meteorológicas, características do terreno e potenciais obstáculos a serem evitados como montanhas, árvores, torres ou edificações elevadas. Os fatores chave, no entanto, são o recobrimento lateral e longitudinal e a resolução espacial das imagens, que interferem diretamente no tempo de voo da aeronave.

a) Recobrimento lateral e longitudinal

Uma parte importante do plano de voo é garantir um bom recobrimento fotográfico da área mapeada, o que irá permitir aos softwares de pós-processamento identificar pontos homólogos entre as imagens captadas. A observância do recobrimento incide diretamente nas características do voo, como o número de faixas de voo e a quantidade de fotografias geradas. A Figura 5 mostra essa relação:

Figura 5 - Ilustração de faixas de voo e recobrimento longitudinal e lateral.



Fonte: Adaptado de KAKAES et al., 2015. Ilustração por Valerie Altounian

Na aerofotogrametria clássica com aeronaves tripuladas os recobrimentos utilizados eram da ordem de 30% lateral e 60% longitudinal. Na aerofotogrametria por VANTs não existe uma definição universalmente aceita para recobrimento lateral e longitudinal, no entanto diversos autores como Fontes (2008) e Nex e Remondino (2014) recomendam o mínimo de 80% de recobrimento longitudinal e 60% de recobrimento lateral.

b) Resolução espacial

A resolução espacial, chamada na aerofotogrametria de GSD - *Ground Sample Distance* (Distância de Amostragem do Solo), é a medida no solo correspondente ao lado de um pixel na imagem ou à distância entre os centros de dois pixels e é geralmente medido em centímetros. O GSD de uma imagem é diretamente proporcional à altitude de voo, ou seja, quanto maior a altitude, maior será o GSD da imagem e vice-versa. No entanto, como se pode observar na Figura 6, um GSD maior (e.g. 10 cm) significa que menos detalhes serão distinguíveis na imagem em relação a um GSD menor (e.g. 4,3 cm), pois este mostrará maior definição e clareza de detalhes.

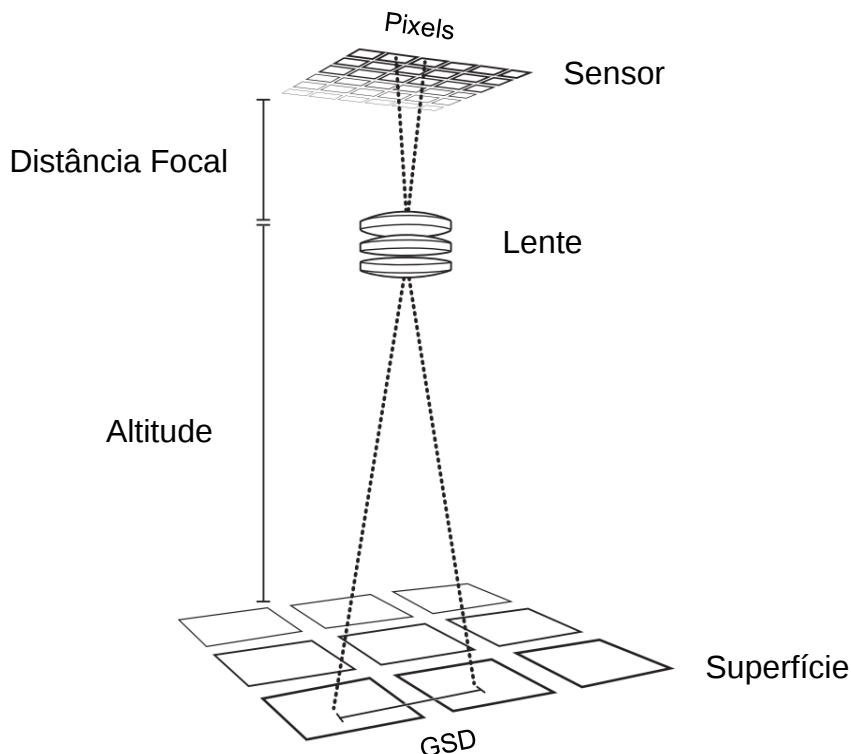
Figura 6 - Comparação entre imagens com diferentes resoluções espaciais



Fonte: Autor

O cálculo do GSD é uma questão de geometria. Quando uma imagem é focada em um plano, dois triângulos isóceles são criados. A altura do triângulo maior equivale à altitude de voo da aeronave acima do solo e sua base equivale à largura da imagem no solo. A altura e base do triângulo menor correspondem, respectivamente, à distância focal das lentes e à distância entre os pixels, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Esquema representando os componentes do cálculo do GSD



Fonte: Adaptado de Kakaes et al., (2015)

O cálculo do GSD depende do tamanho do pixel no sensor multiplicado pela altitude de voo acima do solo e dividido pela distância focal da câmera (KAKAES et al., 2015). Portanto, o cálculo do GSD se dá através da Equação 1:

$$\text{GSD} = \frac{\text{Tamanho do Pixel} \times \text{Altura do Voo}}{\text{Distância Focal}} \quad (1)$$

Para calcular o tamanho do pixel, divide-se a largura do sensor pela quantidade de colunas de pixels (Equação 2). A câmera do micro VANT DJI Phantom 3 Professional, por exemplo, possui um sensor com 6,24 mm de largura e 4000 colunas de pixels, logo:

$$\frac{6,24}{4000} = 0,00156 \text{ mm ou } 1,56^{-6} \text{ metros} \quad (2)$$

Sabendo-se que a distância focal da câmera do P3P é de 3,61 mm, e supondo-se que a altura de voo escolhida seja de 120 metros, a fórmula se dá pela Equação 3:

$$\text{GSD} = \frac{1,56^{-6} \times 120}{0,00361} = 0,0518 \text{ metros ou } 5,18 \text{ cm} \quad (3)$$

2.3.2 Georreferenciamento

O georreferenciamento é um processo importante que incorpora ao mundo real os dados coletados no mapeamento e permite que um mapa seja utilizado para fazer medições. No aerolevantamento com drones, o georreferenciamento é a associação de cada pixel da imagem com uma região física do mundo real, baseada em um Sistema de Geodésico de Referência (MURANETTO, 2017).

Para que o georreferenciamento dos dados seja possível, o software de processamento das imagens precisa saber as coordenadas GNSS de um pequeno número de pontos visivelmente identificáveis nas imagens aéreas coletadas. No contexto de mapeamento com VANTs, essas coordenadas se referem aos pontos de controles no solo, conhecidos como GCP - *Ground Control Points*.

a) *Ground Control Points* (GCP)

Os GCP são alvos presentes na área mapeada com coordenadas conhecidas. Eles são necessários para o georreferenciamento preciso e também para melhorar a acurácia do modelo gerado (p. ex. minimização de erros sistemáticos). A acurácia do produto final depende não somente da acurácia das coordenadas dos GCP, mas também depende da distribuição dos pontos pelo mapa e acurácia à qual os pontos de controle são detectados e marcados na imagem. (THOENI et al., 2015).

As coordenadas dos GCP são identificadas com uso de equipamentos GNSS (Global Navigation Satellite System) de precisão centimétrica, que podem usar os sistemas GPS, GLONASS, o europeu Galileu ou o chinês BeiDou. Segundo Kakaes *et al.*, (2015), os software de processamento requerem um mínimo de 5 pontos de controle para o georreferenciamento dos dados, podendo aumentar esse número de acordo com a necessidade.

Os GCP podem ser identificados utilizando-se alvos presentes na paisagem urbana (p. ex. faixas de pedestres, bueiros, esquinas, etc) ou, em áreas não habitadas, alvos introduzidos previamente ao imageamento (p. ex. plaquetas de cores contrastantes). A escolha do tipo de alvo é feita de acordo com o tamanho e características da área a ser imageada.

2.3.3 Processamento das imagens

O processamento de imagens aéreas pode ser feito por diferentes softwares com diferentes procedimentos. No Agisoft Photoscan, por exemplo, o processo consiste inicialmente no alinhamento automático das imagens, onde o software procura pontos homólogos em diferentes imagens. Nesse passo o software também encontra a orientação e altura da câmera em relação aos pontos, de forma a refinar os parâmetros de calibração da câmera.

Uma vez que as fotos estão completamente alinhadas, o software automaticamente gera uma nuvem de pontos esparsa. Uma nuvem de pontos é uma série de pontos 3D com informações de coordenadas espaciais. A nuvem de pontos esparsa é formada por pontos de amarração, ou Tie Points, que são os pontos homólogos encontrados no alinhamento.

O PhotoScan requer informações de posicionamento da câmera e uma nuvem de pontos esparsa otimizada para continuar o processo gerando uma nuvem de pontos densa, com um número muito maior de pontos 3D, que é a base para geração dos produtos finais do processamento das imagens.

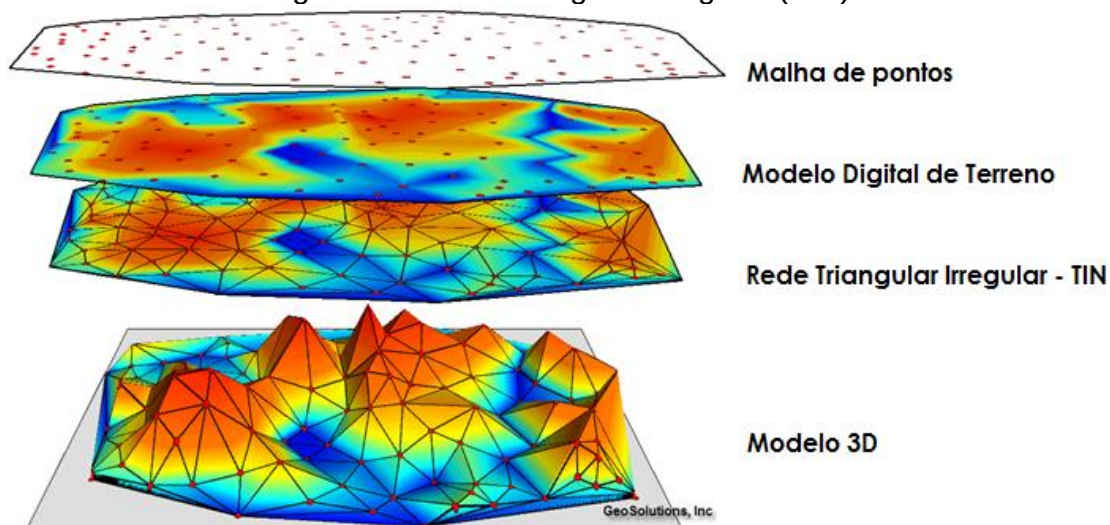
2.4 Produtos do Mapeamento aéreo por VANT

Os produtos do processamento de imagens de mapeamento por VANT podem ser de diferentes tipos, tais quais: modelos 3D, mosaicos ortorretificados, modelos digitais de elevação, entre outros.

2.4.1 Modelos 3D

Os modelos 3D produzidos no processamento das imagens são representados por uma malha irregular de linhas e vértices formando triângulos, também conhecida por TIN (*Triangular Irregular Network*), onde os vértices dos triângulos possuem informações sobre a altitude do relevo, como mostra a Figura 8. Podem ser utilizados para cálculo de volume e para visualização tridimensional do relevo, edificações, entre outros.

Figura 8 - Rede Triangular Irregular (TIN)



Fonte: GeoSolutions, Inc.

2.4.2 Mosaicos ortorretificados

Os mosaicos são conjuntos de imagens adjacentes na mesma escala, sem bordas entre si, agrupadas de forma a compor uma imagem maior da área de interesse (MURANETTO, 2017). Um ortomosaico é um mosaico geometricamente corrigido de forma a mostrá-lo em uma escala uniforme. Este processo remove as distorções de perspectiva das imagens aéreas (KAKAES et al., 2015). Na Figura 9, é possível ver um exemplo de mosaico ortorretificado indicando as *seamlines*, que são as linhas de junções entre as imagens.

Figura 9 - Exemplo de ortomosaico mostrando as seamlines.



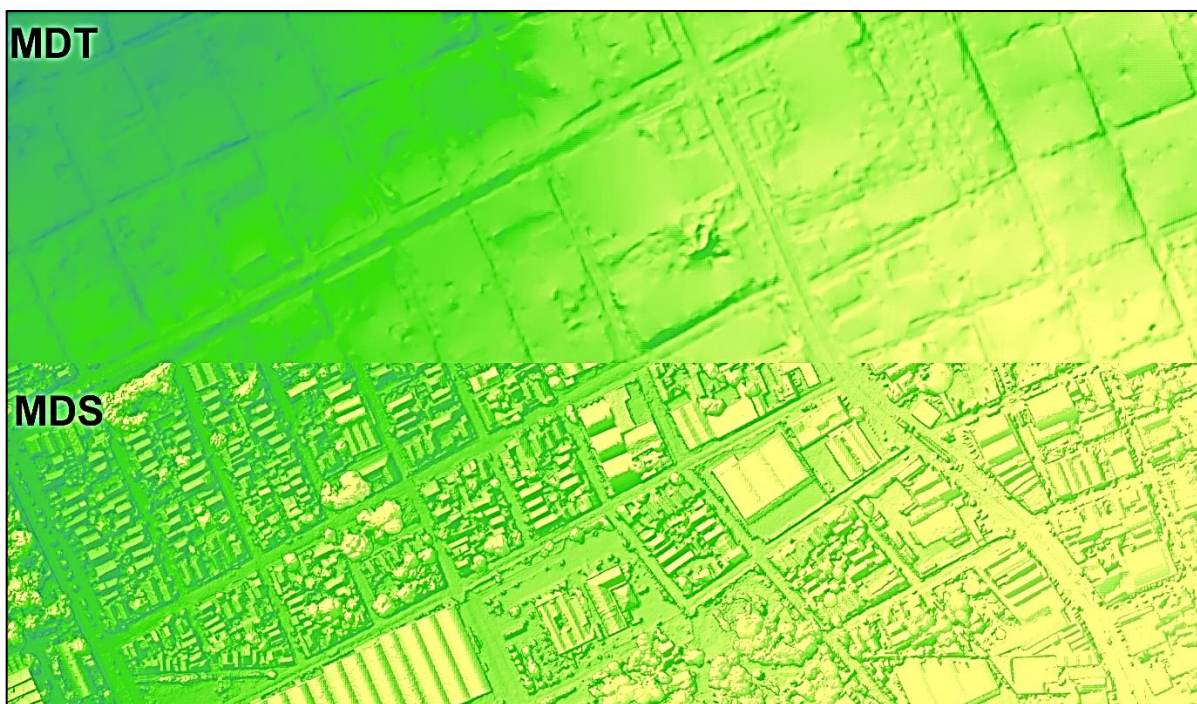
Fonte: Autor

2.4.3 Modelo Digital de Elevação

O Modelo Digital de Elevação (MDE) consiste em uma representação matricial do terreno, em formato de imagem, onde cada pixel possui um valor próprio de altitude (MURANETO, 2017). Os MDE podem ser divididos ainda em Modelo Digital de Superfície (MDS) e Modelo Digital de Terreno (MDT).

Os MDS são representações topográficas que refletem o relevo da superfície terrestre, incluindo a vegetação e as edificações. Diferentemente dos MDS, os MDT representam topograficamente apenas o relevo, não mostrando, portanto, vegetação e edificações. A Figura 10 ilustra a diferença entre os dois modelos.

Figura 10 - Modelo Digital de Terreno e Modelo Digital de Superfície.



Fonte: Autor

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

3.1 Área de estudo

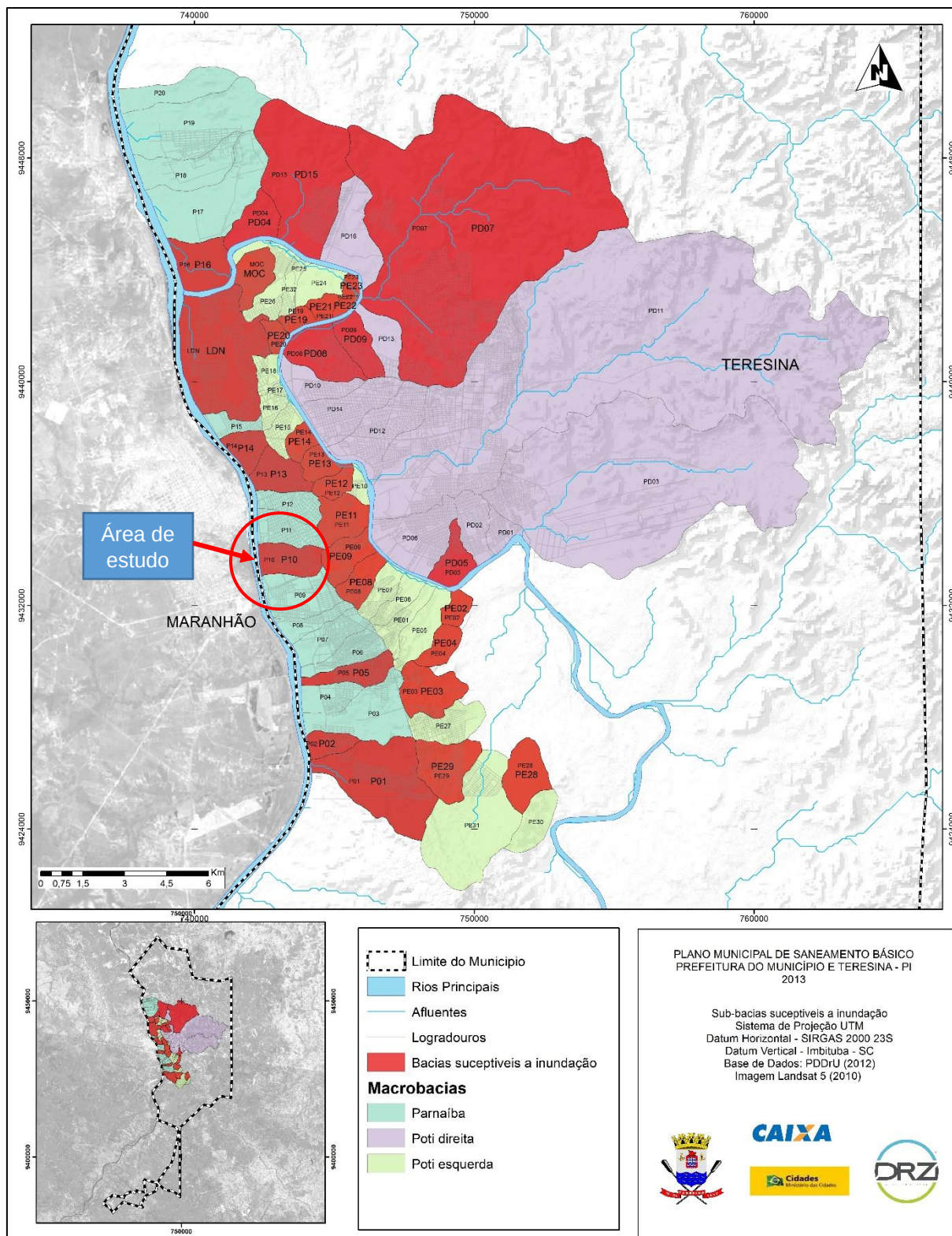
A Prefeitura da Cidade de Teresina, Estado do Piauí, em decorrência das frequentes inundações e problemas de alagamento, ocasionados por precariedade do sistema de drenagem urbana, criou, no ano de 2012, o PDDrUr/THE - Plano Diretor de Drenagens Urbanas de Teresina. Este plano instituiu uma série de diretrizes e ações para controle do risco de inundações e alagamentos (CONCREMAT, 2012). O PDDrUr/THE identificou três macrobacias de escoamento de águas pluviais. Uma delas cuja jusante é o Rio Parnaíba e as outras duas cuja jusante é o Rio Poti.

Para a realização de diagnósticos, o PDDrUr/THE considerou áreas de menor tamanho definindo-as em relação às suas características físicas, recursos hídricos e os aspectos políticos e socioeconômicos. A discretização dessas áreas foi feita dividindo as três macrobacias em 70 sub-bacias hidrográficas tomando como referência os principais rios, córregos e redes nas macrobacias urbanas. Para simplificar o entendimento foi adotada uma nomenclatura, conforme segue:

- Sub-bacias nomeadas com o índice "P" são tributárias do rio Parnaíba;
- Sub-bacias tributárias do rio Poti, foram nomeadas com os índices "PD" e "PE", que dizem respeito às bacias de contribuição da margem direita e da margem esquerda, respectivamente.

A Figura 11 mostra um mapa produzido pela prefeitura, onde são delimitadas as sub-bacias e macrobacias da cidade de Teresina. O mapa mostra também quais sub-bacias estão mais sujeitas à ocorrência de inundações.

Figura 11 - Mapa das sub-bacias suscetíveis à inundação na cidade de Teresina.

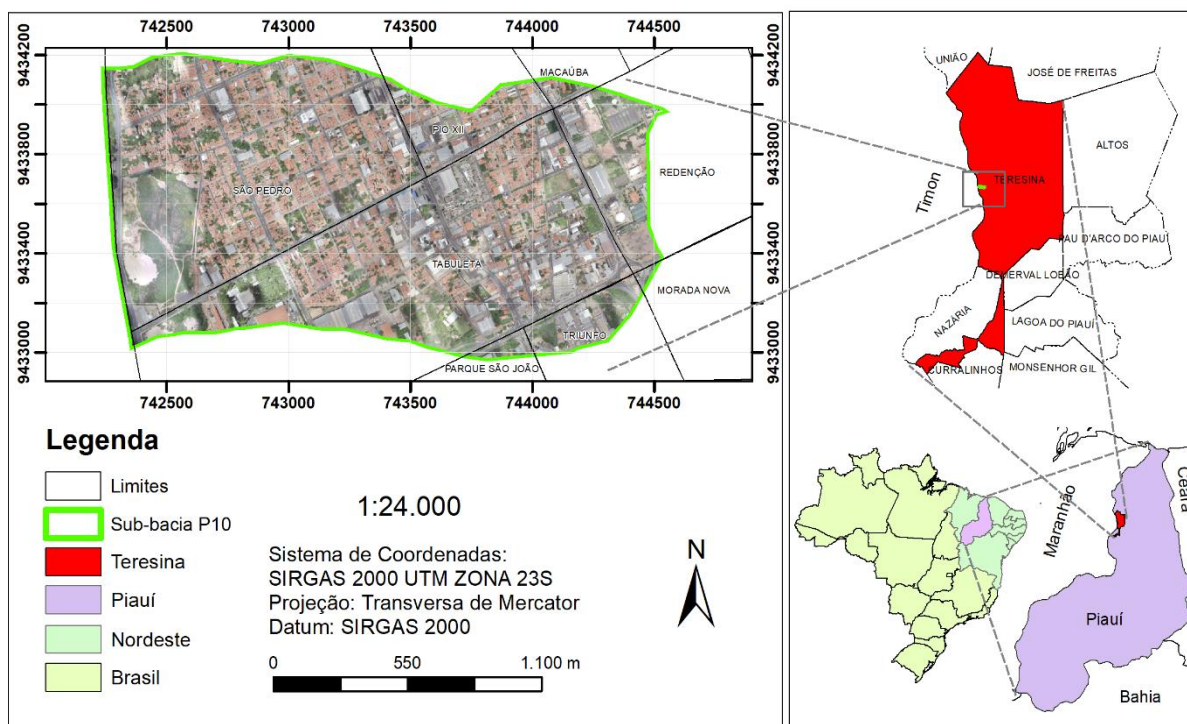


Fonte: Prefeitura Municipal de Teresina

A área de estudo escolhida dentre as identificadas como prioritárias foi a sub-bacia denominada pelo PDDrU/THE como Sub-bacia P10, caracterizada como área

suscetível à inundação e que envolve os bairros Tabuleta, São Pedro e Redenção, localizados na porção centro-oeste de Teresina, conforme é apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Autor

Com área total de 2,47 km², a sub-bacia P10 é formada por terrenos planos e suavemente ondulados, com cotas entre 107 e 55 m, densamente ocupados por edificações residenciais, empreendimentos do setor de serviços e importantes corredores urbanos (HYDRUS & ENGECON, 2015).

Durante a ocupação da área, que data do início do século XX, não houve a necessária preocupação com a drenagem natural e hoje esta área sofre com recorrentes alagamentos com lâminas d'água superiores a 50 cm nas ruas localizadas em vales, inclusive avenidas de grande movimentação que também são importantes corredores de ônibus, como as Avenidas Miguel Rosa, Barão de Gurguéia, Pedro Freitas, Getúlio Vargas e Maranhão (HYDRUS & ENGECON, 2015). Os escoamentos, em sua maior parte, seguem pelas ruas, ocasionando alagamentos frequentes, tanto em função do regime hidrológico local, caracterizado por chuvas de grande intensidade, quanto pelo processo crescente de impermeabilização do solo.

3.2 Equipamentos Tecnológicos

Os equipamentos e softwares utilizados na pesquisa são apresentados a seguir:

- VANT - DJI Phantom 3 Professional;

O Phantom 3 Pro foi utilizado para o mapeamento aéreo da área de estudo. Este modelo possui uma câmera acoplada a um estabilizador (Gimbal) de três eixos. A câmera possui um sensor de 12.76 milhões de pixels, 4000 colunas por 3000 linhas, com largura de 6,24 mm. Um único pixel neste sensor mede $1,56 \mu\text{m}^2$.

Figura 13 - Micro VANT DJI Phantom 3 Professional



Fonte: Autor

- Aplicativo SkyCatch para planejamento de voo;

O SkyCatch é um aplicativo mobile disponível para o sistema operacional iOS. Ele calcula automaticamente o GSD e tem como padrão o recobrimento longitudinal e lateral de 80% e 60%, respectivamente.

- Receptor GNSS Ruide RT90 para a coleta dos pontos de controle;

O Ruide R90T é um aparelho de recepção de sinal GNSS capaz de determinar a sua posição com precisão centimétrica.

- Estação Fotogramétrica

O processamento das imagens foi feito em um notebook Lenovo Y50 com processador Intel(R) Core(TM) i7-4700HQ CPU @ 2.40GHz, memória RAM de 16 Gb e placa de vídeo dedicada NVIDIA GeForce GTX 860M de 2 Gb de memória.

- Agisoft Photoscan para processamento das imagens;

O Photoscan é um dos softwares mais utilizados para processamento de imagens de VANT. Com ele é possível obter nuvens de pontos, modelos 3D, MDE, curvas de nível, ortomosaicos, etc.

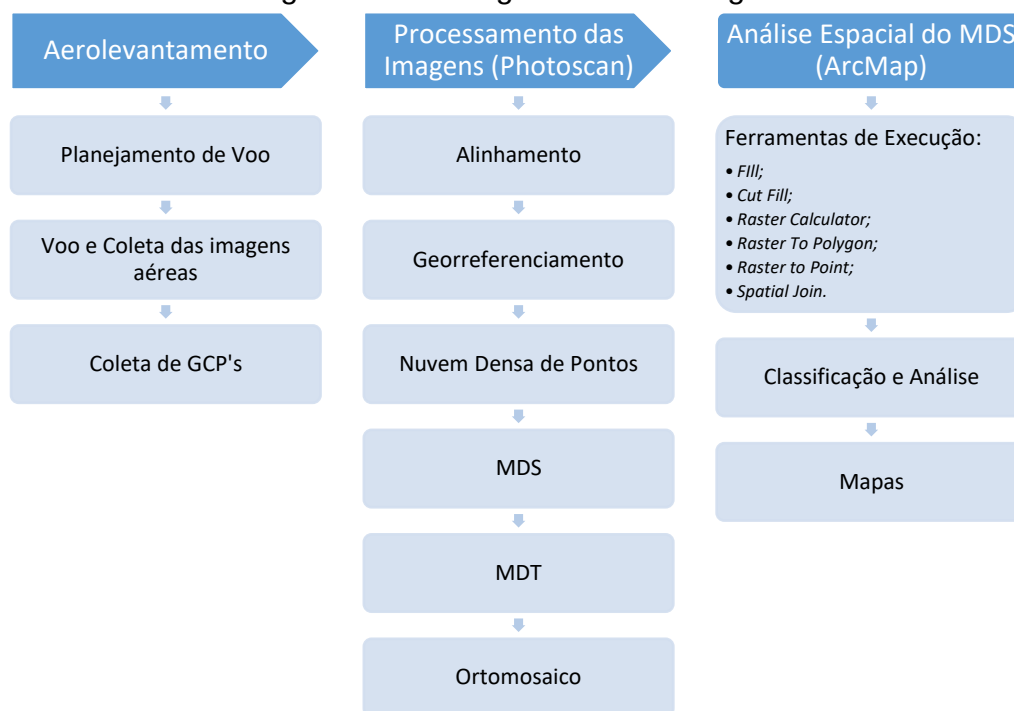
- ArcMap, para análises espaciais.

O ArcMap é um Sistema de Informações Geográficas que faz parte do pacote de softwares da ESRI, chamado de ArcGIS. Com ele é possível realizar diversas análises de dados espaciais.

3.3 Etapas Metodológicas

Para alcançar os objetivos propostos pela pesquisa foram utilizadas as etapas de aerolevanteamento, processamento de imagens e análises espaciais em SIG, como mostra o fluxograma da Figura 14. A descrição de cada uma das etapas é apresentada nos tópicos que se seguem.

Figura 14 - Fluxograma Metodológico



Fonte: Autor

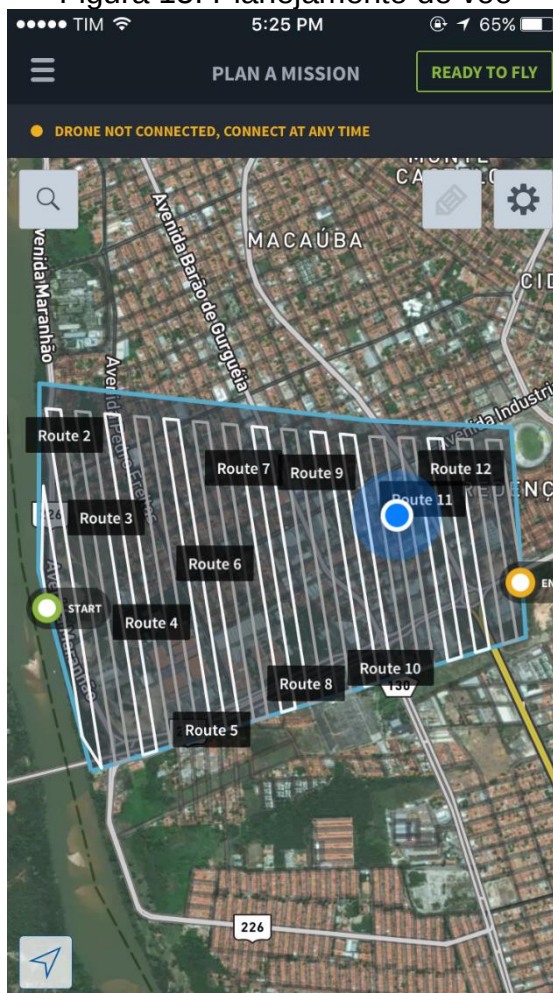
3.4 Aerolevanteamento

3.4.1 Planejamento de voo

O planejamento da missão foi realizado pelo aplicativo para iOS SkyCatch (versão 1.7), no qual foi desenhado um polígono cobrindo a área de estudo (Figura 15). Os parâmetros utilizados para o voo autônomo foram recoberturas longitudinais e laterais de 80% e 60% respectivamente, a uma altitude de 100 metros do ponto de decolagem, obtendo-se assim um GSD em torno de 4 centímetros. O aplicativo calcula

automaticamente a velocidade de cruzeiro, o tempo de disparo da câmera, o número e a distância entre faixas de voo e o tempo total da missão.

Figura 15. Planejamento de voo



Fonte: Autor

3.4.2 Voo e coleta das imagens aéreas

Devido a autonomia da bateria do micro VANT ser de aproximadamente 15 minutos, o levantamento aéreo foi finalizado em dois dias, sendo seis voos por dia em um total de 12 voos. Foram coletadas 3.931 imagens cobrindo uma área total de 3,4 km². No terceiro dia foi feita a coleta em campo dos pontos de controle.

3.4.3 Coleta dos Pontos de controle (GCP)

Para o georreferenciamento das imagens, foi feita a coleta dos GCP na área de estudo com o uso de um receptor GNSS (Figura 16) em modo estático rápido, com duração de 20 minutos em cada ponto, os quais foram corrigidos utilizando o serviço online IBGE-PPP. Foram coletados um total de 14 GCP distribuídos pela área, sendo 6 deles usados apenas como *checkpoints*, que são pontos utilizados para testar a precisão planimétrica e altimétrica dos dados.

A identificação ocular de pontos homólogos nas imagens para coleta dos GCP foi facilitada pelas características urbanas da área como: calçadas, cantos, esquinas, meio-fio, faixa de pedestres, entre outros. Estas características são determinantes na escolha dos pontos de controle em solo.

Figura 16 - Uso de característica urbana para coleta de GCP

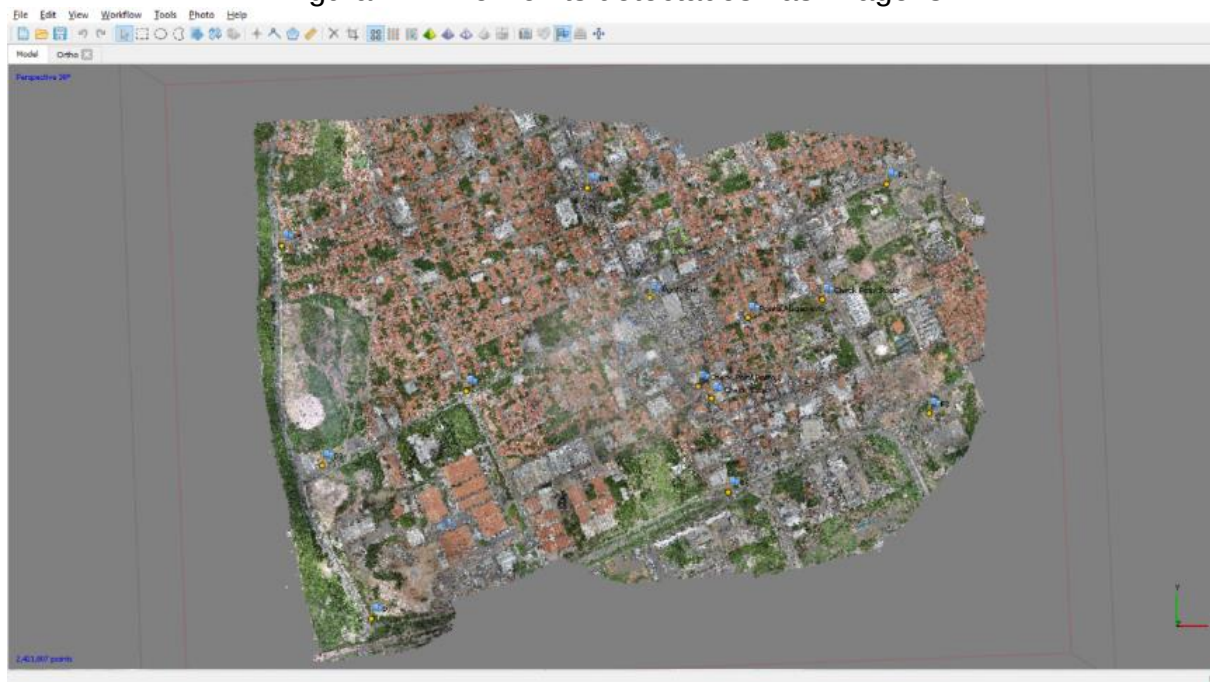


Fonte: Autor

3.5 Processamento das imagens

O processamento das imagens no computador foi realizado utilizando-se o software Agisoft PhotoScan. O primeiro passo para o processamento de imagens dentro do Photoscan é o alinhamento das fotografias, de forma que o software encontre automaticamente os pontos homólogos nas imagens, gerando uma nuvem de pontos de amarração (Tie Points), como mostra a Figura 17.

Figura 17 - Tie Points detectados nas imagens



Fonte: Autor

O segundo passo foi a identificação visual dos pontos onde os GCP foram coletados. Foi preciso ajustar cada marcador em todas as imagens em que o GCP pôde ser visto (Figura 18). Após o ajuste dos marcadores nas duas primeiras imagens, o software automaticamente reposiciona o marcador nas imagens seguintes, restando apenas um ajuste fino para melhor posicioná-los. O passo seguinte foi introduzir as coordenadas coletadas e corrigidas aos marcadores já ajustados e devidamente posicionados, aplicando o mesmo procedimento a todos os GCP.

Figura 18 - Identificação de GCP e inserção de marco no Photoscan

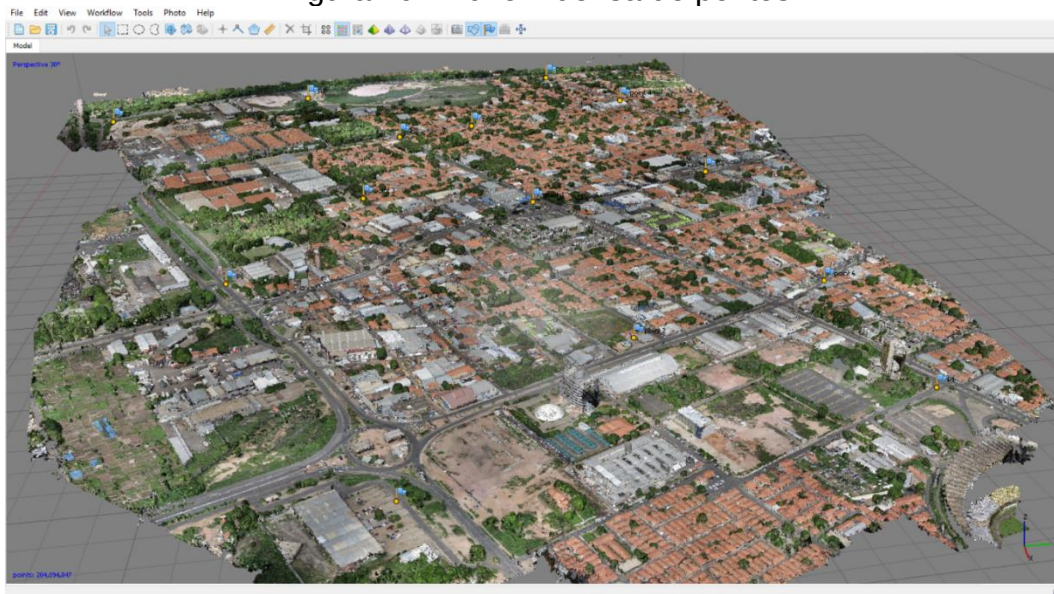


Fonte: Autor

Terminada a identificação e o posicionamento dos GCP, foi efetuada a otimização das imagens baseada nas coordenadas introduzidas. Desta maneira, as imagens são realinhadas, gerando uma nova nuvem de pontos de amarração. Os *checkpoints*, no entanto, não foram utilizados na otimização, pois servirão para testar a precisão planialtimétrica dos dados.

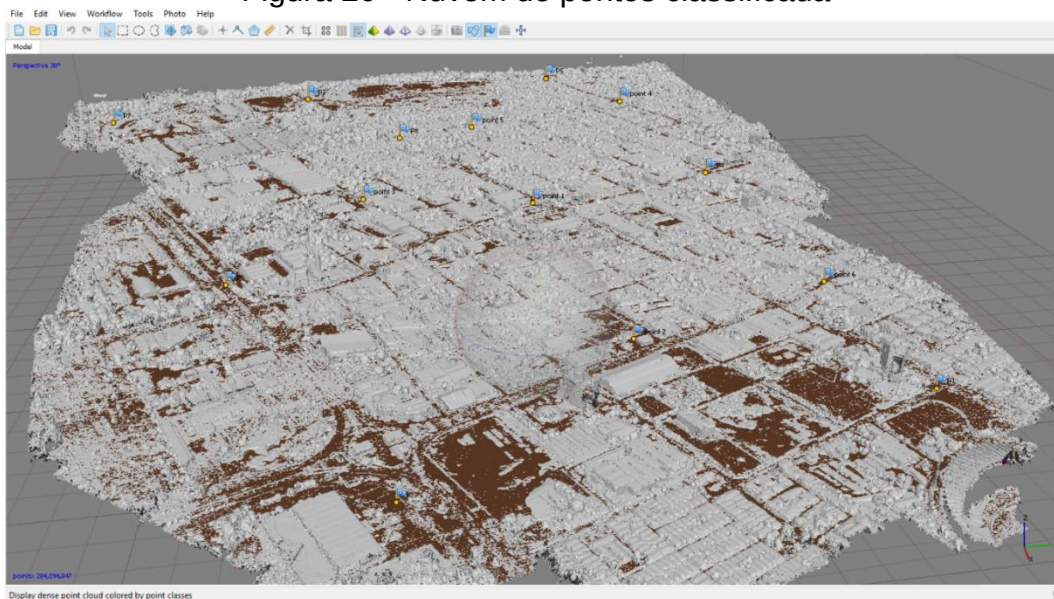
Na terceira parte do processamento foi gerada uma nuvem de pontos densa com mais de 203 milhões de pontos, a partir da qual foi gerado um MDS. A nuvem de pontos foi então classificada automaticamente para a identificação de pontos que representassem o solo. A Figura 19 mostra a nuvem de pontos gerada. A Figura 20 diz respeito à nuvem de pontos com duas classes, sendo uma classe (marrom) para o solo e uma classe (branco) para as feições acima do solo, como árvores e edificações.

Figura 19 - Nuvem densa de pontos



Fonte: Autor

Figura 20 - Nuvem de pontos classificada



Fonte: Autor

Com a nuvem de pontos classificada, foi gerado um modelo 3D filtrando os pontos que não representam o solo. Nesse processo as áreas cobertas por telhados e árvores são interpoladas de forma que são determinadas a essas áreas valores de altitude próximos dos valores presentes no entorno. O modelo 3D foi suavizado para eliminar deformações indesejadas. A partir do modelo 3D foi gerado um MDT e um ortomosaico da área de estudo. Foi utilizada a nuvem de pontos novamente para a geração de um MDS.

3.6 Análises Espaciais em SIG

As depressões topográficas podem sofrer influência das intervenções humanas no terreno, onde edificações e calçadas podem se tornar barreiras artificiais para as depressões. Assim foi utilizado o MDS para detecção das depressões, pois este caracteriza tanto o solo quanto as feições acima dele. No entanto, a presença de árvores e veículos nas vias de circulação causaria a detecção de falsas depressões, sendo necessário assim, a remoção de obstáculos sobre as vias, como acontece no MDT.

Para tal, foi utilizado o software ArcMap de forma que fosse recortado do MDT o perímetro correspondente às vias e inserido no MDS, gerando assim um novo MDS com vias suavizadas e desobstruídas. A junção dos modelos digitais de elevação pode ser vista na Figura 21.

Figura 21 - Junção do MDT (vias) com o MDS (quadras)



Fonte: Autor

As áreas de acúmulo foram identificadas com o uso da ferramenta *“Fill”*, do ArcMap. De acordo com sua descrição, a ferramenta *“Fill”* detecta e preenche automaticamente as células que não possuem direção de drenagem definida. Nenhuma célula ao redor desta célula possui valor menor de elevação. A extensão da depressão é definida pelo ponto de vazamento, isto é, a célula limite com a menor

elevação em direção à área contribuinte da depressão. Se a depressão fosse preenchida com água, este seria o ponto onde a água iria derramar.

Em seguida foi utilizada a ferramenta *“Cut Fill”*, que calcula o volume e extensão de áreas onde houve remoção ou adição de material. Utilizando ambos MDS original e MDS preenchido, a ferramenta tem como saída um raster associado a uma tabela de atributos, listando as áreas que foram modificadas (preenchidas) e informações como volume e área. Áreas com volume negativo são áreas que foram preenchidas e áreas com volume maior que zero tiveram material removido. Já áreas com volume zero não sofreram alteração.

Através da ferramenta *“Raster to Polygon”* o raster foi convertido para polígonos e foram deletadas as áreas que estavam fora da sub-bacia P10. Foram deletadas também as áreas com volume igual ou maior que zero e as áreas que não estavam sobre as vias.

De forma a atribuir valores de profundidade máxima aos acúmulos encontrados, foram utilizadas as ferramentas *“Zonal Statistics”*, *“Raster Calculator”* e *“Raster to Point”* no software ArcMAP.

3.6.1 Zonal Statistics

A ferramenta *“Zonal Statistics”* procura dados estatísticos (p. ex. max, min, soma, média, etc) em arquivos vetoriais utilizando polígonos para delimitação de zonas. O arquivo vetorial utilizado foi o raster *“Profundidade”*, de forma a identificar o valor máximo (max) dentro dos polígonos referentes aos acúmulos, os quais foram utilizados como zonas. O resultado é um raster, aqui chamado de *“max_prof”*, onde os valores de todos os pixels dentro de cada zona são iguais ao maior valor de profundidade encontrado. Os pixels fora das zonas possuem valor nulo.

3.6.2 Raster Calculator

O próximo passo foi identificar quais pixels em *“Profundidade”* correspondem aos valores encontrados em *“max_prof”*. Para este procedimento foi utilizada a ferramenta *“Raster Calculator”*, que permite criar e executar expressões de Álgebra de Mapas. A expressão utilizada foi:

Con("Profundidade" == "max_prof","Profundidade")

Essa sintaxe determina que se um pixel em “Profundidade” possui valor igual ao pixel correspondente em “max_prof”, o valor da célula no raster de saída será igual ao de “Profundidade”. Se o valor da célula em “Profundidade” não é igual ao valor da célula em max_prof, então o valor da célula no raster de saída é determinado como NoData. Portanto, este procedimento retorna, em formato raster, apenas os pixels que possuem valor máximo de profundidade em cada zona.

3.6.3 *Raster to Point*

Os pixels com maior valor de profundidade foram então convertidos para pontos através da ferramenta “*Raster to Point*”. Após a conversão foi possível unir as tabelas dos pontos com polígonos, de forma a copiar as informações de profundidade da tabela dos pontos para a tabela dos polígonos. Essas informações foram utilizadas para a classificação dos acúmulos.

3.7 Classificação dos Acúmulos

A classificação das áreas de acúmulo foi pensada de forma a mostrar a relevância de cada acúmulo, sendo definidas quatro classes: Alta Relevância, Média Relevância, Baixa Relevância e Nenhuma Relevância.

Para caracterizar a relevância dos acúmulos encontrados, foram considerados as características de área e de profundidade de cada acúmulo. Não foram encontrados, no entanto, estudos que definissem os valores mínimos de área e de profundidade que classificassem a relevância dos acúmulos.

As áreas foram classificadas entre grande, média, pequena e muito pequena através da relação entre o tamanho médio da fachada de um lote em área urbana, que é igual a 10 m, e a largura média de uma via local, também de 10 m.

As profundidades foram classificadas entre alta, média e baixa com base na profundidade de segurança recomendada pelas montadoras de veículos. A profundidade de segurança recomendada a veículo popular para trafegar em uma área alagada, é de até 20 cm, que é quando as lâminas de água ultrapassam a metade dos pneus.

As informações de área foram divididas em 4 categorias, como é representado na Tabela 1:

Tabela 1. Classificação dos acúmulos por tamanho.

TAMANHO DA ÁREA	CLASSIFICAÇÃO
$\geq 100 \text{ m}^2$	Grande
$\geq 50 \text{ m}^2$ e $< 100 \text{ m}^2$	Médio
$\geq 5 \text{ m}^2$ e $< 50 \text{ m}^2$	Pequeno
$< 5 \text{ m}^2$	Muito Pequeno

Fonte: Autor

A classificação dos acúmulos a partir dos valores de profundidade pode ser vista na Tabela 2:

Tabela 2. Classificação dos acúmulos por profundidade.

PROFUNDIDADE	CLASSIFICAÇÃO
$\geq 0,20 \text{ m}$	Alta
$\geq 0,10 \text{ m}$ e $< 0,20 \text{ m}$	Média
$< 0,10 \text{ m}$	Baixa

Fonte: Autor

Após a classificação das dimensões e profundidades dos acúmulos, as relevâncias foram definidas como mostra a Tabela 3:

Tabela 3 - Esquema para classificação de relevância dos acúmulos.

Profundidade Área	ALTA	MÉDIA	BAIXA
GRANDE	Alta Relevância	Alta Relevância	Média Relevância
MÉDIO	Alta Relevância	Média Relevância	Baixa Relevância
PEQUENO	Baixa Relevância	Baixa Relevância	Nenhuma Relevância
MUITO PEQUENO	Nenhuma Relevância	Nenhuma Relevância	Nenhuma Relevância

Fonte: Autor

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Qualidade e precisão do aerolevantamento

Através do processamento das imagens do aerolevantamento foi possível obter uma nuvem de pontos de alta densidade, um modelo 3D, modelos digitais de elevação e um ortomosaico da área. A precisão cartográfica desses produtos teve relação direta com o georreferenciamento através dos pontos de controle.

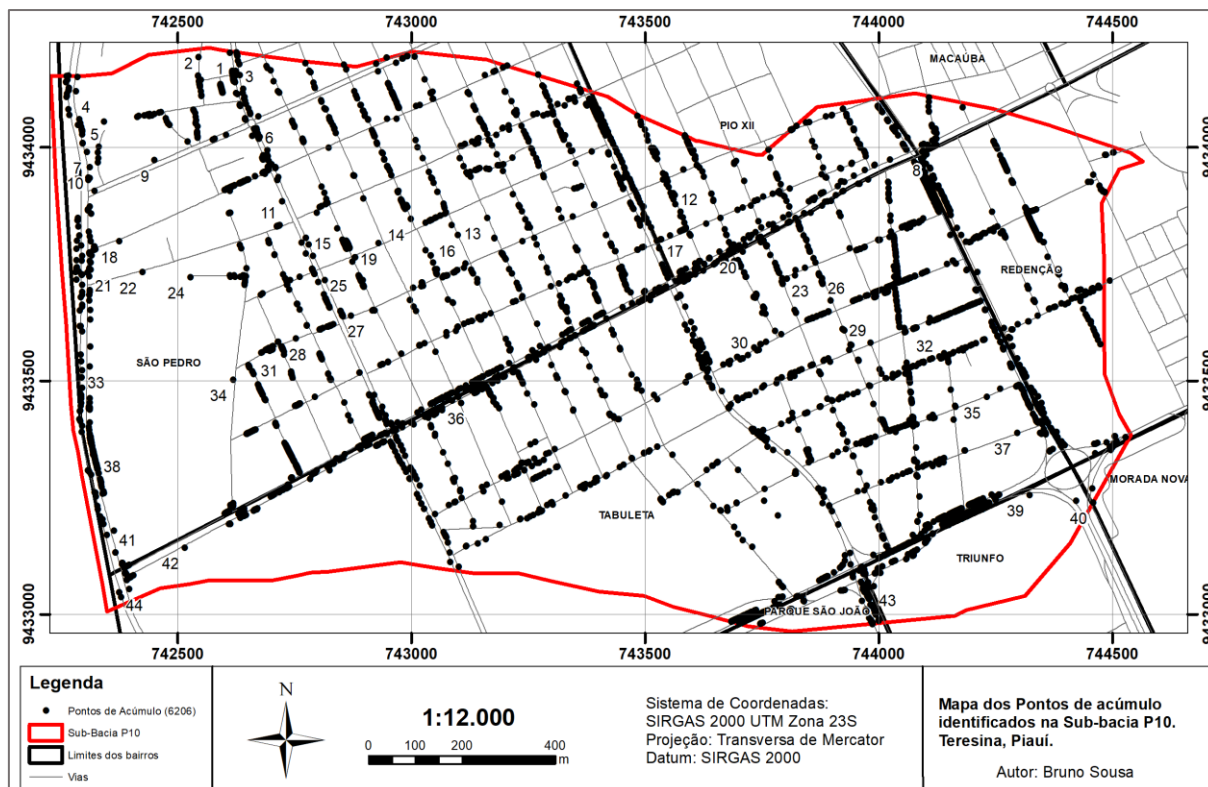
De acordo com o relatório de processamento do Photoscan, os *checkpoints* obtiveram precisão planimétrica de 15,5 cm e precisão altimétrica de 7,25 cm. Os produtos gerados se enquadram na Classe A do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) digital para planimetria e na Classe A do PEC digital altimétrico para Pontos Cotados, MDT, MDS e MDE, ambos na escala de 1:1000. Assim, constata-se que as análises espaciais foram feitas a partir de dados de alta precisão.

4.2 Resultados das análises espaciais

A metodologia aplicada na detecção das depressões foi capaz de identificar tanto acúmulos conhecidos pela comunidade, como também áreas que ainda não sofreram alagamentos, mas que, devido à topografia, podem alagar caso o sistema de drenagem falhe durante um alto fluxo superficial provocado por chuvas intensas.

Foram encontradas um total de 6206 áreas de acúmulo dentro do perímetro da sub-bacia estudada, sendo estes acúmulos com áreas variando de aproximadamente 0,029 m² até 6449,58 m² e profundidades que vão de 0,000004 metros até 2,53 metros. A Figura 22 a seguir contém o mapa que mostra a localização e distribuição dos 6206 acúmulos em forma de pontos.

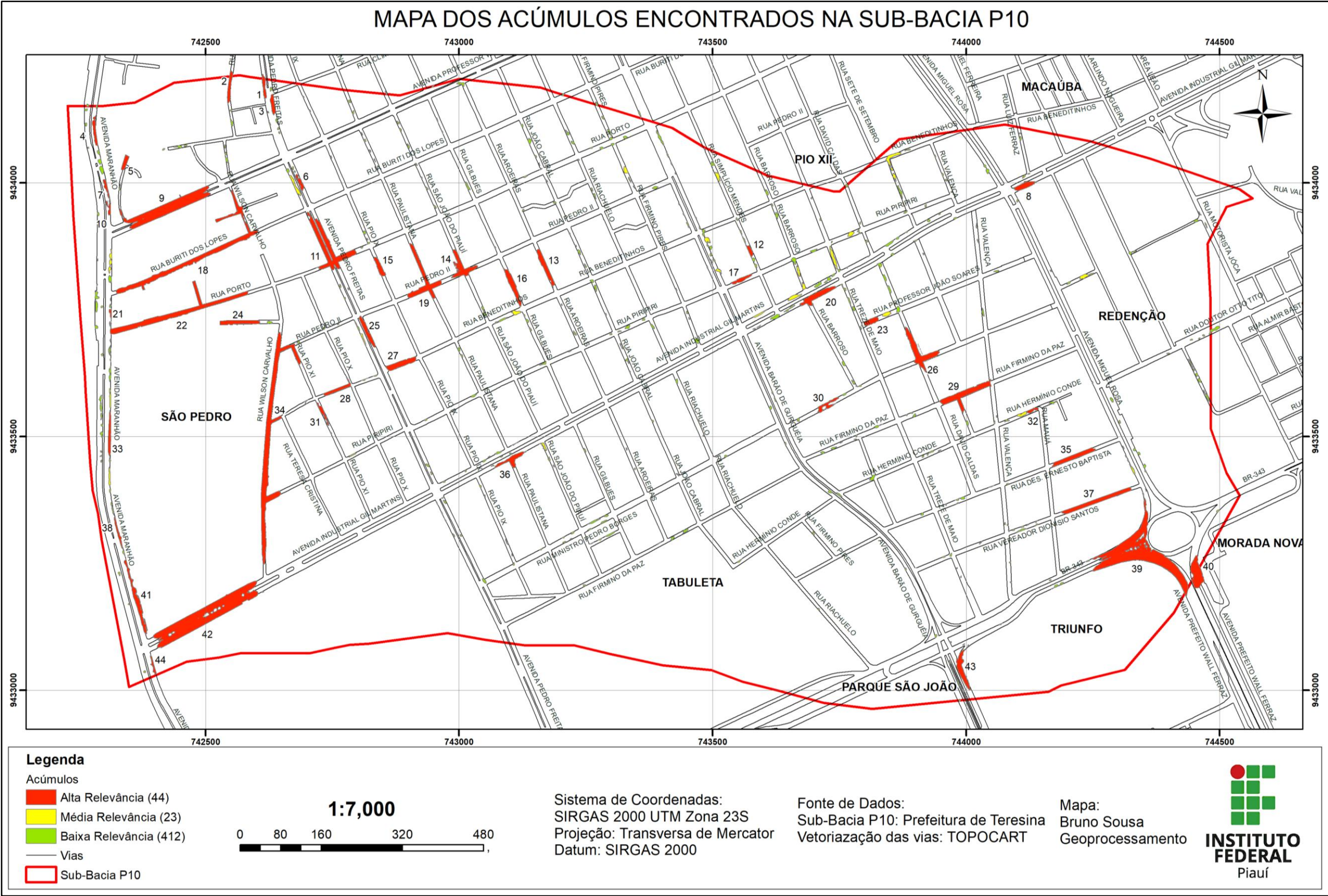
Figura 22 - Pontos de acúmulo encontrados



Fonte: Autor

Quanto à relevância das áreas detectadas, 44 acúmulos foram classificados como Alta Relevância, 23 acúmulos como Média Relevância, 412 acúmulos como Baixa Relevância e 5727 acúmulos foram classificados como Nenhuma Relevância. A Figura 23 mostra as áreas de acúmulo de baixa, média e alta relevância já identificadas dentro de suas respectivas classes. Os pontos de alta relevância foram numerados para facilitar a identificação individual (A lista com as coordenadas de cada ponto caracterizado com alta relevância está representada no Apêndice A).

Figura 23 - Mapa de relevância dos pontos de alagamento.



Fonte: Autor

Os acúmulos classificados como Nenhuma Relevância se devem principalmente a possíveis erros na geração do MDE. Os acúmulos com baixa relevância, por sua vez, correspondem desde possíveis erros no modelo digital até pequenos buracos que podem virar poças d'água. Já os acúmulos de média e alta relevância são os que mais merecem atenção pois podem se tornar sérios alagamentos. Os percentuais dos acúmulos por classe podem ser vistos na Tabela 4:

Tabela 4. Porcentagem das classes de relevância dos acúmulos.

RELEVÂNCIA	%
ALTA	0,71%
MÉDIA	0,37%
BAIXA	6,64%
NENHUMA	92,3%

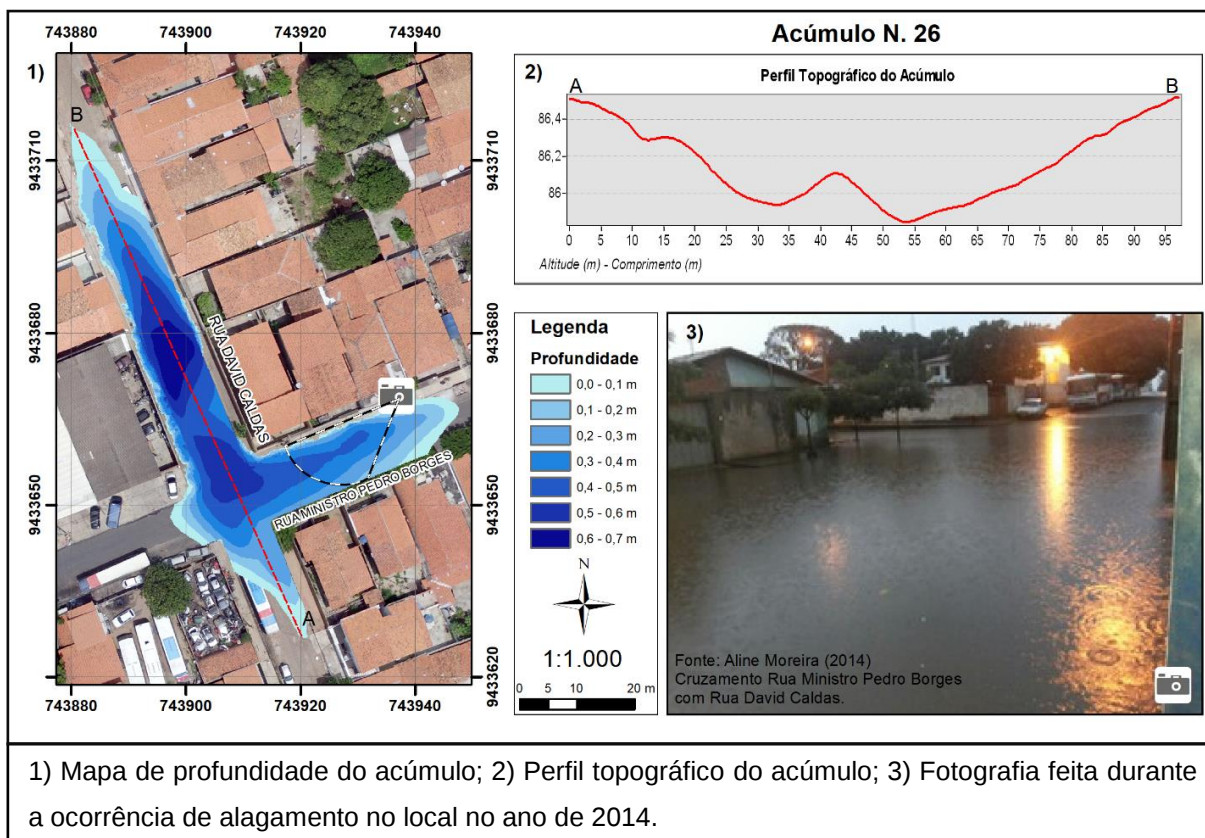
Fonte: Autor

De acordo com as análises, aproximadamente 30% dos acúmulos de alta ou média relevância se encontram em avenidas. No topo da lista podemos citar a Avenida Pedro Freitas, com 6 acúmulos, seguida pela Avenida Industrial Gil Martins, com 5 acúmulos. A quantidade de acúmulos chama a atenção principalmente pelo fato de serem duas das mais importantes vias da área, e essenciais para o sistema de transporte público. A lista completa das vias com acúmulos de alta ou média relevância podem ser vistas no Apêndice B.

4.3 Alagamentos conhecidos

Os acúmulos classificados como Alta Relevância possuem notável similaridade com muitos dos alagamentos que ocorrem anualmente na sub-bacia P10, a exemplo do acúmulo Nº 26, que consiste em um recorrente alagamento no cruzamento das vias Ministro Pedro Borges e David Caldas, no bairro Tabuleta. A Figura 24 mostra alguns dados detectados junto de um registro fotográfico do alagamento:

Figura 24. Esquema com informações sobre o acúmulo N° 26



Fonte: Autor

A lâmina d'água do acúmulo N° 26, que pode passar de 70 centímetros, ocupa todo o perímetro das ruas e calçadas, acarretando na interrupção do tráfego de veículos e pedestres. Além disso, a população residente na área é obrigada a usar barreiras nas portas para evitar que tenham suas casas inundadas. Dessa forma, os moradores ficam ilhados em suas moradias à espera da diminuição do nível da água.

Apesar de possuir sistema de drenagem, alagamentos nesse cruzamento são altamente recorrentes. Além da existência de uma depressão no local, podemos citar outras possíveis causas relacionadas a esses alagamentos: a vazão do fluxo superficial pode ser maior que a comportada pelo sistema de drenagem; o lixo presente nas ruas pode entupir os bueiros e bocas de lobo presentes na área, os quais fazem parte do sistema de drenagem e podem ser vistos na Figura 25 a seguir.

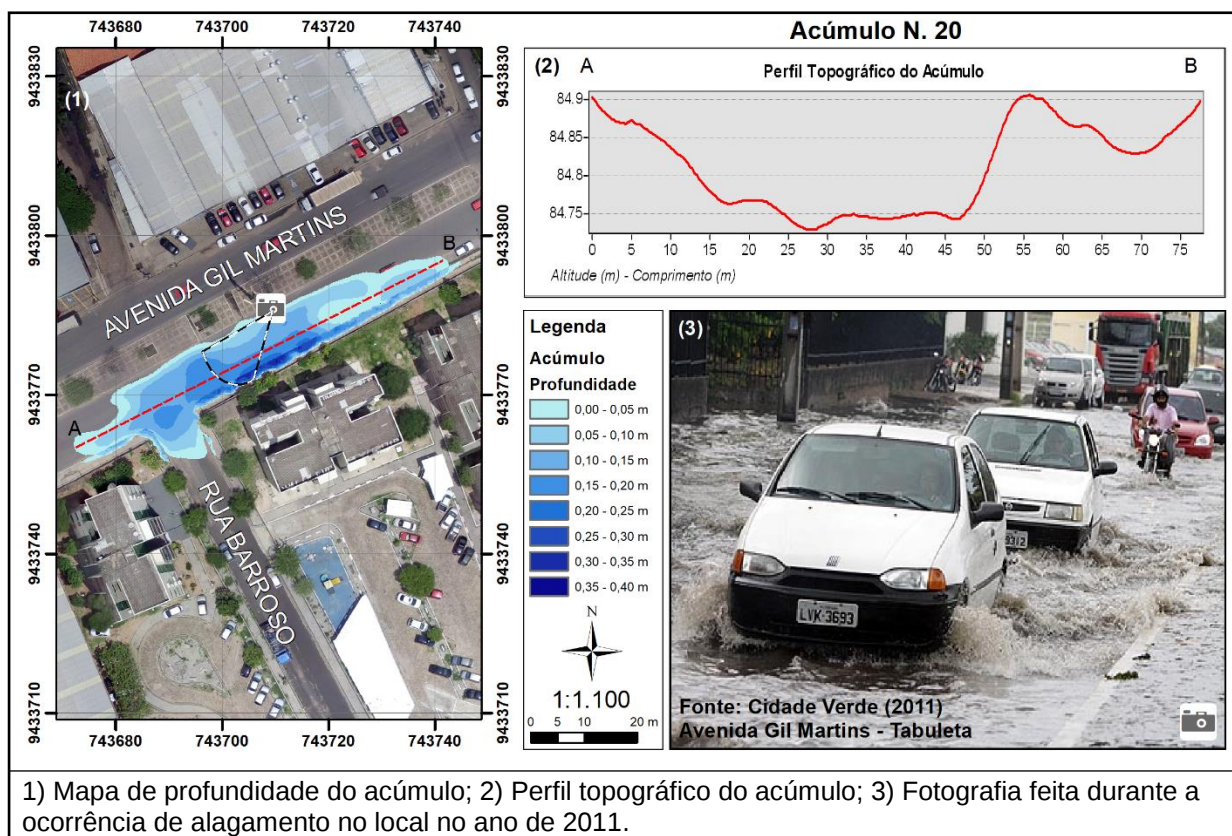
Figura 25. Bueiro e bocas de lobo presentes na área



Fonte: CONCREMAT (2012)

Outro alagamento bastante conhecido pela comunidade e que também possui alta recorrência é o acúmulo de N° 20, que, como mostra a Figura 26, acontece no encontro da Rua Barroso com Avenida Gil Martins.

Figura 26. Esquema com informações sobre o acúmulo N° 20



Fonte: Autor

O fato do acúmulo N° 20 se encontrar em uma avenida de grande movimentação e que também é um importante corredor de ônibus, dá ainda mais

relevância para este local. O tráfego de pedestres e veículos na Avenida Gil Martins é muito prejudicado no sentido noroeste, causando engarrafamentos e danos a veículos que tentam atravessar a área alagada.

O acúmulo N° 20 se encontra logo após o fim das tubulações do mesmo sistema de drenagem presente no acúmulo N° 26. Isso significa que as águas recolhidas na região do acúmulo N° 26 acabam possivelmente indo para a região do acúmulo N° 20, onde, devido à topografia do terreno, o escoamento da água pode não ocorrer, o que, conseqüentemente, acarretaria no alagamento da área.

5 CONCLUSÃO

Os VANTs vêm sendo largamente empregados em mapeamentos com diversas aplicações por se tratarem de equipamentos de fácil operação, de custo relativamente baixo e que não requerem uma logística complexa no planejamento e execução dos voos. Nesta pesquisa, O uso do VANT DJI Phantom 3 Professional e as análises espaciais realizadas em SIG se mostrou adequados para a elaboração dos produtos cartográficos propostos.

O uso de alvos presentes na paisagem também atendeu as necessidades do georreferenciamento, evitando assim a confecção de alvos artificiais e, conseqüentemente, reduzindo os custos do levantamento, sendo possível reconhecê-los na maioria das fotografias tomadas. Estes alvos, portanto, são apropriados para a função de pontos de controle no georreferenciamento e também subterfúgio ao controle de qualidade.

Os *checkpoints*, utilizados como ferramentas de controle de qualidade, tornaram evidente que podem ser gerados produtos cartográficos com alto grau de precisão para os parâmetros utilizados. Isto é comprovado pela elaboração dos produtos cartográficos em escala de 1/1000 ou menores, na Classe A do PEC-DIGITAL.

No que diz respeito às análises espaciais, os componentes do SIG foram essenciais para a identificação e classificação das áreas de acúmulo, gerando uma gama de informações sobre essas áreas que dificilmente seriam obtidas apenas com base nos dados iniciais gerados pelo processamento das imagens. Pelas informações geradas pelo SIG podemos citar os valores de profundidade, cálculos de áreas, localização geográfica dos acúmulos, assim como, a produção de mapas de fácil interpretação. Por isso, é correto afirmar que os SIG são imprescindíveis para o manuseio e análise de dados aerolevantados e que seus resultados podem ser utilizados pelas autoridades nos estudos de melhoria dos sistemas hídricos da cidade de Teresina, assim como, serve de metodologia para possíveis monitoramentos das áreas de risco.

Vale ressaltar também que a classificação dos acúmulos de acordo com os critérios de relevância foi decisiva para a identificação dos acúmulos que devem ter uma maior importância e dos que podem ser desconsiderados, visto que dos 6206 acúmulos encontrados, 6139 (98.92% do total) foram classificados como sendo de

Baixa ou Nenhuma Relevância, não necessitando, portanto, de nenhum estudo mais aprofundado. Assim, foi possível identificar as áreas de Média e Alta Relevância (1.08%), que realmente precisam de atenção e mais estudos.

Não foram encontrados outros estudos que definissem critérios para classificar áreas de alagamento, logo, a classificação criada nesta pesquisa vai poder auxiliar futuras pesquisas. Recomenda-se ainda, em trabalhos futuros, que seja considerado, para a identificação e classificação das áreas de acúmulo, valores de precipitação de chuvas, podendo, assim, calcular com precisão o volume de água que chega até as áreas de acúmulo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ALMEIDA, W. S. DE; SILVA, L. S.; CHRISTAKOU, E. D.; JÚNIOR, E. E. DE A. S.; SOUZA, N. M. DE; LIMA, C. H. R. **Avaliação dos Dados de Alta Resolução Espacial Obtido por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para Produção de Modelo Digital de Terreno**. Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, n. 1, p. 6381–6388, 2015.

ARONOFF, S. **Geographic information systems: a management perspective** Geographic information systems: a management perspective, 1989. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0024815502&partnerID=tZOtx3y1>>

BUFFON, E. A. M.; PAZ, O. L. DE S. DA; SAMPAIO, T. V. M. **Uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (Vant) Para Mapeamento das Vulnerabilidades à Inundação Urbana: Referenciais e Bases de Aplicação**. Geography Department University of Sao Paulo, v. 9, n. spe, p. 180, 2017.

BYUN, J.; SEONG, Y. B. **An algorithm to extract more accurate stream longitudinal profiles from un"Fill"ed DEMs**. Geomorphology, v. 242, n. September, p. 38–48, 2015.

CÂMARA, G.; AGUIAR, A. P. .; ESCADA, M. I. .; AMARAL, S.; CARNEIRO, T. .; MONTEIRO, A. .; ARAÚJO, R.; VIEIRA, I. .; BECKER, B. **Amazon deforestation models**. Science, v. 307, p. 1043–1044, 2005.

CONCREMAT. **Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina**. v. 25, 2012.

FERNANDES, N. DA S. **Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação em Santa Maria, RS**. 2016.

FONTES, L. C. A. DE A. **Levantamentos aerofotogramétricos aplicados à topografia**. Fundamentos De Aerofotogrametria, p. 18, 2008.

FRANCISCO, C. N. **Conceitos de Geoprocessamento**. Universo, n. 1996, p. 17–27, 2014.

GALVÃO, G. M. **Acurácia da mosaicagem gerada por veículo aéreo não tripulado utilizado na agricultura de precisão**. 2014.

HYDRUS; ENGECOR. **CONTRATO No 05/2014 - Prestação de serviços de engenharia para elaboração de estudos e projetos de engenharia para manejo de águas pluviais (LOTE VII)**. 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

JORGE, L. A. DE C.; INAMASU, R. Y. **Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão**. Ferramentas para agricultura de precisão, p. 109–134, 2013.

KAKAES, K.; GREENWOOD, F.; LIPPINCOT, M.; DOSEMAGEN, S.; MEIER, P.; WICH, S. **Drones and aerial observation: new technologies for property rights, human rights, and global development**, n. July, p. 35–47, 2015.

MENEZES. **Zoneamento das áreas de risco de inundação na área urbana de Santa Cruz do Sul – RS**. 2014.

MINISTÉRIO DAS CIDADES / INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT – **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176 p.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas**. 4.ed.rev.atual. Brasília, DF: Embrapa, 2015.

MURANETO L. **VANT e DRONES – A Aeronáutica ao alcance de todos**. 2ª Edição. 2017.

NEX, F.; REMONDINO, F. **UAV for 3D mapping applications: A review**. Applied Geomatics, v. 6, n. 1, p. 1–15, 2014.

NITER, U. F. F. **Conceitos de Geoprocessamento**. Universo, n. 1996, p. 17–27, 1995.

PAULA, J. C. D. E. **Desenvolvimento de um VANT do tipo quadrirrotor para obtenção de imagens aéreas em alta definição**. 2012.

PEGORARO, A. J.; SALETE, J.; PHILIPS, J. W. **Veículo Aéreo não Tripulado: Uma Ferramenta de Auxílio na Gestão Pública**. p. 176–187, 2013.

SOUZA, G. D. E. **Análise da viabilidade do uso de vant para mapeamentos topográfico e de cobertura e uso da terra**. 2015.

THOENI, K.; GUCCIONE, D. E.; SANTISE, M.; GIACOMINI, A.; RONCELLA, R.; FORLANI, G.; MODELLING, M.; ENGINEERING, L. M.; PHOTOGRAMMETRY, C. R.; CAMERA, A.; FEATURES, N. **The potential of low-cost rpas for multi-view reconstruction of sub-vertical rock faces**. 2015.

XIMENES, E. F. **Enchentes e Saúde : levantamento das diferentes abordagens e percepções, Região Médio Paraíba, RJ**. p. 1–145, 2010.

APÊNDICE A – Lista das coordenadas dos acúmulos de Alta Relevância.

ID	Profundidade (m)	Volume (m³)	Area (m²)	Coordenada X	Coordenada Y
1	0,20	13,72	226	742612,02	9434202,27
2	0,63	115,34	327	742545,02	9434193,09
3	0,19	19,21	243	742633,10	9434154,15
4	0,19	12,94	276	742283,14	9434119,29
5	0,83	83,89	212	742343,34	9434054,84
6	0,12	7,05	189	742692,28	9433993,79
7	0,13	5,09	143	742306,61	9433989,54
8	0,16	19,18	381	744102,69	9433984,26
9	1,13	1852,58	3415	742451,15	9433972,19
10	0,12	3,38	119	742312,39	9433956,72
11	1,78	1521,42	2368	742723,57	9433883,76
12	0,15	9,60	138	743576,21	9433861,15
13	0,77	201,18	614	743162,81	9433848,39
14	0,77	236,13	879	742999,05	9433845,84
15	1,19	126,83	324	742841,59	9433825,44
16	0,98	280,92	622	743099,89	9433811,49
17	0,69	37,36	231	743554,10	9433810,81
18	1,81	2757,16	3261	742375,82	9433798,40
19	1,30	951,77	1407	742930,35	9433794,15
20	0,36	74,09	737	743709,53	9433775,95
21	0,23	3,25	51	742314,09	9433737,35
22	2,53	4444,36	2745	742425,64	9433732,25
23	0,33	32,50	277	743820,91	9433725,45
24	1,67	484,00	563	742528,35	9433721,54
25	0,18	38,80	455	742815,40	9433715,41
26	0,70	403,83	1233	743897,26	9433671,88
27	1,29	435,84	612	742871,52	9433639,40
28	0,94	153,23	339	742752,99	9433590,09
29	0,94	777,83	1309	743983,14	9433581,07
30	0,17	9,63	329	743733,84	9433570,70
31	0,10	6,38	205	742728,16	9433555,57
32	0,17	7,99	112	744130,40	9433551,99
33	0,16	17,83	345	742312,90	9433530,06
34	2,34	5112,98	4886	742619,16	9433502,17
35	0,84	297,40	684	744231,75	9433465,10
36	0,36	45,69	490	743106,70	9433452,35
37	1,90	1144,97	1051	744296,37	9433387,90
38	0,14	6,00	189	742331,60	9433301,85
39	1,50	2949,84	6450	744323,58	9433255,09
40	0,61	167,58	1012	744459,11	9433239,10
41	0,21	47,41	896	742364,25	9433179,07
42	1,84	6358,88	6268	742516,11	9433142,51
43	0,44	88,35	692	743990,45	9433059,87
44	0,11	4,12	123	742397,07	9433053,41

APÊNDICE B – Listas da quantidade de acúmulos por logradouro.

ID	Nome	Tipo	Nº de Acúmulos
1	Avenida Pedro Freitas	Secundária	6
2	Avenida Industrial Gil Martins	Secundária	5
3	Rua Beneditinos	Residencial	3
4	Rua Pedro Segundo	Residencial	3
5	Rua São João do Piauí	Residencial	2
6	Rua Sete de Setembro	Residencial	2
7	Rua Barroso	Residencial	2
8	Rua Pio XI	Residencial	2
9	Rua Porto	Residencial	2
10	Rua Piripiri	Residencial	2
11	Rua Wilson Carvalho	Residencial	2
12	BR 343	Rodovia	2
13	Rua Paulistana	Residencial	2
14	Rua Professor João Caldas	Residencial	2
15	Rua Ministro Pedro Borges	Residencial	2
16	Rua Conde Herminio	Residencial	2
17	Avenida Presidente Getúlio Vargas	Primária	1
18	Avenida Getúlio Vargas	Primária	1
19	Av, Henry Wall de Carvalho	Primária	1
20	Av. Prof. Valter Alencar	Secundária	1
21	Acesso à Avenida Prefeito Wall Ferraz	Secundária	1
22	Rua Pio IX	Residencial	1
23	Rua Burití dos Lopes	Residencial	1
24	Rua Simplicio Mendes	Residencial	1
25	Rua Giubúes	Residencial	1
26	Rua Firmino Pires	Residencial	1
27	Rua Oeiras	Residencial	1
28	Rua Treze de Maio	Residencial	1
29	Acesso à Avenida Getúlio Vargas	Primária	1
30	Rua David Caldas	Residencial	1
31	Rua Firmino da Paz	Residencial	1
32	Rua Ernesto José Baptista	Residencial	1
33	Acesso à BR 316	Secundária	1
34	Rua Sem Nome	Residencial	1