

FAMIG – FACULDADE MINAS GERAIS
ELVIS APARECIDO SILVA VIDAL

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE METODOLOGIAS DE LEVANTAMENTO
POR RTK E AEROFOTOGRAMETRIA POR DRONE PARA
ACOMPANHAMENTO DE VOLUME DE TERRA EM OBRAS DE
TERRAPLENAGEM**

Belo Horizonte
2024

ELVIS APARECIDO SILVA VIDAL

**ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE METODOLOGIAS DE LEVANTAMENTO
POR RTK E AEROFOTOGRAMETRIA POR DRONE PARA
ACOMPANHAMENTO DE VOLUME DE TERRA EM OBRAS DE
TERRAPLENAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a FAMIG
– Faculdade Minas Gerais como exigência parcial à
obtenção do título de graduação em Engenharia
cartográfica e de Agrimensura.

Orientador: Prof.^o Diego de Jesus Queiroz Rosa;
Orientador: Prof.^o Marconi Lacerda Pires.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. JUSTIFICATIVA	7
3. PROBLEMA/SOLUÇÃO PROPOSTA PELO PROJETO.....	7
4. OBJETIVOS	8
4.1 OBJETIVO GERAL.....	8
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
5. REFERÊNCIAL TEÓRICO	9
5.1 FUNDAMENTOS TOPOGRÁFICOS	9
5.2 FOTOGRAMETRIA	10
5.2.1 Fotogrametria digital.....	11
5.2.2 Orientação da câmera.....	11
5.2.3 Veículo aéreo não tripulado.....	12
5.3 LEVANTAMENTO POR RTK.....	12
5.3.1 Acompanhamento de volume de terra em obras de terraplenagem	13
5.4 AEROFOTOGRAMETRIA POR DRONE	14
5.4.1 Acompanhamento de volume de terra em obras de terraplenagem	15
5.5 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS METODOLOGIAS.....	16
5.5.1 Precisão	16
5.5.2 Tempo de Execução e Custo	16
5.6 ANÁLISE DE CASO.....	17
6. METODOLOGIA.....	24
7. CONCLUSÃO.....	25
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Região de interesse; Ortofoto com drone e nuvem de pontos do RTK.....	18
Figura 2 - 1º cálculo de volume; Ortofoto de fundo x malha retangular; Cálculo por seções transversais.....	18
Figura 3 - 2º cálculo de volume; Ortofoto de fundo x malha retangular; Cálculo por seções transversais.....	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Volume calculado a partir do levantamento com RTK	19
Tabela 2 - Volume calculado a partir do aerolevanteamento.....	20
Tabela 3 - 2º volume calculado a partir do levantamento com RTK	21
Tabela 4 - 2º volume calculado a partir do aerolevanteamento.....	23

1. INTRODUÇÃO

O acompanhamento preciso do volume de terra movimentado em obras de terraplenagem é uma tarefa essencial para garantir o cumprimento dos projetos de Engenharia Civil e Topografia, tanto em termos de planejamento quanto de controle de custos. Diferentes metodologias de levantamento são aplicadas para realizar esse monitoramento na Engenharia cartográfica, sendo que a precisão, rapidez e custo das técnicas utilizadas têm impacto direto no sucesso dos empreendimentos.

Entre as tecnologias mais amplamente empregadas, destacam-se o posicionamento cinemático em tempo real (RTK) e a aerofotogrametria por drone, ambas oferecendo vantagens específicas para a obtenção de dados geoespaciais.

O posicionamento relativo em tempo real denominado Real-Time Kinematic (RTK) tem sido muito empregado, pois permite ao usuário determinar a sua posição acurada em tempo real. Esse método pode alcançar acurácia centimétrica, sem a necessidade de um processamento posterior dos dados, desde que a solução das ambigüidades obtida for confiável. (DAI et al., 2003)

Com o avanço da tecnologia na área de agrimensura e cartografia, a topografia vem evoluindo, um exemplo disso, é a concepção e o aumento do uso de Drones na área de mapeamento, o qual proporciona um aumento na densidade e na qualidade de dados obtidos da superfície terrestre de forma indireta. Esta tecnologia é baseada nos conceitos de Fotogrametria que, segundo Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ASPRS, é a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes. Esta definição pode ser aplicada nas duas divisões da Fotogrametria que são respectivamente Fotogrametria Terrestre ou Aerofotogrametria. Esta última é derivada da obtenção de fotografia do terreno a partir de câmeras de alta resolução embarcadas em aviões ou Drones. (Tommaselli, 2012)

O método RTK proporciona alta precisão e controle em campo, sendo frequentemente escolhido para obras que exigem um rigor acurado nas medições. Entretanto, o uso de aerofotogrametria por drone tem seus benefícios rapidamente devido à sua capacidade de cobrir grandes áreas em menor tempo,

gerando modelos tridimensionais detalhados e ortomosaicos de alta resolução, o que a torna uma ferramenta atrativa em termos de eficiência operacional.

Ademais, o presente Trabalho de Conclusão de Curso visa realizar uma análise comparativa entre os métodos de levantamento por RTK e aerofotogrametria por drone no acompanhamento de volume de terra em obras de terraplenagem, identificando suas principais vantagens e limitações.

2. JUSTIFICATIVA

A escolha entre as ferramentas e metodologias de RTK e aerofotogrametria por drone no acompanhamento de volume de terra em obras de terraplenagem não deve se basear apenas em suas características individuais, e sim, é importante que seja realizado uma análise comparativa que leve em consideração aspectos como a precisão final, o tempo necessário para execução, os custos envolvidos e a adequação ao tipo de terreno e escopo da obra, para que seja obtido o melhor resultado possível.

3. PROBLEMA/SOLUÇÃO PROPOSTA PELO PROJETO

Como as metodologias de levantamento topográfico por RTK e Aerofotogrametria por drone se comparam em termos de precisão, eficiência e custo no acompanhamento e medição de volumes de terra em obras de terraplenagem?

É incontrovertível que a precisão e eficiência na medição de volumes de terra em obras de terraplenagem são cruciais para o controle de custos, planejamento e execução das atividades, ademais, métodos tradicionais como o levantamento RTK têm sido amplamente utilizados, entretanto, a Aerofotogrametria por drone tem conquistado espaço devido à sua capacidade de cobrir grandes áreas rapidamente. Mediante aos fatos elencados, há uma necessidade de comparar essas duas metodologias para determinar qual delas é mais vantajosa em diferentes cenários de obras.

4. OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma análise comparativa entre as metodologias de levantamento por RTK (Real Time Kinematic) e Aerofotogrametria por drone, visando avaliar a precisão, eficiência e aplicabilidade dessas técnicas no acompanhamento de volume de terra em obras de terraplenagem. - Entender os prós e contras do uso de RTK e por aerofotogrametria com drone em obras de terraplenagem;

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar os resultados dos levantamentos realizados por RTK e por aerofotogrametria com drone em obras de terraplenagem;
- Investigar as limitações e desafios práticos de cada metodologia;
- Propor recomendações para a escolha da metodologia mais adequada para o monitoramento de volumes em obras de terraplenagem.

5. REFERÊNCIAL TEÓRICO

5.1 FUNDAMENTOS TOPOGRÁFICOS

Desde os primórdios o homem sempre demonstrou a necessidade de conhecer o meio em que vive, por questões de sobrevivência, orientação, segurança, guerras, navegação, construção, etc. A representação do espaço, no princípio, caracterizava-se na observação e descrição do meio.

Antigamente, o homem já fazia mapas antes mesmo de desenvolver a escrita, com o tempo, surgiram técnicas e equipamentos de medição que facilitaram a obtenção de dados para posterior representação. A Topografia foi uma das ferramentas desenvolvidas para realizar estas medições.

Etimologicamente a palavra TOPOS, em grego, significa lugar e GRAPHEN descrição, assim, de uma forma bastante simples, Topografia significa descrição do lugar. A seguir são apresentadas algumas de suas definições: “A Topografia tem por objetivo o estudo dos instrumentos e métodos utilizados para obter a representação gráfica de uma porção do terreno sobre uma superfície plana”. DOUBEK (1989)

“A Topografia tem por finalidade determinar o contorno, dimensão e posição relativa de uma porção limitada da superfície terrestre, sem levar em conta a curvatura resultante da esfericidade terrestre”. ESPARTEL (1987)

As operações efetuadas em campo têm o objetivo de coletar dados para a posterior representação, denominando-se de levantamento topográfico. O objetivo principal da sua prática é efetuar o levantamento, executar medições de ângulos, distâncias e desníveis, permitindo representar uma porção da superfície terrestre em uma escala adequada.

A Topografia é dividida em Topometria, que estuda os processos clássicos de medição de distâncias, ângulos e desníveis, cujo objetivo é a determinação de posições relativas de pontos, sendo dividida em planimetria e altimetria; e Topologia, que tem por objetivo principal estudar as formas exteriores do terreno e das leis que regem o seu modelado.

A Topografia pode ser entendida como parte da Geodésia, ciência que tem por objetivo determinar a forma e dimensões da Terra. Na Topografia trabalha-se com medidas (lineares e angulares) realizadas sobre a superfície da Terra e a partir destas medidas são calculados áreas, volumes, coordenadas, etc. Além disto, estas grandezas poderão ser representadas de forma gráfica através de mapas ou plantas. Para tanto é necessário um sólido conhecimento

sobre instrumentação, técnicas de medição, métodos de cálculo e estimativa de precisão. (KAHMEN; FAIG, 1988)

Assim como dito fora por BRINKER; WOLF (1977), o trabalho prático da Topografia pode ser dividido em cinco etapas:

- 1) Tomada de decisão, onde se relacionam os métodos de levantamento, equipamentos, posições ou pontos a serem levantados, etc;
- 2) Trabalho de campo ou aquisição de dados: fazer as medições e gravar os dados;
- 3) Cálculos ou processamento: elaboração dos cálculos baseados nas medidas obtidas para a determinação de coordenadas, volumes, etc;
- 4) Mapeamento ou representação: produzir o mapa ou carta a partir dos dados medidos e calculados;
- 5) Locação.

De acordo com a NBR 13133 (ABNT, 1991, p. 3), Norma Brasileira para execução de Levantamento Topográfico, o levantamento topográfico é definido por: “Conjunto de métodos e processos que, através de medições de ângulos horizontais e verticais, de distâncias horizontais, verticais e inclinadas, com instrumental adequado à exatidão pretendida, primordialmente, implanta e materializa pontos de apoio no terreno, determinando suas coordenadas topográficas. A estes pontos se relacionam os pontos de detalhe visando a sua exata representação planimétrica numa escala pré-determinada e à sua representação altimétrica por intermédio de curvas de nível, com equidistância também pré-determinada e/ou pontos cotados.”

5.2 FOTOGRAMETRIA

O termo Fotogrametria deriva das palavras gregas “photos”, que significa luz, “gramma”, que significa algo desenhado ou escrito e “metron”, que significa medir. Portanto, fotogrametria, de acordo com suas origens, significaria medir graficamente medindo a luz. (ASP, 1979)

Existem diversas definições e de diferentes épocas a respeito de Fotogrametria, sendo algumas delas transcritas a seguir: “Fotogrametria é a ciência e tecnologia de obter informações confiáveis através de processos de registro, interpretação e mensuração de imagens”. (ANDRADE, 1998)

Segundo Andrade (1998), com relação a sua aplicabilidade, a Fotogrametria tem destaque na elaboração de mapas em colaboração com outras ciências, como a Geodésia e Cartografia, sendo que as imagens são

utilizadas para o posicionamento de pontos na superfície terrestre e para mapear temas do objeto fotografado, tais como rede de drenagem, florestas, culturas, redes viárias, feições geológicas e tipos de solo.

5.2.1 Fotogrametria digital

Dito fora por Brito e Coelho (2007), que a fotogrametria digital tem como objetivo principal a reconstrução automática do espaço tridimensional (espaço-objeto), a partir de imagens bidimensionais (espaço-imagem).

A fotogrametria digital tem como fonte primária de dados a utilização de imagens digitais, que estão no formato matricial, onde cada elemento da matriz é chamado de pixel. A imagem pode ser adquirida diretamente de uma câmera digital, ou mesmo através da digitalização matricial de uma imagem analógica, submetendo-a um scanner. Nos anos 90, esse ramo da fotogrametria realmente pôde ser usado de maneira extensiva, graças ao desenvolvimento de computadores com capacidade suficiente para o processamento interativo de imagens digitais, gerando elevados volumes de dados. (BRITO e COELHO, 2007)

5.2.2 Orientação da câmera

A fim de possibilitar a obtenção de medidas precisas da área recoberta pelo levantamento fotogramétrico faz-se necessária a orientação das imagens para a obtenção dos parâmetros com o objetivo de determinar a geometria em que foram tomadas as fotografias. Para isso, realizam-se duas orientações de imagem: a Orientação Interior (OI) e a Orientação Exterior (OE). (BARBOSA e PEREIRA, 2017)

Orientação interior - É a operação de recuperação da posição da fotografia em relação à câmara, sendo assim, permite a reconstrução do feixe perspectivo que gerou as perspectivas (fotografias). (ANDRADE, 1998)

Orientação exterior - Através da orientação exterior (OE) determina-se a posição e altitude (ou orientação) do sensor em relação ao referencial do objeto no instante de tomada de cada fotografia. Para isso devem ser determinadas as coordenadas tridimensionais do centro perspectivo e os ângulos de rotação do sensor para cada fotografia, então, temos seis parâmetros para cada estação de tomada de imagem: três translações do CP (X_{cp} , Y_{cp} e Z_{cp}) e três rotações (ω , φ e k). (ANDRADE, 1998)

5.2.3 Veículo aéreo não tripulado

O VANT é um tipo de veículo aéreo que não necessita de um piloto embarcado para ser guiado. Conforme pauta os estudos de Jensen (2009), o VANT foi criado inicialmente para fins militares, sendo usado em situações de conflitos como a Primeira e a Segunda Guerra Mundial. Hodiernamente são encontrados vários modelos no meio civil com diversas aplicações.

5.3 LEVANTAMENTO POR RTK

O posicionamento relativo em tempo real denominado Real-Time Kinematic (RTK) tem sido muito empregado, pois permite ao usuário determinar a sua posição acurada em tempo real. Esse método pode alcançar acurácia centimétrica, sem a necessidade de um processamento posterior dos dados, desde que a solução das ambigüidades obtida for confiável. (DAI et al., 2003)

No entanto, o uso do RTK possui uma limitação; com o aumento do comprimento da linha de base os resultados são degradados, pois os erros de ionosfera, troposfera e órbita dos satélites obtidos pelo usuário reduzem sua correlação, chegando ao ponto de inviabilizar o posicionamento. (ALVES, 2008)

Este foi método possibilita uma melhor disponibilidade, qualidade (acurácia) e integridade no posicionamento e na navegação. (ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003)

A integridade é um indicador de qualidade utilizado rotineiramente na aviação civil, que pode ser utilizado no posicionamento RTK e RTK em rede. A integridade é uma medida de confiança que se pode ter sobre a exatidão das informações fornecidas por um sistema de navegação, isto é, a capacidade que o sistema tem de informar aos usuários quando o sistema não deve ser utilizado. (HOFMANNWELLENHOF, LICHTENEGGER e WASLE, 2008)

Segundo Monico (2008) e Seeber (2003) a tecnologia RTK é baseada nas seguintes características:

- Transmissão em tempo real dos dados de fase da onda portadora e pseudodistância da estação base para estação móvel ou das correções das observáveis;
- Resolução das ambiguidades para linha de base entre a estação base e o móvel com solução quase instantânea on the way ou on the fly;
- Determinação confiável do vetor da linha de base em tempo real.

No entanto, no posicionamento RTK, os erros envolvidos no processo (ionosfera, troposfera e órbita dos satélites), são proporcionais ao comprimento

da linha de base, o que restringe a distância entre a estação de referência e o usuário a poucos quilômetros. Para superar este problema, foi desenvolvido o conceito de rede de estações de referência (RTK em rede). (LANDAU, VOLLATH e CHEN, 2002; ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003; RIZOS, 2002; WILLGALIS, 2003; FORTES, 2002)

5.3.1 Acompanhamento de volume de terra em obras de terraplenagem

A grandeza de observação fundamental utilizada no RTK é a medida da fase da onda portadora, que propicia precisão subdecimétrica ou melhor (Krueger 1996, p. 55).

Assim como dito fora em MONICO (1996), “outro ponto a ser considerado diz respeito ao atraso no processamento dos dados, decorrido desde sua coleta na estação de referência até o instante em que estes se tornam disponíveis no receptor móvel. Trata-se da latência dos dados. Muitas vezes se faz necessário prever as medidas da estação de referência para alimentar o algoritmo que forma as duplas diferenças. Para latência da ordem de 1 segundo, as duplas diferenças apresentam erros na ordem do centímetro. Podem-se alternativamente, utilizar correções da fase da portadora, que varia muito mais lentamente que a fase propriamente dita, reduzindo os erros inerentes ao atraso. De qualquer forma, a precisão esperada num sistema RTK é da ordem de poucos centímetros.”.

As medidas da fase da onda portadora contêm o termo ambíguo “N”, correspondente ao número inteiro de comprimentos de onda existente entre a antena do satélite e a antena do receptor. A alta precisão oferecida pela técnica RTK só é alcançada após a determinação destas ambiguidades, enquanto a estação móvel estiver em movimento. (MONICO, 1990, p. 219)

A fixação das ambiguidades é uma função do tempo de ocupação, denominado tempo de fixação das ambigüidades, o qual aumenta em proporção ao comprimento da linha de base. As soluções como RTK com ambiguidades reais (float solution) apresentam precisões que variam do metro ao decímetro, enquanto que as ambiguidades fixas (fixed solution) apresentam soluções centimétricas. (SEGANTINE, 2005)

Outra característica que influencia na precisão e na acurácia do posicionamento é a perda de ciclo. Um receptor bom para fazer o levantamento com RTK precisa ter algoritmo que consiga detectar e corrigir as eventuais perdas de ciclos em tempo real, as quais dependem das soluções das

ambiguidades em caminho, outrossim, é necessário que o usuário fique ciente que os códigos matemáticos utilizados para arrumar as ambiguidades nem sempre oferecem soluções corretas, exigindo habilidade, experiência, conhecimento e métodos por parte do topógrafo para avaliar a qualidade dos pontos obtidos no levantamento em tempo real.

5.4 AEROFOTOGRAMETRIA POR DRONE

Com o avanço da tecnologia na área de agrimensura e cartografia, a topografia vem evoluindo, um exemplo disso, é a concepção e o aumento do uso de Drones na área de mapeamento, o qual proporciona um aumento na densidade e na qualidade de dados obtidos da superfície terrestre de forma indireta. Esta tecnologia é baseada nos conceitos de Fotogrametria que, segundo Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing - ASPRS, é a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informação confiável sobre objetos físicos e o meio ambiente através de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes. Esta definição pode ser aplicada nas duas divisões da Fotogrametria que são respectivamente Fotogrametria Terrestre ou Aerofotogrametria. Esta última é derivada da obtenção de fotografia do terreno a partir de câmeras de alta resolução embarcadas em aviões ou Drones. (Tommaselli, 2012)

A Aerofotogrametria por drone é uma técnica de levantamento aéreo que utiliza veículos aéreos não tripulados, conhecidos como VANTs, equipados com câmeras de alta resolução para capturar imagens aéreas que são posteriormente processadas por softwares de fotogrametria. A operação de Aerofotogrametria com drones envolve três etapas principais, que são planejamento do voo, captura de imagens e processamento dos dados.

Conforme destaca Anderson e Mikhail (1998), a fotogrametria envolve a obtenção de medidas precisas a partir de fotografias e permite, com a ajuda de softwares especializados, calcular a distância, ângulos, e até volumes de objetos representados nas imagens. Com o uso de drones, a técnica foi significativamente aprimorada, permitindo coleta de dados rápida, a baixo custo e com alta precisão, especialmente em áreas de difícil acesso.

5.4.1 Acompanhamento de volume de terra em obras de terraplenagem

Um dos principais benefícios da aerofotogrametria por drones é a redução de custos em comparação com métodos tradicionais de levantamento aéreo, como o uso de aviões tripulados ou satélites, os drones podem acessar áreas remotas ou de difícil acesso de maneira mais eficiente, como ressaltado por Nex e Remondino (2014).

O processo de acompanhamento de volumes de terra com drones envolve várias etapas tecnológicas. Primeiramente, o plano de voo é definido, com a rota do drone cobrindo toda a área da obra com sobreposição suficiente para garantir a geração de um modelo tridimensional contínuo. O voo é realizado em intervalos regulares, permitindo que o terreno seja monitorado durante todo o processo de terraplenagem. (Mora et al., 2019)

Durante o voo, o drone captura imagens aéreas que são georreferenciadas por meio de pontos de controle no solo (Ground Control Points, GCPs), aumentando a precisão na comparação de dados entre levantamentos. Essas imagens são processadas por softwares de fotogrametria, como o Pix4D ou o Agisoft Metashape, que utilizam algoritmos para gerar um Modelo Digital de Superfície (MDS). Com o modelo tridimensional do terreno antes e depois da movimentação de terra, é possível calcular com precisão o volume de solo removido ou adicionado. (Faria et al., 2020)

O cálculo do volume de terra movimentado é feito pela diferença entre os modelos digitais de superfície obtidos em diferentes fases da obra. A metodologia da fotogrametria garante precisão subcentimétrica na análise de volumes quando o levantamento é feito corretamente, com o uso de GCPs e drones com sensores de alta resolução. (Jurecka et al., 2016)

A fotogrametria por drone proporciona uma elevada precisão na modelagem de terrenos e no cálculo de volumes. Estudos mostram que a precisão alcançada pela aerofotogrametria é suficiente para atender às demandas da engenharia civil, com margens de erro muito pequenas quando comparadas aos métodos tradicionais. (Nex & Remondino, 2014)

A utilização de drones reduz a necessidade de equipamentos pesados e de mão de obra para levantamentos no terreno. Além disso, minimiza o tempo de inatividade das operações durante a coleta de dados, aumentando a produtividade do projeto. (Colomina & Molina, 2014)

Em ambientes de obra, o uso de drones evita a exposição de trabalhadores a áreas de risco, como grandes escavações ou terrenos instáveis. As medições podem ser realizadas a partir do ar, sem a necessidade de movimentação de equipes em áreas perigosas. (Zhang et al., 2018)

5.5 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS METODOLOGIAS

Ambos os métodos são utilizados na engenharia civil e topografia para medições precisas de volume de materiais movimentados, sendo essenciais para garantir a eficiência, controle de custos e o cumprimento do cronograma das obras. Entretanto, as metodologias diferem em aspectos como precisão, custo, tempo de execução e facilidade de implementação.

5.5.1 Precisão

Em termos de precisão, o RTK oferece medições com precisão centimétrica, sendo a escolha ideal quando é necessário um controle rigoroso de volumes de terra, especialmente em obras de pequena escala ou quando o acompanhamento detalhado é fundamental. A precisão da aerofotogrametria por drone pode variar de alguns centímetros a decímetros, dependendo da qualidade do equipamento, das condições de voo e do processamento das imagens. Em geral, para grandes áreas, a diferença de precisão entre os métodos pode ser negligenciável, mas em áreas menores ou em projetos de alta precisão, o RTK ainda tende a ser mais confiável. (Li et al., 2016)

5.5.2 Tempo de Execução e Custo

Em termos de tempo de execução, a aerofotogrametria por drone é mais eficiente, permitindo a captura de dados em poucas horas, enquanto o processamento das imagens pode ser feito em software especializado em curto prazo. Outrossim, o RTK, exige mais tempo para o levantamento em campo, especialmente em grandes áreas, onde o deslocamento do rover pode se tornar um fator limitante.

No que diz respeito ao custo, a operação de drones tende a ser mais econômica em projetos de grande extensão, uma vez que o levantamento por RTK requer o uso de equipamentos caros e operadores especializados. Além disso, o RTK é mais suscetível a erros em áreas com cobertura densa de vegetação ou obstáculos que interferem na recepção dos sinais GNSS,

enquanto os drones podem operar em ambientes mais variados com menos limitações. (Küng et al., 2012)

5.6 ANÁLISE DE CASO

Foram realizadas 3 medições para quantificar o volume de terra da obra de terraplagem de vias na cidade de Sumaré, no estado de São Paulo, para avaliar a tecnologia mais adequada para fazer o controle de obra mensal. As quatro medições consistiram em:

- 1° drone e RTK - Medição primitiva (em junho/2024);
- 2° drone e RTK – Cálculo de volume (em julho/2024);
- 3° drone e RTK - Cálculo de volume (em agosto/2024).

A intenção dessas medições é encontrar uma relação entre as duas tecnologias no primeiro cálculo de volume e verificar se essa relação se manteve constante na segunda medição, para então, analisar a possibilidade de descarte de uma das tecnologias e manter a mais prática e fidedigna.

Para o cálculo de volume, com metodologia RTK e com aerolevanteamento com drone, foi extraído MDT e o cálculo foi por seções transversais. Foram utilizados o civil 3D e o Agisoft Metashape para todos procedimentos, e os arquivos em DWG, Ortofotó em TIF e Relatórios de processamento estão em anexos.

1º Medição Primitiva; Foi realizado tanto a medição com RTK quanto com drone na seguinte região de interesse.

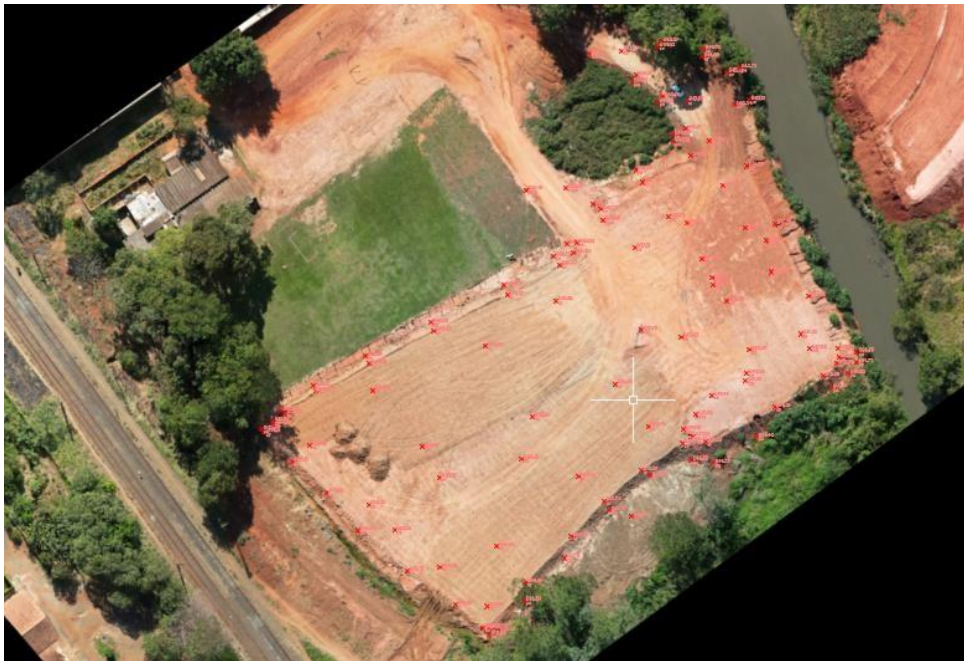


Figura 1 - Região de interesse; Ortofoto com drone e nuvem de pontos do RTK

É possível observar que a Ortofoto foi gerada com pontos de controle conforme relatório de todos processamentos e anexo.

2º Medição e cálculo de volume.

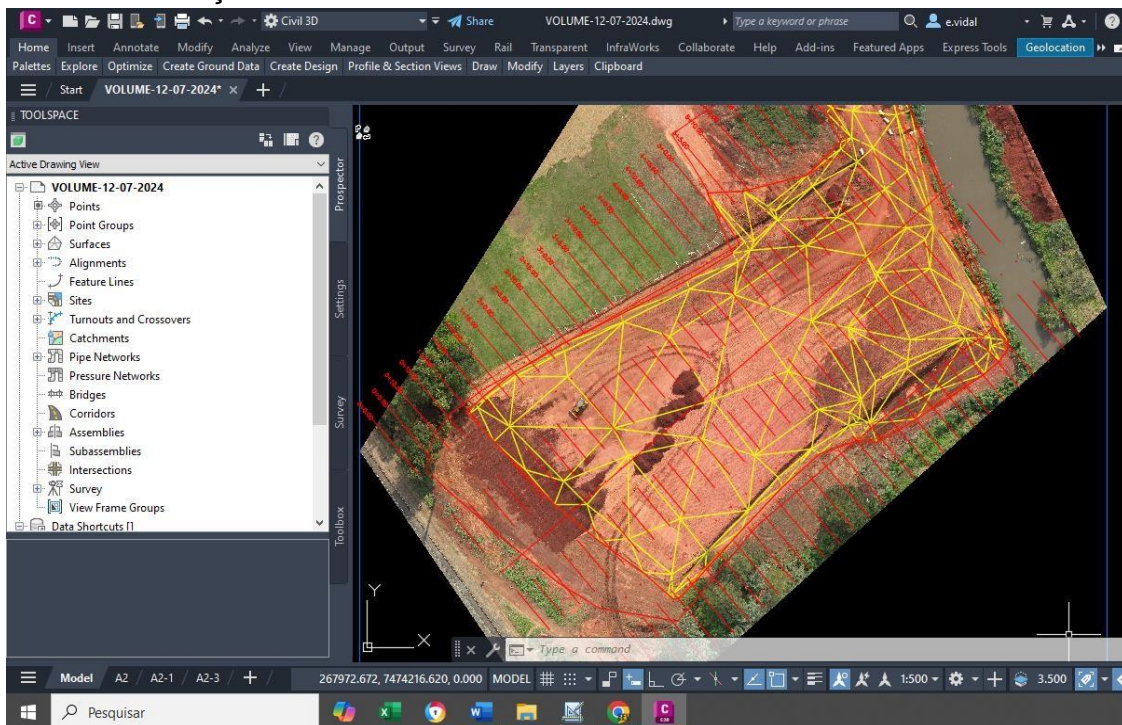


Figura 2 - 1º cálculo de volume; Ortofoto de fundo x malha retangular; Cálculo por seções transversais

Tabela 1 - Volume calculado a partir do levantamento com RTK

Estaca	Área de Corte (m²)	Área de Aterro (m²)	Vol. de Corte (m3)	Vol. de Aterro (m3)	Vol. Corte Acum. (m3)	Vol. Aterro Acum. (m3)	Vol. Líquido
0+0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
0+5,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
0+10,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
0+15,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0
1+0,00	0,00	4,85	0	12,12	0,00	12,12	-12,12
1+5,00	0,00	17,97	0	57,06	0,00	69,18	-69,18
1+10,00	0,24	39,17	0,61	142,85	0,61	212,03	-211,42
1+15,00	0,00	51,85	0,61	227,54	1,22	439,58	-438,36
2+0,00	0,00	55,01	0	267,14	1,22	706,72	-705,5
2+5,00	0,34	49,71	0,86	261,80	2,07	968,51	-966,44
2+10,00	0,54	48,76	2,21	246,17	4,29	1214,69	-1210,4
2+15,00	0,72	49,44	3,17	245,49	7,45	1460,18	-1452,72
3+0,00	0,68	52,28	3,51	254,29	10,97	1714,46	-1703,49
3+5,00	0,62	53,16	3,26	263,60	14,23	1978,06	-1963,83
3+10,00	0,63	54,32	3,12	268,71	17,35	2246,77	-2229,42
3+15,00	0,78	55,11	3,52	273,58	20,87	2520,35	-2499,48
4+0,00	0,68	57,70	3,65	282,03	24,52	2802,38	-2777,86
4+5,00	1,06	58,16	4,35	289,64	28,87	3092,02	-3063,15
4+10,00	0,99	53,53	5,11	279,21	33,98	3371,23	-3337,26
4+15,00	6,98	31,46	19,92	212,47	53,90	3583,70	-3529,8
5+0,00	8,21	16,88	37,98	120,85	91,88	3704,55	-3612,67
5+5,00	14,82	18,61	57,56	88,73	149,44	3793,28	-3643,84
5+10,00	16,67	18,80	78,72	93,53	228,16	3886,81	-3658,64
5+15,00	23,49	23,41	100,4	105,54	328,56	3992,34	-3663,78
6+0,00	21,19	28,13	111,68	128,87	440,24	4121,21	-3680,97
6+5,00	18,32	29,40	98,76	143,82	539,00	4265,04	-3726,04
6+10,00	16,56	28,89	87,2	145,72	626,20	4410,75	-3784,55
6+15,00	12,96	18,98	73,8	119,69	700,00	4530,44	-3830,44
7+0,00	1,78	16,49	36,84	88,69	736,84	4619,13	-3882,28
7+5,00	1,59	12,37	8,43	72,16	745,27	4691,28	-3946,01
7+10,00	2,94	2,84	11,33	38,03	756,61	4729,31	-3972,7

Tabela 2 - Volume calculado a partir do aerolevanteamento

Estaca	Área de Corte (m²)	Área de Aterro (m²)	Vol. de Corte (m3)	Vol. de Aterro (m3)	Vol. Corte Acum. (m3)	Vol. Aterro Acum. (m3)	Volume Líquido (m3)
0+0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
0+5,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
0+10,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
0+15,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00
1+0,00	0,00	8,66	0	21,66	0,00	21,66	-21,66
1+5,00	0,00	35,13	0	109,49	0,00	131,15	-131,15
1+10,00	0,00	38,31	0	183,60	0,00	314,75	-314,75
1+15,00	0,00	42,54	0	202,14	0,00	516,89	-516,88
2+0,00	0,01	51,91	0,03	236,13	0,03	753,02	-752,98
2+5,00	0,08	58,35	0,23	275,64	0,26	1028,66	-1028,40
2+10,00	0,18	66,49	0,65	312,10	0,91	1340,75	-1339,85
2+15,00	0,26	71,50	1,11	344,98	2,01	1685,73	-1683,71
3+0,00	0,11	74,27	0,93	364,43	2,94	2050,16	-2047,22
3+5,00	0,12	78,06	0,58	380,84	3,53	2431,00	-2427,47
3+10,00	0,11	71,30	0,58	373,41	4,11	2804,41	-2800,30
3+15,00	0,08	60,66	0,48	329,91	4,59	3134,32	-3129,73
4+0,00	0,01	51,08	0,22	279,36	4,81	3413,67	-3408,86
4+5,00	0,00	46,00	0,02	242,69	4,83	3656,36	-3651,53
4+10,00	0,00	43,15	0	222,86	4,83	3879,22	-3874,39
4+15,00	5,41	34,34	13,52	193,73	18,35	4072,95	-4054,60
5+0,00	9,99	32,27	38,5	166,53	56,85	4239,48	-4182,63
5+5,00	16,90	32,94	67,22	163,01	124,07	4402,49	-4278,42
5+10,00	16,40	32,41	83,24	163,36	207,31	4565,85	-4358,54
5+15,00	22,48	33,97	97,21	165,95	304,52	4731,81	-4427,29
6+0,00	21,20	36,41	109,22	175,95	413,74	4907,76	-4494,02
6+5,00	21,67	35,78	107,19	180,48	520,92	5088,24	-4567,31
6+10,00	19,47	30,35	102,84	165,34	623,77	5253,57	-4629,80
6+15,00	8,19	11,92	69,14	105,68	692,91	5359,25	-4666,34
7+0,00	1,27	11,07	23,65	57,47	716,57	5416,73	-4700,16
7+5,00	0,19	7,82	3,66	47,22	720,22	5463,94	-4743,72
7+10,00	3,27	5,17	8,66	32,47	728,88	5496,41	-4767,53

Entre as duas tabelas observa-se uma diferença de 794,83 metros cúbicos para mesma região calculada. Outrossim, pela metodologia de aerolevanteamento o volume foi maior. Foi tomado o critério de manter as delimitações das regiões nas duas metodologias.

3º Medição e cálculo de volume. Entre as duas tabelas observa-se uma diferença de 242,86 metros cúbicos para mesma região calculada. Outrossim, pela metodologia de aerolevanteamento o volume foi menor.

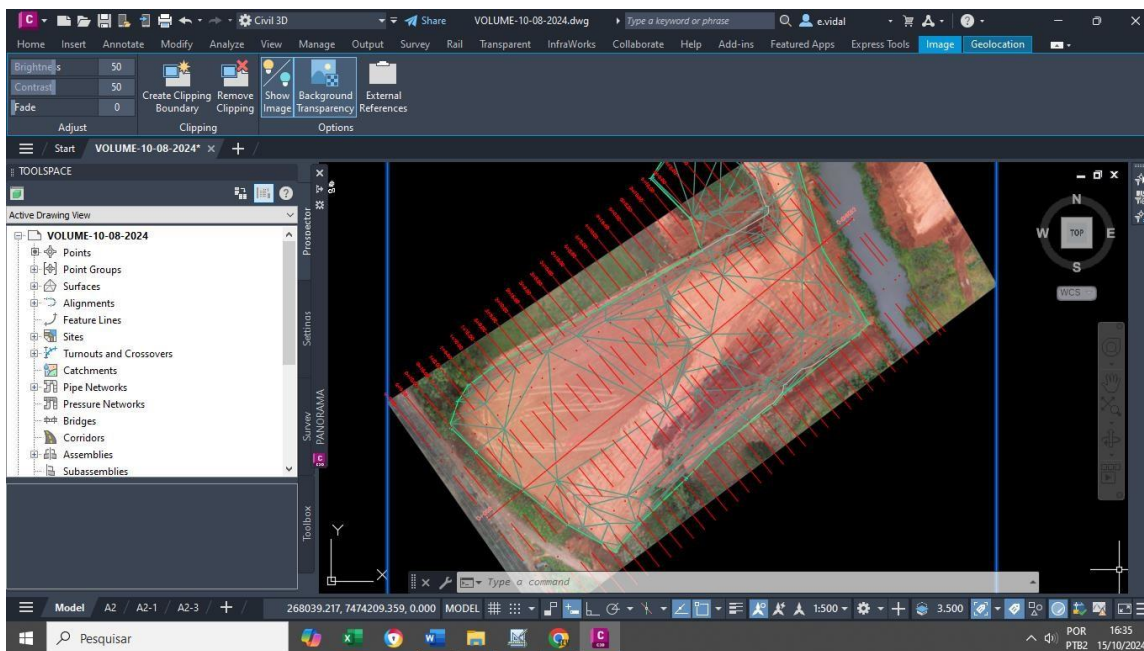


Figura 3 - 2º cálculo de volume; Ortofoto de fundo x malha retangular; Cálculo por seções transversais

Tabela 3 - 2º volume calculado a partir do levantamento com RTK

Estaca	Área de Aterro (m²)	Volume de Aterro (m³)	Volume Aterro Acum. (m³)	Volume Líquido
0+0,00	0,00	0,00	0,00	0
0+5,00	0,00	0,00	0,00	0
0+10,00	0,64	1,59	1,59	-1,59
0+15,00	17,30	44,83	46,42	-46,42
1+0,00	54,21	178,76	225,18	-225,18
1+5,00	67,01	303,03	528,21	-528,2
1+10,00	67,01	335,05	863,26	-863,19
1+15,00	53,40	301,03	1164,29	-1164,17
2+0,00	35,32	221,79	1386,08	-1385,95
2+5,00	25,74	152,63	1538,71	-1532,18
2+10,00	27,41	132,87	1671,58	-1648,83

2+15,00	29,91	143,30	1814,88	-1775,43
3+0,00	30,37	150,69	1965,56	-1913,64
3+5,00	28,80	147,91	2113,47	-2051,4
3+10,00	28,72	143,79	2257,27	-2187,17
3+15,00	29,64	145,90	2403,17	-2326,73
4+0,00	31,95	153,97	2557,14	-2475,33
4+5,00	28,65	151,48	2708,62	-2621,72
4+10,00	19,11	119,40	2828,02	-2736,46
4+15,00	13,25	80,92	2908,94	-2814,04
5+0,00	8,67	54,80	2963,74	-2864,78
5+5,00	9,78	46,12	3009,86	-2904,72
5+10,00	8,05	44,58	3054,44	-2938,05
5+15,00	6,52	36,43	3090,87	-2952,47
6+0,00	13,04	48,91	3139,78	-2973,1
6+5,00	9,05	55,22	3195,00	-3008,13
6+10,00	6,90	39,87	3234,87	-3036,82
6+15,00	6,80	34,25	3269,12	-3058,14
7+0,00	5,27	30,18	3299,30	-3069,15
7+5,00	7,84	32,78	3332,08	-3088,13
7+10,00	3,56	28,51	3360,59	-3114,18
7+15,00	6,75	25,77	3386,36	-3139,27
8+0,00	0,68	18,56	3404,92	-3157,13
8+2,01	0,02	0,70	3405,62	-3157,82

Tabela 4 - 2º volume calculado a partir do aerolevanteamento

Estaca	Área de Corte (m²)	Área de Aterro (m²)	Vol. de Corte (m³)	Vol. de Aterro (m³)	Vol. Corte Acum. (m³)	Vol. Aterro Acum. (m³)	Vol. Líquido (m³)
0+0,00	0,00	14,69	0	0,00	0,00	0,00	0,00
0+5,00	0,00	34,58	0	123,17	0,00	123,17	-123,17
0+10,00	0,02	30,89	0,05	163,67	0,05	286,84	-286,79
0+15,00	0,45	35,06	1,18	164,88	1,23	451,73	-450,50
1+0,00	0,00	44,21	1,12	198,17	2,36	649,90	-647,55
1+5,00	0,02	40,36	0,04	211,43	2,40	861,33	-858,94
1+10,00	0,00	33,07	0,04	183,60	2,44	1044,93	-1042,50
1+15,00	0,12	28,70	0,31	154,44	2,74	1199,38	-1196,63
2+0,00	0,03	23,87	0,39	131,42	3,13	1330,80	-1327,67
2+5,00	0,21	17,96	0,6	104,57	3,73	1435,37	-1431,64
2+10,00	0,13	16,74	0,84	86,75	4,57	1522,12	-1517,55
2+15,00	0,06	19,51	0,47	90,63	5,04	1612,75	-1607,71
3+0,00	0,03	24,95	0,21	111,14	5,25	1723,89	-1718,64
3+5,00	0,00	27,84	0,07	131,97	5,33	1855,86	-1850,53
3+10,00	0,00	28,32	0,01	140,41	5,34	1996,27	-1990,93
3+15,00	0,01	27,72	0,04	140,11	5,38	2136,38	-2131,00
4+0,00	0,05	21,36	0,15	122,71	5,53	2259,09	-2253,56
4+5,00	1,71	11,16	4,4	81,30	9,93	2340,40	-2330,47
4+10,00	1,64	11,84	8,37	57,51	18,30	2397,90	-2379,60
4+15,00	0,19	9,56	4,56	53,50	22,86	2451,41	-2428,55
5+0,00	0,43	7,12	1,55	41,70	24,40	2493,10	-2468,70
5+5,00	0,12	10,82	1,38	44,87	25,78	2537,97	-2512,19
5+10,00	1,63	9,94	4,37	51,90	30,15	2589,88	-2559,73
5+15,00	1,32	7,98	7,36	44,79	37,51	2634,67	-2597,16
6+0,00	0,12	10,40	3,58	45,96	41,09	2680,63	-2639,54
6+5,00	0,49	24,96	1,53	88,42	42,62	2769,05	-2726,43
6+10,00	0,47	13,89	2,42	97,13	45,04	2866,17	-2821,14
6+15,00	0,00	11,41	1,18	63,23	46,22	2929,41	-2883,19
6+18,61	0,00	6,18	0	31,77	46,22	2961,17	-2914,96

6. METODOLOGIA

Pesquisa descritiva, onde foi realizado revisão bibliográfica em livros, artigos científicos e sites de pesquisa empírica online, para sua realização as buscas serão feitas através de bibliotecas digitais, artigos científicos, revistas e documentos informativos. Através do método experimental foi realizado o levantamento e coletado vários dados de campos. Após o processamento de dados e a análise prática como estudo de caso, foi possível obter os resultados esperados pelo método comparativo.

7. CONCLUSÃO

A análise realizada neste estudo é de suma importância para otimizar os processos de controle de terraplenagem, permitindo que engenheiros e topógrafos tomem decisões mais informadas ao escolher a metodologia mais adequada para cada projeto, garantindo assim maior eficiência e precisão nas obras de engenharia civil.

As duas ferramentas, RTK e Aerofotogrametria por drone são métodos eficazes para o acompanhamento de volumes de terra em obras de terraplenagem, cada um com suas vantagens e limitações. O RTK proporciona maior precisão e é ideal para projetos que exigem controle rigoroso em áreas menores, enquanto a aerofotogrametria por drone se destaca pela rapidez, custo-benefício e pela capacidade de cobrir grandes áreas em curto tempo.

Outrossim, a escolha entre as duas metodologias deve considerar o tamanho do projeto, a precisão requerida e as condições do terreno. Após os resultados do Estudo de Caso prático, tendo em vista que na primeira medição o valor foi positivo para o volume por Aerolevanteamento e na segunda negativo, não foi possível encontrar uma relação entre as duas metodologias nesse contexto especificamente. Conclui-se então que, para essa obra especificamente a melhor opção é o RTK, pois a diferença entre o registro de caçambas de terra para aterro é próxima do volume calculado pelo levantamento com RTK.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR13133 – Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro ABNT, Maio 1994.

ALVES, D. B. M. Posicionamento GPS utilizando conceito de estação virtual. 2008. 164f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

ALVES, P.; AHN, Y.; LACHAPELLE, G. The effects of network geometry on network RTK using simulated GPS data. In: ION GPS 2003, Oregon Convention Center, Portland. Proceedings..., 2003.

Anderson, J. M., & Mikhail, E. M. (1998). Introduction to Modern Photogrammetry. McGraw-Hill.

ANDRADE, J. B. Fotogrametria. Curitiba: SBEE. 1998.

BARBOSA, B. J. B. L; PEREIRA, T. S. Geração de base cartográfica para área de interesse histórico/cultural por meio de levantamento fotogramétrico adquirido com vant (RPAS). UFRGS, Porto Alegre. 2017.

BIBVIRT – Biblioteca virtual do estudante brasileiro. Aula 3 Normalização no Brasil. Disponível em:
<http://www.bibvirt.futuro.usp.br/index.html?principal.html&2>. Acesso em: 19/08/2024.

BRINKER, R. C.; WOLF, P. R. Elementary Surveying. 6 ed. New York: Harper & Row, 1977. 568p.

COELHO, L.; BRITO, J. N. Fotogrametria Digital. Rio de Janeiro: UERJ. 2007.

Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79–97.

DAI, L.; WANG, J.; RIZOS, C.; HAN, S. Predicting atmospheric biases for realtime ambiguity resolution in GPS/GLONASS reference station networks. *Journal of Geodesy*, Berlin v. 76 n°11/12, p.617-628, 2003.

DOUBECK, A. *Topografia*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1989.

ESPARTEL, L. *Curso de Topografia*. 9 ed. Rio de Janeiro, Globo, 1987.

Faria, F., Lourenço, D., & Cunha, M. (2020). Uso de drones para monitoramento de obras de terraplenagem. *Revista Brasileira de Engenharia Civil*, 10(2), 45-52.

Gemael, C. (1994). *Geodésia Física*. IBGE.

Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (2001). *GPS: Theory and Practice* (5th ed.). Springer-Verlag.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, Galileo and more*. Springer-Verlage Wien, 2008. 501p.

JENSEN, J. R. *Sensoriamento remoto do meio ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. São José dos Campos: Parêntese, 2009. Disponível em: https://w3.leicageosystems.com/downloads123/zz/gpsgis/sr20/brochures/SR20%20Brochure_pt.pdf. Acesso em: 19/08/2024.

Jurecka, F., Hollaus, M., & Schadauer, K. (2016). Performance analysis of UAV-based photogrammetric point clouds for monitoring forest stand dynamics. *Remote Sensing*, 8(9), 748.

KAHMEN, H. FAÍG, W. *Surveyng*–New York. Editora: de Gruyter, 1988. 578p.

KRUEGER, C.P. *Investigações sobre aplicações de alta precisão do GPS no âmbito marinho*. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Departamento de Geociências, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

Küng, O., Strecha, C., Beyeler, A., Zufferey, J. C., Floreano, D., Fua, P., & Gervais, F. (2012). The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, 4.

Küng, O., Strecha, C., Beyeler, A., Zufferey, J. C., Floreano, D., Fua, P., & Gervais, F. (2012). The accuracy of automatic photogrammetric techniques on ultra-light UAV imagery. In ISPRS conference.

LANDAU, H.; VOLLATH, U.; CHEN, X. Virtual reference station systems. *Journal of Global Positioning System*, v.1, n.2, p.137-143, 2002.

Li, X., Yin, G., & Luo, Q. (2016). Application of UAV aerial photogrammetry and RTK technology in volume measurement of earthwork in open pit mines. *International Journal of Geo-Information*, 5(5), 78-85.

MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações. 2.ed. São Paulo: Unesp, 2008. 473p.

MONICO, J.F.G. Posicionamento pelo NAVSTAR-GPS: descrição, fundamentos e aplicações, UNESP, São Paulo, 2000.

MONICO, J.F.G.; SEGANTINE, P.C.L. ITRF: Definição, realizações e aplicações. *Revista Cartografia e Cadastro*. Número 5. Portugal, Lisboa, 1996.

Mora, M., Cortés, P., & Pérez, M. (2019). Aplicación de drones en el cálculo de volúmenes de obra: Estudio comparativo. *Journal of Construction Engineering*, 35(3), 99-107.

Mulla, D. J. (2013). Twenty-five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358-371.

Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6, 1–15.

Paneque-Gálvez, J., McCall, M. K., Napoletano, B. M., Wich, S. A., & Koh, L. P. (2014). Small drones for community-based forest monitoring: An assessment of their feasibility and potential in tropical areas. *Forest Resources*, 5(6), 1481–1507.

RIZOS, C. Network RTK Research and Implementation - A geodetic perspective. *Journal of Global Positioning System*, v.1, n.2, p.144-150, 2002.

SEGANTINE, P.C.L. GPS: Sistema de Posicionamento Global. 1 ed. São Carlos: EESC/USP, 2005. 366 p.

Turner, D., Lucieer, A., & Watson, C. (2016). An automated technique for generating georectified mosaics from ultrahigh resolution UAV imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87, 103-109.

WILLGALIS, S.; SEEBER, G.; KRUEGER, C. P.; ROMÃO, V. M. C. A real time GPS reference network for cadastral surveys in Recife, Brazil. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, v. 55, n. 01, p. 01-10, 2003.

Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(6), 693-712.