MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUDITORIA DE OBRAS PÚBLICAS RODOVIÁRIAS

LIMITES E POSSIBILIDADES DE APLICAÇÕES DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO GERADOS A PARTIR DE PRODUTOS OBTIDOS POR SENSORES REMOTOS NOS CÁLCULOS DE VOLUMES DE TERRAPLENAGEM

CRISTIANO BRILHANTE DE SOUZA

Brasília, 5 de abril de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Faculdade de Tecnologia

TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO
INSTITUTO SERZEDELLO CORRÊA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

CENTRO INTERDISCIPLINAR DE ESTUDOS EM TRANSPORTES

LIMITES E POSSIBILIDADES DE APLICAÇÕES DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO GERADOS A PARTIR DE PRODUTOS OBTIDOS POR SENSORES REMOTOS NOS CÁLCULOS DE VOLUMES DE TERRAPLENAGEM

CRISTIANO BRILHANTE DE SOUZA

MARCUS VINICIUS CAMPITELI

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO EM AUDITORIA DE OBRAS PÚBLICAS RODOVIÁRIAS

BRASÍLIA/DF: ABRIL/2018

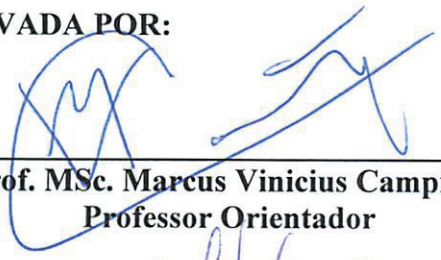
TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO
INSTITUTO SERZEDELLO CORRÊA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
CENTRO INTERDISCIPLINAR DE ESTUDOS EM TRANSPORTES

LIMITES E POSSIBILIDADES DE APLICAÇÕES DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO GERADOS A PARTIR DE PRODUTOS OBTIDOS POR SENSORES REMOTOS NOS CÁLCULOS DE VOLUMES DE TERRAPLENAGEM

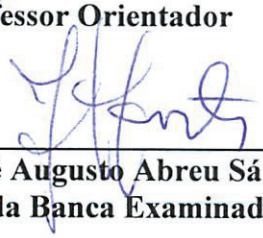
CRISTIANO BRILHANTE DE SOUZA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDA AO INSTITUTO SERZEDELLO CORRÊA DO TRIBUNAL DE CONTAS DA UNIÃO E AO CENTRO INTERDISCIPLINAR DE ESTUDOS EM TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ESPECIALISTA EM AUDITORIA DE OBRAS PÚBLICAS RODOVIÁRIAS.

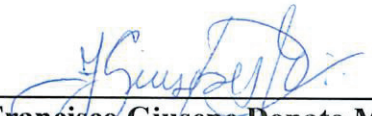
APROVADA POR:



Prof. MSc. Marcus Vinicius Campiteli
Professor Orientador



Prof. Dr. José Augusto Abreu Sá Fortes
Membro da Banca Examinadora



Prof. MSc. Francisco Giusepe Donato Martins.
Membro da Banca Examinadora

BRASÍLIA/DF, 05 DE ABRIL DE 2018.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
CEFTRU
Centro Interdisciplinar de Estudos em Transportes

SOUZA, CRISTIANO BRILHANTE DE

Limites e possibilidades de aplicações de Modelos Digitais de Elevação gerados a partir de produtos obtidos por sensores remotos nos cálculos de volumes de terraplenagem.

Brasília, 2018.

xviii, 110 p., 210 x 297 mm (ISC/TCU, CEFTRU/UnB, Especialista, Auditoria de Obras Públicas Rodoviárias, 2018)

Monografia de Especialização – Tribunal de Contas da União. Instituto Serzedello Corrêa. Universidade de Brasília. Centro Interdisciplinar de Estudos em Transportes.

1. Modelagem digital do terreno 2. Sensores remotos
3. Auditoria de obras rodoviárias

I. ISC/TCU II. CEFTRU/UnB
III. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SOUZA, Cristiano Brilhante (2018). Limites e possibilidades de aplicações de Modelos Digitais de Elevação gerados a partir de produtos obtidos por sensores remotos nos cálculos de volumes de terraplenagem. Monografia de Especialização, Instituto Serzedello Corrêa, Tribunal de Contas da União, Centro Interdisciplinar de Estudos em Transportes, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 110 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Cristiano Brilhante de Souza

TÍTULO DA MONOGRAFIA: Limites e possibilidades de aplicações de Modelos Digitais de Elevação gerados a partir de produtos obtidos por sensores remotos nos cálculos de volumes de terraplenagem.

GRAU/ANO: Especialista em auditoria de obras públicas rodoviárias/2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Trabalho de Conclusão de Curso e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Cristiano Brilhante de Souza
SQSW 304, bloco G, apartamento 605
70.673 407 - Brasília/DF – Brasil

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Iris e ao meu filho Henrique pelo apoio incondicional e pela paciência que tiveram comigo ao longo desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado forças para continuar nos momentos mais difíceis e por ter colocado pessoas especiais a meu lado, sem as quais certamente não teria chegado ao final do caminho.

A minha querida esposa Íris, sem a qual certamente eu não teria conseguido concretizar este trabalho, em razão da importância que tem na minha vida e pela compreensão, apoio, paciência e companheirismo.

Ao meu filho Henrique, que mesmo pequeno, soube compreender minhas ausências decorrentes das horas de pesquisa e estudo empreendidas ao longo dessa jornada.

Aos amigos de convívio acadêmico pelos bons momentos que dividimos juntos e que certamente tornaram mais leve esse trabalho.

Ao Professor MSc. Marcus Campiteli pelo apoio, paciência e disponibilidade na orientação desta pesquisa.

Ao Gabinete do Ministro Vital do Rego pelo incentivo e apoio incondicional, sem os quais não teria sido possível concluir esta jornada com a mesma motivação.

EPÍGRAFE

"A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê." (Arthur Schopenhauer)

RESUMO

Constitui objeto da presente pesquisa o estudo de métodos alternativos e viáveis para a medição de volumes topográficos que possam ser empregados nas fiscalizações de obras rodoviárias, em especial, na fase de terraplenagem. De forma geral, os projetos de terraplenagem bem como as medições referentes à execução desta fase da obra rodoviária se utilizam dos levantamentos topográficos clássicos para a obtenção dos volumes de terra que serão escavados ou aterrados. Em razão desta fase demandar grande parte do orçamento de uma obra rodoviária, torna-se relevante o seu controle. E toda vez que recursos federais são empregados na realização de tais obras, compete ao Tribunal de Contas da União (TCU) a fiscalização desses empreendimentos. No entanto, para bem desempenhar o controle externo, é desejável que as fiscalizações levadas a efeito pelo TCU nessas obras possam prescindir dos dados primitivos gerados pelos responsáveis pelo projeto e pela execução. Para tanto, é preciso saber se o atual estado da arte oferece métodos alternativos que atendam as precisões requeridas nos seguintes momentos da terraplenagem: o anteprojeto, o projeto e a execução. É dentro desse contexto que as ferramentas que podem ser oferecidas por meio de sensores remotos ganham relevância na medida em que tornam possível agregar às fiscalizações de obras rodoviárias, novas metodologias de controle que se utilizem das informações provenientes de imagens obtidas por satélites, aeronaves tripuladas (aerofotogrametria) ou por meio de veículos aéreos não tripulados (VANT). Nessa senda, a presente pesquisa busca identificar os limites e as possibilidades de emprego dos modelos digitais de elevação obtidos por meio de sensores remotos no cálculo de volumes das superfícies topográficas que serão impactadas pela implantação de uma rodovia. A principal hipótese a que remete a problemática é no sentido de que é possível obter volumes topográficos do terreno em precisões compatíveis com as requeridas no anteprojeto e no projeto de obras rodoviárias por meio das informações oriundas de sensores remotos, tais como imagens de satélite de alta resolução, e imagens obtidas por meio de VANTs. Além disso, o estudo aponta para possibilidades concretas de utilização de VANTs na fiscalização da execução (das medições de volumes) de cortes e aterros em obras rodoviárias.

Palavras-chave: Terraplenagem. Volumes Topográficos. Modelagem Digital do Terreno. Sensores Remotos. Veículo aéreo não tripulado.

ABSTRACT

The present study is the study of alternative and feasible methods for the measurement of Topography volumes that can be used in road works inspections, especially during the earthworks phase. As a general rule, earth-moving projects as well as measurements regarding the execution of this phase of the road work are used for the classic Topography surveys to obtain the volumes of earth that will be excavated or grounded. Because this phase requires a large part of the budget of a highway project, its control becomes relevant. And whenever federal resources are used to carry out such works, it is incumbent upon the Federal Audit Court (TCU) to supervise these projects. However, in order to carry out external control, it is desirable that the inspections carried out by the TCU in these works may dispense with the primitive data generated by those responsible for the project and the execution. Therefore, it is necessary to know if the current state of the art offers alternative methods that meet the required precisions in the following moments of the embankment: the preliminary design, the project and the execution. It is within this context that the tools that can be offered through remote sensors gain relevance in that they make it possible to aggregate to road works inspections, new control methodologies that are used of the information coming from images obtained by satellites, manned aircraft (aerial photogrammetry) or by unmanned aerial vehicle (UAV). In this way, the present research seeks to identify the limits and the possibilities of employment of the digital elevation models obtained by means of remote sensors in the calculation of volumes of the Topography surfaces that will be impacted by the implantation of a highway. The main hypothesis that refers to the problem is that it is possible to obtain Topography volumes of the terrain in precisions compatible with those required in the preliminary design and in the project of road works through information from remote sensors, such as high-resolution satellite images resolution, and images obtained by UAV. In addition, the study points to concrete possibilities for the use of UAVs in monitoring the execution (of volume measurements) of cuts and landfills on road works.

Keywords: Earthmoving. Topography Volumes. Digital Terrain Model. Remote Sensors. Unmanned aerial vehicle.

S U M Á R I O

INTRODUÇÃO 1

RELEVÂNCIA DA PESQUISA 4

OBJETIVO GERAL 5

OBJETIVOS ESPECÍFICOS 5

QUESTÃO E HIPÓTESE DE PESQUISA 5

METODOLOGIA 6

CAPÍTULO I - OBRAS RODOVIÁRIAS: ELEMENTOS DE TERRAPLENAGEM 9

I.1 - INTRODUÇÃO 9

I.2 - PLANTA BAIXA 10

I.3 - PERFIL LONGITUDINAL 11

I.4 - SEÇÕES TRANSVERSAIS 12

I.5 - CORTES 15

I.6 - ATERROS 16

I.7 - EMPRÉSTIMOS 18

I.8 – COMPENSAÇÃO DE VOLUMES 19

I.8.1. COMPENSAÇÃO LONGITUDINAL 20

I.8.2. COMPENSAÇÃO LATERAL OU TRANSVERSAL 20

I.9 – FASES DO PROJETO DE TERRAPLENAGEM: ANTEPROJETO E PROJETO 21

I.9.1 – ANTEPROJETO DE TERRAPLENAGEM 21

I.9.2 – PROJETO DE TERRAPLENAGEM 22

I.10 – NOÇÕES ACERCA DO CÁLCULO DE VOLUMES 22

I.11 – SÍNTESE DAS PRECISÕES REQUERIDAS PARA O CÁLCULO DE VOLUMES TOPOGRÁFICOS EM CADA FASE DA TERRAPLENAGEM 25

CAPÍTULO II - MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO: CONCEITOS BÁSICOS 26

II.1 – INTRODUÇÃO 26

II.2 – FORMAS DE REPRESENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA 28

II.2.1 – TRIANGULAR IRREGULAR NETWORK 28

II.2.2 – MALHA QUADRADA OU RETANGULAR 30

II.2.3 – CURVAS DE NÍVEL 31

II.3 – MODELAGEM MATEMÁTICA 32

CAPÍTULO III – FONTES DE INFORMAÇÕES DO TERRENO APTAS À GERAÇÃO DO MDE: LIMITES E POSSIBILIDADES DE EMPREGO NO CÁLCULO DE VOLUMES TOPOGRÁFICOS 36

III.1 - INTRODUÇÃO 36

III.2 - FOTOGRAMETRIA 39

III.2.1 – PRECISÃO ALCANÇADA COM O USO DA FOTOGRAMETRIA 43

III.3 – IMAGENS DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUÇÃO COM ESTEREOSCOPIA 46

III.4 – RADAR 48

III.5 – PERFILAMENTO LASER (LIDAR) 52

III.5.1 – COMPONENTES DO SISTEMA 53

III.5.2 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO 54

III.6– CONSIDERAÇÕES SOBRE O *SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION* - SRTM 57

III.7 – SÍNTESE DAS PRECISÕES ALCANÇADAS POR CADA TÉCNICA APRESENTADA E LIMITES DE EMPREGO NO CÁLCULO DE VOLUMES TOPOGRÁFICOS EM CADA FASE DA TERRAPLENAGEM 62

III.8 – NORMAS DO DNIT QUE SUGEREM TÉCNICAS PARA O CÁLCULO DE VOLUMES TOPOGRÁFICOS NA FASE DE ANTEPROJETO DE TERRAPLENAGEM NO ÂMBITO DO RDC NO REGIME DE CONTRATAÇÃO INTEGRADA 64

CAPÍTULO IV – POTENCIALIDADES DA FOTOGRAMETRIA COM VANTS: APRESENTAÇÃO DE UM ESTUDO DE CASO 66

IV.1 – OBJETIVO DO TESTE 67

IV.2 – ÁREA DE ESTUDO 67

IV.3 – ETAPAS DO LEVANTAMENTO COM VANT 67

IV.3.1 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS 68

IV.3.2 – PLANEJAMENTO DO VOO 70

IV.3.3 – PLANEJAMENTO DOS PONTOS DE AMARRAÇÃO 70

IV.3.4 – MEDIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE 71

IV.3.5 – VOO E TOMADA DAS IMAGENS 72

IV.3.6 – PROCESSAMENTO DAS IMAGENS 73

IV.3.7 – PRODUTOS GERADOS 73

IV.4 – ETAPAS DO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO 76

IV.4.1 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS 76

IV.4.2 – PLANEJAMENTO DA POLIGONAL 76

IV.4.3 – EXECUÇÃO DO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO 77

IV.4.4 – PROCESSAMENTO DAS INFORMAÇÕES 77

IV.4.5 – PRODUTOS GERADOS 78

IV.5 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS 79

IV.6 – ESTUDOS QUE VALIDAM A FOTOGRAMETRIA COM VANTS 81

IV.7 – SÍNTESE DAS PRECISÕES ALCANÇADAS COM EMPREGO DA FOTOGRAMETRIA COM VANTS E LIMITES DE EMPREGO NO CÁLCULO DE VOLUMES TOPOGRÁFICOS EM CADA FASE DA TERRAPLENAGEM 83

CONSIDERAÇÕES CONCLUSIVAS 84

REFERÊNCIAS 89

LISTA DE ABREVIATURAS

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDS – Modelo Digital de Superfícies

MDT – Modelo Digital de Terreno

MIT – *Massachusetts Institut of Technology*

MNE – Modelo Numérico de Elevações

MNT – Modelo Numérico de Terreno

PEC – Padrão de Exatidão Cartográfica

SNV – Sistema Nacional de Viação

TCU – Tribunal de Contas da União

TIN – *Triangulated Irregular Network*

UAV - *Unmanned aerial vehicle*

VANT – Veículo aéreo não tripulado

LISTAS DE GRÁFICOS E QUADROS

GRÁFICOS

Gráfico 1 – Percentual de rodovias por situação física no Brasil 1

Gráfico 2 – Percentual de rodovias sob a administração federal por situação física no Brasil 2

QUADROS

Quadro 1 – Precisão requerida em cada fase da terraplenagem 25

Quadro 2 – Principais sensores orbitais de alta e altíssima resolução 47

Quadro 3 – Bandas Radar 49

Quadro 4 – Compilação de estudos que estudaram erros de acurácia de dados SRTM 59

Quadro 5 – Decreto 89.819/1984 – Padrão de Exatidão Cartográfica 61

Quadro 6 – Relação Escala da Carta x Curva de nível 61

Quadro 7 – Padrão de Exatidão Cartográfica para as escalas requeridas na terraplenagem 62

Quadro 8 – Limites e possibilidades de obtenção de volumes por meio de sensores remotos 63

Quadro 9 – Estudo Topográfico e Modelagem Digital do Terreno no âmbito do RDC no regime de contratação integrada 64

Quadro 10 – Relações de precisão e área em função da altura de voo 68

Quadro 11 – Acurácia dos pontos de controle utilizados: comparação das coordenadas dos pontos de controle obtidas pelo modelo ajustado estatisticamente e as coordenadas medidas no terreno 74

Quadro 12 – Acurácia dos pontos de checagem utilizados: comparação das coordenadas dos pontos de "*check*" obtidas pelo modelo ajustado estatisticamente e as coordenadas medidas no terreno. 75

Quadro 13 – Limites e possibilidades de obtenção de volumes por meio de VANTs 83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação dos principais serviços no custo global de obras rodoviárias 4

Figura 2 – Planta referente a Projeto Geométrico 10

Figura 3 – Perfil longitudinal de trecho de obra rodoviária 12

Figura 4 – Configurações típicas de seções transversais 13

Figura 5 – Elementos da seção transversal em pista simples 14

Figura 6 – Elementos da seção transversal em pista dupla 15

Figura 7 – Trecho de obra rodoviária: Seção de Corte 15

Figura 8 – Trecho de obra rodoviária: Seção em aterro 17

Figura 9 – Esquema de um empréstimo lateral 18

Figura 10 – Esquema de um empréstimo concentrado 19

Figura 11 – Esquema de compensação de volumes: volume do corte maior que o volume do aterro 20

Figura 12 – Esquema de compensação de volumes: volume do aterro maior que o volume do corte 21

Figura 13 – Sólido geométrico: Prismóide 23

Figura 14 – Modelo Digital do Terreno e Modelo Digital de Elevação 27

Figura 15 – Visualização de uma Rede Triangular Irregular 29

Figura 16– Conjunto de pontos de uma amostra e a respectiva vista em perspectiva 30

Figura 17 – Malha quadrada ou retangular 31

Figura 18 – Curvas de nível: conceito 32

Figura 19 – Mesa digitalizadora 36

Figura 20 – Levantamento de informações altimétricas com GPS 37

Figura 21 – Diferença entre os sensores ativos e passivos 38

Figura 22 – Sensores passivos 38

Figura 23 – Plataformas de transporte de sensores remotos 39

Figura 24 – Esquema de voo aerofotogramétrico: sobreposição longitudinal e lateral 40

Figura 25 – Esquema conceitual da paralaxe 41

Figura 26 – Imagens com diferentes GSD 44

Figura 27 – Sensor ADS 40 e o GSD recomendado para as diversas escalas..... 44

Figura 28 – Cálculo do GSD em função da altura de voo, distância focal e tamanho físico no CCD 45

Figura 29 – Esquema de estereoscopia com imagens de satélites..... 46

Figura 30 – Espectro eletromagnético..... 49

Figura 31 – Geometria de imageamento SAR 51

Figura 32 – Penetração do sinal da banda "P" na floresta densa 52

Figura 33 – Determinação de coordenadas tridimensionais..... 54

Figura 34 – Princípio de funcionamento do laser aerotransportado..... 55

Figura 35 – Princípio de funcionamento do laser aerotransportado..... 55

Figura 36 – Cobertura da missão SRTM..... 57

Figura 37 – Missão SRTM: *Endeavour* 58

Figura 38 – Croqui de localização da área de estudo..... 64

Figura 39 – BATMAP: Ficha Técnica 66

Figura 40 – Receptor Geodésico Topcon Hiper SR L1/L2 66

Figura 41 – Especificações do voo..... 67

Figura 42 – Medição dos pontos de controle - Síntese 68

Figura 43 – Sequência do processamento das coordenadas dos pontos de controle..... 69

Figura 44 – Síntese da fase de voo..... 69

Figura 45 – Síntese da fase de processamento das imagens..... 70

Figura 46 – Principais produtos gerados no teste a partir da fotogrametria com VANT..... 73

Figura 47 – Estação Total utilizada no levantamento topográfico..... 74

Figura 48 – Estação Total utilizada no levantamento topográfico..... 75

Figura 49 – Levantamento topográfico: síntese da fase de processamento 75

Figura 50 – Curvas de nível geradas a partir do levantamento topográfico..... 76

Figura 51 – Comparativo Topografia x Fotogrametria com VANT 77

Figura 52 – Área selecionada para cálculo de volume topográfico 77

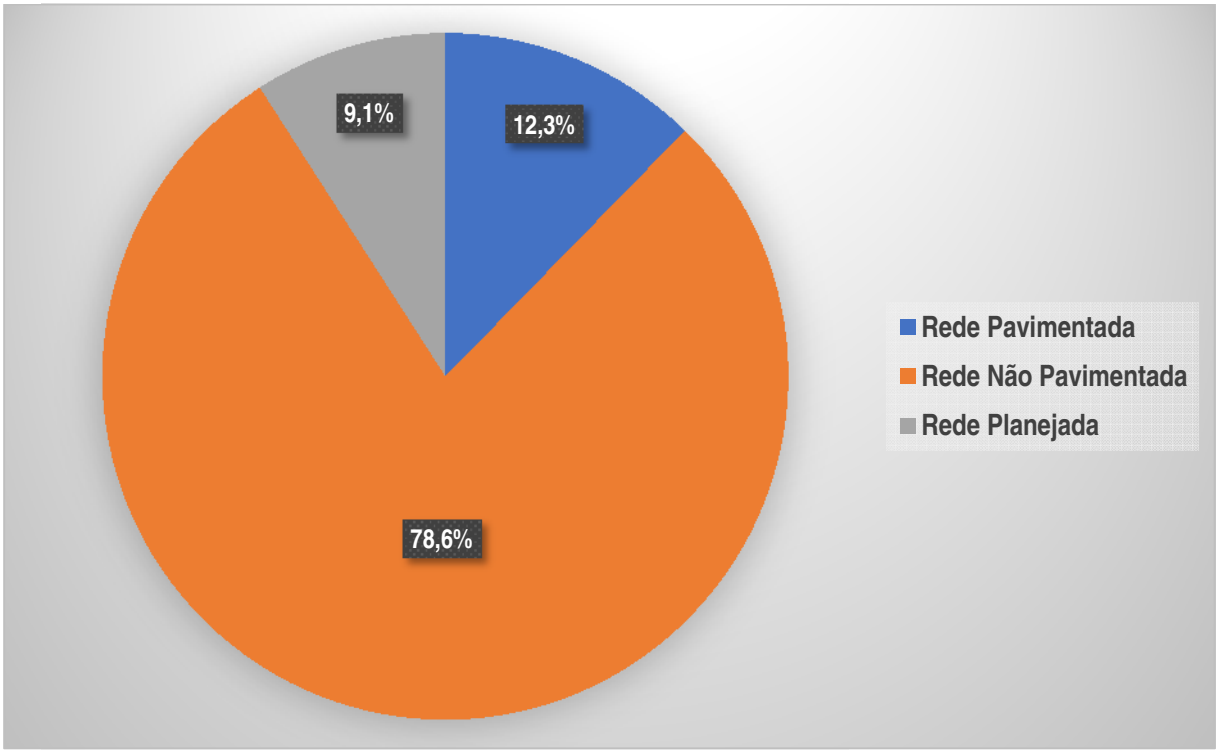
Figura 53 – Cálculo de volume topográfico: Topografia x Fotogrametria 78

Figura 54 – Drone DJI Phantom 4 79

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país continental, que escolheu o modal rodoviário como seu principal sistema de transportes. Segundo informações extraídas do Sistema Nacional de Viação – SNV (2018), o Brasil possui uma malha rodoviária contendo cerca de 1,7 milhão de quilômetros, sendo destes, 211 mil quilômetros de rodovias pavimentadas, 1,3 milhão de quilômetros de rodovias não pavimentadas e 157 mil quilômetros de rodovias planejadas. A situação narrada é resumida pelo Gráfico 1 a seguir:

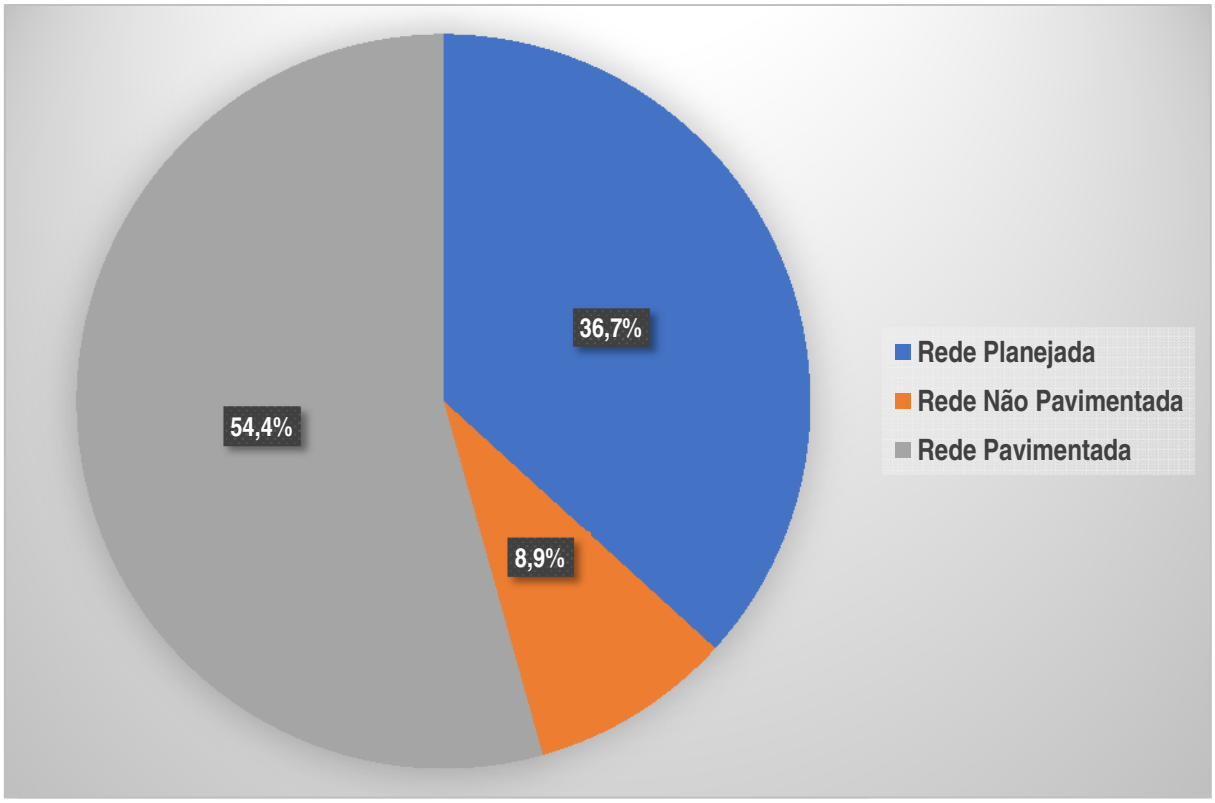
Gráfico 1 – Percentual de rodovias por situação física no Brasil



Fonte: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) – Sistema Nacional de Viação (SNV), 2018.

Considerando apenas a malha sob a jurisdição federal (União), são 65,5 mil quilômetros de rodovias pavimentadas, 10,7 mil quilômetros de rodovias não pavimentadas e 44,3 mil quilômetros de rodovias planejadas. Tais informações são sintetizadas no Gráfico 2:

Gráfico 2 – Percentual de rodovias sob a administração federal por situação física no Brasil



Fonte: Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) – Sistema Nacional de Viação (SNV), 2018.

Em razão da escolha pelo modal rodoviário e tendo em vista a grande extensão da malha, demanda-se, do poder público, uma infraestrutura robusta capaz de atender os milhares de potenciais usuários desse modo de transporte.

Diante de tamanho desafio, é inevitável para o Estado atuar, de alguma maneira, para prover e manter a referida infraestrutura. Nesse sentido, uma das formas de atuação estatal se dá por meio da realização de obras para construir ou reformar a malha rodoviária, utilizando para tanto, vultosos volumes de recursos públicos.

Nesse contexto se insere a atividade de fiscalização realizada pelo Tribunal de Contas da União - TCU, no âmbito de suas competências constitucionais previstas nos incisos do art. 71 da CF/1988, em especial quando recursos federais forem utilizados nas diversas obras que se fazem necessárias. No desempenho de sua missão institucional, no sentido de "Aprimorar a Administração Pública em benefício da sociedade por meio do controle externo"[1], cabe ao TCU a fiscalização de obras públicas financiadas com recursos públicos da União. Assim,

[1] Referencial Estratégico do Tribunal de Contas da União, 2015 – 2021. Disponível em: < http://portal.tcu.gov.br/planejamento-e-gestao/referencial-estrategico/>. Acesso em 8/12/2017.

considerando a importância do transporte rodoviário para o desenvolvimento do Brasil e, sobretudo, os investimentos federais que são feitos nessa matriz de transporte, é necessário que o TCU possua condições estruturais, técnicas e humanas que permitam à Corte de Contas contribuir de maneira efetiva para que a atuação do Estado, na tarefa de prover e manter a malha rodoviária, seja a mais eficiente possível.

Nessa senda, entre outras atribuições, cabe ao TCU coibir a ocorrência de fraudes e desvios de recursos públicos. Para tanto, o Tribunal deve conhecer o negócio a ser fiscalizado e, sempre que possível, valer-se de metodologias independentes que permitam à Corte avaliar se as ações do Estado são as mais adequadas. Por tal razão, o TCU necessita contar com recursos humanos capacitados e metodologias bem definidas, aceitáveis e consagradas, para analisar as diversas etapas que compreendem as obras rodoviárias.

Isso porque, em algumas dessas etapas, o risco de fraudes e desvios de recursos públicos é muito alto. Um bom exemplo para o risco apontado será objeto de estudo na presente monografia e se vislumbra nos movimentos de terra projetados para determinada obra rodoviária bem como nos volumes deles decorrentes, efetivamente medidos por ocasião da execução dos trabalhos. Nesses casos, é oportuno e importante para o órgão de fiscalização, poder contar com ferramentas de controle próprias que permitam, dentro de precisões aceitáveis, aferir a adequação da movimentação de terra projetada para a obra, por meio de cortes e aterros, além de atestar, com alguma segurança, se determinado volume medido pelo construtor e efetivamente pago pelo órgão público responsável pela obra condiz de fato com a realidade dos trabalhos executados. Nesse contexto fático se inserem as ferramentas oferecidas pelo sensoriamento remoto que podem, em alguma medida, auxiliar na verificação que caberá ao TCU realizar no exercício de suas competências constitucionais.

A etapa construtiva de terraplenagem é uma atividade de fundamental importância na construção de obras de engenharia por representar o preparo do terreno para que possa ser materializado o projeto de um empreendimento, seja uma edificação, uma obra de arte especial ou uma obra rodoviária.

Nichols (2010) define terraplenagem ou movimento de terras como o conjunto de operações necessárias para remover a terra dos locais em que se encontra em excesso para aqueles em que há falta, tendo em vista um determinado projeto a ser implantado.

Nesse escopo, vale repisar que as obras de infraestrutura rodoviária demandam investimentos financeiros consideráveis. Assim, partindo para uma perspectiva orçamentária, a Figura 1 a seguir dá uma ideia da participação dos cinco principais serviços de uma obra rodoviária no orçamento global do empreendimento.

Figura 1 – Participação dos principais serviços no custo global de obras rodoviárias

Fonte: Pedrozo, 2001.

Observa-se da figura, sob o ponto de vista econômico, que os serviços de terraplenagem representam, em média, quase 20% no custo total de uma obra de implantação (construção) rodoviária. Daí a importância de se buscar alternativas de controle que permitam ao TCU aprimorar seus métodos de fiscalização com vistas a exercer sua função constitucional de zelar pelos recursos públicos.

É dentro desse contexto que as ferramentas de controle que podem ser oferecidas pelo sensoriamento remoto ganham relevância, na medida em que, é possível agregar às fiscalizações de obras rodoviárias, novas metodologias de controle fazendo uso das informações oriundas de imagens de satélites ou obtidas por meio de veículos aéreos não tripulados – VANT[2].

RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A intenção da pesquisa é, portanto, identificar, no atual estágio do desenvolvimento tecnológico, as possibilidades de geração de modelos digitais do terreno, por meio das

[2] VANT - gênero que comporta os conhecidos “drones”.

ferramentas oferecidas pelo sensoriamento remoto, com objetivo de extrair informações de volume das superfícies topográficas que serão impactadas pela implantação de uma rodovia, permitindo, dessa forma, comparar esses volumes com os calculados pelos métodos tradicionais (medição direta por meio de instrumentos de topografia). É investigar o estado da arte no que diz respeito a modelagem digital do terreno com vistas a aferir seu grau de aplicação no cálculo de volumes de superfícies topográficas. Com isso, pretende-se, ao final, verificar em que medida essas ferramentas podem ser utilizadas pelo Tribunal de Contas da União nas fiscalizações de obras rodoviárias, em especial, nos serviços contidos na terraplenagem.

OBJETIVO GERAL

O objetivo geral da pesquisa pode ser traduzido por meio do seguinte comando: **Identificar com que níveis de precisão é possível empregar produtos oriundos de sensores remotos no cálculo de volumes topográficos**.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Tendo como referência o objetivo geral, é possível vislumbrar os três principais objetivos específicos do estudo em epígrafe, quais sejam:

1) Identificar quais são as precisões alcançáveis com a modelagem digital do terreno obtida por meio de sensores remotos no cálculo de volumes topográficos;

2) Identificar se as precisões alcançadas no cálculo de volumes topográficos com o uso de sensores remotos são compatíveis com as precisões obtidas por meio dos métodos clássicos de levantamento, como os levantamentos topográficos;

3) Identificar para os produtos obtidos por meio de sensores remotos, os diferentes níveis de aplicação, bem como as limitações de utilização no cálculo de volumes topográficos.

QUESTÃO E HIPÓTESE DE PESQUISA

Para guiar os estudos que permeiam a presente pesquisa, foi formulada a seguinte questão:

Considerando as precisões alcançáveis, os resultados obtidos no cálculo de volumes topográficos por meio da utilização de informações obtidas por sensores remotos, em

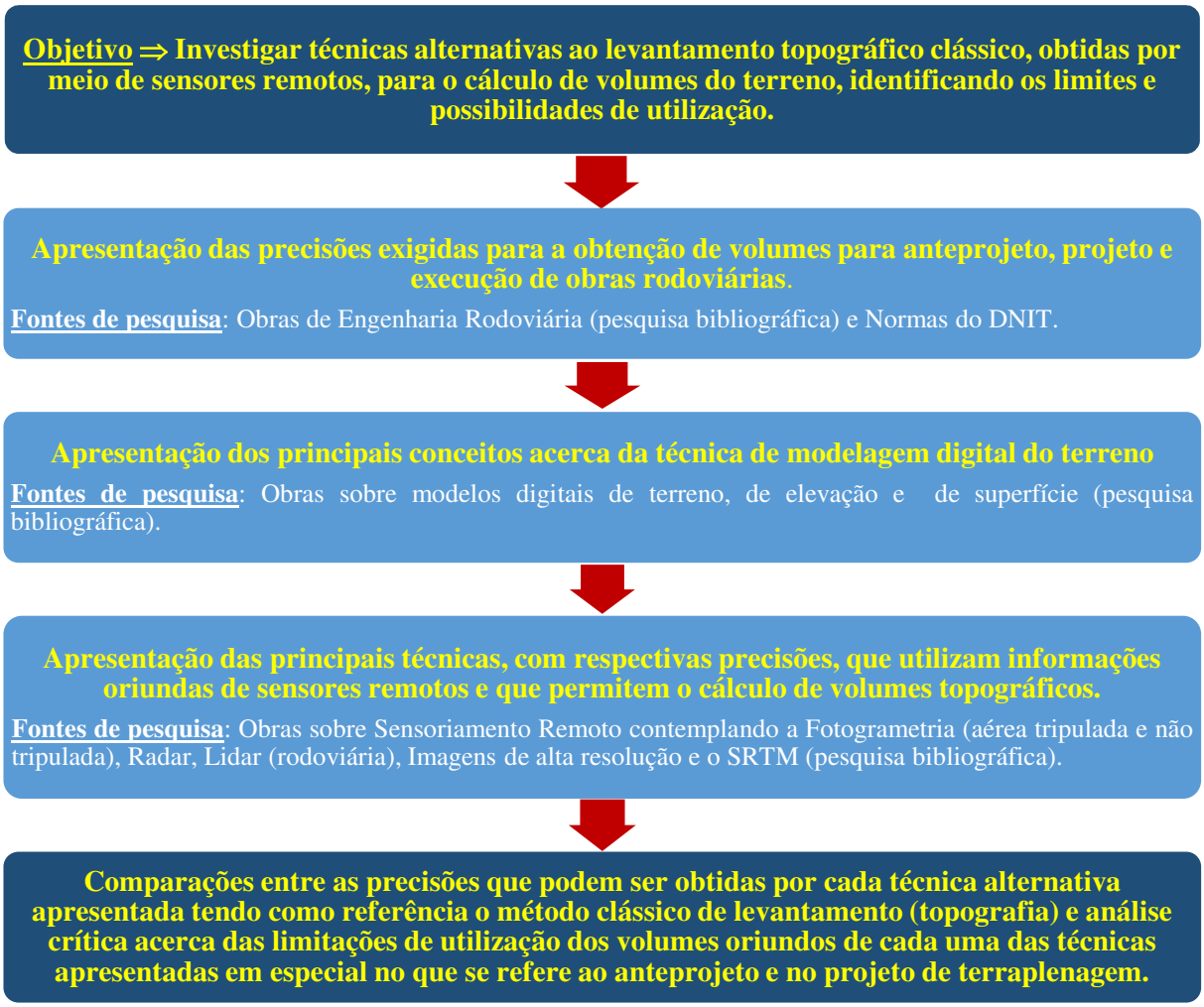
comparação com os levantamentos clássicos tais como o topográfico, possibilitam alguma utilização prática nas fiscalizações de obras rodoviárias que tenham por objeto os movimentos de terra?

A hipótese a que remete a problemática é no sentido de que, dado o estágio atual de desenvolvimento tecnológico, **existem alternativas para o levantamento dos volumes topográficos do terreno a partir de informações oriundas de sensores remotos com precisões compatíveis com às requeridas no anteprojeto e no projeto de terraplenagem de uma obra rodoviária.**

METODOLOGIA

A pesquisa desenvolvida no presente estudo é do tipo exploratória visto que, limitada pelo tempo, tem por objetivo precípuo explicitar o problema apontado, qual seja, as possiblidades de aplicação dos produtos oriundos de sensores remotos no cálculo de volumes topográficos. Nesse sentido, o principal instrumento empregado no estudo abarca pesquisa bibliográfica acerca dos assuntos necessários ao desenvolvimento do tema, por meio da qual se apresentam os produtos que podem ser obtidos pela utilização de sensores remotos, tais como imagens de satélites e imagens obtidas por drones, entre outras, suas características principais bem como suas limitações de uso, em especial na obtenção de modelos digitais de elevação utilizados para o cálculo de volumes. Como técnica, adota-se a análise documental.

Com as técnicas de pesquisa mencionadas e tendo por objetivo demonstrar a hipótese de trabalho, a metodologia empregada no estudo em epígrafe contempla as ações constantes do fluxograma a seguir apresentado:



Nesse contexto, a estruturação dos dados coletados por meio das pesquisas bibliográficas realizadas está organizada em quatro capítulos. O Capítulo I contém breve explanação acerca dos principais elementos de terraplenagem. Nesse capítulo, são abordadas as principais características técnicas exigidas nos projetos de terraplenagem, tais como os métodos de obtenção das seções transversais que servirão ao cálculo dos cortes e aterros necessários à implantação da rodovia. Também são mencionadas as normas do DNIT que tratam da execução dos serviços de corte e aterro com as respectivas precisões requeridas no controle geométrico realizado. No Capítulo II, estuda-se os principais conceitos necessários para compreender a modelagem digital do terreno. No Capítulo III, aborda-se as principais técnicas de obtenção de volumes considerando sensores remotos diferentes, a exemplo das imagens de satélites e das imagens obtidas por drones. O Capítulo IV apresenta um caso prático no qual pesquisadores realizaram um comparativo entre o levantamento topográfico clássico e o levantamento fotogramétrico com o uso de veículos aéreos não tripulados com vistas a testar, entre outras

características, as discrepâncias nas coordenadas tridimensionais obtidas pelos dois métodos e a geração de volumes.

Vale mencionar que esta pesquisa, em razão das limitações inerentes às monografias de pós-graduação *latu sensu*, não tem a pretensão de firmar regras ou sugerir "o melhor procedimento". A ideia principal é oferecer uma revisão bibliográfica das técnicas mencionadas cotejando os limites e as possiblidades de cada uma no que tange ao cálculo de volumes topográficos. Oportuniza-se, portanto, aos eventuais leitores uma visão geral das principais tecnologias disponíveis, como alternativas ao levantamento topográfico clássico, contemplando suas respectivas potencialidades com vistas a instigar o surgimento de novas pesquisas mais apuradas, que poderão culminar, no futuro, em metodologias de fiscalização.

CAPÍTULO I - OBRAS RODOVIÁRIAS: ELEMENTOS DE TERRAPLENAGEM

I.1 - INTRODUÇÃO

A decisão política de implantar novas rodovias demanda do poder público, escolhas técnicas que tornem a obra rodoviária útil e eficiente, considerando o menor custo possível. Nesse caminho está a escolha de um traçado racional, que será função, entre outros fatores, da topografia da região e das condições geológicas e geotécnicas do terreno.

Nessa senda, não é difícil perceber que regiões topograficamente acidentadas, geralmente acarretam grandes movimentos de terra, elevando substancialmente os custos de construção. Da mesma forma, as condições geológicas e geotécnicas podem inviabilizar determinada diretriz de uma estrada, já que, na maioria dos casos, são grandes os custos necessários para estabilização de cortes e aterros a serem executados em terrenos com características internas desfavoráveis (cortes em rocha, aterros sobre solos moles, etc.).

De todo modo, independentemente das escolhas técnicas que se façam, toda a obra rodoviária demandará, em alguma medida para sua implantação, serviços de terraplenagem. Conforme se verá adiante, nas obras rodoviárias, os serviços que envolvem os movimentos de terra demandam a quantificação de volumes topográficos, que ora serão escavados, e ora serão aterrados. Assim, considerando que neste tipo obra as medições de volumes impactam sobremaneira a fase de terraplenagem, se faz importante apresentar alguns dos conceitos básicos relacionados a esta etapa da construção de rodovias.

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2017, p. 3), define-se terraplenagem como o "conjunto de operações necessárias à escavação e movimentação de solos e rochas, removendo-se o excesso de material de uma região para outra em função de sua escassez". No contexto de obras rodoviárias, a terraplenagem tem por objetivo a conformação do relevo terrestre para implantação das rodovias, dando à superfície do terreno a forma projetada para a construção.

Para Ratton, E. et al. (2015, p. 4), a terraplenagem é a operação destinada a conformar o terreno existente aos gabaritos definidos em projeto. Assim, a terraplenagem engloba, de forma geral, os serviços de corte (escavação de materiais) e de aterro (deposição e compactação de materiais escavados). Vale dizer que a conjugação desses dois serviços tem por finalidade

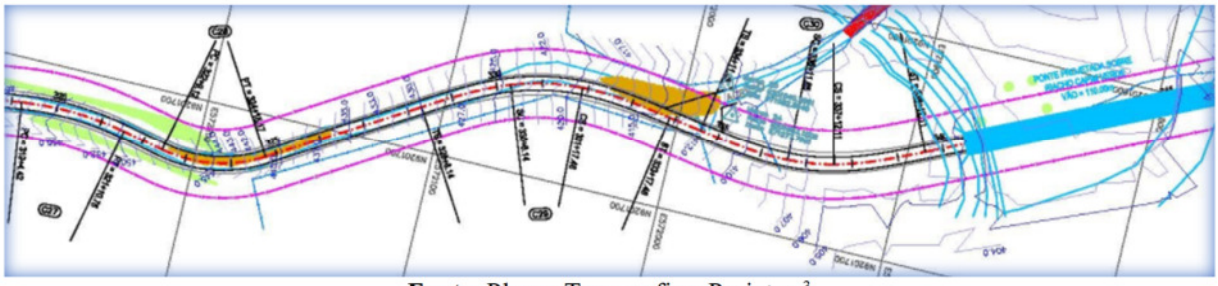
proporcionar condições geométricas compatíveis com o volume e tipo dos veículos que irão utilizar a rodovia.

Importa também mencionar a importância do estudo da geometria da rodovia, que é efetuado por meio de levantamentos topográficos por processo convencional ou aerofotogramétrico. O resultado desses levantamentos é consolidado no Projeto Geométrico, que representa a geometria da rodovia através da planta baixa e do perfil longitudinal, complementados pelas seções transversais (Ratton, E. et al. 2015).

I.2 - PLANTA BAIXA

A planta baixa de uma rodovia é a representação em projeção horizontal dos elementos do terreno e projeto. Segundo Ratton, E. et al. (2015, p. 5), a planta baixa constitui-se de uma vista "de cima" da faixa projetada, nela se apresentando, de maneira geral: (i) eixo de projeto, estaqueado convenientemente; (ii) os bordos da plataforma de terraplenagem; (iii) as projeções dos taludes de corte e aterro e a linha de encontro destes com o terreno natural -"off-set"; (iv) os cursos d'água; (v) os bueiros e as obras de arte especiais (pontes, viadutos, muros de arrimo, etc.); (vi) as interseções; (vii) as construções existentes; e (viii) os limites da faixa de domínio. Aqui, o terreno é representado pelas curvas de nível, conforme se observa na representação dada pela Figura 2 a seguir.

Figura 2 – Planta referente a Projeto Geométrico



Fonte: Planus Topografia e Projetos.[3]

Ensina Garcia D. S. P (2016, p. 6) que o projeto planimétrico é constituído pelos seguintes elementos:

a) Eixo: é o alinhamento longitudinal da rodovia, localizando-se, geralmente, na parte central da plataforma;

[3] Disponível em: < http://planus.eng.br/projetos/projeto-geometrico/>. Acesso em 17/1/2018.

b) Estacas: definem e materializam o eixo, crescendo a partir da origem de 20 em 20 metros;

c) Alinhamento reto (reta): localizado entre as curvas horizontais, é o trecho retilíneo que compõe uma rodovia;

d) Curva de concordância horizontal: é o arco ou sequência de arcos que concordam geometricamente dois alinhamentos retos sucessivos. A referida curva é caracterizada pelo raio de curvatura.

I.3 - PERFIL LONGITUDINAL

O Perfil longitudinal pode ser caracterizado pela representação gráfica de um corte vertical no corpo estradal, através de uma superfície perpendicular e coincidente com o eixo da rodovia. Segundo Garcia D. S. P. (2016, p. 7), compõem o perfil longitudinal de uma estrada:

a) Linha do terreno natural: representa a variação do terreno através da interseção deste com a superfície vertical que determina o perfil;

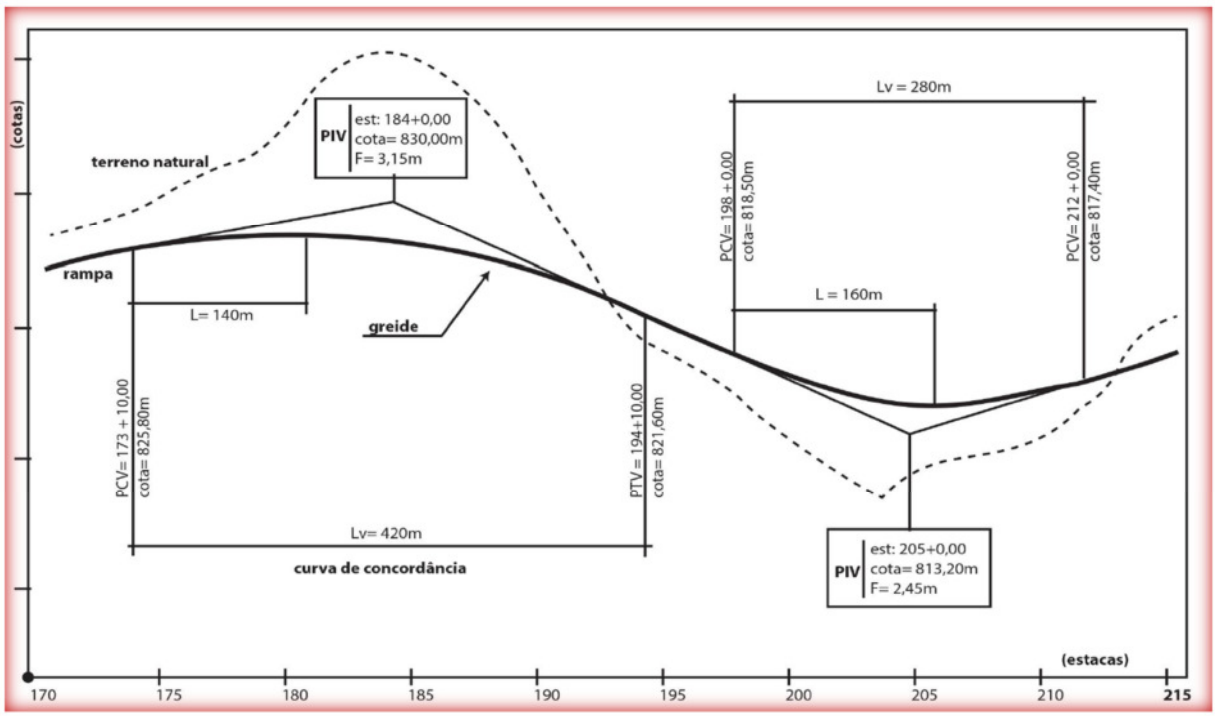
b) Linha de projeto ou greide: é uma linha em perfil longitudinal precisamente posicionada em relação ao terreno natural. Vale mencionar que o posicionamento desta linha em relação a linha do terreno natural indica a ocorrência de cortes e aterros;

c) Declividade: é a taxa de acréscimo ou decréscimo altimétrico do greide. É oportuno mencionar que a declividade pode se apresentar em forma de aclive (ou rampa), declive (contra rampa) ou em nível (nula). O primeiro caso ocorre quando, a partir da origem do estaqueamento, observa-se trecho ascendente com declividade constante. O segundo caso se dá quando, a partir do estaqueamento, depara-se com trecho descendente e declividade constante. Por fim, o último caso ocorre quando declividade está em nível (igual a zero);

d) Curva de concordância vertical: é a curva que concorda geometricamente duas rampas sucessivas, utilizando-se, normalmente para sua representação matemática, da parábola de 2º grau.

A Figura 3, a seguir, apresenta um esquema exemplificativo de um perfil longitudinal.

Figura 3 – Perfil longitudinal de trecho de obra rodoviária



Fonte: Instituto IDD.[4]

I.4 - SEÇÕES TRANSVERSAIS

As seções transversais são obtidas a partir da intercessão da superfície do terreno natural com diversos planos verticais, normais e transversais ao eixo da rodovia, posicionados sobre o estaqueamento (20 em 20 metros em geral) e sobre estacas específicas (Garcia D. S. P., 2016, p. 8). Colocando de outra maneira, as seções transversais correspondem a cortes efetuados no terreno, ortogonalmente ao eixo de projeto, nos pontos referidos no estaqueamento. Tais seções, em um projeto rodoviário, são constituídas por duas linhas:

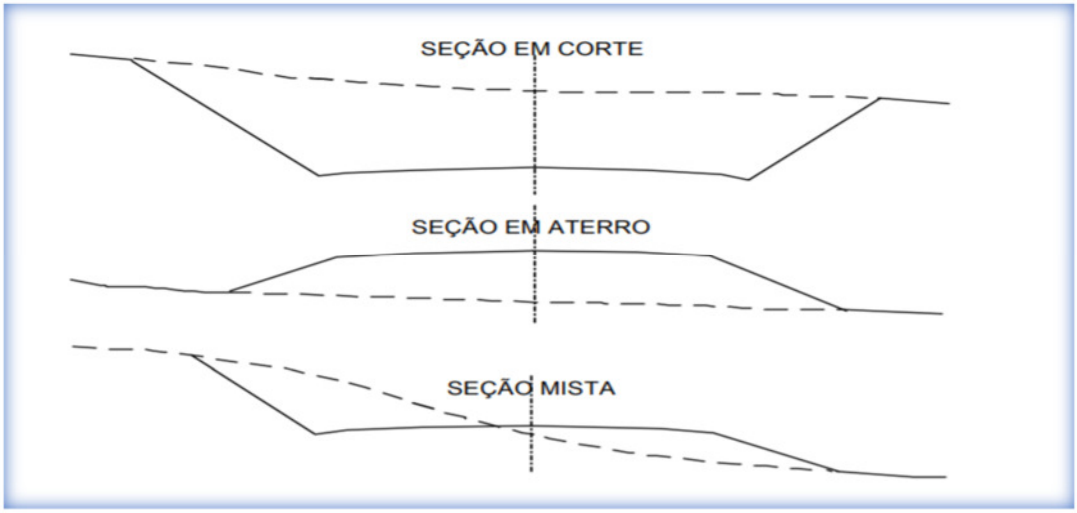
(i) uma que representa o perfil transversal do terreno natural e,

(ii) outra que representa o perfil transversal do projeto, ou gabarito.

Na Figura 4 a seguir, que apresenta as seções transversais típicas, a linha pontilhada representa o perfil transversal do terreno e a linha contínua representa o perfil transversal do projeto.

[4] Disponível em: <http://www.idd.edu.br/curso/pos-graduacao-e-mba/pavimentacao-rodoviaria>. Acesso em 22/1/2018.

Figura 4 – Configurações típicas de seções transversais



Fonte: LEE, 2013.

Ensina Garcia D. S. P. (2016, p. 8-9) que os componentes geométricos da seção transversal são os seguintes:

a) Taludes: superfícies inclinadas que delimitam lateralmente os cortes e aterros. Aqui, costuma-se utilizar como valores padrões de inclinação as seguintes razões: 1:1,5; 1:2; 1,5:1 (vertical/horizontal);

b) Off-set: é a interseção dos taludes de corte e aterro com a superfície do terreno natural. Nos cortes é denominado de crista do corte e nos aterros é chamado de pé do aterro;

c) Plataforma de terraplenagem: é a superfície convexa final, construída a partir das operações de terraplenagem, limitada lateralmente por taludes de corte ou aterro. Apresenta as seguintes características geométricas:

- *Largura da plataforma*: é função da hierarquia da rodovia. Geralmente a plataforma de corte apresenta-se maior que a de aterro, em razão da necessidade de dimensionamentos de sarjetas de drenagem;
- *Inclinação transversal ou abaulamento*: a inclinação depende da natureza da superfície de rolamento e tem por função retirar a água da plataforma;
- *Superelevação*: é a inclinação transversal que se dá às plataformas nos trechos curvos a fim de fazer frente à ação da força centrífuga (ou centrípeta) que atua sobre os veículos. O valor da superelevação decorre do raio de curvatura e da velocidade do projeto;
- *Superlargura*: é a largura adicional que se dá às plataformas nos trechos curvos

a fim de melhorar as condições de segurança, particularmente no que se refere à inscrição de veículos longos à curva.

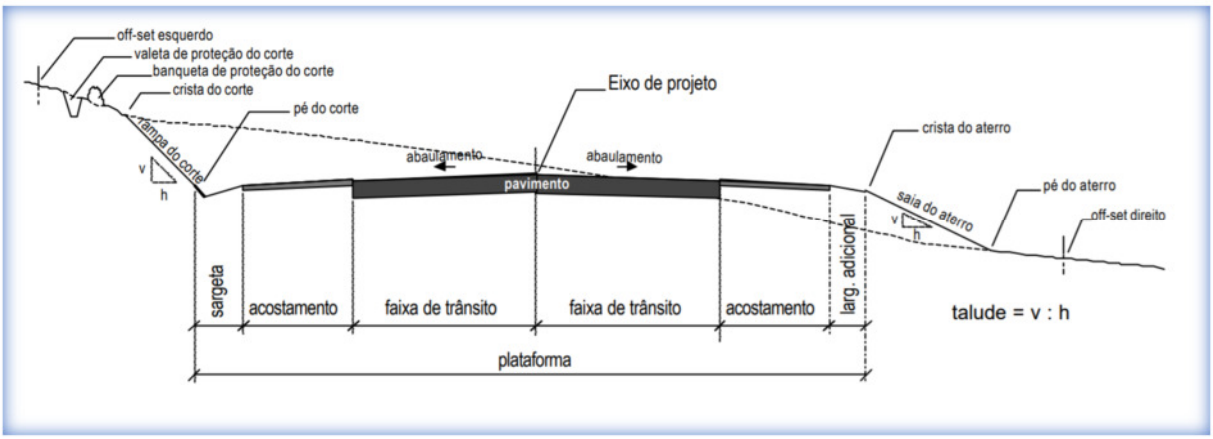
d) Faixa de domínio: é a faixa de terras que contém a rodovia e áreas adjacentes sendo necessária para a segurança dos veículos e pedestres. Possibilita condições para alargamentos, duplicações e obtenção de materiais para uso na construção de estrada. Vale mencionar que as áreas desta faixa são desapropriadas pelo Estado e que tal largura é variável em função da classe da rodovia e do relevo da região;

e) Plataforma de pavimentação: é a largura superior do pavimento de uma rodovia e se constitui pelos seguintes elementos:

- *Pista*: é a parte da plataforma de pavimentação destinada ao tráfego de veículos. Podem, por exemplo, ser constituídas por pista simples ou por duas pistas sendo estas separadas por um canteiro central ou divisor físico;
- *Faixa de tráfego*: é a parte da pista destinada ao fluxo de veículos em um mesmo sentido;
- *Terceira faixa*: é uma faixa adicional utilizada por veículos lentos nas rampas ascendentes muito inclinadas e longas em rodovias de pistas simples;
- *Acostamentos*: são faixas construídas lateralmente às faixas de tráfego com a finalidade de proteger os bordos do pavimento e servir para a parada ocasional dos veículos.

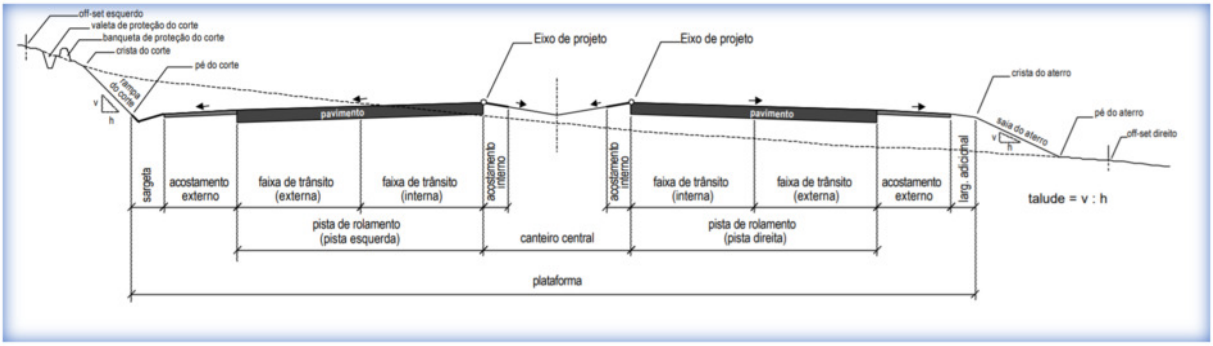
As Figuras 5 e 6 apresentadas a seguir ilustram os elementos da seção transversal em pistas simples e duplas.

Figura 5 – Elementos da seção transversal em pista simples



Fonte: LEE, 2013.

Figura 6 – Elementos da seção transversal em pista dupla



Fonte: LEE, 2013.

I.5 - CORTES

A Norma DNIT 106/2009[5] define cortes como sendo segmentos de rodovia, em que a implantação requer a escavação do terreno natural, ao longo do eixo e no interior dos limites das seções do projeto ("Off sets") que definem o corpo estradal, o qual corresponde à faixa terraplenada.

Ratton, E. et al. (2015, p. 11) define os cortes como segmentos que requerem escavação no terreno natural para se alcançar a linha do greide projetado, definindo assim transversal e longitudinalmente o corpo estradal. A Figura 7 a seguir ilustra trecho de obra rodoviária no qual se vislumbra uma seção em corte.

Figura 7 – Trecho de obra rodoviária: Seção de Corte

Fonte: Universidade Federal Fluminense (adaptado).[6]

[5] NORMA DNIT 106/2009 – ES: **Terraplenagem – Cortes – Especificação de serviço** ☞ Define a sistemática a ser empregada na execução dos cortes e no transporte de materiais escavados para implantação de rodovia.
[6] Disponível em: <http://uff-desprojcivil.blogspot.com.br/2009/10/projeto-em-secao-transversal-pista.html>. Acesso em 21/1/2018.

Para o referido professor, as operações de corte compreendem os seguintes serviços:

a) escavação dos materiais constituintes do terreno natural até a plataforma de terraplenagem definida pelo projeto;

b) escavação para rebaixamento do leito de terraplenagem, nos casos em que o subleito for constituído por materiais julgados inadequados;

c) escavação nos terrenos de fundação de aterros com declividade excessiva, comuns nos alargamentos de aterros existentes para que estes proporcionem condições para trabalho dos equipamentos e estabilidade às camadas a serem sobrepostas;

d) alargamentos além do necessário em algumas porções de cortes para possibilitar a utilização de equipamentos normais, comuns nos casos de escavações em cortes já existentes;

e) transporte dos materiais escavados para aterros ou bota-foras.

Consoante preconiza a Norma DNIT 106/2009, na etapa que envolve os cortes projetados, há de ser feito o controle geométrico da execução dos serviços, por meio de levantamento topográfico com gabarito apropriado e considerando os elementos geométricos estabelecidos nas "Notas de Serviço", com as quais deve ser feito o acompanhamento da execução dos serviços. Segundo a referida norma, por meio do nivelamento do eixo e das bordas e de medidas da largura, deve ser verificado se foi alcançada a conformação da seção transversal do projeto de engenharia, admitidas as seguintes tolerâncias:

a) variação de altura máxima, para eixo e bordas:

- Cortes em solo: ± 0,05 m;
- Cortes em rocha: ± 0,10 m.

b) variação máxima de largura de + 0,20 m para cada semi-plataforma, não se admitindo variação negativa.

I.6 - ATERROS

A Norma DNIT 108/2009[7] define os aterros como segmentos de rodovia cuja

[7] NORMA DNIT 108/2009 – ES: **Terraplenagem – Aterros – Especificação de serviço** ☞ Define a sistemática a ser empregada na execução de aterros como parte integrante da plataforma da rodovia.

implantação requer depósito de materiais provenientes de cortes e/ou de empréstimos no interior dos limites das seções de projeto (“Off sets”) que definem o corpo estradal, o qual corresponde à faixa terraplenada.

Ratton, E. et al. (2015, p. 17) apresenta os aterros como segmentos cuja implementação requer o depósito de materiais, para a composição do corpo estradal segundo os gabaritos de projeto sendo que os referidos materiais, se originam dos cortes ou de empréstimos. A Figura 8 a seguir ilustra trecho de obra rodoviária no qual se vislumbra uma seção de aterro.

Figura 8 – Trecho de obra rodoviária: Seção em aterro

Fonte: Universidade Federal Fluminense (adaptado).[8]

Vale mencionar que as operações de aterro compreendem a descarga, o espalhamento, a correção da umidade e a compactação dos materiais escavados, para confecção do corpo e da camada final dos aterros propriamente ditos, bem como para substituição de volumes retirados nos rebaixamentos de plataforma em cortes ou nos terrenos de fundação dos próprios aterros (Ratton, E. et al., 2015).

Consoante preconiza a Norma DNIT 108/2009, na etapa que envolve os aterros projetados, há de ser feito o controle geométrico da execução dos serviços por meio de levantamento topográfico com gabarito apropriado e considerando os elementos geométricos estabelecidos nas “Notas de Serviço”, com os quais deve ser feito o acompanhamento da execução dos serviços. Nos termos da norma mencionada, por meio da verificação do alinhamento, do nivelamento do eixo e das bordas e de medidas de largura deve ser verificado

[8] Disponível em: <http://uff-desprojcivil.blogspot.com.br/2009/10/projeto-em-secao-transversal-pista.html>. Acesso em 21/1/2018.

se foi alcançada a conformação da seção transversal do projeto de engenharia, admitidas as seguintes tolerâncias:

a) variação máxima da altura máxima de ± 0,04 m, para o eixo e bordas;

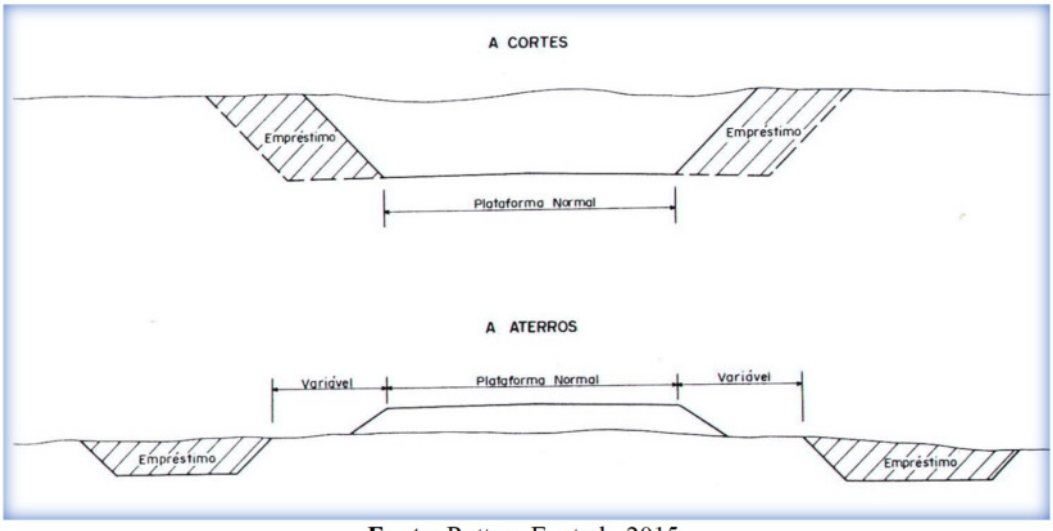
b) variação máxima da largura de + 0,30 m, para a plataforma, não sendo admitida variação negativa.

I.7 - EMPRÉSTIMOS

Empréstimos são escavações efetuadas em locais previamente definidos para a obtenção de materiais destinados à complementação de volumes necessários para aterros, quando houver insuficiência de volume nos cortes, ou por razões de ordem qualitativa de materiais, ou de ordem econômica, como nos casos de elevadas distâncias de transporte. Segundo Ratton, E. et al. (2015, p. 14), dependendo da situação, podem ser considerados dois tipos distintos de empréstimos: laterais e concentrados (ou localizados).

Os empréstimos laterais se caracterizam por escavações efetuadas próximas ao corpo estradal, sempre dentro dos limites da faixa de domínio. Nos casos de segmentos de cortes se processa o alargamento da plataforma com consequente deslocamento dos taludes e, no caso de aterros, escavações do tipo "valetões", em um ou ambos os lados. O que define a execução ou não desses empréstimos é a qualidade do material adjacente aos cortes ou aterros em que se fará a escavação e o volume necessário para suprir a carência de material no aterro de destino (Ratton, E. et al., 2015). A Figura 9 ilustra de forma esquemática um empréstimo lateral.

Figura 9 – Esquema de um empréstimo lateral

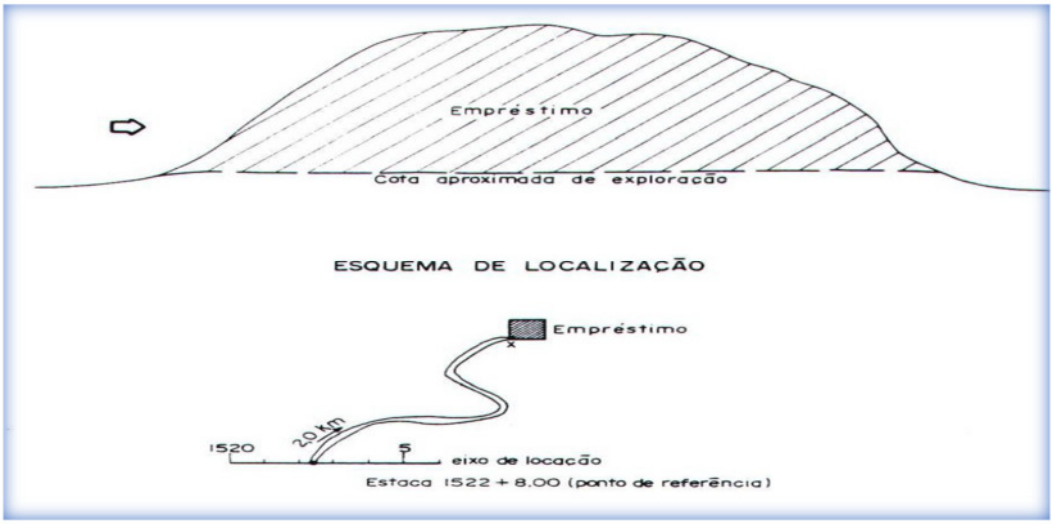


Fonte: Ratton, E. et al., 2015.

Os empréstimos concentrados são definidos por escavações efetuadas em áreas fora da faixa de domínio, em locais que contenham materiais em quantidade e qualidade adequada para confecção dos aterros. A utilização desse tipo de empréstimo se dá quando não existem materiais adequados nas faixas laterais a cortes ou aterros para efetivação de empréstimos laterais, ou quando esses últimos não proporcionam a retirada do volume total necessário (Ratton, E. et al., 2015).

Segundo Ratton, E. et al. (2015, p. 17), os locais dos empréstimos concentrados devem ser selecionados dentre as elevações do terreno natural próximas ao aterro a que se destinará o material, devendo-se definir a área e forma de exploração de tal maneira que, após a escavação, se tenha uma aparência topográfica natural. A Figura 10 ilustra de forma esquemática um empréstimo concentrado.

Figura 10 – Esquema de um empréstimo concentrado



Fonte: Ratton, E. et al., 2015.

I.8 – COMPENSAÇÃO DE VOLUMES

A execução de escavações em cortes ou empréstimos determina o surgimento de volumes de materiais que deverão ser transportados para aterros ou bota-foras. Vale mencionar que configuração do terreno onde se realiza uma operação de corte poderá determinar uma seção dita de “corte pleno” ou uma “seção mista”. Assim, dependendo da situação topográfica do segmento, caracterizam-se dois tipos distintos de compensação de volumes: compensação longitudinal ou compensação lateral (Ratton, E. et al., 2015).

I.8.1. COMPENSAÇÃO LONGITUDINAL

Para Ratton, E. et al., (2015, p. 23) uma compensação é chamada de longitudinal em duas situações, quais sejam:

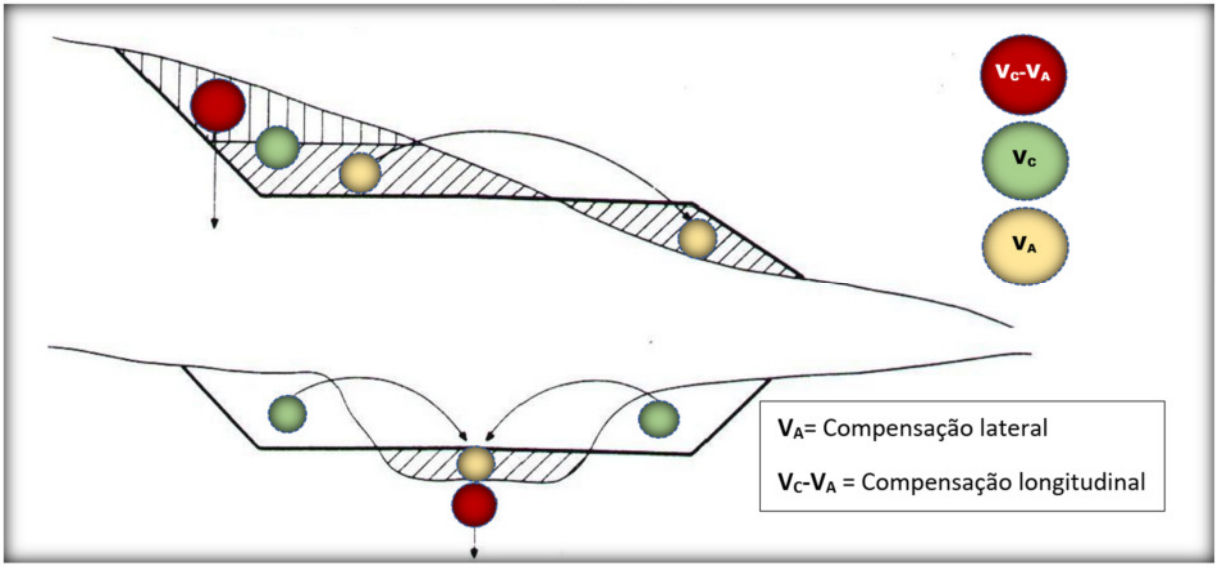
a) a escavação é em corte pleno, ou a escavação provém de empréstimo não lateral a aterro. Neste caso, todo o volume extraído será transportado para segmentos diferentes daquele de sua origem: de corte para aterro (ou bota-fora); de empréstimo para aterro, unicamente.

b) a escavação do corte é em seção mista onde o volume de corte supera o volume de aterro. Neste caso, o volume excedente de corte em relação ao volume necessário de aterro no mesmo segmento terá destinação a segmento distinto do de origem.

I.8.2. COMPENSAÇÃO LATERAL OU TRANSVERSAL

A compensação lateral caracteriza-se pela utilização de material escavado, no mesmo segmento em que se processou a escavação. Ocorre nos casos de segmentos com seções mistas ou quando a situação do terreno existente apresente pequenos aterros disseminados em cortes plenos ou vice-versa (Ratton, E. et al., 2015). A Figura 11 a seguir ilustra situação na qual o volume do corte (V_C) é maior que o volume do aterro (V_A).

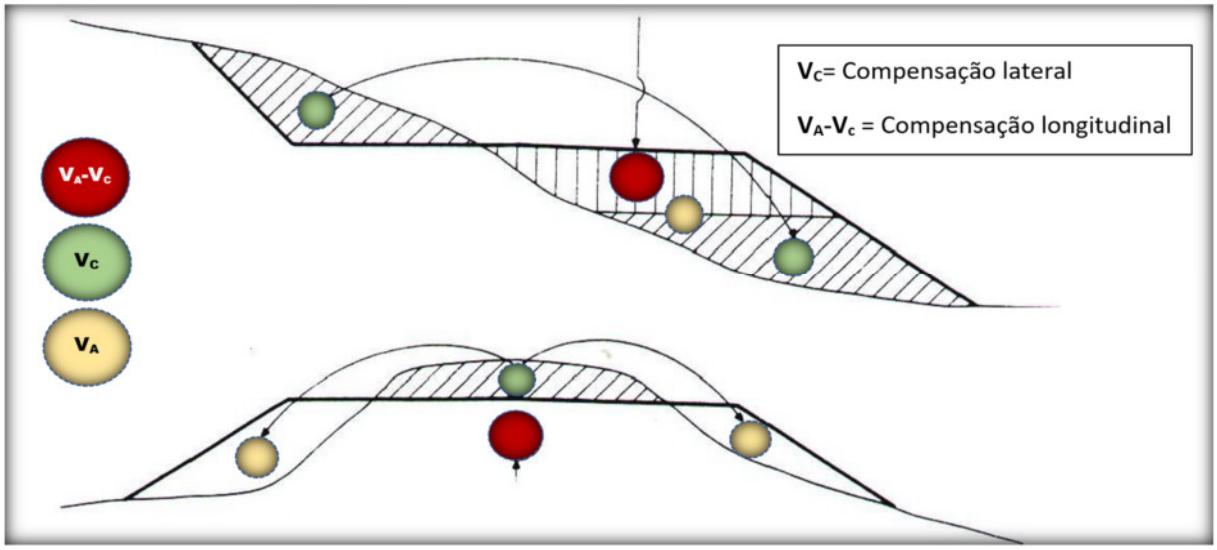
Figura 11 – Esquema de compensação de volumes: **volume do corte maior que o volume do aterro**



Fonte: Ratton, E. et al., 2015 (adaptado).

A Figura 12 a seguir ilustra situação na qual todo volume do aterro (V_A) é maior que o volume do corte (V_c).

Figura 12 – Esquema de compensação de volumes: **volume do aterro maior que o volume do corte**



Fonte: Ratton, E. et al., 2015 (adaptado).

I.9 – FASES DO PROJETO DE TERRAPLENAGEM: ANTEPROJETO E PROJETO

I.9.1 – ANTEPROJETO DE TERRAPLENAGEM

Segundo Ratton, E. et al. (2015, p. 49), a fase de Anteprojeto de um "Projeto Final de Engenharia Rodoviária" objetiva o estudo de alternativas de traçado para definição de uma única diretriz a ser levada à Fase de Projeto. Portanto, todos os trabalhos desenvolvidos visam a obtenção de dados para um comparativo técnico-econômico ao final desta fase. Nesse contexto, vale dizer que, como se trata de uma fase de definição de traçado, não se dispõe de dados de grande precisão, já que os elementos obtidos oferecem uma gama muito grande de informações, porém, em escalas reduzidas.

Para o Anteprojeto de Terraplenagem, conta-se com subsídios retirados do Anteprojeto Geométrico e das investigações geotécnicas desenvolvidas em cada alternativa. Observa-se que o Anteprojeto Geométrico é elaborado, comumente, sobre plantas topográficas em escala 1:5.000, estas obtidas por processo aerofotogramétrico ou por processo topográfico convencional. No entanto, os Estudos Geotécnicos investigam a natureza dos cortes e subleitos por meio de sondagens com coleta de amostras para ensaios de laboratório, com espaçamento da ordem de 1.000 m, contendo, no mínimo, um furo por corte (Ratton, E. et al., 2015).

Com base nesses subsídios, o Anteprojeto de Terraplenagem, busca determinar, com as aproximações possíveis, os serviços e as consequentes quantidades, com vistas à definição dos custos envolvidos, para cada uma das alternativas eventualmente apresentadas.

Importa mencionar que, para fins da pesquisa em epígrafe, a qual tem entre seus objetivos identificar métodos alternativos aos procedimentos convencionais utilizados na elaboração do anteprojeto de terraplenagem, em especial, no que tange ao cálculo de volumes, não serão feitas comparações abarcando os Estudos Geotécnicos por meio dos quais se investiga a natureza dos cortes e aterros. Assim, para fins desta pesquisa, a referência para a precisão dos volumes topográficos nos anteprojetos deve ser compatível com as limitações de informação contidas nas cartas topográficas na escala 1:5.000.

I.9.2 – PROJETO DE TERRAPLENAGEM

Já a fase de um "Projeto Final de Engenharia Rodoviária" tem por objetivo a determinação de todos os elementos necessários à construção, bem como para a elaboração de editais e propostas de empresas construtoras para execução dos serviços (Ratton, E. et al., 2015).

Desta forma, os dados para cada item de projeto devem ser os mais precisos possíveis. Para o caso específico do Projeto de Terraplenagem, os dados obtidos do Projeto Geométrico são provenientes de levantamentos convencionais de campo, com aparelhagem de precisão, do qual decorrem plantas contendo as seguintes representações:

a) elementos horizontais do perfil longitudinal em escala 1:2.000;

b) elementos verticais do perfil longitudinal e as seções transversais em escala 1:200.

Do exposto, vale mencionar que o Projeto de Terraplenagem terá sua precisão compatível com a precisão dos referidos itens de projeto, e não poderá deixar dúvidas acerca dos problemas e das soluções construtivas (Ratton, E. et al., 2015).

I.10 – NOÇÕES ACERCA DO CÁLCULO DE VOLUMES

Inicialmente, vale mencionar que o objetivo do presente estudo não é descrever em detalhes como são feitos os cálculos de volumes nos projetos e na execução da terraplenagem. Isso porque, são vários métodos possíveis e aceitáveis pela comunidade científica. O que importa mencionar é que, tradicionalmente, para cada método, são levados em consideração os dados oriundos dos levantamentos topográficos.

Segundo Ratton, E. et al. (2015, p. 67), existem diversos procedimentos de cálculo que poderão ser mobilizados com vistas à determinação dos volumes de cortes e aterros. Alguns, mais elaborados e, portanto, de maior precisão (métodos precisos), são compatíveis com o nível de detalhamento requerido pela fase de projeto. São exemplos o método mecânico e o método computacional. Outros, contudo, de aplicação mais simples, condizem com o caráter aproximativo pertinentes à fase de anteprojeto (métodos expeditos), a exemplo das deduções de volumes de cartas topográficas por meio de expressões matemáticas analíticas.

Nestes procedimentos, os volumes de cortes ou aterros são calculados para os "prismas" compreendidos entre duas seções transversais consecutivas, os quais são denominados Inter perfis (Ratton, E. et al., 2015). Nesses cálculos de volume, algumas premissas são colocadas, quais sejam:

a) admite-se que o terreno varia de forma linear entre duas seções consecutivas;

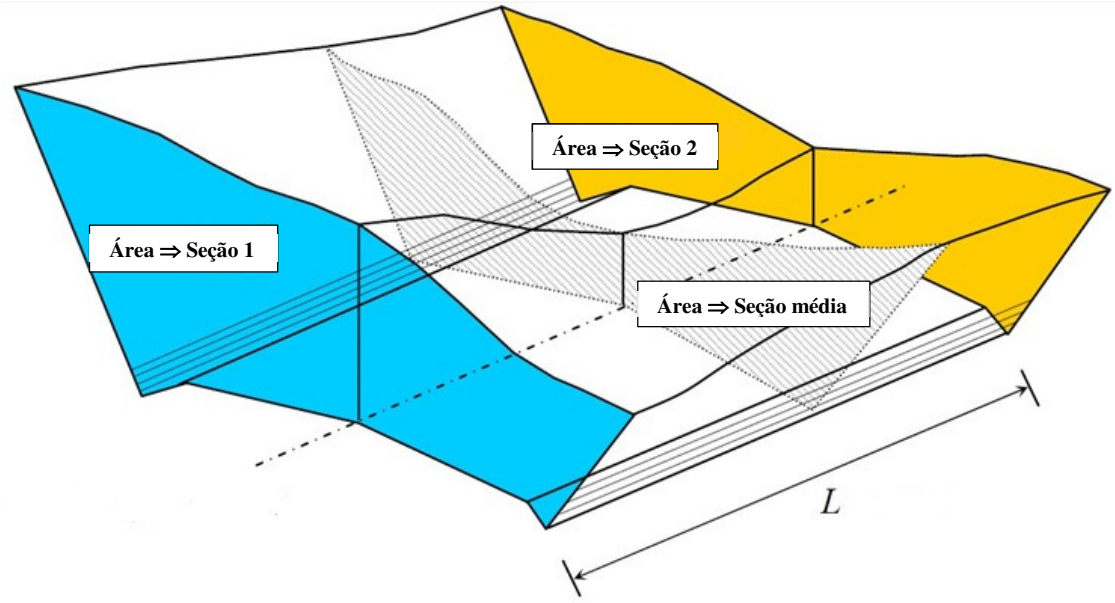
b) para distâncias (L) entre seções de 20 m, os erros não são significativos;

c) é necessário supor que existe um sólido geométrico cujo volume será facilmente calculado;

d) o volume proveniente de uma série de prismóides – sólidos geométricos limitados nos extremos por faces paralelas e lateralmente por superfícies planas;

e) no campo, as faces paralelas do prismóides serão constituídas pelas seções transversais extremas. A superfície plana é constituída pela plataforma da estrada ou pela superfície do terreno natural e taludes. A Figura 13 ilustra um prismóide cujo volume pode ser calculado a partir das informações das seções transversais consecutivas.

Figura 13 – Sólido geométrico: Prismóide



Fonte: Lopes, 2015 (adaptado).

Para o prismóide ilustrado na Figura 13, a fórmula utilizada para o cálculo do volume é a seguinte:

$$V = \frac{L}{6} . (A_1 + 4.A_m + A_2)$$

Também é possível calcular o volume do sólido geométrico mencionado pela fórmula das áreas médias:

$$V_m = \frac{L}{2} . (A_1 + A_2)$$

Importa mencionar que, atualmente, os cálculos são obtidos por meio de softwares especializados a exemplo do TOPOEVN, TOPOGRAPH e AUTOCAD. Também vale dizer que a avaliação das áreas das seções transversais, com menor ou maior precisão, é que determinará o processo de cálculo do volume, determinando a precisão deste.

Deve ser destacado que nos cálculos de volumes, a distância de 20 metros entre as seções transversais, utilizada como padrão nestes cálculos pelos projetistas, considera que a variação do terreno nesse espaço é linear. Com isso, por óbvio, por mais precisa que seja a medição das seções transversais, perde-se alguma precisão no cálculo de volumes com a simplificação mencionada. Esso ponto será discutido na comparação que será apresentada no Capítulo IV, na qual foram comparados volumes de terreno calculados por meio de levantamento topográfico clássico e aplicando técnicas fotogramétricas a imagens obtidas por VANTs.

I.11 – SÍNTESE DAS PRECISÕES REQUERIDAS PARA O CÁLCULO DE VOLUMES TOPOGRÁFICOS EM CADA FASE DA TERRAPLENAGEM

O Quadro 1 a seguir sintetiza as especificações preconizadas pela bibliografia especializada e pelo DNIT, apresentadas no capítulo corrente, no que se refere à elaboração do Anteprojeto e do Projeto de Terraplenagem bem como no que diz respeito às precisões requeridas na fase de execução.

Quadro 1 – Precisão requerida em cada fase da terraplenagem

Fases	Precisão requerida
Anteprojeto	▪ Informações topográficas na escala 1:5.000 (horizontais e verticais).
Projeto	▪ Elementos horizontais do perfil longitudinal em escala 1:2.000; ▪ Elementos verticais do perfil longitudinal e as seções transversais em escala 1:200; ▪ Seções transversais de 20 em 20 metros.
Execução	**Cortes** – Norma DNIT 106/2009 ▪ Variação de altura máxima, para eixo e bordas: Cortes em solo: ± 0,05 m; Cortes em rocha: ± 0,10 m. ▪ Variação máxima de largura de + 0,20 m para cada semi-plataforma, não se admitindo variação negativa.
	Aterros – Norma DNIT 108/2009 ▪ Variação máxima da altura máxima de ± 0,04 m, para eixo e bordas; ▪ Variação máxima da largura de + 0,30 m, para a plataforma, não sendo admitida variação negativa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

CAPÍTULO II - MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO: CONCEITOS BÁSICOS

II.1 - INTRODUÇÃO

A origem do termo Modelo Digital de Terreno (MDT) é creditada aos trabalhos realizados pelo Prof. Charles L. Miller, do *Massachusetts Institut of Technology* (MIT) entre 1955 e 1960. Segundo Matos (2005), o Prof. Miller estava realizando pesquisas para o Departamento de Obras Públicas do Massachusetts (*Massachussets Department of Public Works*) e para a Agência Federal de Rodovias Públicas (*U.S. Bureau of Public Roads*), com o objetivo de elaborar projetos de rodovias através do uso do computador utilizando dados do terreno adquiridos por meio de fotogrametria. Na ocasião, vários programas computacionais foram preparados para processar os dados com vistas a gerar a linha central do perfil da estrada e as curvas de nível, determinar as regiões de corte e de aterro e obter áreas de seções transversais e os diagramas de distâncias para transporte de terra e cálculo de volumes nas operações de corte e aterro. Foram desenvolvidos, ainda, programas para determinar o perfil ótimo da rodovia baseado numa malha, nos limites da estrada e suas curvas, e para calcular a quantidade de terra a ser deslocada, bem como as distâncias de transporte de uma forma otimizada para diminuir custos e tempo (Matos, 2005, p. 37).

Petrie & Kennie (1990) ensinam que o termo Modelo Digital do Terreno (MDT) apareceu pela primeira vez no artigo "*The digital terrain model – theory and applications*, publicado na revista *Photogrammetric Eng. n.3, V.24, pp. 433-442, 1958*, dos autores Charles Miller e R. A. LaFlamme, ambos do Instituto de Tecnologia de Massachusetts. No referido artigo, os autores assim definiram o MDT:

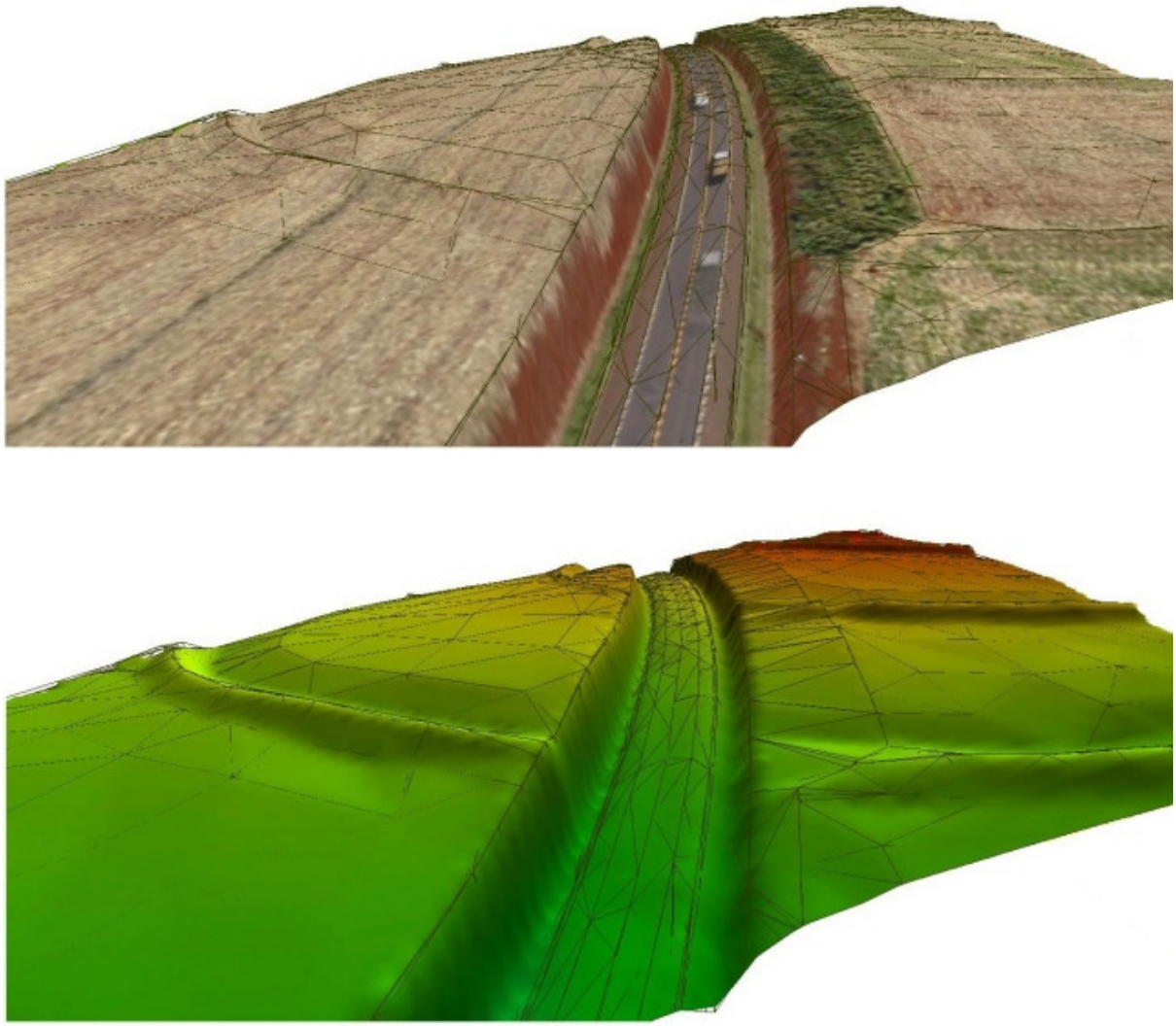
> "The digital terrain model (DTM) is simply a statistical representation of the continuous surface of the ground by a large number of selected points with known X, Y, Z coordinates in an arbitrary coordinate field" (O modelo digital do terreno (MDT) é simplesmente uma representação estatística da superfície contínua do terreno por um grande número de pontos selecionados com conhecimento das coordenadas X, Y, Z em um sistema de coordenadas arbitrário).

Alguns autores (Andrade, 1998) preferem usar o termo Modelo Digital de Elevação (MDE) para designar apenas a elevação da superfície e o termo MDT significando um modelo

mais completo do terreno, incluindo outras feições, tais como: casas, prédios, vegetação, árvores etc.

Brito, Prado e Augusto (1999) definem Modelo Digital de Superfícies (MDS) qualquer representação numérica para uma determinada superfície física do terreno (relevo, por exemplo) a ser representada. Desse modo, para os referidos autores, um MDS pode expressar vários tipos de atributos tais como temperatura, pressão e declividade, e também altitude. Assim, quando, um MDS exprime altitudes, chama-se Modelo Numérico de Elevações (MNE) ou Modelo Digital de Elevações (MDE ou DEM, Digital Elevation Model). A Figura 14 ilustra, respectivamente, um MDT e um MDE.

Figura 14 – Modelo Digital do Terreno e Modelo Digital de Elevação



Fonte: NewGeo Mapeamento Digital.[9]

[9] Disponível em: < http://www.newgeomapdigital.com.br/aplicacoes>. Acesso em 10/1/2018.

Segundo Felgueiras (2001), existem três nomenclaturas diferentes relativas a modelos tridimensionais, quais sejam:

a) MDT – Modelo Digital de Terreno: utilizado para modelagem do relevo e outros tipos de informações que variam de acordo com ele. Ex.: temperatura;

b) MNT – Modelo Numérico de Terreno: quando se utiliza uma variável "z" de uma dada área da superfície terrestre, essa variável pode ser de qualquer natureza, tanto física quanto socioeconômica, como, por exemplo, nível de poluição atmosférica e densidade populacional;

c) MDE – Modelo Digital de Elevação: utilizado exclusivamente para a modelagem de relevo.

A despeito da variação das nomenclaturas que tratam da modelagem digital do terreno, importa mencionar que, para fins desta pesquisa, será utilizado o conceito de Modelo Digital de Elevações - MDE, já que o objetivo é identificar as precisões alcançáveis no cálculo de volumes topográficos referentes ao relevo natural que será objeto de cortes e aterros necessários à implementação de uma obra rodoviária.

II.2 – FORMAS DE REPRESENTAÇÃO DA SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA

São várias as estruturas utilizadas para representar as elevações da superfície. Entre elas, as mais utilizadas são as três a seguir descritas:

a) Rede Triangular Irregular (RTI), mais conhecida pela sigla em inglês por *Triangular Irregular Network* (TIN), com ou sem linhas de descontinuidade (breaklines);

b) Malha quadrada ou retangular;

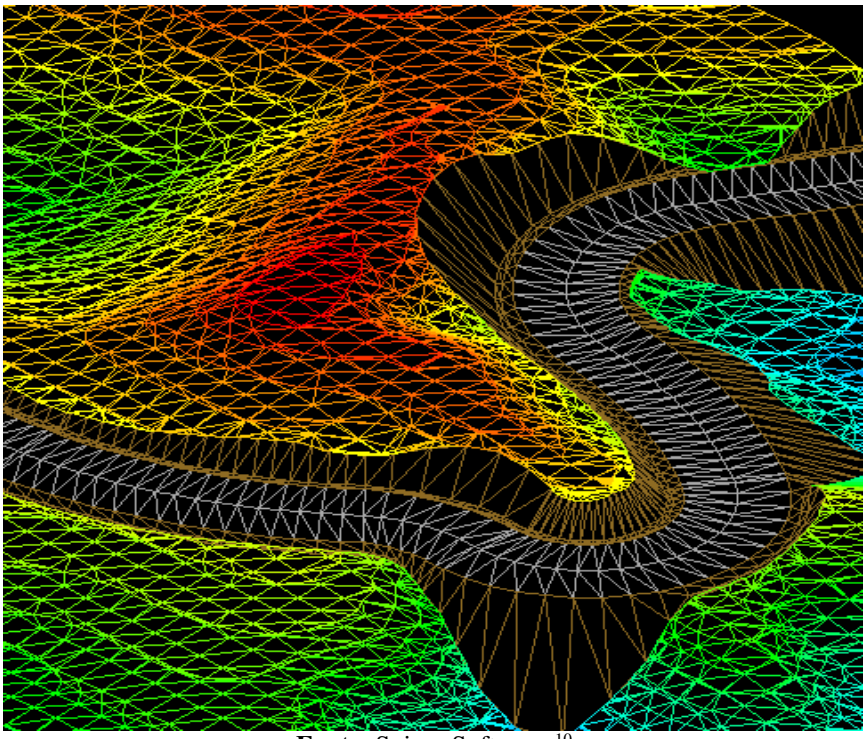
c) Curvas de nível com ou sem pontos cotados.

II.2.1 – TRIANGULAR IRREGULAR NETWORK

Segundo Maune (2001), a *Triangular Irregular Network* é composta pelos pontos originais, ligados três a três, formando triângulos irregulares. Os pontos, usados para a construção do modelo (dados), representam um conjunto de localizações na superfície e normalmente incluem os que representam descontinuidades na inclinação do terreno como

picos, depressões, divisores de águas, vales e desfiladeiros. A Figura 15 a seguir ilustra uma visualização geométrica de um TIN.

Figura 15 – Visualização de uma Rede Triangular Irregular



Fonte: Spinar Software.[10]

Nessa representação os valores planimétricos e altimétricos observados são mantidos sem nenhuma transformação para uma estrutura intermediária de dados. Segundo Weibel et al. (1991), os modelos mais precisos devem manter consistência com o grau de variação das altitudes obtidas no terreno. Assim, quando o terreno se torna mais irregular a resolução do modelo deve consequentemente aumentar por meio da inclusão de mais pontos na área de alta complexidade.

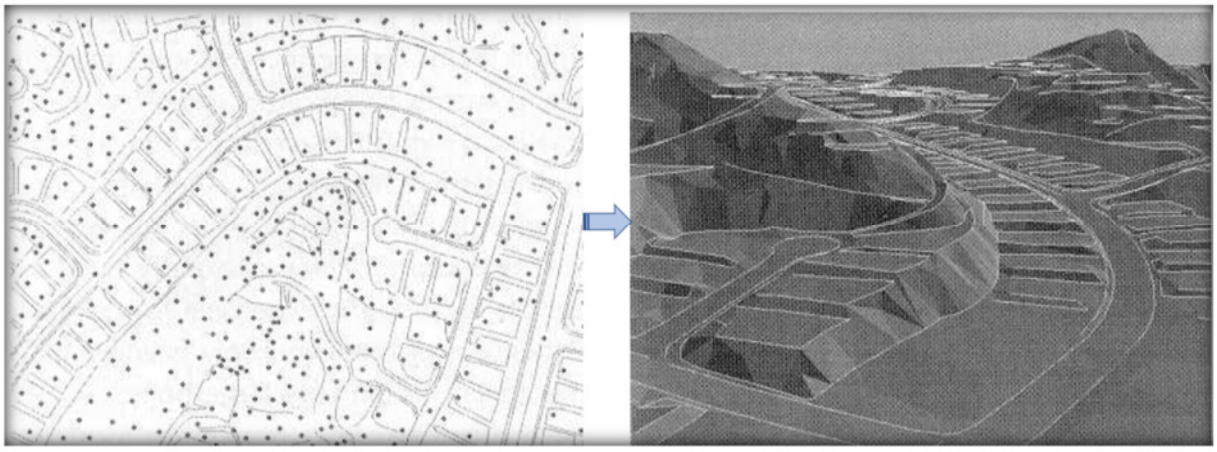
Nas redes TIN é possível introduzir linhas de descontinuidade de acidentes geográficos (*breaklines*) aumentando a informação de um MDT. Tais linhas representam descontinuidades naturais ou artificiais importantes na inclinação do terreno. Como exemplos de descontinuidades naturais podem ser citados os divisores de águas, os canais, as falhas geológicas e os lagos. As descontinuidades artificiais são exemplificadas por reservatórios, prédios e taludes de rodovias. Segundo Chen (1988), estas linhas não devem ser atravessadas por arestas da triangulação. Vale mencionar que a não utilização destas linhas gerará, quase que

[10] Disponível em: < http://www.spinar.cz/produkt/civil_design_suite_pro_turbocad/images/9.png>. Acesso em 14/1/2018.

invariavelmente, suavização nos vales e nas cumeeiras, o que não é desejável quando se deseja a representação precisa de tais feições.

A Figura 16 apresenta um conjunto de pontos de uma amostra e linhas de descontinuidade utilizados para criar um TIN bem como a respectiva vista em perspectiva do resultado no modelamento da superfície utilizando estas informações.

Figura 16– Conjunto de pontos de uma amostra e a respectiva vista em perspectiva



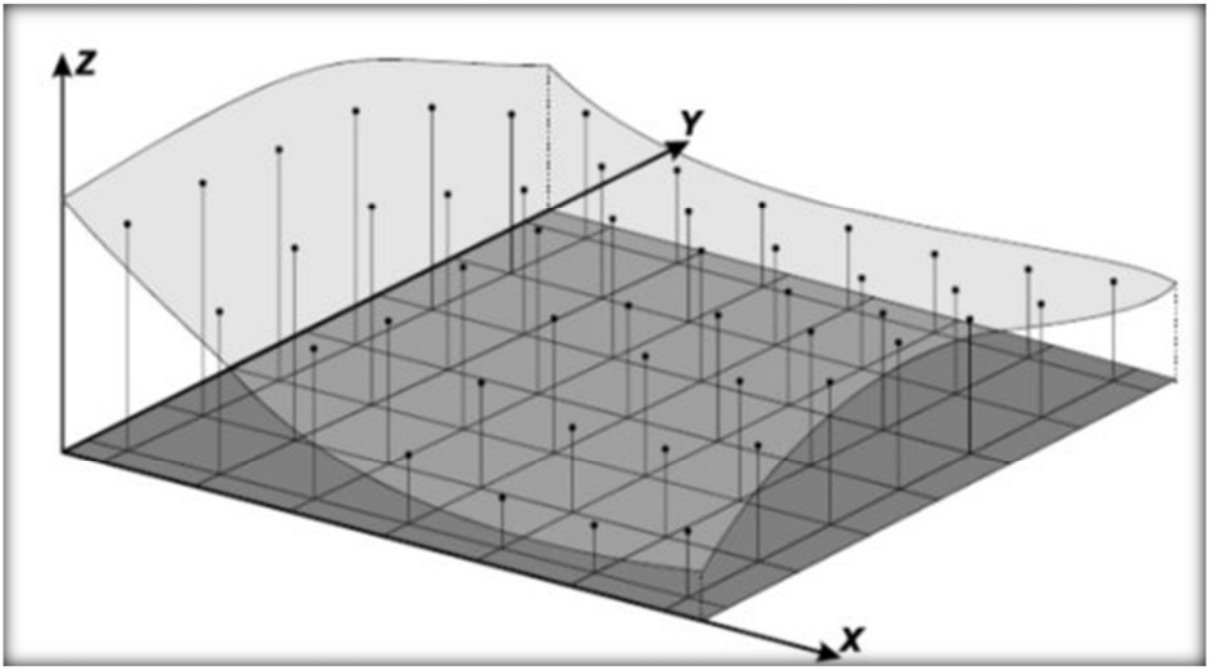
Fonte: Maune, 2001 (adaptado).

Segundo Maune (2001), os modelos baseados em redes TIN possuem vantagens com relação a outras representações da superfície. A mais importante é que esta rede se adapta naturalmente à variação da complexidade do terreno. Onde houver pouca variação na superfície somente uma pequena quantidade de pontos é amostrada e onde houver muita variação, mais dados são coletados.

II.2.2 – MALHA QUADRADA OU RETANGULAR

Segundo Felgueiras (2001), a malha quadrada consiste num conjunto de pontos espaçados regularmente com vistas a representar determinada superfície topográfica. Para essa estrutura, o processo de geração implica em estimar os valores da altitude de cada ponto da malha a partir do conjunto de amostras de entrada. É importante notar que, se a estimativa da altitude de cada ponto da malha for realizada a partir de amostras vizinhas, é necessário determinar essa vizinhança. A Figura 17 a seguir ilustra uma malha retangular.

Figura 17 – Malha quadrada ou retangular



Fonte: Albrecht, 2009.

Vale mencionar que a resolução da malha (abertura) depende do nível de detalhamento dos dados de entrada. Tal abertura deve ser suficientemente pequena para se obter o detalhamento exigido, mas não tão grande que dificulte o armazenamento no computador e as análises posteriores. Na maioria dos modelos, adota-se uma malha quadrada devido ao seu baixo custo, rápida leitura no computador e à eficiência da estrutura dos dados para algoritmos de análise e representação da superfície. É apropriada, entre outros casos, para aplicações em cartografia em escalas pequenas onde a precisão posicional absoluta não precisa ser de extrema qualidade e as características da superfície não precisam ser exatamente determinadas.

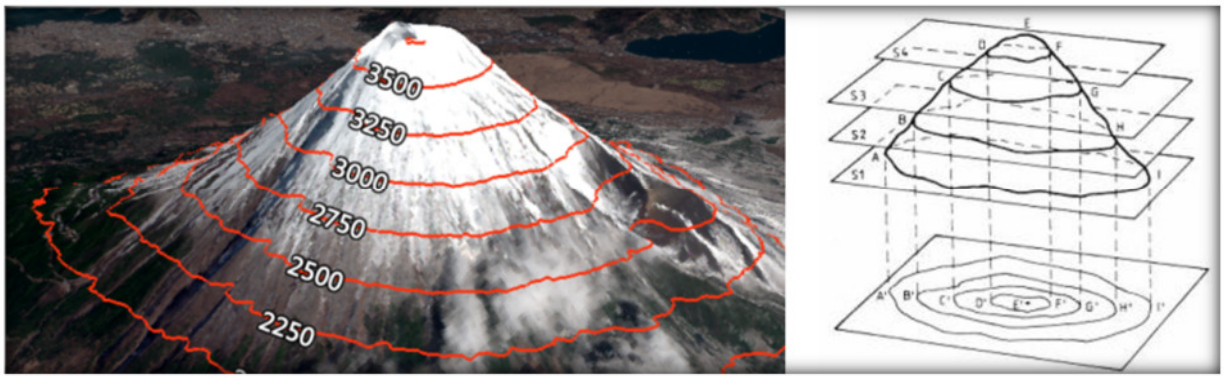
Nesse contexto, vale mencionar que a desvantagem da representação em malha retangular é uma possível perda de informação em regiões de descontinuidades, pois as altitudes podem sofrer degradação no momento da amostragem, isto é, a interpolação aplicada aos dados leva a resultados piores. Por esta razão, este tipo de malha pode não ser adequado para representar objetos artificiais como estradas, edifícios, etc, sendo mais apropriado para modelos de terreno nos quais não existam descontinuidades naturais.

II.2.3 – CURVAS DE NÍVEL

Segundo Matos (2005), as curvas de nível ou isolinhas são linhas de iguais valores de cota de uma superfície. Colocando de outra maneira, curvas de nível são linhas que ligam

pontos, na superfície do terreno, que têm a mesma cota (mesma altitude). A Figura 18 a seguir apresenta o conceito das curvas de nível.

Figura 18 – Curvas de nível: conceito



Fonte: GIS Geography (adaptado).[11]

As isolinhas são muito usuais para a representação da topografia em formato bidimensional. Por meio da representação por curvas de nível, é fácil reconhecer cumes, vales, picos e outras características que não podem ser facilmente interpretadas por uma malha triangular ou retangular. Nesse contexto, vale dizer que este tipo de representação se destina principalmente a propósitos de representação cartográfica. Com isso é possível, por meio de digitalização dessa informação altimétrica (caso conste de cartas topográficas em meio analógico) ou quando esta informação já tenha sido gerada em meio digital, obter modelos de elevação por meio da utilização de softwares específicos.

Contudo, a depender do intervalo das curvas, feições topográficas em terceira dimensão podem não ser adequadamente representadas já que, em função da precisão requerida, as interpolações entre as curvas podem esconder feições (como por exemplo volumes) de interesse.

II.3 – MODELAGEM MATEMÁTICA

Segundo Matos (2001), para construir modelos digitais de elevação, é necessário utilizar técnicas de interpolação. Referidas técnicas são empregadas quando é necessário obter valores para células de uma malha quadrada a partir de uma triangular, quando se quer adensar a malha ou estimar valores em pontos internos da mesma e outras situações.

[11] Disponível em: < https://gisgeography.com/contour-lines-topographic-map/>. Acesso em 4/2/2018.

Nessas modelagens, um princípio básico compartilhado por todos os métodos de interpolação é o de que pontos mais próximos entre si tendem a ter características mais semelhantes do que pontos mais distantes. Segundo Burrough (1986), esses métodos podem ser caracterizados como:

a) Determinísticos ou geoestatísticos: Os primeiros são baseados diretamente nos valores medidos na vizinhança e/ou fórmulas matemáticas aplicadas a estes mesmos valores. Já os métodos geoestatísticos são modelos estatísticos probabilísticos que incluem auto correlação, a qual expressa a intensidade de similaridade entre as amostras medidas em relação à distância e à direção;

b) Locais ou globais: Os interpoladores locais aplicam algoritmos repetidamente a subconjuntos do conjunto total de pontos. Aqui uma alteração num valor de entrada afeta apenas o resultado de um subconjunto. Os interpoladores globais determinam uma função que é aplicada em toda a região a interpolar. Assim, uma alteração num valor de entrada afeta o mapa inteiro;

c) Transição gradual ou abrupta. Tais interpoladores produzem superfícies que variam de forma gradual ou abrupta, como o próprio nome já diz;

d) Exatos ou aproximados. Os interpoladores exatos respeitam os valores da amostra sobre a qual o modelo é baseado, portanto, a superfície passa através de todos os pontos da amostra. Os interpoladores aproximados baseiam-se no fato de que, em muitas amostras, existem tendências globais, com variações suaves, e simultaneamente flutuações locais, que variam rapidamente.

Ainda segundo Segundo Burrough (1986), as funções interpolantes normalmente utilizadas, com as suas respectivas características, são:

a) Média das altitudes das amostras vizinhas (determinístico, local de transição e aproximado);

b) Triangulação de Delaunay e vizinho natural (determinístico, local, de transição abrupta e exato);

c) Superfície de tendência (probabilístico, global, de transição gradual e aproximado);

d) Série de Fourier (probabilístico, global, de transição gradual e aproximado);

e) Superfície de mínima curvatura (*Spline*) (determinístico, local, de transição gradual e exato);

f) Krigagem (probabilístico, local, transição local e exato).

A função interpolante que se utiliza da média das altitudes das amostras vizinhas é um dos esquemas de interpolação mais simples para estimar valores de altitude para os pontos de uma malha regular ou irregularmente espaçada (FELGUEIRAS, 2001). Entre as principais alternativas dessa função estão: (i) adotar a cota do vizinho mais próximo; (ii) calcular a média simples; (iii) calcular a média ponderada com n vizinhos, sendo n variável e; (iv) calcular a média ponderada, impondo um mínimo de vizinhos por quadrante (Matos, 2005, p. 68).

A triangulação de Delaunay é o mais frequente método utilizado para estabelecer os triângulos dentro de uma representação qualquer de pontos, para aplicar um método de interpolação. A configuração obtida tem a propriedade de que, uma circunferência qualquer definida pelos três pontos de um triângulo não contém qualquer outro ponto do conjunto em seu interior. A construção de uma triangulação de Delaunay é um problema do domínio da computação gráfica, onde a otimização do algoritmo é um fator crítico para permitir o processamento de grandes volumes de dados (Matos, 2005, p. 70).

O método pelo qual uma superfície contínua é ajustada aos pontos amostrados irregularmente espaçados pelo critério de regressão por mínimos quadrados é chamado superfície de tendência. Mencionado ajuste é implementado através de polinômios que podem ser de diversas ordens ou graus. Com essa função, aumentando o número de termos pode-se conseguir, aparentemente, um melhor ajuste à amostra (Matos, 2005, p. 73).

A série de Fourier é o método que, através das funções seno e coseno, tenta representar o comportamento do terreno. Referido método quase não é utilizado como ferramenta de interpolação para mapeamento da superfície, sendo mais adotado para análise estrutural. Em geral, as variações da superfície da Terra são mais complexas do que variações periódicas estritas (Matos, 2005, p. 74).

As *Splines* são técnicas de interpolação que usam polinômios para criar uma superfície que minimize a curvatura da mesma, resultando numa superfície suavizada que passa através dos pontos da amostra. A imagem de uma *spline* aproxima-se de uma superfície flexível passando através de um conjunto de pontos. Trata-se de um método muito útil para criar

modelos de elevação em áreas com leve variação do terreno e suaves transições. Contudo, não é apropriado para mudanças bruscas em pequenas distâncias sendo que, nestas situações, este tipo de interpolação tende a exagerar o valor dos pontos interpolados nas áreas de variações bruscas (Matos, 2005, p. 75).

O objetivo da krigagem é criar uma superfície que minimize o erro dos valores avaliados e do modelo estatístico da superfície, sendo talvez o método de interpolação mais notável. Este estimador abrange um conjunto de métodos de estimação, sendo o mais usual a krigagem normal, a qual assume que as médias locais não sejam necessariamente próximas da média da população. Neste caso a estimativa é realizada utilizando apenas os pontos vizinhos. É o método mais apropriado para a interpolação de dados de terreno. Apresenta, como desvantagem, o custo computacional, proporcional a n^3, onde n é o número de pontos da amostra, tornando-se extremamente dispendioso para grande volume de dados (Matos, 2005, p. 77).

Vale mencionar que o objetivo do presente estudo não contempla as formulações matemáticas que cada função interpolante citada possui. Basta saber que, por trás dos softwares que permitem criar modelos digitais de elevação, tais formulações estarão presentes na programação e, em alguns casos, o operador será chamado a escolher qual delas deve ser utilizada na modelagem em curso.

CAPÍTULO III – FONTES DE INFORMAÇÕES DO TERRENO APTAS À GERAÇÃO DO MDE: LIMITES E POSSIBILIDADES DE EMPREGO NO CÁLCULO DE VOLUMES TOPOGRÁFICOS

III.1 - INTRODUÇÃO

Atualmente, existem várias fontes de dados para se obter altitudes tendo por objetivo a elaboração de Modelos Digitais de Elevação. Segundo Brito & Coelho Filho (2007), um dos primeiros métodos que foi por muito tempo adotado era a digitação das coordenadas de determinados pontos, obtidos por inspeção em cartas topográficas. Em razão de se tratar de uma abordagem pouco prática e passível de erros, tal método não se popularizou.

A digitalização de cartas em papel através de mesa digitalizadora (Figura 19) é outro método que ainda hoje é utilizado, sobretudo quando o mapeamento do local desejado só existe em meio analógico (papel). O aparelho mencionado possui um transdutor com um cursor que transfere as coordenadas planimétricas do mapa que está sobre a superfície da mesa. Assim um operador, percorrendo uma curva de nível com o cursor, consegue obter as coordenadas planimétricas de pontos situados sobre a curva. Com isso, um documento cartográfico analógico pode ser digitalizado a partir desses procedimentos (Brito & Coelho Filho, 2007, p.158).

Figura 19 – Mesa digitalizadora

Fonte: Laboratório de Cartografia, UFPR.[12]

[12] Disponível em:< http://www.cartografica.ufpr.br/portal/?page_id=32>. Acesso em 10/2/2018.

Um outro método que pode ser empregado para a aquisição de dados para um modelo digital de elevação é o que se utiliza de equipamentos GPS em método cinemático ou semi cinemático (Figura 20). Nesse caso, percorre-se o terreno com a antena portátil, ligada a um coletor de feições, e, ao fim, descarregam-se os dados para seu pós-processamento. Vale mencionar que nesse método, assim como no levantamento topográfico com estações totais ou teodolitos, o contato com ao terreno (alvo) é direto.

Figura 20 – Levantamento de informações altimétricas com GPS

Fonte: LEPTOP Topografia e Geoprocessamento.[13]

Para além das metodologias acima mencionadas, interessa ao presente estudo métodos que utilizem sensores remotos. Nessa senda, Lillesand e Kiefer (1994) definem sensoriamento remoto como a ciência e a arte de obter informação sobre um objeto (alvo), área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por um dispositivo (sensor) que não está em contato direto com o objeto, área ou fenômeno sob investigação. Portanto, os sensores remotos são equipamentos que captam e registram a energia refletida ou emitida pelos elementos da superfície terrestre. As câmeras fotográficas, as câmeras de vídeo, os radiômetros, os sistemas de varredura (scanners) e os radares são exemplos de sensores.

Considerando a fonte de energia, os sensores são classificados como ativos ou passivos[14]. Sensores ativos são aqueles que possuem sua própria fonte de radiação

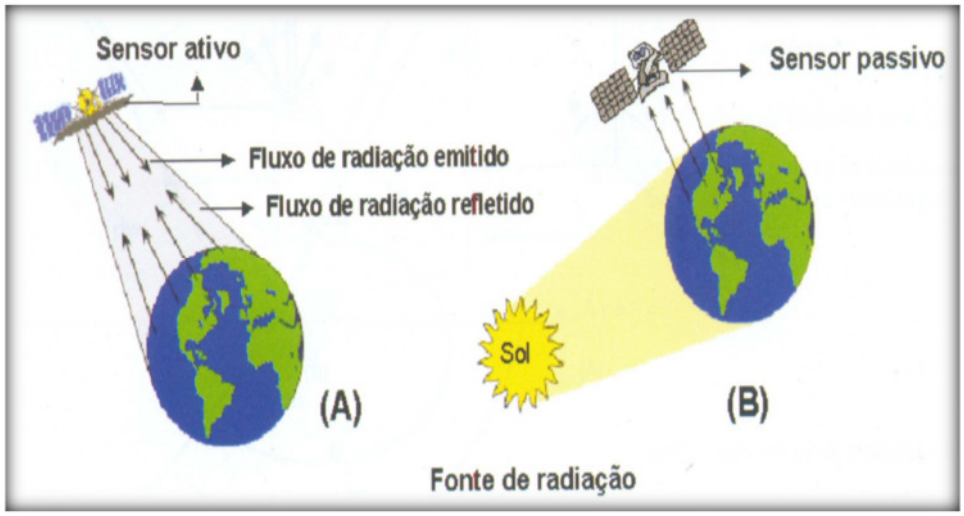
[13] Disponível em:< http://www.leptoptopografia.com.br/atuacao.php#geo>. Acesso em 7/2/2018.

[14] **Sensores passivos** detectam a radiação solar refletida a partir da terra e radiação térmica no **comprimentos de onda visíveis e de infravermelhos do espectro eletromagnético**. Eles não emitem sua própria radiação, mas apenas recebem luz natural e radiação de calor refletida pela superfície da Terra (Löffler et al. 2005). Já os **sensores**

eletromagnética, como os radares instalados em aviões ou em satélites. Já os sensores passivos não possuem uma fonte própria de radiação, medindo a radiação solar refletida ou radiação emitida pelos alvos, como os sistemas fotográficos e satélites.

A Figura 21 ilustra a diferença entre os sensores ativos e passivos.

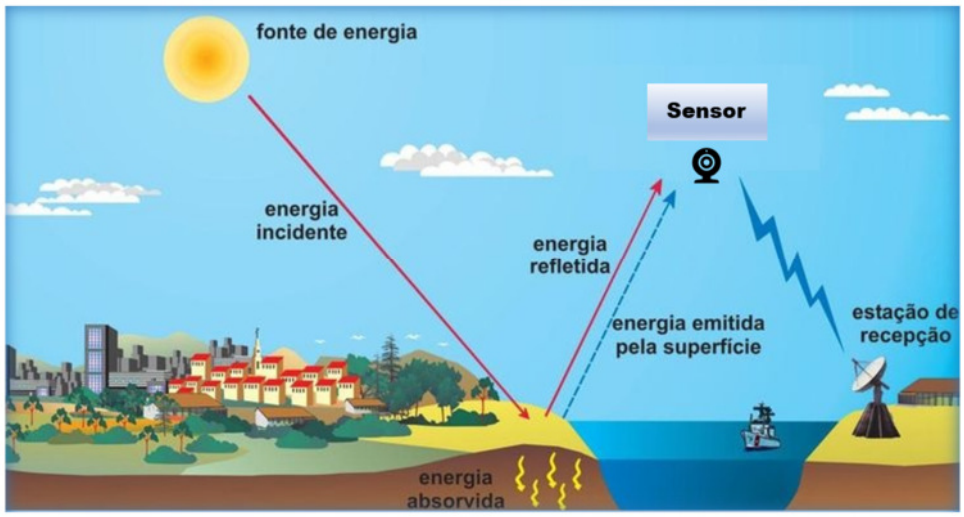
Figura 21 – Diferença entre os sensores ativos e passivos



Fonte: Zaidan, 2011.

Na Figura 22, apresenta-se de maneira mais completa como se dá o ciclo de captura das informações por meio de sensores remotos passivos.

Figura 22 – Sensores passivos

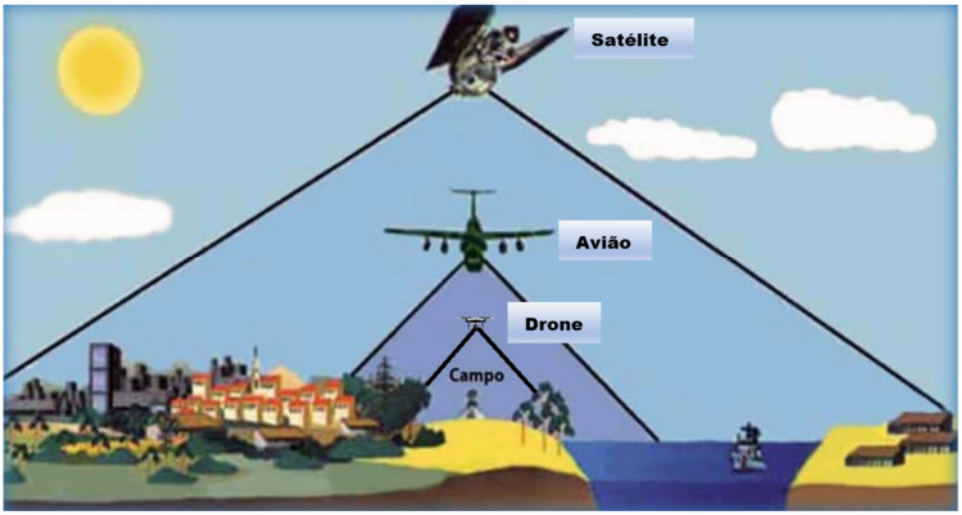


Fonte: Zaidan, 2011.

ativos possuem sua própria fonte de radiação eletromagnética, como os radares instalados em drones, aviões ou em satélites.

Hoje em dia, diversas são as plataformas que transportam os sensores remotos, ativos ou passivos, que tem por objetivo obter informações sobre as feições da topografia terrestre. A Figura 23 ilustra as plataformas mais usuais.

Figura 23 – Plataformas de transporte de sensores remotos



Fonte: Pontuschka, et. al., 2012 (adaptado).

Dado o contexto, as próximas seções terão por objetivo descrever algumas das principais tecnologias para a obtenção de dados para o MDE de forma remota, apresentando as precisões alcançadas em cada uma delas. Entre elas, estão a fotogrametria, as imagens de satélite de alta e altíssima resolução, o Radar e o perfilamento Laser (Lidar).

III.2 - FOTOGRAMETRIA

Brito & Coelho Filho (2007) definem a fotogrametria como sendo a ciência e tecnologia de se reconstruir o espaço tridimensional, ou parte do mesmo (espaço objeto), a partir de imagens bidimensionais, advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas (espaço imagem), sem contato físico direto com o objeto ou alvo de interesse.

Segundo Maune (2001), a aerofotogrametria é a tecnologia mais utilizada para a elaboração de mapeamento de áreas de grandes dimensões sobretudo em razão de apresentar produtos precisos a custos relativamente baixos. A referida técnica faz uso de fotografias aéreas tomadas com câmera aerotransportada rigorosamente calibrada[15], montada com o eixo ótico próximo da vertical em uma aeronave devidamente preparada e homologada para receber o

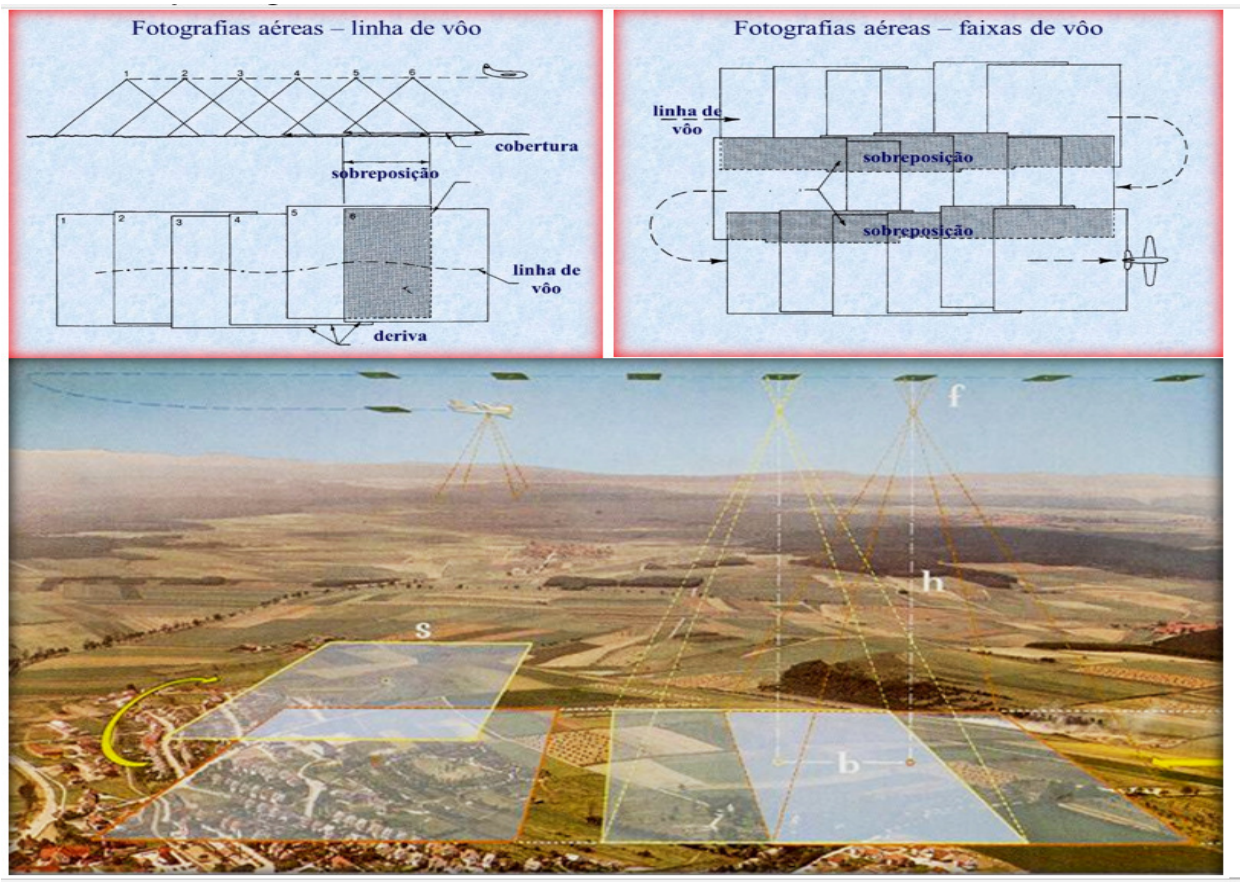
[15] Para a calibração de uma câmera aérea é preciso conhecer a distância focal, os parâmetros de distorção de lentes e o tamanho de quadro do negativo.

sistema.

Nesse contexto, o conjunto de operações necessárias para obtenção destas fotos ou o conjunto de fotos que superpõe e representam a área voada chama-se de cobertura aerofotogramétrica. Vale mencionar que as fotografias aéreas geralmente são obtidas de forma sequencial e com sobreposição longitudinal e lateral de imagem permitindo que toda a região de interesse seja coberta duplamente (Santos, 2013).

Geralmente, o recobrimento longitudinal de uma fotografia aérea é calculado para fornecer aproximadamente 60% de sobreposição entre fotografias subsequentes. Já a sobreposição entre faixas de voo varia de 20% a 40% e é chamada de recobrimento lateral. As mencionadas sobreposições, longitudinal e lateral é que possibilitam a obtenção de estereoscopia. A Figura 24 mostra de forma esquemática as linhas de voo, nas quais ocorre o recobrimento longitudinal com sobreposição bem como a sobreposição entre as faixas de voo.

Figura 24 – Esquema de voo aerofotogramétrico: sobreposição longitudinal e lateral

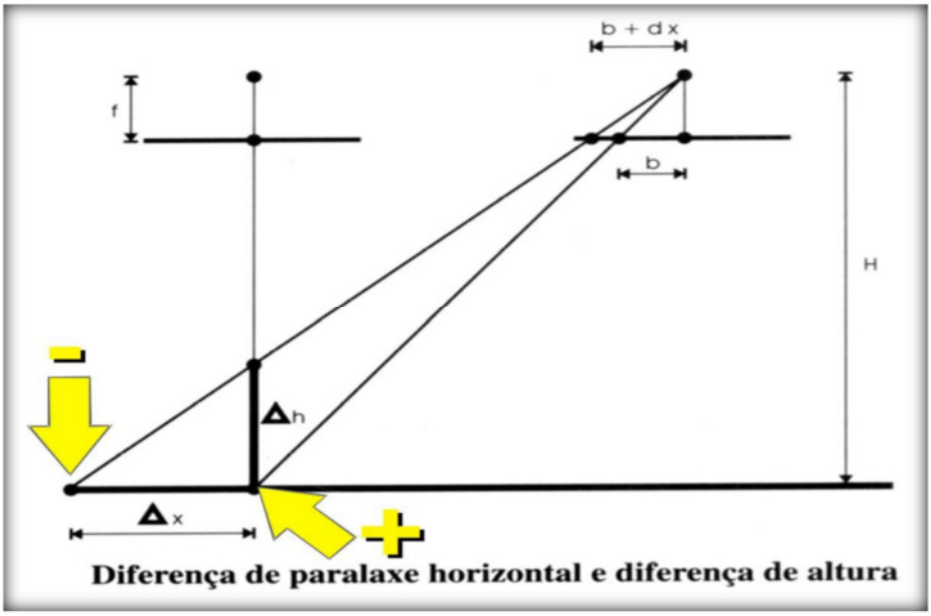


Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[16]

[16] Disponível em: < http://blog.droneng.com.br/mdt-com-drones/>. Acesso em 15/2/2018.

A estereoscopia pode ser entendida como a visualização de uma imagem em terceira dimensão (3D). O fato é que um mesmo objeto observado em fotografias diferentes não possui o mesmo centro de perspectiva. E quando cada uma destas fotografias é vista por um olho diferente do observador, faz com que o cérebro humano interprete as diferenças de perspectiva das fotos como profundidade do objeto. Esta diferença de perspectiva do objeto registrado denomina-se paralaxe. Assim, os objetos situados a uma mesma distância do observador possuem a mesma paralaxe, porém, para objetos com distâncias diferentes do observador a paralaxe, possivelmente será diferente. Observa-se que a paralaxe é maior para objetos mais próximos do observador, conforme se vislumbra na Figura 25 a seguir.

Figura 25 – Esquema conceitual da paralaxe



Fonte: Zaidan, 2011.

O resultado da sobreposição longitudinal entre duas fotos aéreas consecutivas é chamado de par estereoscópico. Vale mencionar que as fotos tomadas são importadas para estações fotogramétricas digitais (com *software* de fotogrametria digital) após o voo. Nessas estações, as imagens são projetadas em um sistema ótico de modo a formar um modelo tridimensional na ocular. Para a confecção de cartas topográficas de precisão é necessário reconstruir a posição exata de cada fotografia no momento da exposição. Para tanto, é necessário executar um conjunto de operações denominadas de orientação, por meio das quais reconstitui-se as condições geométricas do instante da tomada das fotografias aéreas, formando-se um modelo tridimensional do terreno (modelo estereoscópico) sem deformações ou

deslocamentos. A etapa de orientação do modelo se divide em interior e exterior (Brito & Coelho Filho, 2007).

A orientação interior consiste em colocar cada imagem (foto) em posição semelhante à que exerciam dentro da câmera, no momento em que foram obtidas. A orientação exterior depende do referencial externo a ser utilizado e é realizada em duas etapas denominadas de orientação relativa e absoluta. A orientação relativa serve para referenciar cada feixe em relação ao seu homólogo, reconstruindo a posição exata de um par no espaço durante a tomada das fotos. A orientação absoluta, por sua vez, referência o par de feixes em relação ao terreno (colocando o modelo em escala e nivelando-o).

Nesse caminho, os elementos planimétricos são obtidos por meio do delineamento e registro de pontos da forma das feições usando a marca estereoscópica do aparelho. Essa deve sempre ser mantida em contato com a superfície da feição a fim de manter a sua correta coordenada. Para cada ponto, registra-se os valores dos eixos X, Y e Z representativos da localização espacial.

A obtenção da altimetria é realizada com a marca estereoscópica sempre numa determinada altitude, onde o operador deve procurar no terreno visualizado, os pontos que possuem esta mesma altitude, materializando assim as curvas de nível (Santos et al., 2002).

Para Brito & Coelho Filho (2007), o objetivo principal da fotogrametria pode ser enunciado como a reconstrução de um espaço tridimensional, chamado de espaço-objeto, a partir de um conjunto não vazio de imagens bidimensionais, chamado de espaço-imagem.

Trata-se, então, de uma transformação entre sistemas: um sistema bidimensional, chamado sistema fotográfico, e um sistema tridimensional, que representa o próprio espaço-objeto. Normalmente, utiliza-se um sistema bidimensional próprio de cada câmera, com origem aproximadamente no centro de seu quadro e de coordenadas determinadas por calibração da câmera em laboratório, antes de sua utilização. O sistema tridimensional, no caso mais comum, representa o sistema de coordenadas do terreno sobre o qual as imagens são obtidas, terreno que pode estar sendo representado em coordenadas geodésicas (latitude: λ, longitude: φ, e

altura: H ou altitude: h[17]), planialtimétricas do tipo transversa de Mercator (leste: E, norte: N e altura: H ou altitude: h) ou cartesianas (X, Y e Z) (Brito & Coelho Filho, 2007).

Para que a transformação seja implementada, também é necessário um conjunto de pontos de controle (ou de campo), que são expressos no espaço-objeto. Uma vez locados no espaço-imagem, temos os parâmetros de entrada para a dedução da função que mapeia um sistema no outro. Quanto maior o número de pontos de controle, melhores são os resultados; porém, convém verificar até onde é economicamente viável a obtenção de tantos pontos de controle. Em razão de tal fato, alguns processos (fototriangulação, por exemplo) foram desenvolvidos, de modo que, a partir de apenas alguns pontos de controle, possa ser gerada uma infinidade de outros, com precisões aceitáveis para que sejam utilizados como se de controle fossem (Brito & Coelho Filho, 2007).

III.2.1 – PRECISÃO ALCANÇADA COM O USO DA FOTOGRAMETRIA

A precisão alcançada pela fotogrametria já sob a égide digital dependerá da altura do voo e será diretamente influenciada pela resolução da câmera digital utilizada. Nessa senda, para a captação direta de imagens digitais utiliza-se o conceito de GSD (*Ground Sample Distance*). O GSD representa o tamanho real, em unidades do terreno, que um determinado pixel representa em função da resolução de uma imagem. O pixel (*picture element*) por sua vez é a menor unidade de uma imagem digital e define a sua resolução. Assim, uma imagem digital pode ser considerada como sendo uma matriz cujos índices de linha e colunas identificam um ponto na imagem e o correspondente valor do elemento da matriz identifica o nível de cinza naquele ponto. Os elementos identificados pela combinação de linhas e colunas desta matriz são chamados de elementos de imagem ou pixels (Kugler, 2008).

Nos pixels, portanto, são armazenados valores que irão formar a imagem. Em cada pixel da imagem é armazenado um valor ponderado de toda a energia refletida correspondente a sua área no terreno, de acordo com o GSD utilizado. Logo, quanto menor for o GSD, maior será a resolução da imagem, ou seja, melhor será a definição dos objetos. Na Figura 26 apresenta-se uma sequência de imagens com diferentes GSD, nas quais se observa que, quanto menor for essa unidade melhor a nitidez dos detalhes.

[17] A diferença entre altura e altitude reside no fato de a primeira estar referenciada a uma figura geométrica (elipsoide de revolução) e a última, a uma figura geofísica (geoide). A separação entre as duas chama-se desnível geoidal e pode ser calculada por métodos gravimétricos.

Figura 26 – Imagens com diferentes GSD

GSD: 0,10 m **GSD: 0,20 m** **GSD: 0,50 m**

GSD: 1 m **GSD: 2 m**

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[18]

A Figura 27 a seguir mostra o GSD recomendado para a câmera digital ADS40 (uma das câmeras métricas utilizadas em aerofotogrametria), para as diversas escalas de mapeamento.

Figura 27 – Sensor ADS 40 e o GSD recomendado para as diversas escalas

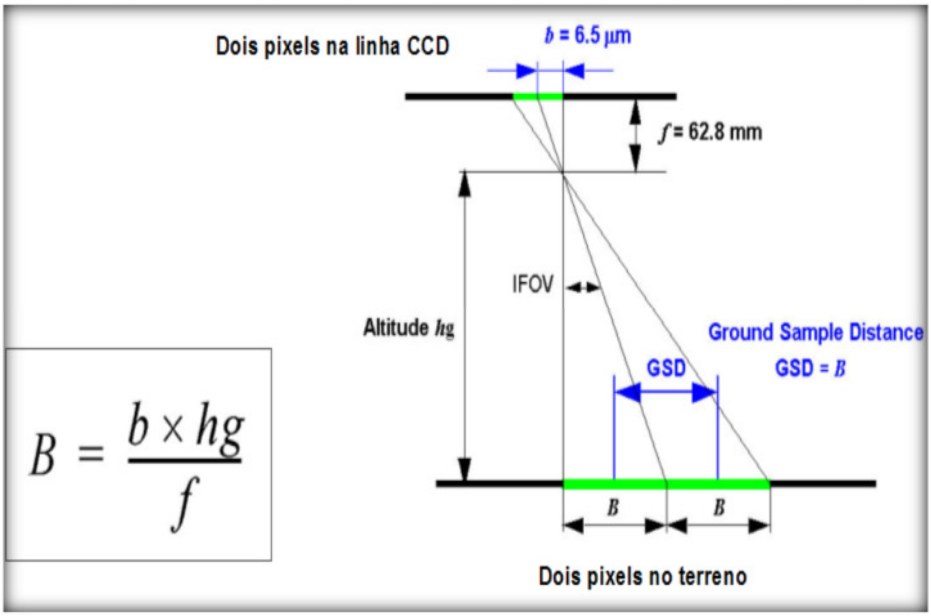
ADS40 GSD	Escala do Mapa	Mapa Padrão	
		Acurácia X, Y RMSE	Intervalo de Curva de Nível
5 – 10 cm	1:500	0,125 m	0,25 m
10 – 15 cm	1:1.000	0,250 m	0,50 m
15 – 20 cm	1:1.500	0,400 m	0,75 m
20 – 30 cm	1:2.000	0,500 m	1,00 m
25 – 35 cm	1:2.500	0,600 m	1,25 m
30 – 50 cm	1:5.000	1,250 m	2,50 m
40 – 60 cm	1:10.000	2,500 m	5,00 m
50 – 70 cm	1:20.000	5,000 m	10,00 m
50 – 80 cm	1:25.000	6,250 m	12,50 m
50 – 100 cm	1:50.000	12,50 m	20,00 m
50 – 100 cm	1:100.000	25,00 m	50,00 m

Fonte: Santos, 2013 (adaptado).

[18] Disponível em: < http://blog.droneng.com.br/gsd/>.Acesso em 15/2/2018.

Conforme já mencionado, o GSD é diretamente relacionado com a altura de voo da aeronave em relação ao solo. Além desse fator, a distância focal da câmera utilizada e o tamanho físico do pixel no CCD também influenciam o GSD. A Figura 28 a seguir ilustra como se dá o cálculo do GSD em função dessas variáveis.

Figura 28 – Cálculo do GSD em função da altura de voo, distância focal e tamanho físico no CCD



Fonte: Kugler, 2008.

É válido mencionar que a aerofotogrametria é amplamente utilizada nos anteprojetos e projetos de obras rodoviárias em razão de atender as precisões requeridas. Vale rememorar que no anteprojeto, a escala requerida é 1:5.000 e nos projetos, os elementos planimétricos do perfil devem ser representados na escala 1:2.000, escalas comumente atendidas pela aerofotogrametria. Quanto aos elementos verticais do perfil, os projetos requerem a escala 1:200. Para essa escala, no entanto, as opções mais precisas ainda são os levantamentos diretos de campo, utilizando estações totais e equipamentos GPS diferenciais.

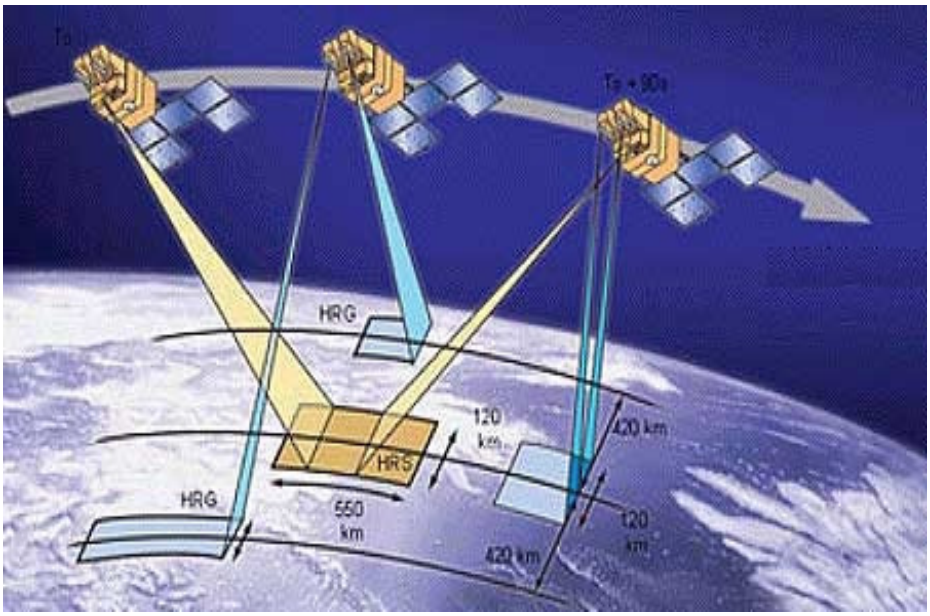
A despeito de tal fato, a fotogrametria com VANTs tem conseguido chegar, com boa precisão, a escalas muito próximas a 1:200 para informações altimétricas. Isto se deve à evolução da resolução espacial das câmeras digitais e a altura de voo dos VANTs, que voa mais baixo do que o limite mínimo permitido para aeronaves tripuladas. Por óbvio, o recobrimento aéreo da área de interesse será menor com o uso de VANTs do que se for empregada a aerofotogrametria com aeronaves tripuladas. No Capítulo IV dessa pesquisa será apresentado

um estudo de caso que demonstra com dados empíricos os resultados que podem ser alcançados com os VANTs na fotogrametria.

III.3 – IMAGENS DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUÇÃO COM ESTEREOSCOPIA

Da mesma maneira que na aerofotogrametria, um par estereoscópico de imagens de satélites consiste em duas cenas adquiridas para uma mesma localização geográfica, de duas perspectivas distintas durante uma mesma passagem do satélite. O objetivo é extrair a altimetria de feições geográficas naturais, tais como o relevo e a vegetação, e de objetos construídos, tais como construções. A Figura 29 ilustra como ocorre a estereoscopia entre imagens tomadas por satélites.

Figura 29 – Esquema de estereoscopia com imagens de satélites



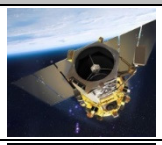
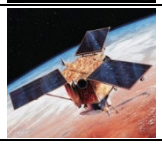
Fonte: Zaidan, 2011.

Vale mencionar que a estereoscopia a partir de imagens de satélites depende das informações sobre o modelo geométrico (IGM), que consiste na equação e nos parâmetros técnicos que retratam as condições de aquisição das imagens usadas e do sensor. Com isso, incorporando os dados do IGM e o par estereoscópico nos softwares comerciais de processamento de imagens geralmente disponíveis no mercado, é possível criar produtos tais como modelos digitais de elevação. São vários os softwares homologados pelos provedores de imagens de satélites e que suportam geralmente os formatos das imagens em estereoscopia fornecidas comercialmente. Entre os mais conhecidos estão: LH SocetSet, Erdas Stereo Analist e Orthobase, PCI OrthoEngine, Z/I Image Station e SSK.

É válido mencionar que a extração das feições de ambiente natural e urbano é significativamente aprimorada usando pares estereoscópicos e visualização em 3-D. Com as ferramentas apropriadas disponíveis atualmente, os usuários de informações geoespaciais podem obter medições de altimetria de qualquer ponto na superfície da Terra, permitindo, entre outros, a detecção de mudanças na altimetria.

Atualmente, todos os sensores de alta e altíssima resolução de observação da Terra comercialmente disponíveis têm capacidade de imageamento em estereoscopia. O Quadro 2 a seguir apresenta uma síntese dos principais sensores de alta e altíssima resolução, bem como as possibilidades de se obter informações altimétricas por meio das imagens produzidas por eles:

Quadro 2 – Principais sensores orbitais de alta e altíssima resolução

Sensor	Resolução espacial máxima	Estereoscopia?	Possibilidade de programação do imageamento?	Foto do Satélite
Geoeye	Pan P&B: 0,5 m; Multiespectral: 2,0 m	Sim	Sim	
Pleiades	Pan P&B: 0,5 m; Multiespectral: 2,0 m	Sim	Sim	
World View 4	Pan P&B: 0,3 m; Multiespectral: 1,24 m	Sim	Sim	
Kompsat	Pan P&B: 0,40 m; Multiespectral: 1,6 m	Sim, possibilitando gerar curvas de nível de 2 em 2 metros	Sim	
Eros B	Pan P&B: 0,7 m	Sim	Sim	
Ikonos	Pan P&B: 1,0 m; Multiespectral: 4,0 m.	Sim, possibilitando gerar curvas de nível de 5 em 5 metros	Não	

Fonte: EngeSat (adaptado).[19]

Vale dizer, contudo, que a obtenção dos pares estereoscópicos é demandada por programação específica da área de interesse. Conforme se observa do quadro, com as imagens de altíssima resolução espacial chegando a 30 cm, considerando a natureza dos serviços a serem executados no projeto e dependendo do relevo da região, do imageamento de cenas sem nuvens

[19] Disponível em:< http://www.engesat.com.br/imagem-de-satelite/>. Acesso em 12/12/2017.

sobre a área de interesse e com pontos de controle coletados em levantamentos de campo, as imagens de alta resolução podem alcançar uma precisão absoluta planialtimétrica de 0,30 m, e curvas de nível de até 2m de equidistância.

Cotejando as precisões alcançadas com imagens de altíssima resolução com as requeridas nos projetos de terraplenagem, verifica-se que é possível utilizar tais insumos na elaboração do anteprojeto, seja na planimetria, seja na altimetria, já que a escala requerida é 1:5.000. Aqui, tanto na elaboração do anteprojeto como em uma eventual fiscalização dos estudos preliminares e de viabilidade de obras rodoviárias, seria possível utilizar o modelo digital de elevações gerado a partir de imagens de altíssima resolução com estereoscopia, como elemento de tomada de decisão.

Já nos projetos, os elementos planimétricos do perfil devem ser representados na escala 1:2.000, e esta escala é alcançada por boa parte dos sensores mencionados. Quanto aos elementos verticais do perfil, os projetos requerem a escala 1:200. Conforme se viu, para essa escala, não é possível a utilização de imagens de satélite de alta resolução. Assim, nos projetos de obras rodoviárias, a utilização de imagens de altíssima resolução se restringe aos elementos planimétricos porquanto as precisões máximas alcançadas para a geração de modelos digitais de elevação estão longe dos erros máximos permitidos para a componente altimétrica desses projetos.

III.4 – RADAR

O termo Radar (*Radio Detection And Ranging*) significa detecção de alvos e avaliação de distâncias por ondas de rádio. Trata-se de um sistema imageador ativo de ondas de rádio, em geral micro-ondas, embarcado em aeronave ou satélite. Distingue-se dos sensores ópticos, na faixa do visível ou do infravermelho, pelo fato de utilizar uma fonte de ondas de rádio como elemento gerador de radiação e por possuir uma fonte ativa e controlável de radiação a qual define a frequência, a polarização e o ângulo de incidência da onda transmitida. Comparativamente às outras faixas do espectro eletromagnético, as micro-ondas penetram mais na vegetação, além de eventualmente poderem adentrar no solo (Matos, 2005). Vale dizer que os radares operam em comprimentos de onda bem maiores do que os da região espectral do visível e infravermelho, encontrando-se na região das micro-ondas entre as bandas Ka e P, conforme ilustra o Quadro 3 a seguir.

Quadro 3 – Bandas Radar

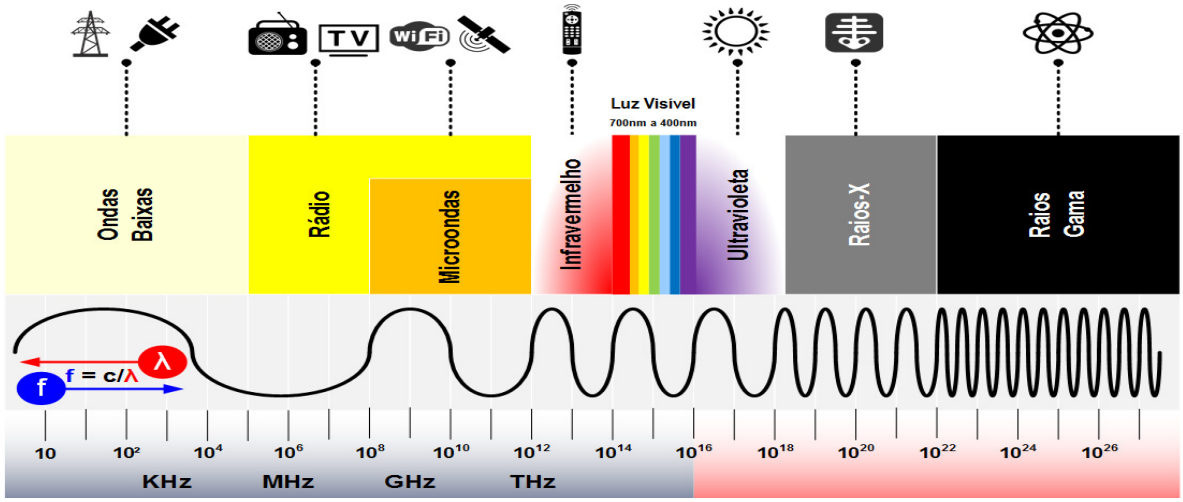
Banda Radar	Comprimento de onda - λ (cm)	Frequência - f (GHz)
Ka	0,80 - 1,10	40,0 - 26,5 (35,0)*
Ks	1,10 - 1,70	26,5 - 18,0
Ku	1,70 - 2,40	18,0 - 12,5
X	2,40 - 3,75	12,5 - 8,0 (9,3)*
C	3,75 - 7,50	8,0 - 4,0 (5,3)*
S	7,50 - 15,00	4,0 - 2,0 (2,0)*
L	15,00 - 30,00	2,0 - 1,0 (1,2)*
UHF	30,00 - 100,00	1,0 - 0,3 (0,6)*
P	77,00 - 136,00	0,2 - 0,4

(*) Nos parênteses, as frequências mais utilizada em Radar

Fonte: Matos, 2005 (adaptado).

A Figura 30 apresenta as faixas do espectro eletromagnético, nas quais é possível identificar as micro-ondas e ondas de Rádio em comparação com a faixa do visível (λ de 700nm a 400nm).

Figura 30 – Espectro eletromagnético



Fonte: Labcisco (adaptado).[20]

Segundo Matos (2005), um sistema típico de Radar possui um transmissor, um coletor e uma antena. O transmissor produz pulsos de micro-ondas, que são regulados por um

[20] Disponível em:< http://labcisco.blogspot.com.br/2013/03/o-espectro-eletromagnetico-na-natureza.html>. Acesso em 14/12/2017.

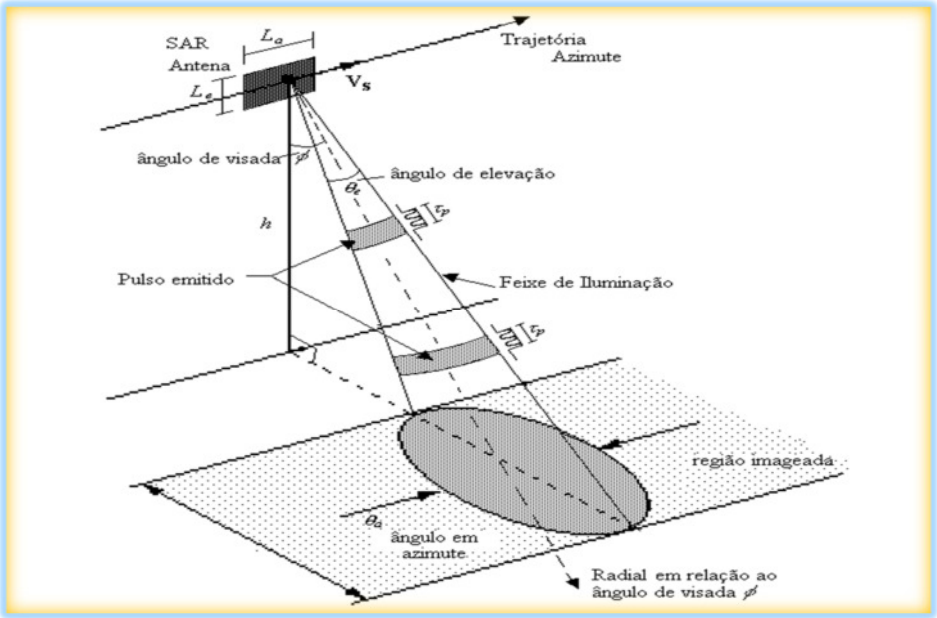
sincronizador e padronizados a uma potência conhecida por um modulador. Por uma fração de segundo, a chave transmissão/recepção é ligada para transmissão e o transmissor envia um pulso de micro-ondas pela antena. Em seguida, a chave transmissão/recepção retorna à sua posição original e a antena recebe pulsos refletidos pela superfície da Terra. Esses pulsos são convertidos para uma forma adequada para amplificação e processamento pelo misturador e pelo oscilador local, sendo em seguida enviados para o receptor. Esse amplifica o sinal, passando-o para o detector que produz um sinal eletrônico adequado para gravação em filme fotográfico, fita analógica ou forma digital.

O pulso transmitido é modulado linearmente em frequência, com uma variação desta entre um valor mínimo e um máximo. Essa variação é conhecida como largura de banda do pulso (Bp = fmáx − fmin) e determina a resolução na direção perpendicular ao voo. O sistema de Radar emite um sinal em direção ao alvo e ao atingir a superfície do objeto esta energia é espalhada em várias direções (retroespalhamento). Uma parcela da energia é refletida em direção ao próprio sensor, onde é medida para gerar uma imagem. A intensidade de retorno do Radar é determinada pelos parâmetros relativos ao sistema, quais sejam, a polarização, o ângulo de visada e comprimento de onda e os parâmetros relativos ao terreno, como, por exemplo, a rugosidade da superfície (Matos, 2005).

São dois os tipos de Radar: o Radar de Abertura Real (RAR, *Real Aperture Radar*) e Radar de Abertura Sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*). Os sistemas RAR foram os primeiros imageadores por micro-ondas e necessitam operar em comprimentos de onda muito curtos para terem uma boa resolução. Por outro lado, sofrem uma influência muito grande da atmosfera. Para comprimentos de onda mais longos, torna-se necessário o uso do sistema SAR, já que os sistemas RAR teriam uma resolução muito baixa.

Os sistemas SAR simulam uma grande antena, através do deslocamento de uma antena (pequena) ao longo da direção de voo da plataforma. As posições sucessivas da antena são tratadas eletronicamente como se fossem elementos de uma única antena grande (Matos, 2005). O sistema é constituído de um Radar, com as características convencionais, com visada lateral, ou seja, o diagrama de irradiação da antena do Radar é disposto obliquamente em relação ao eixo definido pelo vetor direção de voo da plataforma na qual está instalada a antena. A Figura 31 apresenta a geometria de imageamento do sistema SAR.

Figura 31 – Geometria de imageamento SAR



Fonte: Matos, 2005 (adaptado).

O Radar apresenta algumas características que o colocam em destaque sobre os sensores passivos óticos, destacando-se as seguintes:

a) a interação da radiação com as nuvens ou radiação é reduzida ou mesmo anulada, devido ao elevado comprimento de onda;

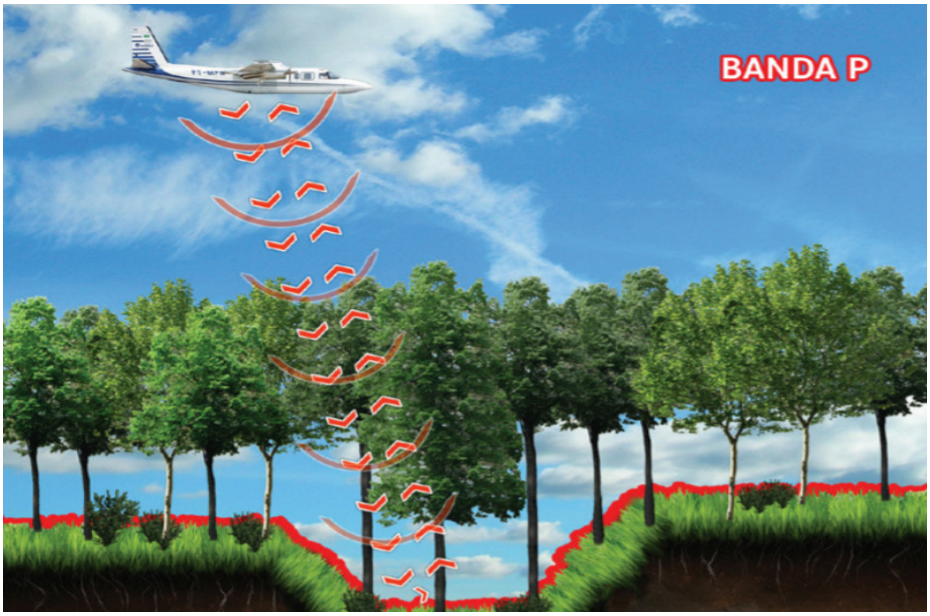
b) enquanto a refletância nas imagens obtidas por sensores óticos está relacionada com as propriedades moleculares dos objetos, as imagens de Radar dependem de características macroscópicas da superfície como: rugosidade, propriedades dielétricas (relacionadas com o teor de humidade), características geométricas das áreas urbanas, características estruturais da vegetação, orientação das estruturas relativamente à direção de visão do feixe, etc.;

c) as imagens têm uma boa resolução espacial, são obtidas sob quaisquer condições meteorológicas, de dia ou de noite e independentemente das condições de iluminação; estas características fazem com que as imagens de Radar sejam de grande utilidade para a monitorização da superfície em áreas de grande nebulosidade.

Outra destacada aplicação da tecnologia Radar está na obtenção de informações altimétricas do terreno em regiões de selva, como, por exemplo, a Amazônia. Isso porque os métodos tradicionais são praticamente inviáveis para a determinação do relevo abaixo das copas das árvores. Em áreas de selva, a fotogrametria permite apenas o mapeamento da copa das árvores e os receptores GPS não funcionam (não encontram os sinais de satélites) devido às

obstruções naturais (árvores muito altas). Nesse caso o Radar é vantajoso porque, a depender da frequência utilizada, o pulso penetra na copa das árvores e reflete no solo retornando para o sensor. A Figura 32 a seguir ilustra essa aplicação com o uso da banda "P":

Figura 32 – Penetração do sinal da banda "P" na floresta densa



Fonte: Gaboardi et al., 2017.

Gaboardi et al. (2017), em pesquisa que buscou validar a precisão altimétrica do modelo digital de elevação abaixo da floresta amazônica gerados por meio de dados de Radar na banda "P" encontrou, em 39 dos 42 pontos medidos no experimento, diferenças menores que 2,5 metros com erro médio quadrático de 1,464 m.

Segundo a empresa Bradar[21], os sensores Radar mais recentes permitem a obtenção de cartas topográficas nas escalas 1:50.000, 1:25.000, 1:10.000 e 1:5.000. Com isso, considerando a maior escala (1:5.000), vislumbra-se que a aplicação de imagens oriundas de sensores Radar para o cálculo de volumes de terraplenagem nas obras rodoviárias se circunscreve ao anteprojeto.

III.5 – PERFILAMENTO LASER (LIDAR)

O sistema LIDAR (*Light Detecting And Ranging*) é a denominação mais abrangente do sistema de perfilamento a laser. De maneira geral, tem-se uma tecnologia que usa luz,

[21] Disponível em:<http://www.bradar.com.br/images/folders/sensorem/folder_Cartografia.pdf >. Acesso em 10/12/2017.

especificamente uma luz de laser, para medir distâncias.

Segundo Brandalize (2002), o sistema de perfilamento a laser (*ALS - Airborne LASER Scanning*) ou sistema para mapeamento do terreno por laser aerotransportado (*ALTM - Airborne LASER Terrain Mapper*) é um sistema que adquire dados digitais de elevação do terreno com precisão equivalente ao GPS e de forma mais eficaz, uma vez que o sensor principal do sistema está localizado em uma aeronave cujo deslocamento, sobre uma área de interesse, é extremamente rápido quando comparado com os levantamentos convencionais. Segundo Sallem Filho (2007), o sistema em questão se desenvolveu a partir da necessidade de usuários de modelos digitais de elevação em casos onde os métodos convencionais não eram suficientes sendo que as primeiras experiências datam de 1993.

III.5.1 – COMPONENTES DO SISTEMA

Brandalize (2002) destaca que os componentes principais que se encontram a bordo de uma aeronave, preparada para este tipo de serviço, são os seguintes:

a) sensor laser (LRF-LASER Range Finder) composto pelo gerador do pulso laser, ótica de transmissão e recepção do raio, detector de sinal, amplificador e outros componentes eletrônicos;

b) sistema de medição inercial (INS);

c) receptor GPS e seus respectivos componentes;

d) computador de bordo e respectivos programas para controlar a aquisição dos dados;

e) unidades de armazenamento dos dados brutos do laser, do GPS e da navegação Inercial;

f) receptor GPS para navegação da aeronave.

No solo e em tempo real, o componente principal é o receptor GPS de base cujo rastreio será usado na correção diferencial dos pontos medidos pelo Laser. De acordo com as características de extensão e forma da superfície que está sendo trabalhada, é necessário mais de uma estação GPS de base. Completando o sistema estão os programas para descarga dos dados brutos do Laser, do GPS e da medição inercial e os programas de pós-processamento destes dados para obtenção de produtos derivados do levantamento como, por exemplo, MDE, MDT ou curvas de nível (Brandalize, 2002).

III.5.2 – PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

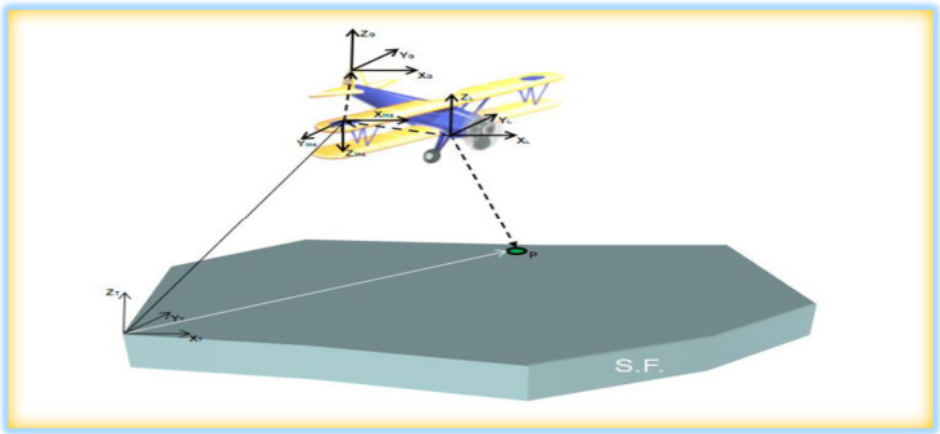
O sistema Laser aerotransportado é um sistema de Sensoriamento Remoto ativo, que utiliza uma técnica de varredura ótico-mecânico com pulsos laser para a coleta de informações. O pulso laser considera o intervalo de tempo entre a emissão e a recepção para determinar a distância entre o sensor e o objeto. O mencionado sistema gera coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície num curto período de tempo (Schafer & Loch, 2005).

O princípio de operação é relativamente simples. Os pulsos de laser são gerados e emitidos pelo sistema com o auxílio de um espelho de varredura atingindo os objetos. Estes objetos refletem o pulso emitido e parte de sua energia volta para o sistema. Com isto, a medida da distância entre o sensor e o objeto iluminado é determinado através do intervalo de tempo entre a emissão e a reflexão (retorno) do pulso (Schafer & Loch, 2005).

A reconstrução do pulso laser emitido é dada no sistema referencial WGS84, isto é, a distância percorrida pelo pulso entre a plataforma e o objeto perfilado é calculada em pós-processamento baseada na determinação do ângulo que o pulso formou com a aeronave no momento de sua emissão, juntamente com os dados de posição e atitude da aeronave, fornecidos pelo sistema de integração GPS/INS, bem como em função da velocidade da luz (c) e tempo de emissão e recepção do pulso Laser (Δt) (Dalmolin & Santos, 2004).

Vale mencionar que as coordenadas tridimensionais de um ponto qualquer na superfície física são determinadas em função de uma sequência de rotações e translações aplicadas entre os componentes que compõem o sistema. A Figura 33 mostra a relação entre os sistemas envolvidos na determinação de coordenadas de um ponto no sistema do espaço-objeto ou referencial terrestre (Santos, 2013).

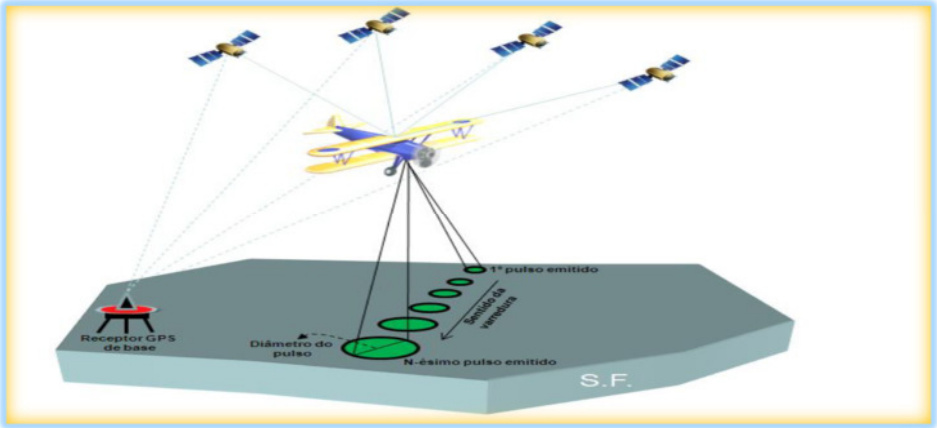
Figura 33 – Determinação de coordenadas tridimensionais



Fonte: Santos (2013).

Segundo Santos (2013), a varredura é feita no sentido transversal à direção da linha de voo, o que possibilita o perfilamento tridimensional da área de interesse, com a divergência configurável pelo sistema permitindo a determinação da largura da faixa abrangida pelo perfilamento laser. Com a realização do voo, o sistema fornece dados brutos com informações tridimensionais do terreno sobrevoado. Esses dados são de posição (GPS), orientação da aeronave e de cada pulso emitido e intervalos de tempo (medida laser). A Figura 34 apresenta o princípio de funcionamentos do laser aerotransportado.

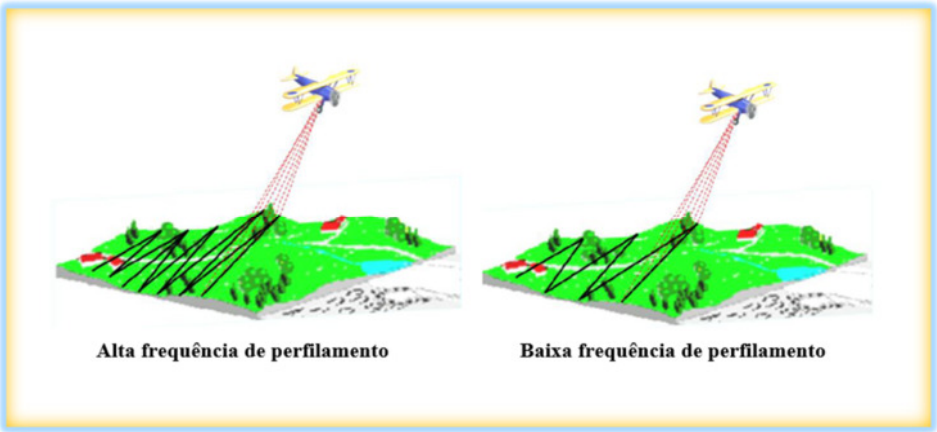
Figura 34 – Princípio de funcionamento do laser aerotransportado



Fonte: Santos (2013).

O pulso laser emitido pelo sistema possui um diâmetro que aumenta na medida em que ocorre sua propagação no meio. Conforme se vislumbra na Figura 34, o diâmetro do pulso no momento da emissão é consideravelmente inferior quando o mesmo interage com a superfície. E esse diâmetro do pulso varia de acordo com a altitude de voo estabelecida no levantamento aéreo. Ensina Santos (2013) que a frequência do pulso depende das especificações do projeto. A Figura 35 ilustra esquemas de alta e baixa frequência de perfilamento.

Figura 35 – Princípio de funcionamento do laser aerotransportado



Fonte: Santos (2013).

De acordo com Wher e Lohr (1999), o sistema *laser scanning* fornece coordenadas planimétricas com precisão em torno de 0,5 m e altimétricas com precisão em torno de 0,15 m. No entanto, a precisão do sistema depende das características dos componentes utilizados, tipo de terreno, qualidade do INS empregado e altura de voo.

Os fabricantes de sistemas de perfilamento a laser estabelecem como tolerâncias aceitáveis para a qualidade planimétrica dos pontos laser após processamento, valores na ordem de 1/5.000 x H a 1/10.000 x H (H é a altura de voo). Com isso, a qualidade planimétrica esperada para uma altura de voo de 1.000 m seria de 0,20 a 0,10 m e para uma altura de voo de 3.000 m, seria de 0,60 a 0,30 m, sendo tais valores válidos para 68% (1 sigma) dos pontos testados (Sallem Filho, 2007).

A qualidade vertical é dependente de inúmeros fatores, mas um dos preponderantes é a altura de voo. Assim, para uma altura de voo de 1.000 m espera-se uma qualidade menor que 0,15 m para cerca de 68% destes pontos. Para 90% dos pontos testados, a precisão vertical é menor que 0,30 m, segundo os fabricantes (Sallem Filho, 2007). Como vantagens, o perfilamento a laser apresenta alto rendimento, boa precisão, alta densidade de informação altimétrica (nuvem de pontos), boa penetrabilidade em áreas com vegetação e disponibilidade de altimetria tanto na superfície quanto no solo. Como desvantagem, deve ser mencionado que a técnica ainda não é tão disseminada em razão da parca literatura e da complexidade técnica. Além disso, requer grande capacidade de armazenamento e processamento de informações. Por fim, o perfilamento laser gera custos elevados para pequenos projetos, o que inviabiliza economicamente a adoção da técnica a depender do objetivo.

No que interessa ao presente estudo, cotejando as precisões alcançadas com o perfilamento a laser com as requeridas nos projetos de terraplenagem, verifica-se que é possível utilizar tais insumos na elaboração do anteprojeto, seja na planimetria, seja na altimetria, já que a escala requerida é 1:5.000. Aqui, tanto no elaboração do anteprojeto como em uma eventual fiscalização dos estudos preliminares e de viabilidade de obras rodoviárias, seria possível utilizar o modelo digital de elevações gerado a partir de perfilamento a laser, como insumo para a tomada de decisão.

Já nos projetos, os elementos planimétricos do perfil devem ser representados na escala 1:2.000, e esta escala é alcançada tranquilamente por essa técnica. Quanto aos elementos verticais do perfil, os projetos requerem a escala 1:200, o perfilamento laser com aeronaves

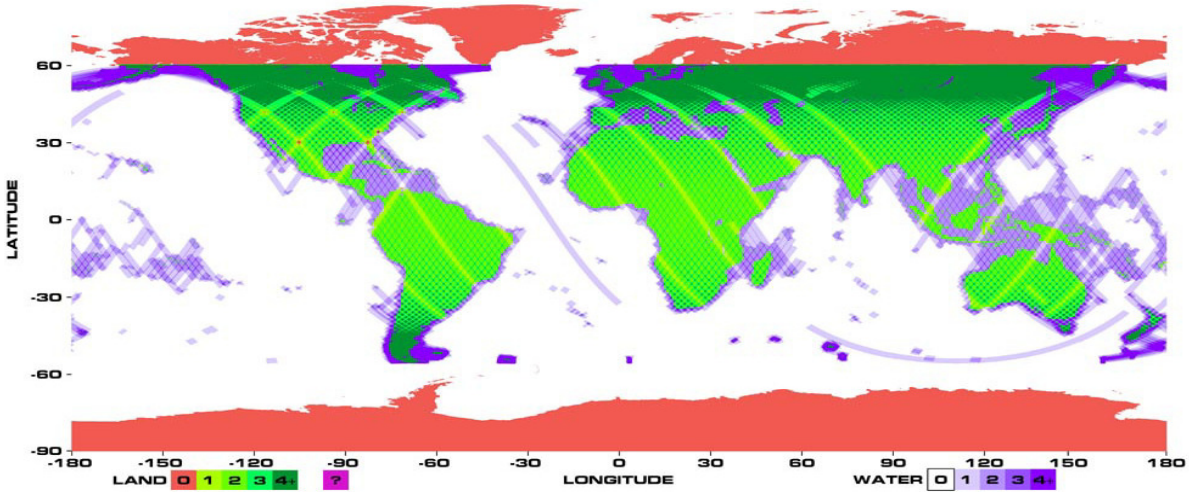
tripuladas poderá atingir precisão compatível com essa escala a depender da altura de voo da aeronave e do bom funcionamento dos componentes do sistema.

III.6– CONSIDERAÇÕES SOBRE O *SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION* - SRTM

Segundo Matos (2005), agências e órgãos científicos têm se esforçado para o desenvolvimento constante de modelos digitais globais de elevação. Nessa senda, vários são os modelos globais disponíveis para o uso da comunidade, podendo ser citados o ETOPO5, o TERRAINBASE, o GLOBAL 30 e o SRTM. Todos esses modelos têm suas coordenadas horizontais referenciadas ao WGS84 e a altitude em metros acima do NMM. Destes, o mais conhecido, preciso e utilizado é o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Vale mencionar que o SRTM é o modelo utilizado pelo Google Maps e pelo Google Earth.

A missão SRTM foi um esforço conjunto da NASA, do *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt* (DLR) e da *Agenzia Spaziale Italiana* (ASI). Nessa missão, realizada pelo ônibus espacial *Endeavour* entre 11 a 22 de fevereiro de 2000, um dos objetivos foi obter cartografia, por interferometria, de grande parte da superfície terrestre. Segundo Matos (2005), o ônibus espacial orbitou em volta da Terra 16 vezes em cada dia, num total de 176 voltas durante toda missão, voando a 7,5 km/s, observando aproximadamente 80% da superfície terrestre e cobrindo cerca de 95% da área ocupada do globo. Os dados coletados pelo Radar compreenderam a região entre os paralelos 60◦ N e 56◦ S (Figura 36).

Figura 36 – Cobertura da missão SRTM

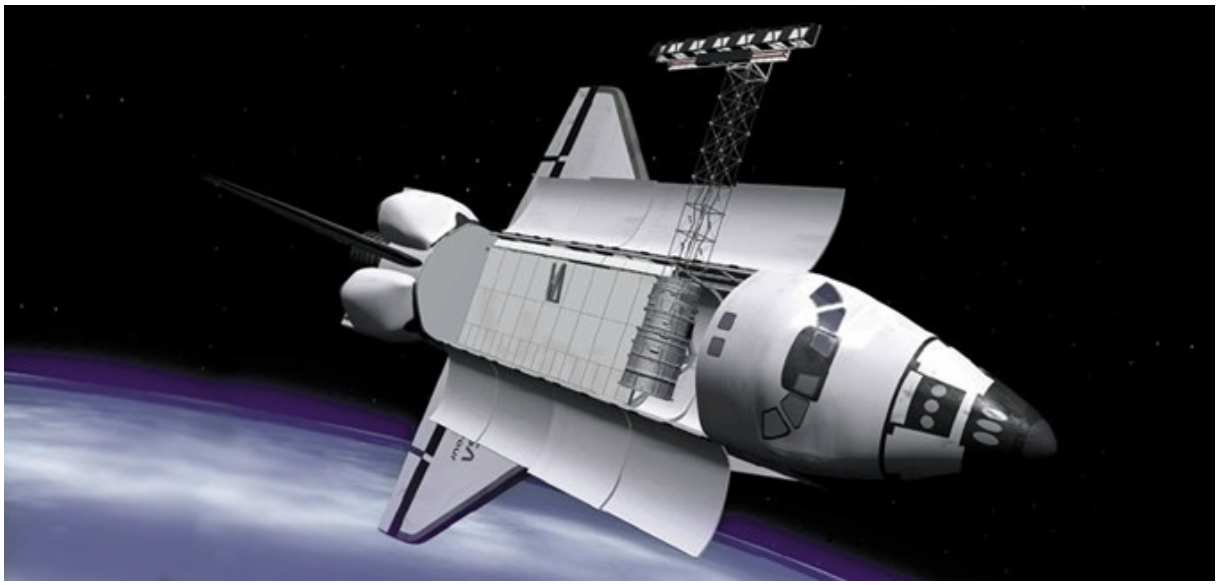


Fonte: *Nasa Portal – Jet Propulsion Laboratory.*[22]

[22] Disponível em: < http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/datacoverage.html>. Acesso em 10/1/2018.

A coleta de dados se deu por meio da instalação de antenas de Radar, nas bandas C e X, no compartimento de carga da nave e na ponta de um mastro de 60 metros estendido perpendicularmente para o exterior da nave. A técnica utilizada foi a de interferometria, onde a antena principal, a bordo da espaçonave, emitia ondas de Radar para a Terra e as duas antenas coletavam as ondas refletidas. O resultado foi a obtenção das altitudes através do método de interferometria. A Figura 37 ilustra a *Endeavour* e o braço de 60 metros no qual foram instaladas as antenas de Radar.

Figura 37 – Missão SRTM: *Endeavour*



Fonte: *Nasa Portal – Jet Propulsion Laboratory*[23]

Segundo Brochado (2015), o Modelo Digital de Elevação originado a partir do processamento interferométrico dos dados da banda C tem sido o produto da missão mais amplamente utilizado, uma vez que é disponibilizado gratuitamente[24], em escala quase global, com resolução horizontal de 3" (três segundos de arco, cerca de 90 metros). A partir do final do ano de 2014, foi disponibilizado, da mesma forma, o MDE-SRTM oriundo da banda C apresentando resolução horizontal de 1" (um segundo de arco, cerca de 30 metros). Portanto, para o emprego adequado é necessário que se conheça a acurácia altimétrica em diferentes regiões de estudo.

Para Orlandi (2016), diferentes fontes de informações são utilizadas para mensurar as precisões do modelo SRTM como dados medidos em campo por topografia ou rastreio GNSS

[23] Disponível em: < http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/datacoverage.html>. Acesso em 10/1/2018.
[24] Disponível gratuitamente em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>

ou bases cartográficas com escalas maiores (por exemplo1:10.000 ou 1:25.000). Nesse caminho, Orlandi (2016) sintetiza no Quadro 4, os diversos estudos pelo mundo que avaliaram a precisão do SRTM, na qual a coluna "insumo" mostra as diferentes fontes de dados e métodos para a determinação do erro.

Quadro 4 – Compilação de estudos que estudaram erros de acurácia de dados SRTM

Número	Referência	Local	Modelo	Insumo	Resultados
0	BERRY et al (2007).	Global	SRTM V2	Satélite ERS-1.	**Erro médio: 3,60m Desvio-Padrão: 16,16m.**
1	SHORTRIDGE & MESSINA (2011).	EUA	SRTM-V2	National Elevation Dataset (NED)	**Erro médio: 2,0 m DesvioPadrão: 8,3 m.**
2	MUKHERJEE et al (2013).	Shiwalik Himalaya,	CGIAR-CSI SRTM v4.1	Ground Control Points (GCPs)	**Erro médio: –2,94 m RMSE: 9,20m.**
3	Y. Liu (2008).	China	NASA SRTM3	Mapa topográfico 1:25.000	**Erro médio: -6,635m Desvio-Padrão: 29,16 m.**
4	CHAIEB et al (2016)	Kasserini, Tunisia	SRTM version 4.1	Ground Control Points (GCPs)	**Erro médio: -1,85 m Desvio-Padrão: 9,41m.**
5	MICELI et al (2011).	Rio de janeiro, Brasil	SRTM 1	Carta topográfica 1:10.000.	**90% menores que 15,00m. RMSE de 8,86m.**
6	ROBINSON et al (2014).	EUA	CGIAR-CSI SRTM v4.1	Ground Control Points (GCPs)	**Erro médio: 1,66 m RMSE 4,15m.**
7	DATTA& KIRCHNER (2010)	Índia	SRTM- the University of Maryland.	Ground Control Points (GCPs)	**Erro médio: -12,56m Desvio-Padrão: 51,37m.**
8	ATHMANIA & ACHOUR (2014).	Anaguid, Tunisia	CGIAR-CSI SRTM v4.1	RTK-DGPS	**Erro médio: 2,9 m DesvioPadrão: 4,6m.**
9	ATHMANIA & ACHOUR (2014).	Tebessa, Tunisia	CGIAR-CSI SRTM v4.1	RTK-DGPS	**Erro médio: 0,48 m Desvio-Padrão: 8,4m.**
10	GOROKHOVICH & VOUSTIANIOUC K (2006).	CatskillMountains, EUA	CGIAR-CSI SRTM	Ground Control Points (GCPs)	**Erro médio: 7,58 m Desvio-Padrão: 8,09m.**
11	GOROKHOVICH & VOUSTIANIOUC K (2006).	Phuket, Tailândia.	CGIAR-CSI SRTM	Ground Control Points (GCPs)	**Erro médio: 4,07 m Desvio-Padrão: 4,01m.**
12	TARQUINI et al (2012).	Itália	SRTM-JPL-NASA	LIDAR	**RMSE : 7,78m**
13	FREY & PAUL (2012).	Suiça	SRTM3	DHM25 (swisstopo).	**Erro médio: 2,23 m Desvio-Padrão: 21,64m.**
14	MICELI et al (2011).	Amazônia, Brasil	SRTM 1	Ground Control Points (GCPs)	**90% menores que 25,00m. RMSE de 11,70m.**
15	M. Rexer & C. Hirt (2014)	Austrália	CGIAR-CSI SRTM v4.1	Ground Control Points (GCPs)	**Erro médio: 3,04 m Desvio-Padrão: 3,22m.**
16	A. K. Karwel & I. Ewiak (2008)	Polônia	SRTM	Ground Control Points (GCPs)	**RMSE: 2,9m (plano) RMSE= 5,4m (montanha).**
17	H.Jörn & W. Diana (2008)	Sul da Alemanha	SRTM-JPL-NGA	Ground Control Points (GCPs)	**Desvio-Padrão: 3,90m.**
18	K. NATALIA & K. JACEK (2014)	Polônia	SRTM -version 4	DEM-Cartographic Inventory	**Erro médio: 4,31 m Desvio-Padrão: 14,09m.**
19	M. ANTONIOS et al(2010)	Grécia	SRTM.V4	KGPS coletados com veículo (GPS).	**Erro médio: 0,30 m Desvio-Padrão: 6,40m.**

Número	Referência	Local	Modelo	Insumo	Resultados
20	G. ALVARO et al (2011)	Espanha	SRTM version 4.1	Mapa topográfico 1:10.000	**RMSE: 6,10m.**
21	WANG, W. et al (2012)	Tibet	CIGIAR_ SRTM	Mapa topográfico 1:50.000	**Erro médio: 5,3 m DesvioPadrão: 12,2m.**
22	MUKUL et al (2015)	América do Sul	SRTM version 4.1	Ground Control Points (GCPs)	**Erro médio: 5,2m DesvioPadrão:10,2m.**
23	OUERGHI et al (2015)	Grombalia, Tunísia	SRTM version 4.1	Mapa topográfico 1:25.000	**Erro médio: 0,76 m Desvio-Padrão: 47,46m.**
24	SUWANDANA et al (2012).	Indonésia	SRTM v4.1	RTK-DGPS	**RMSE 3,250m.**
25	MUKUL et al (2015)	Global	SRTM v4.1	Ground Control Points (GCPs)	**Erro médio: 8,0 m Desvio-Padrão: 8,3m.**
26	MOURA et al (2014)	Distrito Federal, Brasil	SRTM v4	Mapa topográfico 1:10.000	**Erro médio: 3,14 m Desvio-Padrão: 4,06m.**
27	SANTOS et al (2006)	Amazônia, Brasil	SRTM-3	Ground Control Points (GCPs)	**Desvio-Padrão: 11,06m.**
28	Ludwig & Schneider (2006)	Alemanha	SRTM(German Aerospace Agency)	Mapa topográfico 1:25.000	**Erro médio: 11,98 m RMSE: 36,21m.**
29	JARIHANI et al (2015)	Austrália	SRTM(30/90m)	Ground Control Points (GCPs)	**Desvio-Padrão: 1,84m.**
30	IORIO et al (2011)	Pantanal, Brasil	SRTM v4	Ground Control Points (GCPs)	**E.M.Q: 16,69m.**
31	MEDEIROS et al (2009)	Goiás-Brasil	SRTM-EMBRAPA	Ground Control Points (GCPs)	**Erro médio: -3,0m Desvio-Padrão:10,0m.**
32	NÓBREGA et al (2005)	São PauloBrasil	SRTM	Fotogrametria 1:8.000	**Erro médio: 14,23m Desvio-Padrão:13,73m.**

Fonte: Orlandi (2016).

Orlandi (2016), ao avaliar a acurácia altimétrica dos Modelos SRTM para o Brasil chegou aos seguintes resultados: erro médio: 6,33m; desvio-padrão: 7,22m. No seu estudo, o referido pesquisador também concluiu que um fator bastante relevante no uso de modelos globais é que sua acurácia está diretamente ligada à faixa de declividade do terreno em estudo, uma vez que o erro médio aumenta com a elevação da declividade, como também se observa em KARWEL & EWIAK (2008) na Polônia (item 16 do Quadro 3), onde foi evidenciado que o terreno plano apresenta um valor de RMSE (2,9m) quase metade do valor do RMSE para um terreno montanhoso (5,4m). Segundo Orlandi (2016), ainda no que concerne à influência da declividade na magnitude dos erros, é razoável afirmar que a declividade afeta diretamente a acurácia do MDE, uma vez que em regiões mais movimentadas há maior incidência de áreas com "sombras", ou seja, regiões com vazios de dados. Nesses locais, os dados apresentados são resultados de interpolações, fazendo com que os erros sejam maiores em regiões com maior declividade. Assim, torna-se imperativo que em paralelo com o uso do Modelo SRTM, seja avaliada a declividade da região, pois em regiões mais movimentadas, ocorrerão maiores erros.

Com essas considerações, é possível afirmar que, como regra, o modelo digital de elevações proveniente do SRTM poderia ser utilizado, no máximo, nas fases que precedem o anteprojeto de engenharia de obras rodoviárias, já que a precisão altimétrica do modelo não atende as precisões preconizadas na fase de anteprojeto e projeto.

É válido mencionar, contudo, que em áreas planas, como é o Distrito Federal, o SRTM pode apresentar resultados melhores, como os obtidos no estudo de Moura et al (2014), item 26 do Quadro 3, no qual alcançou "erro médio: 3,14 m" e "desvio-padrão: 4,06m", números melhores que os obtidos por Orlandi (2016) para o território nacional.

Uma boa referência para avaliar o erro máximo encontrado, é o Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, o qual estabeleceu critérios para classificação de cartas quanto à sua exatidão e à distribuição de erros ao longo das mesmas, utilizando um indicador estatístico da qualidade posicional, denominado de Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)**.** Em síntese, pelo referido decreto, as cartas são classificadas em três grupos, nos termos constantes do Quadro 5.

Quadro 5 – Decreto 89.819/1984 – Padrão de Exatidão Cartográfica

Carta	PEC Planimétrico	Erro Padrão	PEC Altimétrico	Erro Padrão
Classe A	0,5 mm x Escala	0,3 mm x Escala	1/2 da equidistância	1/3 da equidistância
Classe B	0,8 mm x Escala	0,5 mm x Escala	3/5 da equidistância	2/5 da equidistância
Classe C	1 mm x Escala	0,6 mm x Escala	3/4 da equidistância	1/2 da equidistância

Fonte: Elaborado pelo autor.

A depender da escala da carta topográfica, a altimetria é representada segundo os seguintes níveis de detalhamento apontados no Quadro 6.

Quadro 6 – Relação Escala da Carta x Curva de nível

Escala da Carta	Equidistância das curvas de nível em metros
1:500	0,25 m
1:1.000	0,50 m
1:2.000	1,0 m
1:5.000	2,0 m
1:10.000	5,0 m
1:25.000	10,0 m
1:50.000	25,0 m
1:100.000	50,0 m

Fonte: Elaborado pelo autor.

Adotando-se como referência o Decreto nº 89.819/1984 para aferir o material cartográfico oriundo de levantamentos topográficos é possível estabelecer parâmetros de aceitação de erros, nas escalas requeridas na terraplenagem, segundo os níveis de detalhamento dados pelo Quadro 7.

Quadro 7 – Padrão de Exatidão Cartográfica para as escalas requeridas na terraplenagem

Escala da Carta	Equidistância das curvas de nível em metros	Tipo de classificação	PEC Planimétrico (m)	Erro Padrão (m)	PEC Altimétrico (m)	Erro Padrão (m)
1:200	0,10 m	Classe A	0,1	0,06	0,05	0,033333
		Classe B	0,16	0,1	0,06	0,04
		Classe C	0,2	0,12	0,075	0,05
1:2.000	1,0 m	Classe A	1	0,6	0,5	0,333333
		Classe B	1,6	1	0,6	0,4
		Classe C	2	1,2	0,75	0,5
1:5.000	2,0 m	Classe A	2,5	1,5	1	0,666667
		Classe B	4	2,5	1,2	0,8
		Classe C	5	3	1,5	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando, a título exemplificativo, os resultados obtidos por Moura et al (2014) para o SRTM na área do Distrito Federal (erro médio: 3,14 m), o modelo poderia ser enquadrado com precisão na Classe "C", dentro da escala 1:10.000. Isso porque a tolerância na Classe C, para a altimetria, é dada por:

$$\text{Classe C} \Rightarrow 3/4 \text{ da equidistância (escala 1/10.000 = 5,0m)} = 3,75 \text{ m}$$

Nesse caso, a escala 1:10.000, a despeito de não ser adequada nem mesmo para o anteprojeto, poderia ser utilizada para estudos preliminares, nessa região (DF), em especial para os que visem atestar a viabilidade econômica da obra.

III.7 – SÍNTESE DAS PRECISÕES ALCANÇADAS POR CADA TÉCNICA APRESENTADA E LIMITES DE EMPREGO NO CÁLCULO DE VOLUMES TOPOGRÁFICOS EM CADA FASE DA TERRAPLENAGEM

Nas obras rodoviárias, a precisão do cálculo dos volumes topográficos depende da precisão das coordenadas de terreno (E, N, H ou X, Y e Z) que integram as seções transversais do perfil longitudinal, sendo a componente altimétrica (H ou Z) a mais importante. Diante dessa constatação, após apresentadas cada uma das técnicas que, fazendo uso de sensores remotos, permitem o cálculo de volumes topográficos, o Quadro 8 a seguir, resume os limites e as

possibilidades de emprego de cada técnica na obtenção desses volumes em cada uma das três fases da terraplenagem a seguir descritas:

Quadro 8 – Limites e possibilidades de obtenção de volumes por meio de sensores remotos

Técnica de Obtenção de volumes	Acurácia posicional (X, Y,Z) – 3D	Precisão compatível para geração de volumes na fase de Anteprojeto?	Precisão compatível para geração de volumes na fase de Projeto?	Precisão compatível para geração de volumes na fase de Execução?	Observações
Aerofotogrametria	▪X, Y - 12,5 cm ▪Z – 25 cm ▪Escala máxima atingida: ⇒1:500	**Sim**	**Sim** para os elementos horizontais do perfil longitudinal; **Não** para os elementos verticais do perfil longitudinal.	**Não**	Custos relativamente elevados. No entanto, é possível obter informações de voos já realizados em vários órgãos públicos.
Perfilamento Laser aerotransportado	▪X, Y – 10 a 20 cm ▪Z – 30 cm ▪Escala máxima atingida: ⇒1:500	**Sim**	**Sim** para os elementos horizontais do perfil longitudinal; **Não** para os elementos verticais do perfil longitudinal.	**Não**	Custos muito elevados.
Radar aerotransportado	▪X, Y – de 50 cm a 1 m ▪Z: 1 a 2 metros ▪Escala máxima atingida: ⇒1:5.000 (X,Y,Z) ⇒1:2.000 (X,Y)	**Sim**	**Sim** para os elementos horizontais do perfil longitudinal; **Não** para os elementos verticais do perfil longitudinal.	**Não**	Custos muito elevados.
Imagens de Satélite de Alta Resolução	▪X,Y: até 30 cm ▪Possibilita gerar curvas de nível (Z) de 2 em 2 metros; ▪Escala máxima atingida: ⇒1:5.000 (X,Y,Z) ⇒1:2.000 (X,Y)	**Sim**	**Sim** para os elementos horizontais do perfil longitudinal; **Não** para os elementos verticais do perfil longitudinal.	**Não**	O custo de aquisição de imagens de alta resolução com estereoscopia é relativamente alto. Contudo, é possível conseguir imagens de alta resolução em vários órgãos públicos.
SRTM	▪ Z (H) - 3 a 7 metros ▪Escala máxima atingida: ⇒1:10.000	Talvez. Em áreas pouco movimentadas como no DF é possível chegar a erros menores	**Não**	**Não**	Não há custo para a utilização desse modelo global. Contudo, a utilização demanda levantamento de campo para melhorar a acuracidade do modelo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

III.8 – NORMAS DO DNIT QUE SUGEREM TÉCNICAS PARA O CÁLCULO DE VOLUMES TOPOGRÁFICOS NA FASE DE ANTEPROJETO DE TERRAPLENAGEM NO ÂMBITO DO RDC NO REGIME DE CONTRATAÇÃO INTEGRADA

Oportuno mencionar que os métodos que foram apresentados nesse capítulo não são novos e nem estranhos ao DNIT. Nesse sentido, podem ser citadas a Instrução de Serviço DNIT nº 9/2016 e a Portaria DNIT nº 496/2014, as quais, ao estabelecerem diretrizes para os anteprojetos de engenharia no Regime de Contratação Integrada em empreendimentos do órgão, sugerem a utilização de várias das técnicas aludidas ao longo do texto, conforme retratado no Quadro 9:

Quadro 9 – Estudo Topográfico e Modelagem Digital do Terreno no âmbito do RDC no regime de contratação integrada

Instrução de Serviço DNIT nº 9/2016	**Portaria DNIT nº 496/2014**
(...) **5.1.1. Topografia e Modelagem Digital do Terreno — Caráter Obrigatório** Para o desenvolvimento do Anteprojeto de Engenharia para RDCi, a base topográfica poderá ser obtida por meio de um dos seguintes procedimentos: ▪ **Levantamento topográfico com uso de Estação Total ou com receptor Real Time Kinematic (RTK)**, limitando-se a densidade de pontos a pelo menos 1/200 m^2, ou ainda, o levantamento de seções transversais a cada 100 metros. Nos casos de regiões planas, as seções transversais poderão ser, no máximo, a cada 500 metros; ▪ **Modelagem digital do terreno com uso de aerofotogrametria, varredura a laser com veículo terrestre ou com o emprego de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT)**, com imagens aéreas georreferenciadas e ortorretificadas, com varredura adequada, a partir do eixo da rodovia existente ou a ser projetada, em função da complexidade necessária que permita uma base topográfica para atendimento às demandas do Anteprojeto; ▪ Modelagem digital do terreno com uso de imagens **Shuttle Radar Topography Mission - SRTM**, preferencialmente com processo de correção do Modelo Digital do Terreno - MDT por meio de pontos de controle terrestre ao longo do trecho a ser estudado, adquiridos com Global Positioning System - GPS de precisão submétrica.	(...) **2.3. Estudo Topográfico e Modelagem Digital do Terreno** Conforme consta da Instrução de Serviço/DG Nº 17 de 04 de dezembro de 2013, para o desenvolvimento do Anteprojeto de Engenharia para RDCi, a base topográfica poderá ser obtida por meio de um dos seguintes procedimentos, levando em consideração as características do empreendimento: ▪ **Levantamento topográfico com uso de Estação Total ou com receptor Real Time Kinematic (RTK),** limitando-se a densidade de pontos a pelo menos 1/200 m^2 ou ainda, o levantamento de seções transversais a cada 100 metros. Nos casos de regiões planas, as seções transversais poderão ser, no máximo, a cada 500 metros; ▪ **Modelagem digital do terreno com uso de aerofotogrametria, varredura a laser com veículo terrestre ou com o emprego de Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT),** com imagens aéreas georreferenciadas e ortorretificadas, com varredura adequada, a partir do eixo da rodovia existente ou a ser projetada, em função da complexidade necessária que permita uma base topográfica para atendimento às demandas do Anteprojeto; ▪ Modelagem digital do terreno com uso de imagens **Shuttle Radar Topography Mission - SRTM**, preferencialmente com processo de correção do Modelo Digital do Terreno - MDT por meio de pontos de controle terrestre ao longo do trecho a ser estudado, adquiridos com Global Positioning System - GPS de precisão submétrica.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Das normas acima mencionadas, importa perceber que os procedimentos apresentados pelo DNIT como opções para a obtenção da base topográfica que fundamentará o anteprojeto no âmbito do RDC, possuem níveis de precisões bastante diferentes. Para esta fase, por óbvio, os métodos mais precisos deverão sempre ser aceitos, como é o caso, por exemplo, de levantamentos com uso de estações totais, receptores GPS com correção diferencial em tempo real (RTK), aerofotogrametria, varredura Laser ou com o emprego de VANTs. Contudo, ao aceitar a modelagem digital obtida a partir do SRTM, essas normas, em tese, aceitam anteprojetos que chegarão, quando muito, ao nível de detalhamento contido na escala 1:10.000, escala essa que, em princípio, não oferece os elementos mínimos desejáveis para a quantificação de volumes ao nível esperado para um anteprojeto.

CAPÍTULO IV – POTENCIALIDADES DA FOTOGRAMETRIA COM VANTS: APRESENTAÇÃO DE UM ESTUDO DE CASO

Nos capítulos precedentes, foi possível observar as precisões requeridas (ou erros máximos tolerados) para a obtenção de volumes nas fases de anteprojeto, projeto e execução da terraplenagem, bem como as principais técnicas alternativas aos levantamentos topográficos clássicos, com enfoque no uso de sensores remotos, para a obtenção desses volumes. No entanto, a despeito de ser importante o embasamento teórico na fundamentação da escolha de uma solução para a obtenção de volumes, mais importante é a validação prática da solução.

Nesse contexto, uma limitação do presente estudo consiste no fato de não ter sido possível, por meio de atividades práticas, testar as afirmações teóricas mencionadas pelos diversos autores. Isso ocorreu em função do tempo exíguo e de outras dificuldades práticas, tais como a impossibilidade de aquisição dos equipamentos e insumos necessários para testar algumas das técnicas apresentadas.

Não obstante essas constatações, o presente capítulo apresentará, a partir de uma fonte secundária, um caso prático no qual foram comparados empiricamente e em vários aspectos, o levantamento topográfico e a fotogrametria com veículos aéreos não tripulados (VANTs). Entre as características comparadas está o modelo digital de elevação gerado por meio das duas técnicas e o cálculo de volumes topográficos. Tal experiência foi realizada pela DronEng Drones & Engenharia[25] em conjunto com a Empresa Júnior de Engenharia Cartográfica da Universidade Estadual Paulista (UNESP) em março de 2016.

Conforme já havia sido mencionado na seção que tratou da aerofotogrametria, os princípios teóricos utilizados na realização dessa técnica com emprego de aeronaves tripuladas se aplicam também à adaptação que se passou a fazer, de alguns anos para cá, para que a fotogrametria pudesse ser levada a efeito com veículos aéreos não tripulados. Portanto, a despeito da comparação e dos resultados que serão apresentados não terem sido produzidos diretamente no âmbito do presente estudo em razão das limitações já expostas, são tais informações essenciais para demonstrar o estado da arte dessa opção técnica, além de instigar outros pesquisadores a, em outros experimentos, realizarem novos testes de validação da fotogrametria com VANT com vistas a delimitar com precisão as potencialidades de utilização.

[25] Este e outros estudos estão disponíveis no endereço eletrônico:<http://droneng.com.br/materiais-educativos/>

IV.1 – OBJETIVO DO TESTE

Segundo os responsáveis técnicos[26], o objetivo central do teste foi realizar um projeto em área determinada utilizando as duas ciências: Topografia e Fotogrametria. Buscou-se verificar na prática as semelhanças e divergências destas ciências. Entre as comparações realizadas, destacam-se o tempo despendido em cada ciência para a realização do levantamento da área teste, a quantidade de pessoas necessárias em cada levantamento, o tempo de processamento para gerar os produtos finais, bem como os produtos gerados considerando seus diferenciais, limitações e aplicações.

IV.2 – ÁREA DE ESTUDO

A área escolhida para o teste localiza-se no município de Pirapozinho, no Estado de São Paulo, e abrange uma área aproximada de 31.000 m², distante 4km da área central do município. Trata-se de área que contém relevo acidentado, característica que facilita as comparações entre os modelos digitais de elevação gerados a partir das duas ciências em estudo. A Figura 38 apresenta a localização da citada área de estudo.

Figura 38 – Croqui de localização da área de estudo

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[27]

IV.3 – ETAPAS DO LEVANTAMENTO COM VANT

De maneira geral, as etapas de um projeto de fotogrametria com a utilização de VANTs são as seguintes:

[26] A equipe técnica responsável pelo "***case***" foi composta pelos seguintes profissionais: Manoel Silva Neto (Eng. Cartógrafo); Nícolas Machancoses (Eng. Cartógrafo); Maurício Campiteli (Eng. Cartógrafo) e Anderson Arias (Aluno de graduação do curso de Eng. Cartográfica/UNESP).

[27] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.

a) Planejamento do voo ☞ Consiste na análise da área a ser mapeada, definição da resolução do voo (GSD), altura de voo, sobreposições, faixas, quantidade de imagens, local de pouso e decolagem;

b) Planejamento dos pontos de amarração (Controle e Check) ☞ Consiste na distribuição de pontos identificáveis na área de estudo em função de suas características topográficas;

c) Medição dos pontos de amarração ☞ Ocorre com a coleta dos pontos através de receptores GPS geodésicos;

d) Voo e tomada das imagens;

e) Preparação dos dados obtidos em campo;

f) Processamento das imagens;

g) Geração de produtos: Mosaico de Ortofoto, Modelo Digital da Superfície (MDS), Modelo Digital de Elevação (MDE).

IV.3.1 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para o sobrevoo da área escolhida e com vistas a possibilitar o levantamento fotogramétrico com VANT, foi utilizado pelos responsáveis no teste apresentado o BATMAP I. Trata-se de um VANT para uso profissional cujo conjunto, incluindo a câmera, custa cerca de R$ 61.000,00. Segundo a empresa fabricante[28], o referido aparelho é um VANT/Drone de uso duradouro que tem autonomia para voar por cerca de 90 minutos (1,5h) possibilitando recobrir até 4.200 ha em um único voo. Possui uma câmera com resolução de 24,3 MP sincronizada com o GPS e pode voar até 1.500 m de altura, situação em que consegue recobrir a maior área. O Quadro 10 a seguir apresenta a relação altura de voo x GSD x área recoberta.

Quadro 10 – Relações de precisão e área em função da altura de voo

Altura de Voo (m)	GSD (cm)	BATMAP I (ha)
100	2,4	**310**
200	4,9	**610**
300	7,3	**950**
400	9,8	**1.200**
500	12,2	**1.500**
1.000	24,4	**2.800**
1.500	36,6	**4.200**

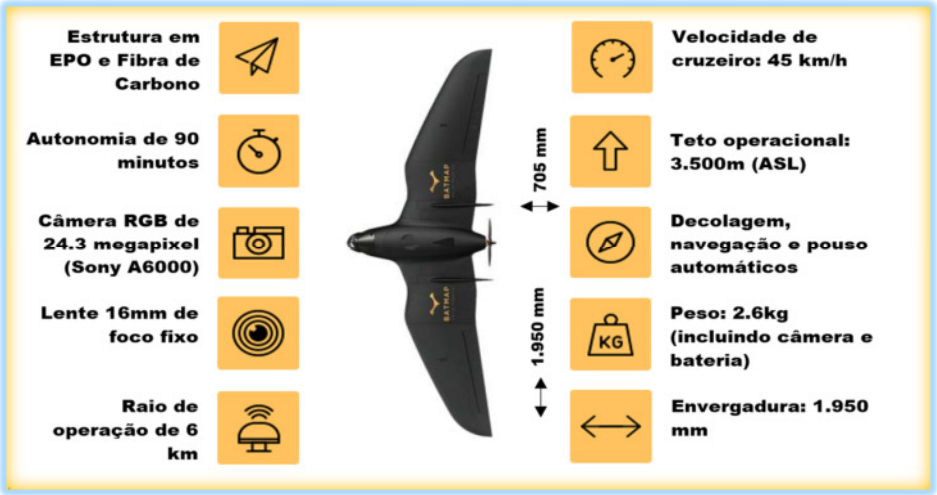
Fonte: BATMAP *Aerial Mapping*[29]

[28] O BATMAP é um DRONE de alta performance desenvolvido no Brasil pela Empresa Nuvem UAV. < http://nuvemuav.com/>

[29] Disponível em:< http://batmap.com.br/batmap-1/> Acesso em 2/2/2018.

A Figura 39 sintetiza as principais características técnicas do VANT utilizado no teste em epígrafe.

Figura 39 – BATMAP I: Ficha Técnica



Fonte: BATMAP *Aerial Mapping* (adaptado).[30]

Na medição dos pontos de amarração necessários ao processamento das informações oriundas da fotogrametria, foi utilizado o receptor geodésico Topcon Hiper SR L1/L2. A Figura 40 apresenta o mencionado receptor geodésico.

Figura 40 – Receptor Geodésico Topcon Hiper SR L1/L2

Fonte: Mark Lok Locação de Equipamentos.[31]

[30] Disponível em:< http://batmap.com.br/batmap-1/> Acesso em 2/2/2018.
[31] Disponível em:< http://marklok.com.br/locacao/equipamentos-topograficos>. Acesso em 8/2/2018.

IV.3.2 – PLANEJAMENTO DO VOO

O planejamento de voo é uma das etapas mais importantes dos projetos fotogramétricos já que é nesta etapa que são definidos, entre outras especificações, a resolução do mapeamento, a sobreposição das imagens e faixas, o tempo de voo, a quantidade de voos, quantidade de imagens tomadas e a disposição do voo. As informações do planejamento são inseridas no VANT que levanta voo e executa todas as especificações definidas, incluindo toda a trajetória definida para o voo, no planejamento.

No caso apresentado, para o planejamento do voo, foi utilizado o programa *Mission Planner*. Trata-se de um software *open-source* e gratuito, compatível apenas com o Windows. Foi desenvolvido para ser uma estação de controle em solo para vários tipos de VANTs. A Figura 41 apresenta o resumo das especificações definidas para o teste.

Figura 41 – Especificações do voo

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[32]

IV.3.3 – PLANEJAMENTO DOS PONTOS DE AMARRAÇÃO

Os pontos de apoio ou pontos de controle são pontos facilmente identificáveis nas fotos a serem tomadas. São, portanto, objetos, alvos, detalhes no terreno que permitam fácil identificação nas imagens aéreas. Esses pontos são utilizados para fazer a relação (transformação matemática, utilizada no processamento do bloco fotogramétrico) entre o sistema de coordenadas da imagem com o sistema de coordenadas do terreno. São pontos de referência no solo cujas coordenadas de terreno são, posteriormente, utilizadas no pós-processamento das imagens com vistas a conferir acurácia aos produtos gerados.

[32] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.

Os pontos de verificações apresentam as mesmas características dos pontos de controle. No entanto, se diferem destes porque não são utilizados na transformação matemática entre os referenciais da imagem e do terreno, mas apenas para a conferência da acuracidade posterior do modelo de transformação gerado. São, portanto, pontos de checagem (*check points*) utilizados na verificação do produto.

No "*case*" apresentado, foram coletados 7 pontos de apoio (A1, A2, A4, A6, A8, A9 e A10) e 3 pontos de verificação (A3, A5 e A7), todos identificáveis nas imagens. Conforme já mencionado, a medição das coordenadas desses pontos se deu com o emprego do receptor geodésico Topcon Hiper SR L1/L2.

IV.3.4 – MEDIÇÃO DOS PONTOS DE CONTROLE

A medição dos pontos de controle levou, ao todo, em torno de 3 horas. Nessa etapa, participaram dois técnicos, para operar os receptores GPS e um engenheiro para o pós-processamento dos dados GPS. Como referência de amarração global do trabalho, foi utilizada a estação denominada PPTE, integrante da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE, localizada no Campus da UNESP de Presidente Prudente. O *Datum* (referencial geodésico) utilizado foi o SIRGAS 2000 e a projeção cartográfica para a obtenção de coordenada planas a Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 22 Sul. Nessa fase, ao todo, o levantamento de campo durou cerca de 3 (três horas) e o tempo de coleta em cada ponto medido levou cerca de 30 minutos.

As coordenadas referentes à altitude geométrica (referenciada ao elipsoide que compõe o sistema de posicionamento global utilizado) obtidas pelo levantamento GPS foram transformadas para ortométricas (referenciadas ao nível médio dos mares) por meio do software MAPGEO 2015. A execução dessa fase é sintetizada pela Figura 42 a seguir.

Figura 42 – Medição dos pontos de controle - Síntese

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[33]

[33] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.

Nessa fase, foram obtidas, ao final, as coordenadas planas com a componente altimétrica referenciada ao nível médio dos mares (altitude ortométrica), seguindo o fluxo descrito na Figura 43.

Figura 43 – Sequência do processamento das coordenadas dos pontos de controle

LINHA DE BASE	PDOP	STATUS	RMS (m)
A1–PPTE	2,130	AJUSTADO	0,022
A2–PPTE	2,167	AJUSTADO	0,021
A3–PPTE	2,297	AJUSTADO	0,021
A4–PPTE	2,032	AJUSTADO	0,022
A5–PPTE	1,621	AJUSTADO	0,019
A6–PPTE	1,736	AJUSTADO	0,020
A7–PPTE	1,739	AJUSTADO	0,021
A8–PPTE	1,635	AJUSTADO	0,027
A9–PPTE	1,905	AJUSTADO	0,022
A10–PPTE	1,655	AJUSTADO	0,031

Obtenção das coordenadas geodéscias (latitude, longitude e altitude geométrica) dos pontos de controle e checagem pelo processamento diferencial tendo por estação base (referência) a "PPTE" da RBMC. O quadro mostra o erro médio quadrático (RMS) em cada linha de base ajustada.

PONTO	NORTE	ESTE	ALTITUDE
A1	7533637,851	447891,006	460,269
A2	7533639,370	447758,198	460,721
A3	7533555,335	447819,562	460,754
A4	7533577,598	447785,498	464,560
A5	7533610,675	447841,492	460,290
A6	7533506,029	447770,880	464,532
A7	7533480,342	447850,956	469,717
A8	7533448,828	447869,097	465,967
A9	7533438,261	447794,135	462,041
A10	7533562,020	447879,942	462,344
PPTE	7553844,608	457866,057	431,050

Obtenção das coordenadas planas (N, E) dos pontos de controle e checagem na projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) para o Fuso 22 Sul.

PONTO	ALT. GEO	ONDULAÇÃO	ALT. ORTO
A1	460,269	-4,65	464,919
A2	460,721	-4,65	465,371
A3	460,754	-4,65	465,404
A4	464,560	-4,65	469,210
A5	460,290	-4,65	464,940
A6	464,532	-4,65	469,182
A7	469,717	-4,65	474,367
A8	465,967	-4,65	470,617
A9	462,041	-4,65	466,691
A10	462,344	-4,65	466,994
PPTE	431,050	-4,65	435,700

Obtenção da altitude ortométrica (referenciada ao nível médio dos mares dos pontos de controle e checagem pela transformação da altitude geométrica (dada no levantamento GPS) por meio do programa MAPGEO 2015.

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[34]

IV.3.5 – VOO E TOMADA DAS IMAGENS

Na execução do voo, o tempo no campo, incluindo os preparativos que o antecederam levou, ao todo, cerca de 30 minutos. Nessa etapa, participaram um técnico e um operador. O VANT executou o voo planejado em 15 minutos tomando, ao todo, 182 imagens. A Figura 44 sintetiza essa fase do teste.

Figura 44 – Síntese da fase de voo

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[35]

[34] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.
[35] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.

IV.3.6 – PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

O processamento das imagens foi realizado com o software *Pix4Dmapper*. Trata-se de uma solução para converter imagens aéreas e oblíquas tomadas pelos VANTs em ortomosaicos[36] georreferenciados, modelos tridimensionais de superfície e nuvens de pontos. Entre suas ferramentas, destacam-se a aerotriangulação automática, baseada no conteúdo de imagens e técnicas de otimização exclusiva. A Figura 45 sintetiza a fase de processamento das imagens.

Figura 45 – Síntese da fase de processamento das imagens

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[37]

Nessa fase foi alocado um engenheiro.

IV.3.7 – PRODUTOS GERADOS

De início, vale mencionar que o teste revelou, para os 7 (sete) pontos de controle utilizados na transformação do referencial da foto para o referencial do terreno, os resultados sintetizados no Quadro 11 a seguir.

[36] **Ortomosaico ou mosaico de ortofotos** é um produto gerado pelo processo de mosaicagem (junção de partes para formar um todo por meio da busca de pontos homólogos entre duas ou mais imagens sobrepostas entre si) de várias ortofotos. Estas são assim denominadas depois de serem submetidas ao processo de ortorretificação. A ortorretificação tem como finalidade corrigir geometricamente a imagem, pixel por pixel, das distorções decorrentes do relevo. O objetivo da ortorretificação é transformar a imagem de uma projeção cônica para uma perspectiva ortogonal, mantendo a constância da escala em toda a imagem ortorretificada.

[37] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.

Quadro 11 – Acurácia dos pontos de controle utilizados: comparação das coordenadas dos pontos de controle obtidas pelo modelo ajustado estatisticamente e as coordenadas medidas no terreno

Ponto	Erro em X(m) (Coordenada E)	Erro em Y (m) (Coordenada N)	Erro em Z (m) (Coordenada H)
A1	-0,036	0,043	0,028
A2	0,012	0,019	0,021
A4	-0,013	0,016	-0,038
A6	0,010	0,016	-0,013
A8	-0,027	-0,037	-0,044
A9	0,042	0,012	0,046
A10	0,006	-0,062	0,029
Sigma (m)	**0,024524**	**0,034092**	**0,033200**
Erro Médio Quadrático (RMS)	**0,024541**	**0,034109**	**0,033457**

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[38]

Na fotogrametria o indicador de qualidade do produto final é a acurácia (RMS) dos pontos de verificação (*check*). Vale ressaltar que os pontos de verificação (A3, A5 e A7) não são utilizados no modelo de transformação entre o referencial da foto e o referencial do terreno. Importa rememorar que os três pontos referidos tiveram suas coordenadas de terreno coletadas com receptor GPS de alta precisão. Assim, após o processamento das informações obtidas durante o voo, os pontos de checagem são identificados no modelo já ajustado e georreferenciado, extraindo-se destes, suas coordenadas de terreno (obtidas a partir da transformação gerada pelos 7 pontos de controle) para compará-las com as mensuradas em campo (dadas pelo GPS Geodésico). A discrepância encontrada mede a acurácia do modelo.

Para os 3 (três) pontos de checagem, os resultados oriundos da comparação entre suas coordenadas medidas e as homólogas obtidas a partir do modelo ajustado é resumido no Quadro 12 a seguir:

Quadro 12 – Acurácia dos pontos de checagem utilizados: comparação das coordenadas dos pontos de "*check*" obtidas pelo modelo ajustado estatisticamente e as coordenadas medidas no terreno

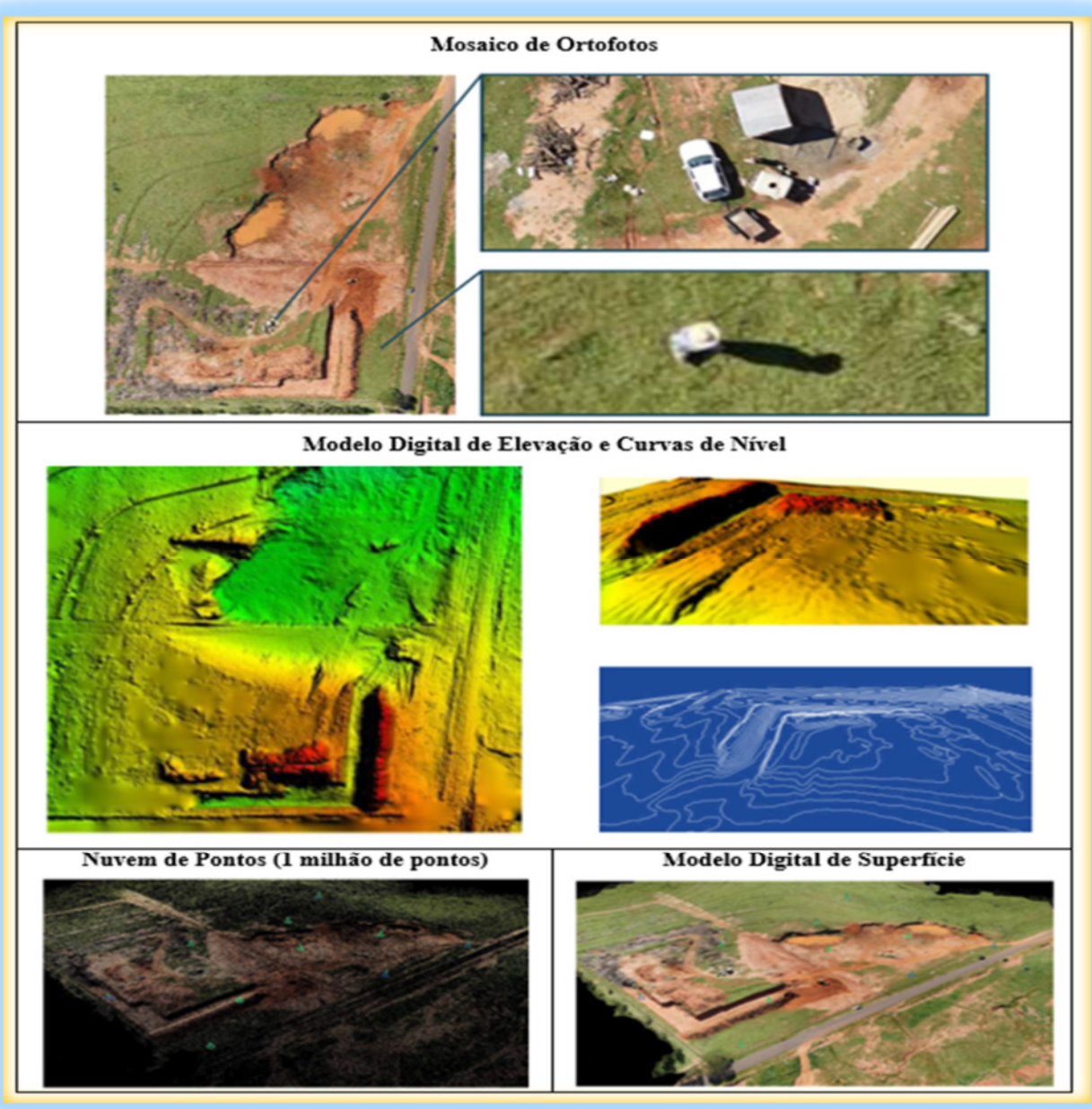
Ponto	Erro em X(m) (Coordenada E)	Erro em Y (m) (Coordenada N)	Erro em Z (m) (Coordenada H)
A3	-0,0069	0,0499	0,0852
A5	-0,0233	0,0644	0,0344
A7	0,0182	-0,0344	-0,1098
Sigma (m)	**0,017061**	**0,043592**	**0,031390**
Erro Médio Quadrático (RMS)	**0,017532**	**0,051084**	**0,082662**

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[39]

[38] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.
[39] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.

Uma vez aferida a acuracidade do modelo de transformação gerado, na casa de 1,7 cm em X (E), 5,1 cm em Y (N) e 8,2 em Z (H), apresentam-se sintetizados na Figura 46 os principais produtos obtidos:

Figura 46 – Principais produtos gerados no teste a partir da fotogrametria com VANT



Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[40]

Conforme já mencionado na Figura 41, no teste apresentado, foi utilizado um GSD de 3 cm, o que significa que cada pixel na imagem representa 3 cm^2 no terreno.

[40] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.

IV.4 – ETAPAS DO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

De maneira geral, as etapas de um levantamento topográfico podem ser resumidas em três momentos. O primeiro consiste no planejamento da poligonal com a definição dos pontos que a comporão, bem assim dos pontos que serão utilizados como referência para o ajuste das medições. A partir dos pontos dessa poligonal ocorrem as irradiações de outros pontos ao longo do terreno com vistas a melhor defini-lo. Feito o planejamento, as próximas fases são a execução do levantamento e, ao final, o processamento das informações.

IV.4.1 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

No levantamento topográfico da área de estudo foi utilizada a Estação Total Topcon GTS- 105N. A Figura 47 a seguir ilustra equipamento mencionado:

Figura 47 – Estação Total utilizada no levantamento topográfico

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[41]

IV.4.2 – PLANEJAMENTO DA POLIGONAL

A equipe responsável narra que para ter o controle do erro de fechamento, optou-se por utilizar uma poligonal fechada apoiada em dois pontos (P0 e P1) de coordenadas conhecidas, os quais também serviram de apoio para os pontos de controle do mapeamento aéreo. Considerando as possibilidades de erros de visadas, foram realizadas 3 visadas na Ré e Vante de cada ponto zerando o ângulo na Ré. Segundo a equipe, esse método de redundância de observações permite que os erros de visada possam ser identificados e, caso necessário, é

[41] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.

possível eliminar uma das observações. Com isso, mantém-se 2 visadas íntegras, consoante preconiza a norma de levantamento topográfico NBR 1313. A Figura 48 ilustra a distribuição dos 7 pontos planejados (P0, P1, P2, P3, P4, P5 e P6) e utilizados na poligonal principal do levantamento topográfico:

Figura 48 – Estação Total utilizada no levantamento topográfico

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[42]

IV.4.3 – EXECUÇÃO DO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

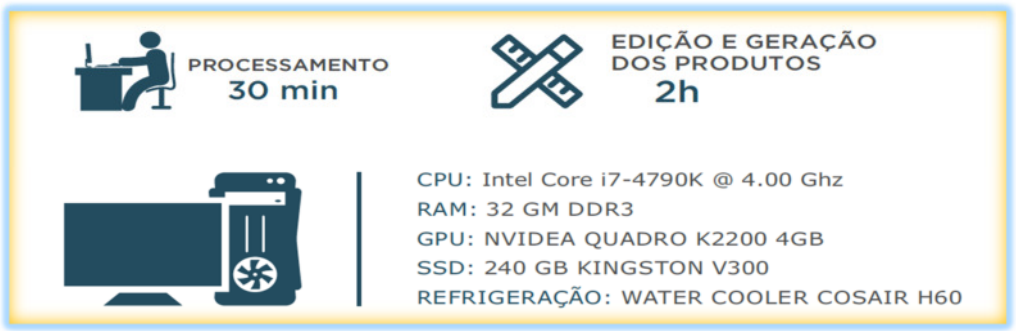
A execução do levantamento demandou um técnico para operar a Estação Total e outros três auxiliares nas balizas de marcação. No campo, o levantamento topográfico teve duração de 8 horas e 15 minutos. No total foram coletados por irradiação a partir dos vértices da poligonal 628 pontos no terreno.

IV.4.4 – PROCESSAMENTO DAS INFORMAÇÕES

A fase de processamento das informações topográficas foi realizada por um engenheiro e levou cerca de 30 minutos. Na edição digital dos produtos foram gastas mais 2 horas. A Figura 49 a seguir sintetiza a fase de processamento.

[42] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.

Figura 49 – Levantamento topográfico: síntese da fase de processamento



Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[43]

IV.4.5 – PRODUTOS GERADOS

No processamento das informações oriundas do levantamento topográfico foi utilizado o programa **TopoEVN 6**. Relatam os responsáveis pelo teste que, de acordo com as características do levantamento realizado, a tolerância máxima de erro angular seria de 39,7 segundos sendo que o erro angular máximo encontrado no projeto foi de 10,5 segundos.

No que diz respeito ao erro relativo, estipulou-se como tolerância um erro máximo de 1:10.000. Segundo os responsáveis, tal objetivo foi atingido já que o erro máximo do projeto ficou na casa de 1:65.739. Considerando que o erro angular e o erro relativo ficaram dentro das tolerâncias estabelecidas, considera-se que o erro de fechamento da poligonal está adequado atendendo os parâmetros de precisão estabelecidos. Por fim, destaca-se que a acurácia posicional final do projeto foi de 5 mm em X, 0,7 mm em Y e 5 mm em Z.

Entre os produtos gerados, apresenta-se na Figura 50, a título exemplificativo, as curvas de nível extraídas a partir do levantamento topográfico.

[43] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.

Figura 50 – Curvas de nível geradas a partir do levantamento topográfico

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[44]

IV.5 – COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

A partir da comparação dos resultados é possível verificar que o levantamento fotogramétrico com a utilização de VANT consegue atingir boa precisão, capaz de tornar possível seu emprego em várias aplicações de engenharia. Nesse sentido, a Figura 51 sintetiza, no que diz respeito ao desempenho, o comparativo entre as técnicas empregadas no "*case*":

Figura 51 – Comparativo Topografia x Fotogrametria com VANT

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[45]

Com as informações da área de teste obtidas por meio das duas ciências, a equipe responsável pelo "*case*" realizou, para fins comparativos, o cálculo de volume topográfico de

[44] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.
[45] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.

uma porção do terreno. Para tanto, escolheu-se no terreno uma área de morro. A Figura 52 ilustra a área escolhida:

Figura 52 – Área selecionada para cálculo de volume topográfico

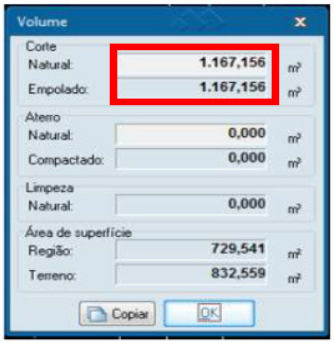
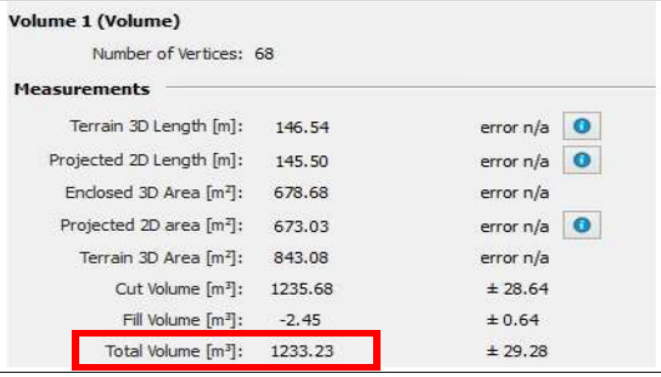
Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[46]

Os resultados encontrados mostram que, na comparação entre os volumes obtidos, houve uma diferença de 66 m^3. Considerando que o volume medido para o morro a partir das informações oriundas do levantamento topográfico chegou ao resultado de 1.167,16 m^3 e que para a mesma região escolhida o volume obtido a partir da fotogrametria chegou ao resultado de 1.233,23 m^3, a diferença entre as metodologias chega a 5,65% considerando como referência o volume obtido por meio da topografia.

No entanto, a diferença encontrada não se deve tão somente à diferença entre a acuracidade nas duas técnicas empregadas. Os levantamentos topográficos, a despeito de apresentarem resultados mais precisos para os pontos levantados (628 no teste realizado), apresentam limitações quanto a real representação das variações topográficas do terreno já que, pela limitação dos pontos irradiados, o cálculo das curvas de nível e dos volumes acaba fazendo uso de interpolações matemáticas (onde não existe informações) em maior intensidade que a fotogrametria. O levantamento fotogramétrico, no entanto, a despeito de apresentar precisão na casa dos centímetros, permite gerar nuvens de pontos (mais de 1 milhão no teste realizado) que no final, permitem detalhar melhor o morro. A Figura 53 a seguir resume a comparação de volumes realizada.

[46] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.

Figura 53 – Cálculo de volume topográfico: Topografia x Fotogrametria

Topografia (TopoEVN)	Fotogrametria (Pix4d)
	

Discrepância 66 m³

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).[47]

IV.6 – ESTUDOS QUE VALIDAM A FOTOGRAMETRIA COM VANTS

A acurácia atribuída à fotogrametria alcançada no teste apresentado se confirma por outros experimentos considerando outros modelos de VANTs. No Brasil, a Empresa DronEng já realizou outros experimentos dos quais dois se destacam, em razão da utilização do equipamento DJI Phantom 4. Trata-se de um VANT semiprofissional acessível que custa cerca de R$ 5.000,00. A Figura 54 ilustra o equipamento mencionado:

Figura 54 – Drone DJI Phantom 4

Fonte: DJI Drones.[48]

[47] Disponível em:< http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>. Acesso em 10/1/2018.
[48] Disponível em:< https://www.dji.com/support/product/phantom-4>. Acesso em 3/2/2018.

Em um dos testes, denominado "Mapeamento aéreo com Phantom – resultados e análise de qualidade", realizado em uma área de 27 hectares, para um GSD de cerca de 4 cm, o teste chegou aos seguintes erros médios na avaliação de qualidade: a 0,8 cm em X (E), 2,12 cm em Y (N) e 3,27 cm em Z (H).

No outro teste utilizando o mesmo equipamento, realizado em conjunto com outra empresa (Mapear com Drones), o "*case"* denominado de "Mapeamento aéreo com Drones aplicado à topografia", realizado em uma área de 20,7 hectares, para um GSD de cerca de 3,5 cm, o teste chegou aos seguintes erros médios na avaliação de qualidade: a 2,95 cm em X (E), 3,72 cm em Y (N) e 5,98 cm em Z (H).

Em trabalho realizado em 2015, com o título "*DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill*", publicado na seção "*Measurement*" do periódico internacional *ELSEVIER*[49]*,* os autores M. Uysal, A.S. Toprak, N. Polat relatam, em seu experimento, cujo objetivo principal foi o de avaliar a precisão vertical (Z) de um Modelo Digital de Elevação referente a uma área de aproximadamente 5 hectares, que, considerando 30 pontos de verificação, chegaram a um erro médio vertical na casa de 6,62 cm, considerando uma altura de voo de 60 m. No experimento foi utilizado o VANT "OCTO XL".

Maciej S. e Beata M. (2017), em artigo apresentado à Academia Polonesa de Ciências, ao estudarem a acuracidade do georreferenciamento de imagens obtidas por veículos aéreos não tripulados, para uma área de aproximadamente 1 hectare e considerando 10 pontos de verificação, chegaram aos seguintes erros médios na avaliação de qualidade: a 6 cm em X (E), 5 cm em Y (N) e 4 cm em Z (H).

Além das pesquisas apresentadas neste capítulo, vale mencionar que há no Brasil e no mundo muitas outras pesquisas que também têm alcançado níveis de precisão semelhantes aos expostos. Com isso, considerando que a fotogrametria com o uso de veículos aéreos não tripulados está se consolidando no âmbito da engenharia, é possível concluir que, por seu relativo baixo custo e facilidade operacional, esta tecnologia pode oferecer para as fiscalizações de obras insumos precisos e necessários que, somados aos procedimentos já existentes, serão essenciais para formação de opiniões na análise dos achados de auditoria.

[49] Disponível em:<https://www.journals.elsevier.com/measurement>. Acesso em 12/2/2018.

IV.7 – SÍNTESE DAS PRECISÕES ALCANÇADAS COM EMPREGO DA FOTOGRAMETRIA COM VANTS E LIMITES DE EMPREGO NO CÁLCULO DE VOLUMES TOPOGRÁFICOS EM CADA FASE DA TERRAPLENAGEM

Conforme já se vislumbrou, nas obras rodoviárias, a precisão do cálculo dos volumes topográficos depende da precisão das coordenadas de terreno (E, N, H ou X, Y e Z) que integram as seções transversais do perfil longitudinal, sendo a componente altimétrica (H ou Z) a mais importante. Diante dessa constatação, o Quadro 13 a seguir, resume os limites e as possibilidades de emprego da fotogrametria com VANTs obtenção de volumes em cada uma das três fases da terraplenagem a seguir descritas:

Quadro 13 – Limites e possibilidades de obtenção de volumes por meio de VANTs

Técnica de Obtenção de volumes	Acurácia posicional (X, Y,Z) – 3D	Precisão compatível para geração de volumes na fase de Anteprojeto?	Precisão compatível para geração de volumes na fase de Projeto?	Precisão compatível para geração de volumes na fase de Execução?	Observações
Fotogrametria com VANTs	▪X,Y: de 3-6 cm ▪ Z – de 5 a 12 cm ▪Escala máxima atingida: ⇒ maior que 1:500	**Sim**	**Sim** para os elementos horizontais do perfil longitudinal; **Talvez** para os elementos verticais do perfil longitudinal	**Talvez.**	Custos relativamente baixos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

CONSIDERAÇÕES CONCLUSIVAS

Ao longo desta monografia, buscou-se, por meio de pesquisa bibliográfica, apresentar técnicas alternativas aos levantamentos topográficos clássicos que permitissem a obtenção de volumes do terreno, com vistas a responder a questão inicial formulada para guiar a presente pesquisa: **Considerando as precisões alcançáveis, os resultados obtidos no cálculo de volumes topográficos por meio da utilização de informações obtidas por sensores remotos, em comparação com os levantamentos clássicos tais como o topográfico, possibilitam alguma utilização prática nas fiscalizações de obras rodoviárias que tenham por objeto os movimentos de terra?**

Para responder esta questão, o presente estudo identificou, inicialmente, para cada fase da terraplenagem de uma obra rodoviária, a precisão mínima requerida. Assim, observou-se que na fase de Anteprojeto de Terraplenagem as informações topográficas necessárias devem contemplar, no mínimo, a escala 1:5.000 (ou maiores) tanto para os elementos horizontais do perfil longitudinal quanto para os verticais, aceitando-se os erros inerentes à mencionada escala.

Na fase de Projeto, contudo, os elementos horizontais do perfil longitudinal devem ser obtidos na escala 1:2.000 (ou maiores). Já os elementos verticais do perfil longitudinal e as respectivas seções transversais devem ser obtidos a partir da escala 1:200.

Na fase de execução da Terraplenagem, observou-se que, para os Cortes, a Norma DNIT 106/2009 autoriza como variação máxima de altura para eixo e bordas ± 0,05 m, se o corte se der em solo ou ± 0,10 m, se o corte se der em rocha. Para os Aterros, a Norma DNIT 108/2009 estabelece como parâmetro de variação máxima de altura ± 0,04 m, para eixo e bordas e + 0,3 m para a plataforma.

Em seguida, o estudo apresentou os conceitos necessários para a compreensão das técnicas alternativas ao levantamento topográfico na obtenção de volumes do terreno. Entre os conceitos apresentados destaca-se o de Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizado para designar apenas a elevação da superfície e o termo MDT (ou MDS) significando um modelo mais completo do terreno, incluindo outras feições, tais como: casas, prédios, vegetação, árvores etc.

Nas obras rodoviárias, a precisão do cálculo dos volumes topográficos depende da precisão das coordenadas de terreno (E, N, H ou X, Y e Z) que integram as seções transversais do perfil longitudinal, sendo a componente altimétrica (H ou Z) a mais importante. Diante dessa constatação, após apresentadas cada uma das técnicas que, fazendo uso de sensores remotos, permitem o cálculo de volumes topográficos, verificou-se que as informações oriundas da Aerofotogrametria, do Perfilamento Laser aerotransportado, do Radar aerotransportado e das Imagens de Satélite de Alta Resolução podem ser utilizadas na elaboração de Anteprojetos por atenderem a escala 1:5.000 e também na elaboração de Projetos os quais requerem a escala 1:2.000, com uso limitado (do ponto de vista da precisão requerida) aos elementos horizontais do perfil longitudinal. Quanto às informações do SRTM, verificou-se que as precisões máximas alcançadas permitem sua utilização, quando muito, para os estudos preliminares que antecedem o Anteprojeto. Vale rememorar que nenhuma das técnicas apresentadas no presente estudo permitem obter volumes topográficos nas precisões requeridas (erros tolerados em torno de 5 cm em altura - Z) na fase de execução de uma obra rodoviária. Isso porque, não se mostra adequado comparar, para fins de fiscalização, volumes obtidos com precisão inferior com aqueles medidos por técnicas topográficas convencionais de maior precisão.

Quanto ao emprego de VANTs na fiscalização de volumes, verificou-se que sua empregabilidade alcança com facilidade as escalas 1:5.000 (anteprojeto) e 1:2.000 (projeto), permitindo aferir os elementos horizontais do perfil longitudinal. Observou-se ainda que, como as precisões obtidas com essa técnica são muito próximas aos erros tolerados na obtenção dos elementos verticais do perfil longitudinal apresentados no projeto (escala 1:200) e, também, na fase de execução da obra (medições tolerando erros próximos de 5 cm), vislumbram-se possibilidades concretas de utilização dessa tecnologia na fiscalização das aludidas fases. Para tanto, novos testes voltados para a medição de volumes com esse equipamento seriam necessários, avaliando, por exemplo, alturas de voo ideais, bem como a influência da resolução das câmeras digitais utilizadas na tomada aérea, na precisão final obtida. Com isso, seria possível formular uma metodologia que serviria de orientação para essas fiscalizações.

Verificou-se também que o Decreto nº 89.817/1984, estabelece critérios para classificação de cartas topográficas quanto à sua exatidão e à distribuição de erros ao longo das mesmas, utilizando um indicador estatístico da qualidade posicional, denominado de Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)**.** Adotando-se como referência essa norma para aferir o material cartográfico oriundo de levantamentos topográficos é possível estabelecer parâmetros de

aceitação de erros, nas escalas requeridas na terraplenagem, quais sejam, 1:200 para os elementos verticais do perfil longitudinal na fase de Projeto; 1:2.000, para os elementos horizontais do perfil longitudinal na fase de projeto e 1:5.000 na fase de Anteprojeto.

Uma importante informação apresentada no Capítulo I diz respeito à forma como se dá o cálculo de volumes nos projetos de terraplenagem. Basicamente o cálculo desses volumes leva em conta a área precisa das seções transversais ao eixo da via projetada, espaçadas de 20 em 20 metros (espaçamento utilizado como padrão nestes cálculos pelos projetistas). Esse método, contudo, considera que a variação do terreno entre as seções é linear. Com isso, por mais precisa que seja a medição das áreas das seções transversais, perde-se alguma precisão no cálculo de volumes com a simplificação mencionada. Esse ponto fica evidente com a comparação realizada no Capítulo IV, no qual, os volumes de uma mesma feição do terreno discreparam cerca de 66 m^3. No teste, a fotogrametria com VANT gerou uma nuvem com 1 milhão de pontos, enquanto que o levantamento topográfico levantou 628 pontos. Com isso, no momento de gerar o modelo digital de elevação a partir dos dados do levantamento topográfico, o software utilizado para representar o terreno se valeu de interpolações para cobrir os "vazios" (áreas do terreno não medidas). Já a nuvem de pontos gerada pela fotogrametria reduziu a necessidade de interpolações que os programas que geram MDEs costumam fazer, na medida em que, por si só, a nuvem obtida se mostrou suficiente para representar com boa precisão a topografia da área escolhida para o teste de volume.

As informações compiladas na presente pesquisa permitem vislumbrar aplicações de várias das técnicas apresentadas em momentos distintos de fiscalização realizada pelo TCU. Ao realizar controle prévio, os volumes calculados nos anteprojetos e projetos de engenharia poderiam ser checados a partir da seleção de áreas amostrais mais sensíveis, nas quais seriam realizados testes de campo, com a utilização, por exemplo, de veículos aéreos não tripulados. O controle concomitante teria por objetivo aferir as medições de volumes, o que poderia ser feito, com boa aproximação, também com o uso de VANTs. No entanto, em um ou outro caso, seria necessário o desenvolvimento de metodologias para o emprego dessas técnicas. Para que isso possa ocorrer, seria necessário a realização de outros testes com vistas a confirmar a acuracidade do método, e solidificar os procedimentos de medição.

Vale mencionar que os métodos que foram apresentados nessa monografia não são novos e nem estranhos ao DNIT. Nesse sentido, podem ser citadas a Instrução de Serviço DNIT nº 9/2016 e a Portaria DNIT nº 496/2014, as quais, ao estabelecerem diretrizes para os

anteprojetos de engenharia no Regime de Contratação Integrada em empreendimentos do órgão, sugerem a utilização de várias das técnicas aludidas ao longo do trabalho, quais sejam:

a) Levantamento topográfico com uso de Estação Total ou com receptor Real Time Kinematic (RTK);

b) Modelagem digital do terreno com uso de aerofotogrametria, varredura a laser com veículo terrestre ou com o emprego de VANT, com imagens aéreas georreferenciadas e ortorretificadas, com varredura adequada, a partir do eixo da rodovia existente ou a ser projetada, em função da complexidade necessária que permita uma base topográfica para atendimento às demandas do Anteprojeto;

c) Modelagem digital do terreno com uso de imagens *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM, preferencialmente com processo de correção do Modelo Digital do Terreno - MDT por meio de pontos de controle terrestre ao longo do trecho a ser estudado, adquiridos com Global Positioning System - GPS de precisão submétrica.

Das normas acima mencionadas, importa perceber que os procedimentos apresentados pelo DNIT como opções para a obtenção da base topográfica que fundamentará o anteprojeto, possuem níveis de precisões bastante diferentes. Para esta fase, por óbvio, os métodos mais precisos deverão sempre ser aceitos, como é o caso, por exemplo, de levantamentos com uso de estações totais, receptores GPS com correção diferencial em tempo real (RTK), aerofotogrametria, varredura Laser ou com o emprego de VANTs. Contudo, ao aceitar a modelagem digital obtida a partir do SRTM, essas normas, em tese, aceitam anteprojetos que chegarão, quando muito, ao nível de detalhamento contido na escala 1:10.000, escala essa que, em princípio, não oferece os elementos mínimos desejáveis para a quantificação de volumes ao nível esperado para um anteprojeto.

Outrossim, importa dizer que a principal limitação ao estudo realizado se deu em função do tempo disponível para este tipo de pesquisa. Por tal razão, o caso prático apresentado é oriundo de fonte secundária, uma vez que não foi possível realizar experimento semelhante no período de estudo já que, para isso, seriam necessárias tratativas e articulações externas com instituições de ensino para a viabilização de empréstimos de materiais e equipamentos, além da escolha de uma área viável ao estudo prático.

Nesse sentido, sugere-se que eventuais pesquisas futuras acerca do tema realizem, caso seja possível, testes empíricos com os sensores remotos capazes de gerar modelos digitais de elevação, como os que são transportados por veículos aéreos não tripulados, com vistas a dominar a tecnologia e aferir, por meio de fonte primária, a empregabilidade da técnica nas fases da fiscalização de obras que requeiram maior acuracidade. Também se mostra oportuna, para eventuais investigações futuras, a consideração dos custos das técnicas alternativas ao levantamento topográfico, levando em conta os respectivos equipamentos e métodos requeridos, para a obtenção de volumes do terreno. Com isso, seria possível verificar quais técnicas seriam as mais adequadas, considerando o custo-benefício, para emprego em futuras fiscalizações que tenham por objetivo a aferição de volumes topográficos estimados nos projetos e medidos na execução de obras rodoviárias.

REFERÊNCIAS

ALBRECHT, C. H. **Modelagem Numérica de Terrenos**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola Politécnica. Programa de Engenharia Urbana, 2009.

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

BRANDALIZE, A. A. **Perfilamento a LASER: Comparação com Métodos Fotogramétricos**. Anais do I simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente, julho, 2002.

BRASIL, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Coordenação-Geral de Custos de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes**. 1ª Edição - Brasília, 2017.

_____DNIT 106-ES – **Terraplenagem – Cortes – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: IPR, 2009.

_____DNIT 108-ES – **Terraplenagem – Aterros – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: IPR, 2009.

_____**Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984**. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br> Acesso em: 18/2/2018.

BROCHADO, G.T. **Atenuação do efeito do desflorestamento em dados SRTM por meio de deferentes técnicas de interpolação**. 2015. 113p. (sid.inpe.br/mtcm21b/2015/02.06.18.12-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2015. Disponível em http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3HT5JCL. Acessado em: dezembro de 2017.

BRITO, J. L. N. e S.; COELHO FILHO, L. C. T. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007.

———, PRADO, W. e AUGUSTO, E. **Estágio de fotogrametria digital para engenheiros cartógrafos** (notas de aula). IME, 1999.

BURROUGH, P. A. **Methods of spacial interpolation**. In: BURROUGH, P. A. (Ed.). Principles of geographical information systems for land resources assessment. New York: Oxford University Press, 1986.

CHEN, Z.-T. **Breaklines on terrain surfaces**. In: AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. Falls Church,VA: ASPRS-ACSM Annual Convention technical papers, 1988.

DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laserscanner: conceitos e princípios de funcionamento**. 3. ed. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências da Terra. Departamento de Geomática. Curitiba: 2004.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem numérica de terreno**. In: CÂMERA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Ed.). Introdução à ciência da geoinformação. São José dos Campos, São Paulo: INPE, 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>.

GABOARDI, C; ROSA, R. A. S.; LÁZARO, J. M. **Validação da precisão altimétrica do modelo de elevação do terreno abaixo da floresta amazônica gerado através de dados de radar na banda P**. Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Exposicarta. SBC, Rio de Janeiro: 2017, p. 539-542.

GARCIA, D. S. P. **Apostila de Rodovias.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento de Engenharia de Produção e Transportes: 2016.

KUGLER, A. **Qual a Escala de Um Voo Digital?** Curitiba, 2008. Disponível em: < http://www.esteio.com.br/downloads/2008/EscalaDigital.pdf>

LEE, S. H. **Introdução ao projeto geométrico de rodovias**. 4. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2013.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 3. ed. Crawforsville: J. Wiley and Sons, 1994.

LÖFFLER, E., HONECKER, U., STABEL, E. **Geographie und Fernerkundung. Eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und Fernerkundungsdaten**. Berlin/Stuttgart, 2005.

LOPES, M. **Projeto de Terraplenagem**. Fundação Edson de Queiroz. Universidade de Fortaleza, 2015.

MACIEJ S., BEATA M. **Low aerial imagery – an assessment of georeferencing errors and the potential for use in environmental inventory.** Polish Academy of Sciences. Geodesy and Cartography.Vol. 66, n. 1, 2017.

MATOS, A. C. O. C. de. **Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul**. São Paulo, 2005.

MATOS, J. L. de. **Fundamentos de informação geográfica**. 2. ed. Lisboa: Lidel edições técnicas, 2001.

MAUNE, D. F. **Digital elevation model techonologies and applications: the DEM users manual. [S.l.]**: ASPRS (The Imaging & Geospatial Information Society), 2001.

MILLER, C. **The spatial model concept of photogrammetry**. Photogrammetric Engineering, v. 23, n. 1, p. 31, Mar. 1957.

MILLER, C.; FLAMME, R. A. L. **The digital terrain model-theory and applications**. Photogrammetric Engeneering, v. 24, n. 3, p. 433–442, 1958.

MUKHERJEE, S. JOSHI, P.; MUKHERJEE, S.; Ghosh, A.; Garg, R.; Mukhopadhyay, A..**Evaluationof vertical accuracy of open source Digital ElevationModel (DEM)**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 21, 205-217, 2013.

NETO, M. S.; MACHANCOSES, N.; CAMPITELI, M.; ARIAS, A. ***Case*** **Técnico: Topografia x Fotogrametria.** DronEng Drones e Engenharia. Empresa Júnior de Engenharia Cartográfica/UNESP. 2016.

_____ ***Case*** **Técnico: Mapeamento Aéreo com Phantom: Resultados e análise de qualidade.** DronEng Drones e Engenharia. Empresa Júnior de Engenharia Cartográfica/UNESP. 2016.

NICHOLS, H. e DAVID, D. **Moving the Earth: The workbook of escavation**, 6th. ed. - McGraw-Hill Professional, 2010.

ORLANDI, A. G. **Avaliação da acurácia vertical do modelo SRTM para o Brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Instituto de Ciências Humanas. Departamento de Geografia. Brasília, 2016.

PEDROZO, L. G. **Custos da Infra-Estrutura rodoviária: análise e sistematização**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2001.

PETRIE, G. & KENNIE, T. J. M. **Terrain modelling in surveying and civil engineering**. Caithness: Whittles, 1990.

PONTUSCHKA, M.; ALBUQUERQUE, P. T. F. Geoprocessamento e fotointerpretação: da imagem ao mapa. Departamento de Engenharia de Pesca e Aquicultura – UNIR, 2012.

RATTON, E.; PERREIRA, D. M.; BLASI, G. F.; PEREIRA, M. de A.; KÜSTER FILHO, W.**. Introdução à Terraplenagem**. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Departamento de Transportes. Curitiba: 2015.

Referencial Estratégico do Tribunal de Contas da União, 2015 – 2021. Disponível em: < http://portal.tcu.gov.br/planejamento-e-gestao/referencial-estrategico/>. Acesso em 8/12/2017.

SALLEM FILHO, S. **As inovações do laser aerotransportado: suas vantagens para o mapeamento de dutos**. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP. 2007.

SANTOS, A. L. S.; AMARO, V. E.; BICHO, C. P.; SABADIA, J. A. B. **Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando vant, gnss e LIDAR.** Bol. Ciênc. Geod., Curitiba, v. 22, no1, p.73 - 94, jan-mar, 2016.

SANTOS, D. R. **Fotogrametria I**. 1. ed. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Geomática. Setor de Ciências da Terra. Departamento de Geomática. Curitiba: 2013.

SCHAFER, A. G.; LOCH, R. E. N. **Aplicação dos dados do sensor Laserscanner para modelagem do terreno visando projetos rodoviários**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 749-756.

UYSAL, M.; TOPRAK, A.S.; Polat, N. **DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill**. Disponível em:< https://www.journals.elsevier.com/measurement >. Acesso em 12/2/2018.

ZAIDAN, R. T. **Fotointerpretação e Sensoriamento Remoto.** Universidade Federal de Juiz de Fora. Departamento de Geociências. Laboratório de Geoprocessamento Aplicado, 2011.

WEIBEL, R.; HELLER, M. **Digital terrain modelling**. In: MAGUIRE, D. J.; GOODCHILD, M. F.; RHIND, D. W. (Ed.). Geographic information systems: principles and applications. 1. ed. England: Longman Scientific & Technical, 1991.

WEHR, Aloysius, U. Lohr, 1999 - **Airborne Laser Sacnning** - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, pp. 68-82.