

**UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO - PPGSR

AVALIAÇÃO POSICIONAL DE DADOS
ALTIMÉTRICOS GERADOS POR
DIFERENTES SISTEMAS DE
VARREDURA A LASER TERRESTRE –
ESTUDO DE CASO

RODRIGO DA SILVA FERRAZ

**PORTO ALEGRE
2017**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitor: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Ferraz, Rodrigo da Silva

Avaliação posicional de Dados altimétricos gerados por diferentes sistemas de varredura a laser terrestre: estudo de caso. / Rodrigo da Silva Ferraz. - Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2017. [119 f.]

Dissertação (Mestrado).- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2017.

Orientador(es): Sérgio Florêncio de Souza

1. Sensoriamento remoto. 2. Altimetria. 3. Controle de qualidade posicional. I. Souza, Florêncio de Souza. II. Título.

CDU 528.8

Catálogo na Publicação

Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS

Sibila F. T. Binotto

CRB 10/1743

**AVALIAÇÃO POSICIONAL DE DADOS ALTIMÉTRICOS
GERADOS POR DIFERENTES SISTEMAS DE VARREDURA
A LASER TERRESTRE – ESTUDO DE CASO**

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Florêncio de Souza

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Felipe Geremia Nievinski (PPGSR – UFRGS)

Prof. Dr. Gilberto Gagg (UFRGS)

Prof. Dr. Mário Luiz Lopes Reiss (UFRGS)

Prof. Dr. Roosevelt de Lara Santos Junior (UFRGS)

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Sensoriamento Remoto.

**PORTO ALEGRE
2017**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
CENTRO ESTADUAL DE PESQUISAS EM SENSORIAMENTO REMOTO E METEOROLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SENSORIAMENTO REMOTO

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM SENSORIMENTO REMOTO

Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto (PPGSR)
Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPRSM)
Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Porto Alegre, RS, Brasil.

Aprovada em: 23/03/2014

Homologada em: / /

Pela Banca Examinadora:

Por:

Prof. Dr. Sergio Florencio de Souza
Orientador

(Departamento de Geodésia/IGEO/Docente do
PPGSR/UFRGS)

Prof. Dr. Roosevelt de Lara dos Santos
(Departamento de Geodésia/IGEO/UFRGS)

Prof. Dr. Gilberto Gagg
(Departamento de Geodésia/IGEO/UFRGS)

Prof. Dr. Felipe Geremia Nievinski
(Departamento de Geodésia/IGEO/Docente do
PPGSR/UFRGS)

Prof. Dr. Mario Lopes Reiss
(Departamento de Geodésia/IGEO/UFRGS)

Prof. Dr. Laurindo Antonio Guasselli
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto

PPGSR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM SENSORIAMENTO REMOTO

Av. Bento Gonçalves, 9.500 - Campus do Vale
Bairro Agronomia - CEP 91501-970 - Porto Alegre -RS
Telefones: (51) 3308-6221 e (51) 3308-7479
<http://www.ppgsr.ufrgs.br>
Endereço eletrônico: ppgsr@ufrgs.br

TERMO DE ISENÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Declaro, para todos os fins de direito, que assumo total responsabilidade pelo aporte ideológico conferido ao presente trabalho, isentando a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a Coordenação do Programa de Mestrado em Sensoriamento Remoto, a Banca Examinadora e o Orientador de toda e qualquer responsabilidade acerca do mesmo.

Porto Alegre, 13 de julho de 2017.



RODRIGO DA SILVA FERRAZ
Mestrando

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

...primeiramente a Deus por ter me dado a oportunidade de estudar.

A minha família, que hoje se resume a minha esposa Renata Mello que em todos os momentos de alegria e tristeza de minha vida sempre esteve a meu lado.

A minha mãe, que embora não faça mais parte desse plano, sempre serviu de exemplo de luta, dedicação e coragem em todos os momentos.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela oportunidade de poder trabalhar com equipamentos de última tecnologia e também pela disponibilidade de acesso aos laboratórios no Departamento de Geodésia.

Ao professor Mário Luís Lopes Reiss pela amizade e contribuição técnico-científica durante o mestrado.

Ao professor Sérgio Florêncio de Souza pela orientação e ampla colaboração durante o mestrado.

Aos demais professores do Curso de Engenharia Cartográfica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

As colegas Andrea Fortes e Karine Consentino pela valorosa ajuda durante os levantamentos efetuados no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Ao Exército Brasileiro, em especial à 1ª Divisão de Levantamento, quartel onde eu trabalho, pela oportunidade de trabalho e amplo aprendizado na produção cartográfica no âmbito da Diretoria de Serviço Geográfico – DSG.

RESUMO

As utilizações de dados altimétricos, nesse estudo analisados a partir de modelos digitais de terreno (MDT), são as mais variadas assim como as técnicas de obtenção desse tipo de dado. Pode-se obter MDT por radar de abertura sintética que é utilizado para o levantamento de grandes áreas e de difícil acesso. Também pode-se gerar esse tipo de dado por Fotogrametria, por Topografia utilizando estação total com apoio GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Uma tecnologia mais atual para a obtenção de dados altimétricos é a utilização de tecnologia *Lidar* (*light detection and ranging*) que consiste na medição de distância e coordenadas através de um pulso eletromagnético que interage com os alvos. O produto básico dos sistemas que utilizam a tecnologia *Lidar*, seja em plataformas aéreas ou terrestres, é denominado de nuvem de pontos. Essas nuvens de pontos possuem coordenadas tridimensionais (X, Y e Z) referenciadas ao centro de fase do sensor. Nesse estudo foram realizados experimentos com dois sistemas de varredura a laser terrestre. O primeiro é um sistema de varredura modelo Optech Ilris 3D e outro Faro Focus 3D, nesse estudo denominados de SVLT Optech e SVLT Faro. Assim, o objetivo desse trabalho é estimar a qualidade posicional dos dados altimétricos gerados por dois SVLT. Os estudos foram executados em dois experimentos. No primeiro experimento foram realizados escaneamentos num campo de calibração. Nessa etapa foi gerada uma nuvem de pontos de cada sistema de varredura, e esses dados foram georreferenciados e a partir de pontos de checagem medidos no mesmo e assim foi estimada o controle de qualidade posicional. No segundo experimento, os dois SVLT foram utilizados para efetuar um levantamento topográfico planialtimétrico em um percurso de aproximadamente um quilômetro. Os dados gerados pelos SVLT passaram por um processo de registro, que consiste na junção de pares de nuvens de pontos, e foram georreferenciados a partir de pontos de controle medidos no terreno. Nesse percurso foram realizados circuitos de nivelamento cujos vértices foram utilizados para se estimar o controle de qualidade posicional, planimétrico e altimétrico, das nuvens de pontos oriundas dos dois sistemas de varredura. Assim, após a realização de testes estatísticos, no primeiro experimento, obteve-se valores de acurácia altimétrica de 1,5 cm para o SVLT Faro e de 1,3cm para o SVLT Optech e no segundo experimento acurácia altimétrica de 1,9 cm para o SVLT Faro e de 5,9 cm para o SVLT Optech.

Palavras-chaves: *Lidar*, altimetria, controle de qualidade posicional.

ABSTRACT

The uses of altimetric data, in this study approached from digital terrain models (TDM) are the most varied as well as the techniques for getting this type of data. It can be get DTM by synthetic aperture radar that is used for surveying wide areas and with difficult access. As well it can be this type of data by Photogrammetry, by conventional Topography using total station with GNSS (Global Navigation Satellite System) support. A more actual technology for obtaining altimetric data is the use of light detection and ranging technology, which consists of measuring distance and coordinates through an electromagnetic pulse that interacts with the targets. The basic product of the systems that use the technology lidar, be it in aerial or terrestrial platforms, is denominated a point cloud. These point clouds have three-dimensional coordinates (X, Y, and Z) referenced to phase center of the sensor. In this study, will be performed experiments with two systems of terrestrial laser scanning (STLS). One STLS of the brand Optech Iris 3D and another of the brand Faro Focus 3D, in this study called of STLS Faro and STLS Optech. Therefore, the aim of this work is to estimate the positional quality of digital terrain models generated by these two STLS. The studies were executed in two experiments. In the first experiment, scans has been made on a calibration wall. The generated point clouds were georeferenced and from the checkpoints measured in this calibration wall, the positional quality of these data was estimated. In the second experiment, the two STLS were has been made a planialtimetric topographic survey of a course of approximately one kilometer. In this course a leveling network was created and the vertices of this network were used to estimate the positional quality control of the points clouds from the two STLS. Therefore, after realization statistical tests, in the first experiment, it was obtained altimetric accuracy values of 1.5 cm for the STLS Faro and 1.3 cm for the STLS Optech were obtained and in the second experiment, the altimeter accuracy of 1.9 cm for the STLS Faro and 5.9 cm for the Optech STLS.

Keywords: *Lidar*, Altimetry, positional quality control.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2 OBJETIVO GERAL	16
1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
1.4 JUSTIFICATIVA	17
1.5 ESTRUTURAÇÃO	19
2. REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 LASER E OS SISTEMAS DE VARREDURA	20
2.2 FILTRAGEM DE DADOS EM NUVENS DE PONTOS	37
2.3 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E GNSS	39
2.4 AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES	43
2.5 ALGUNS TRABALHOS RELACIONADOS COM O TEMA	50
3. EXPERIMENTOS REALIZADOS	58
3.1 EXPERIMENTO EM UM CAMPO DE CALIBRAÇÃO	60
3.2 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO COM OS SVLT	65
3.3 CRIAÇÃO DE CIRCUÍTOS DE NIVELAMENTO	74
3.4 FILTRAGEM DAS NUVENS DE PONTOS	78
3.5 ESCOLHA DOS PONTOS DE CHECAGEM PARA O CQP	80
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS	82
5. CONDIDERAÇÕES FINAIS	93
REFERENCIAS	97
APÊNDICES	102
MATRIZES DO AJUSTAMENTO DOS CIRCUITOS DE NIVELAMENTO.....	102
PUBLICAÇÃO NA REVISTA BRASILEIRA DE GEOMÁTICA	108

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferentes tipos de sistemas dinâmicos.	22
Figura 2 - Obtenção de coordenadas num LST.	23
Figura 3 - Princípio da Triangulação.	24
Figura 4 - Princípio de funcionamento de tempo de vôo de sinal.	25
Figura 5 - Princípio da diferença de fase.	25
Figura 6 - Diferentes tipos de SVLT.	26
Figura 7 – SVLT Panorâmico.	26
Figura 8 – SVLT Híbrido.	27
Figura 9 – SVLT Tipo Câmera.	27
Figura 10 - Retornos Lidar.	28
Figura 11 - Diâmetro do círculo a partir de um pulso laser.	29
Figura 12 -Diâmetro de varredura para um SVLT.	30
Figura 13 – Gráfico Footprint dos SVLT em função da distância dos alvos.	31
Figura 14 - Registro de nuvens de pontos.	33
Figura 15 - SVLT Optech.	34
Figura 16 - SVLT Faro.	35
Figura 17 - Diferença entre MDT e MDS.	37
Figura 18 – Filtro utilizado para gerar o MDT.	38
Figura 19 – Avaliação do filtro conforme o autor.	39
Figura 20 – Lance de nivelamento.	41
Figura 21 – Nivelamento geométrico composto.	41
Figura 22 – Método de posicionamento relativo.	43
Figura 23 – Análise de exemplos de precisão e acurácia.	46
Figura 24 – Viaduto Falsenau localizado em Berna – Suíça.	50
Figura 26 – Medidas de comprimento obtidas por um paquímetro.	52
Figura 27 – Formas geométricas escaneadas e analisadas.	52
Figura 28 – Superfícies de terreno analisadas.	53
Figura 29 – Resultados obtidos a partir de cada tipo de situação.	54
Figura 30 – Análise realizada na área de estudo.	55
Figura 31 – Área de estudo dentro do município de Porto Alegre.	58
Figura 32 – Fluxograma das etapas desenvolvidas nesse estudo.	59
Figura 33 – Medição de pontos num campo de calibração.	61

Figura 34 - Pontos medidos com estação total num campo de calibração.	61
Figura 35 – Georreferenciamento das nuvens de pontos.....	62
Figura 36 – Densidade de pontos nos alvos.	64
Figura 37 – Média das distâncias entre os pontos dentro do alvo circular.....	64
Figura 38 – Estações de escaneamento do SVLT Faro.	66
Figura 39 - Estações de escaneamento do SVLT Optech.....	67
Figura 40 – Ponto de ligação entre nuvens de pontos.	68
Figura 41 – Análise estatística do registro do SVLT Faro.	68
Figura 42 - Georreferenciamento do SVLT Faro.	69
Figura 43 – Medição de pontos de controle.	69
Figura 44 – Software para as varreduras do SVLT Optech.....	70
Figura 45 – Automóvel escaneado durante uma névoa.....	71
Figura 46 – Nuvem de pontos gerada pelo SVLT Optech durante a névoa.	71
Figura 47 – Georreferenciamento de nuvens de pontos no SVLT Optech.....	72
Figura 48 – Registro de nuvens de pontos do SVLT Optech.	72
Figura 50 – Circuitos de nivelamento executados no Campus do Vale.	74
Figura 51 – Nivelamento geométrico – marco M17.	75
Figura 52 – Nível eletrônico utilizado.....	75
Figura 53 – Nuvem de pontos original após o registro e georreferenciamento.....	79
Figura 54 - Nuvem de pontos após o processo de filtragem.	79
Figura 55 – Pontos de checagem do SVLT Optech.	80
Figura 56 – Ponto de checagem do SVLT Faro.	81
Figura 57 – Discrepâncias dos dados altimétricos do SVLT Faro.	83
Figura 58 - Discrepâncias dos dados altimétricos do SVLT Optech.....	85
Figura 59 – Discrepâncias dos dados na componente E do SVLT Faro.	86
Figura 60 - Discrepâncias dos dados na componente N do SVLT Faro.	86
Figura 61 - Discrepâncias dos dados na componente E do SVLT Optech.....	87
Figura 62 - Discrepâncias dos dados na componente N do SVLT Optech.	88
Figura 63 – Discrepâncias entre os SVLT Faro e Optech - componente E.....	89
Figura 64 - Discrepâncias entre os SVLT Faro e Optech - componente N.....	89
Figura 65 - Discrepâncias entre os SVLT Faro e Optech - componente h.....	90

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Refletividade de algumas superfícies.....	32
Tabela 2 - Características do SVLT Optech Ilris 3D Hd.....	34
Tabela 3 - Características do SVLT Faro.	35
Quadro 1 – Diferentes definições para a representação digital do terreno.....	36
Tabela 4 - Análise dos resultados obtidos.	51
Tabela 5 – Resultados obtidos a partir das diferentes varreduras.	53
Tabela 6 - Análise estatística do CQP utilizando o SVLT Optech.....	63
Tabela 7 - Análise estatística do CQP utilizando o SVLT Faro.....	63
Tabela 8 - Acurácia planimétrica e altimétrica conforme o FGDC.....	63
Tabela 9 – Dados da rede de nivelamento.....	76
Tabela 10 – Equações de condição.....	77
Tabela 11 – Coordenadas dos vértices dos circuitos de nivelamento.	77
Tabela 12 – Altitudes ajustadas com seus desvios-padrões.	78
Tabela 13 – Discrepâncias das coordenadas Altimétricas do SVLT Faro.	82
Tabela 14 – Análise estatística das discrepâncias (em metros) do SVLT Faro.....	83
Tabela 15 - Discrepâncias das coordenadas Altimétricas do SVLT Optech.....	84
Tabela 16 - Análise estatística das discrepâncias (em metros) do SVLT Optech.	85
Tabela 17 – Análise estatística das coordenadas E e N do SVLT Faro.	87
Tabela 18 – Análise estatística das coordenadas E e N do SVLT Optech.	88
Tabela 19 – Resumo dos valores de acurácia obtidos em cada SVLT.....	91
Tabela 20 – Análise comparativa dos experimentos.	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASPRS - *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*
CONCAR - Conselho Nacional de Cartografia
CQP - Controle de Qualidade Posicional
CSF - *Cloth Simulation Filter*
GNSS - *Global Navigation Satellite System*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
EMA - Erro Médio Absoluto
EMQ - Erro Médio Quadrático
ET - Estação Total
ET-ADGV - Especificações Técnicas para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais
FGDC - *Federal Geographic Data Comitee*
ICP - *Iterative Closest Point*
INDE - Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais
LASER - *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*
LIDAR - *Light Detection and Ranging*
MDE - Modelo Digital de Elevação
MDT - Modelo Digital de Terreno
MDS - Modelo Digital de Superfície
PC - Pontos de Controle
PEC - Padrão de Exatidão Cartográfica
PEC-PCD - Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais.
RN - Referência de Nível
RTK - *Real Time Kinematic*
SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*
SOR - *Statistical Outlier Removal*
SVLA - Sistema de Varredura Laser Aerotransportado
SVLT - Sistema de Varredura Laser Terrestre
UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Os Sistemas de Varredura a Laser Terrestre (SVLT) possuem diversas aplicações. Podem ser utilizados para o monitoramento de deformações e danos em estruturas arqueológicas. Estudos ambientais visando a determinação de patologias em plantas e árvores, cálculos de volumes em minerações e obras em geral e também em levantamentos topográficos.

Um dos objetivos deste estudo aborda a utilização de dois SVLT, em aplicações topográficas, mais especificamente uma análise comparativa dos dados altimétricos gerados por dois SVLT em comparação com o nivelamento geométrico.

O produto básico de um SVLT é uma densa nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais. Esses produtos podem ser empregados nas mais diversas atividades, a maioria delas envolvendo trabalhos de engenharia e arquitetura. Essa nuvem de pontos pode sofrer processos matemáticos denominado de registro e georreferenciamento e a partir dessa etapa podem ser geradas diferentes tipos de dados como modelos de superfície (MDS), modelos digitais de elevação (MDE), modelos de terreno (MDT), modelagem tridimensional de estruturas e detecção de rachaduras em pontes e edificações.

A modelagem tridimensional do terreno (3D), ou seja, aquela oriunda a partir de informações altimétricas vem sendo desenvolvida ao longo dos séculos por engenheiros, matemáticos e físicos. Desde a construção das pirâmides no Egito antigo, o controle de cheias e secas de rios seculares como Nilo, Tigre e Eufrates demonstram que a análise do terreno é uma tarefa que sempre esteve presente junto com o desenvolvimento da civilização.

Na Cartografia clássica a representação do terreno era realizada através de curvas de nível e pontos cotados adquiridos através de métodos analógicos a partir de modelos fotogramétricos. A tecnologia foi evoluindo e com o advento da cartografia digital os dados medidos em campo começaram a ser armazenados em bancos de dados espaciais.

Assim, através de processos matemáticos, utilizando as feições tridimensionais adquiridas a partir dos modelos fotogramétricos (curvas de nível e pontos cotados) podia-se fazer o processo inverso e modelar o terreno a partir desses dados. Porém, esse processo acabava gerando incerteza e degradando a qualidade altimétrica do modelo.

Diversas aplicações utilizam dados altimétricos para a tomada de decisão. A partir de dados de elevação pode-se estimar cálculos hidrológicos como áreas e tempo de concentração de bacias hidrográficas, cálculos de vazão na implantação de obras de arte como bueiros, pontilhões, drenos e sarjetas. A partir de dados de declividade oriunda de modelos de elevação, pode-se criar sistemas de informações geográficas voltados para estudos referentes a desastres ambientais. Em obras de terraplanagem modelos de elevação são utilizados para o cálculo de volumes.

Na literatura existem diferentes termos para se descrever a modelagem do terreno. Termos como MDE, MDT e MDS são conceitos que serão abordados nesse estudo sendo que as análises serão realizadas no MDT.

Existem diversas técnicas de geração de MDT. Para regiões extensas utiliza-se o radar de abertura sintética que é um sensor ativo que apresenta a grande vantagem de operar sob quaisquer condições climáticas. Também pode-se gerar MDT a partir de feições pontuais levantadas com estação total com apoio GNSS (*Global Navigation Satellite System* – Sistema de Navegação Global por Satélites). Em projetos de estradas, pontos são levantados de vinte em vinte metros (as vezes em distâncias menores) em seções transversas que abrangem a largura da rodovia. Através da Fotogrametria obtém-se o MDS e após processamento manual em escritório, classificação ou a combinação dos dois métodos chega-se ao MDT. Logo em função do custo, finalidade e precisão, cabe ao engenheiro ou responsável técnico a forma de obtenção desse modelo.

Nesse contexto, sobre a importância dos MDT e suas técnicas de geração, entra uma outra abordagem utilizando uma tecnologia relativamente nova no Brasil que é a obtenção de dados altimétricos a partir de nuvens de pontos. A tecnologia *Lidar* – detecção de distância através da luz, mede diversos pontos por segundo gerando um produto primário denominado de nuvem de pontos. A nuvem de pontos consiste em milhares de pontos com coordenadas tridimensionais inicialmente referenciadas ao centro de fase do sensor.

As coordenadas medidas pelos SVLT utilizam os princípios de medição descritos na Topografia considerando a origem do sistema o centro de fase do SVLT. Porém, o registro das nuvens de pontos, que consiste na junção de várias varreduras efetuadas pelos SVLT, possui semelhanças com conceitos descritos na Fotogrametria.

A literatura não descreve de maneira direta em qual parte das ciências cartográficas os SVLT se enquadram, porém, a sua principal finalidade é o emprego na Topografia. O termo *Lidar* (*Light detection and ranging* – detecção de distâncias através

da luz) conceitualmente é parecido com a definição de Fotogrametria. Existem autores que descrevem a Fotogrametria como obtenção de medidas através da luz (*fóton* referente a luz e *metria* referente a medida). A partir desses dois conceitos nota-se que a tecnologia que utiliza pulsos laser para a medição de distâncias e coordenadas tem uma forte ligação com a Fotogrametria

A obtenção de dados por tecnologia *Lidar* possui duas abordagens: uma puramente geométrica que consiste no registro e georreferenciamento de nuvens de pontos. A segunda abordagem é em relação a característica física (radiométrica) do alvo escaneado que influencia diretamente na intensidade de retorno do sinal. Alguns sensores *Lidar* medem a distância dos alvos em função de sua refletância.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal desse estudo consiste em estimar o controle de qualidade posicional (CQP) de dados altimétricos gerados a partir de diferentes SVLT. Essa análise será realizada comparando amostras medidas nas nuvens de pontos com dados obtidos através de nivelamento geométrico.

1.3 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Este trabalho visa realizar uma análise sobre o CQP de dados altimétricos, mais especificamente ,modelos digitais de terreno, obtidos através de tecnologia *Lidar*. Serão dois tipos de modelos analisados. Um gerado a partir do SVLT Optech Iris 3D Hd que nesse trabalho será denominado SVLT Optech e outro gerado pelo SVLT Faro Focus 3D que nesse trabalho será denominado SVLT Faro. Também serão abordados nesse estudo etapas anteriores à análise do controle de qualidade posicional como as abaixo descritas.

- Levantamento e registro de nuvens de pontos, com varreduras múltiplas dos SVLT Optech e Faro.

- Medição de coordenadas que servirão de pontos de checagem na área de estudo onde os dados planimétricos são oriundos de rastreamento GNSS e os dados altimétricos serão determinados a partir de vários circuitos de nivelamento geométrico implantados a partir das Referências de Nível (RN) 3093F e 3093M localizadas no Campus do Vale na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

1.4 JUSTIFICATIVA

Existem várias maneiras de se efetuar levantamentos topográficos. Os métodos tradicionais, principalmente aqueles empregados na década de 90 envolviam medidas de ângulos e distâncias com a utilização de teodolitos. Com o passar dos anos esses métodos foram evoluindo, tanto na medição de distâncias como medição de ângulos.

Com a grande demanda por informação espacial, no caso informações sobre o terreno, foram desenvolvidos novos equipamentos visando maior agilidade e confiabilidade nos levantamentos de dados topográficos. Assim medidores eletrônicos de distância incorporados a medidores de ângulos, no caso estações totais, foram desenvolvidos visando mais agilidade nos levantamentos topográficos. Esses equipamentos foram e são muito empregados atualmente junto com dados medidos a partir da tecnologia GNSS.

Porém, esses dados nos fornecem informações de maneira pontual. Caso exista a necessidade de medição, por exemplo, uma área que uma residência ocupa numa quadra torna-se necessário medir pelo menos de três a quatro pontos que representam os cantos dessa edificação. Mas, muitas vezes, em sistemas de informações geográficas, principalmente em áreas urbanas existem muitos prédios ou casas numa quadra. Assim o levantamento com estação total acaba se tornando lento e suscetível a erros.

Nesse contexto é que os SVLT apresentam uma solução alternativa. Uma única varredura, dependendo da frequência do sistema, pode medir mais de um milhão de pontos num intervalo de dez a vinte minutos. Num dia de trabalho, com uma jornada com duração de oito horas, podem ser gerados sem maiores dificuldades dez a doze varreduras de maneira rápida e eficiente com mais de 50 (cinquenta) milhões de pontos medidos.

O produto básico gerado por um SVLT é uma nuvem de pontos onde o processo de medição de coordenadas é realizado através de múltiplos pulsos, ou seja, o usuário não consegue selecionar no instrumento de medição um ponto específico para se medir de maneira análoga à de uma estação total ou teodolito.

Nesse contexto, o controle de qualidade posicional de dados gerados por SVLT torna-se um desafio, uma vez que a escolha de pontos de checagem deve ser realizada em feições bem definidas no dado adotado como referência e o produto cartográfico que será analisado. Os pontos de checagem em produtos cartográficos como imagens de satélite de alta resolução (por exemplo, imagens com 50 cm de resolução espacial) e mosaicos de ortofotos geradas por fotogrametria são facilmente identificáveis no terreno. Em relação

aos dados gerados por SVLT, os pontos de checagem são medidos nas nuvens de pontos que dependendo da posição do sensor, ângulo de varredura e distância da superfície escaneada acabam gerando uma grande incerteza nas suas coordenadas.

Outro fator a se considerar são os testes estatísticos utilizados no CQP. Tradicionalmente os erros sistemáticos são determinados utilizando a distribuição t Student e a análise de acurácia ou precisão é realizada utilizando a distribuição χ^2 (Qui-Quadrado). Porém, esses testes possuem restrições em relação ao tamanho da amostra. A literatura recomenda a utilização da distribuição t Student para pequenas amostras, ou seja, até 30 (trinta) pontos de checagem. Porém, um SVLT pode medir rapidamente cinco milhões de pontos em uma única varredura. Nesse estudo, em um dos experimentos foram implantados num campo de calibração alvos quadrangulares com dimensões de 20 x 20 cm e alvos circulares com diâmetro de 30 cm. Nesse alvos a média de pontos medidos pelos SVLT foi de 800 pontos nos alvos quadrangulares e de 1000 pontos nos alvos circulares. Assim, um dos desafios do CQP de dados gerados por SVLT é a determinação do ponto central de cada alvo que será utilizado nos testes estatísticos para se estimar o CQP e o tamanho da amostra utilizado.

No Brasil, o CQP é regulado pelo Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, onde a avaliação posicional é denominada de Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Em 2011 o CONCAR (Conselho Nacional de Cartografia) normatizou a ET-ADGV (Especificações Técnicas para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais) onde foi instituído o PEC-PCD (Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais) procurando adaptar na legislação regulamentada pelo Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Essa normatização aborda padrões para o CQP que é estimado pelo Erro-Padrão (EP) para diversos produtos cartográficos, porém não menciona nuvens de pontos (produto primário gerado por um SVLT) como produto cartográfico e as análises dos dados altimétricos são realizadas a partir dos modelos digitais (MDT, MDS e MDE), curvas de nível e pontos cotados.

Nesse estudo optou-se por utilizar a legislação da *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS), que também é utilizada pelo FGDC (*Federal Geographic Data Comitee*). A legislação da ASPRS possui uma normatização para a avaliação do CQP de dados gerador por Sistemas de Varreduras a Laser Aerotransportados (SVLA), onde estimativa de controle posicional dos dados é separada em dados altimétricos e planimétricos. Essa normativa foi utilizada na estimativa de avaliação posicional dos dados gerados pelos SVLT Faro e Optech, onde o CQP é

avaliado utilizando o Erro Médio Quadrático (EMQ) como estimador estatístico, diferente do Brasil onde, como já foi citado anteriormente, é analisada a partir do EP.

1.5 ESTRUTURAÇÃO

Esta dissertação é dividida em cinco capítulos e mais um apêndice. O primeiro capítulo faz uma introdução geral do trabalho desenvolvido, bem como aborda os objetivos deste estudo bem como a razão que os motivou.

O segundo capítulo aborda o referencial teórico que serviu de embasamento para as atividades de campo desenvolvidas tais como as características técnicas e físicas dos SVLT empregados, bem como alguns estudos realizados por outros pesquisadores utilizando outros sistemas de varreduras nas mais diversas áreas.

O capítulo três descreve os métodos empregados nos levantamentos executados na área de estudo. Assim, as metodologias empregadas no registro, georreferenciamento das nuvens de pontos geradas bem como o levantamento de dados amostrais na área de estudo são descritos neste capítulo.

O quarto capítulo aborda os resultados obtidos a partir de testes estatísticos visando avaliar a acurácia das nuvens de pontos bem como a avaliação dos dados altimétricos gerados pelos SVLT a partir da comparação com o nivelamento geométrico.

O capítulo cinco, aborda as conclusões embasadas nos testes estatísticos a partir da metodologia empregada no capítulo três, vantagens e desvantagens encontradas no método empregado nos levantamentos bem como recomendações para futuros trabalhos.

O apêndice constitui as matrizes do ajustamento da rede de nivelamento e um artigo que foi publicado em junho de 2016 abordando uma revisão conceitual sobre a tecnologia *Lidar* com alguns experimentos realizados com os SVLT Faro e Optech.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesse capítulo serão abordados conceitos que estão diretamente envolvidos nas etapas desenvolvidas nos levantamentos. Assim serão abordados conceitos referentes aos diferentes tipos de sistemas de varreduras, classificação SVLT em função do princípio de medição, cobertura angular, aspectos físicos e radiométricos das superfícies escaneadas que interferem na medição de alvos no terreno. Também haverá uma abordagem dos Sistemas de Posicionamento Global Por Satélites (GNSS), Nivelamento Geométrico, Controle de Qualidade Posicional de Produtos Cartográficos e Ajustamento de observações.

2.1 LASER E OS SISTEMAS DE VARREDURA

A palavra laser é uma adaptação para amplificação da luz por emissão estimulada de radiação. Basicamente, um laser é um dispositivo com propriedades óticas que, quando ativado por uma fonte de energia externa, produz e emite um feixe de pulsos ou de radiação monocromática na qual todas as ondas são coerentes e estão em fase. (SHAN e TOTH, 2008).

Os tipos mais comuns são lasers de gás, lasers de estado sólido, e lasers semicondutores. Outros tipos que são usados com menos frequência são lasers líquidos, lasers de corante, etc. Para o mapeamento topográfico, onde são necessários níveis muito elevados de energia para realizar medições de distâncias, as vezes durante longos intervalos, apenas certos tipos de lasers, em função do comprimento de onda que pode variar do visível até o infravermelho médio, têm a intensidade e características específicas combinadas com um alto grau de colimação que são necessários para realizar estas operações (SHAN e TOTH, 2008).

Para se ter uma noção das propriedades físicas do laser, no caso a sua direcionalidade, pode-se compará-lo com uma fonte comum de emissão de luz como uma vela acesa que irradia luz em todas as direções. Isto significa que ilumina vários objetos igualmente se eles encontram-se equidistantes da fonte emissora. Um laser transmite uma fonte luminosa que, normalmente, seria emitida em todas as direções, tais como a partir de uma vela, e concentra a sua luz numa única direção, por exemplo, em um único feixe com diâmetro de alguns milímetros (OGUNDARE, 2015).

No laser, ao contrário de outras fontes luminosas os átomos atuam em conjunto para produzir um feixe de luz ou de Radiação Eletromagnética (REM). Pode-se citar como principais características que a luz laser é monocromática, ou seja, encontra-se distribuída numa larga faixa de comprimentos de onda que pode variar desde o visível até o infravermelho próximo (HALLIDAY e RESNICK, 2010).

Tipler e Mosca (2006) descrevem o laser como uma fonte REM coerente, muito estreito e intenso. Os autores também citam que os lasers são utilizados como componentes para um preciso alinhamento ao longo de grandes distâncias que podem ser medidas pela reflexão do pulso a partir de um espelho e da medição do tempo que, este mesmo, pulso leva para se deslocar até o espelho e retornar.

Outra propriedade física do laser é que ele é altamente direcional, ou seja, a divergência do feixe de luz produzido por um laser é muito pequena e um pulso de energia laser também pode ser focalizado numa região muito pequena produzindo uma intensidade luminosa maior nessa região (HALLIDAY e RESNICK, 2010).

As condições atmosféricas causam uma degradação na qualidade de retorno de sinal do laser. A quantidade de vapor de água na atmosfera em dias úmidos e frios e a refração atmosférica são alguns dos fatores atmosféricos que afetam a qualidade de retorno de sinal do laser (LERMA GARCIA *et al*, 2008).

A turbulência do ar também afeta muito o feixe emitido por instrumentos a laser. A turbulência do ar é basicamente causada por flutuações de temperatura aleatórias, que vão desde alguns décimos a vários graus Celsius na temperatura atmosférica perto da superfície do solo. As flutuações resultam em mudanças de densidade do ar, e estes, por sua vez resultam em flutuações no índice de refração. Em distâncias superiores a 150 m, muitas vezes é muito difícil estabelecer o centro do feixe de laser (OGUNDARE, 2015).

Outro conceito importante em relação aos dados obtidos utilizando a tecnologia *Lidar* é em relação a intensidade de retorno de sinal. Jensen (2011) afirma que a intensidade de retorno do sinal representa os picos de voltagens dos sinais de retorno registrados pelo controlador do SVLT, ou seja, a intensidade representa o número de fótons e a energia que retornam para o receptor e que a intensidade é uma função do material que constitui a superfície escaneada. A partir desse tipo de informação os SVLT são capazes de detectar eflorescências, umidade, biodeterioração e realizar a detecção de fissuras em estruturas.

A intensidade de retorno do sinal do laser é influenciada pela distância ao alvo, do ângulo de incidência e das propriedades superficiais (tipo a cor, rugosidade) da superfície que está sendo escaneada (LERMA GARCIA *et al*, 2008).

Os SVLT são enquadrados dentro da tecnologia *Lidar*. E as aplicabilidades desses sistemas possuem duas abordagens. Uma voltada para a parte geométrica onde o principal produto é a informação geométrica oriunda das coordenadas tridimensionais das nuvens de pontos geradas pelo sistema. Outra abordagem é em relação a parte radiométrica a partir do espectro medido pelo sistema, geralmente no infravermelho ou infravermelho próximo.

Nesse estudo, a utilização dos SVLT irá abordar a parte geométrica aplicada em levantamentos topográficos. Não será analisado nesse estudo a abordagem radiométrica dos SVLT.

Assim, os SVLT, são aparelhos que usam um laser para medir as coordenadas tridimensionais de uma dada região ou a superfície de um objeto automaticamente. Os dados medidos são denominados de "nuvens de pontos" que fornecem os valores de X, Y, Z dos pontos medidos na superfície escaneada, bem como um valor de intensidade de retorno do sinal (BARBER, 2003).

Segundo Lerma Garcia *et al* (2008), existem dois tipos de sistemas de varredura laser em função da plataforma de escaneamento: os sistemas estáticos, em que o equipamento fica estacionado em um determinado local para a medição de dados, e os sistemas dinâmicos, em que o equipamento fica em movimento durante essa etapa. Os sistemas estáticos são os SVLT que executam varreduras a partir de uma posição fixa no terreno. Já os sistemas dinâmicos podem ser os sistemas utilizados em aeronaves (aertransportados) ou a utilização de um SVLT acoplado a um veículo em movimento. Na Figura 1, demonstra-se um exemplo dos diferentes tipos de sistemas dinâmicos.

Figura 1 - Diferentes tipos de sistemas dinâmicos.

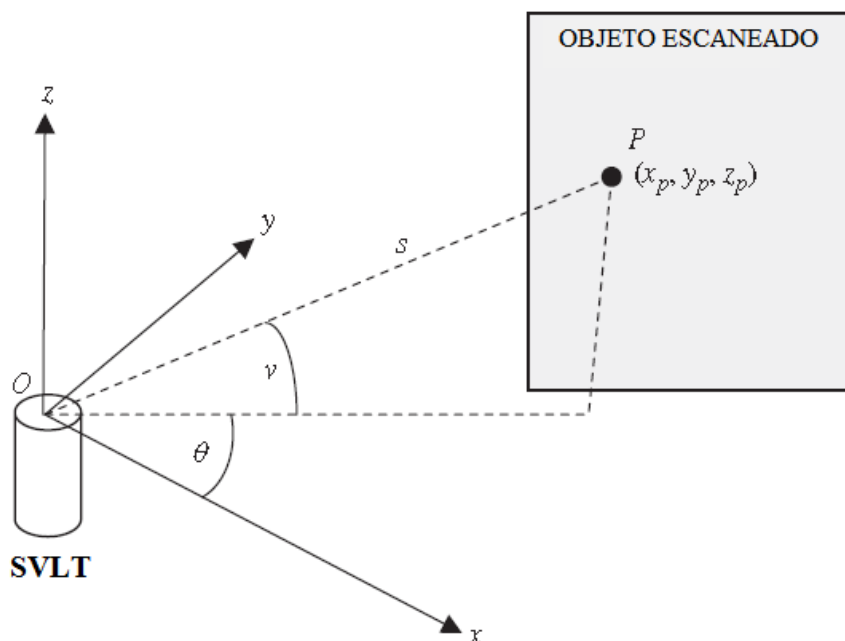


Fonte: Chow (2014).

Chow (2014) classifica os SVLT a partir do princípio de medição de distâncias em tempo de voo de sinal, diferença de fase e triangulação.

As coordenadas (X, Y, Z), Figura 2, dos pontos sobre o objeto estão referenciadas ao centro de fase do equipamento, o qual é definido pela interseção do eixo principal e do seu eixo secundário.

Figura 2 - Obtenção de coordenadas num LST.



Fonte: Ogundare (2015).

$$X = S \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(v) \quad (1)$$

$$Y = S \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(v) \quad (2)$$

$$Z = S \cdot \sin(v) \quad (3)$$

Onde:

S: é a distância inclinada entre SVLT e o objeto;

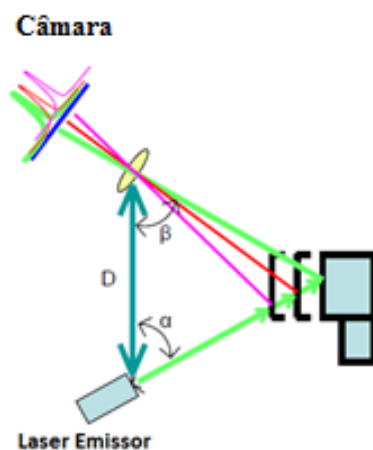
v: é o ângulo vertical;

θ: é o ângulo horizontal.

No princípio baseado na triangulação um pulso de laser é emitido pelo sistema e a luz refletida pelo objeto que retorna é registrada por uma ou mais câmaras digitais. Cada

ângulo de varredura (α e β) dos pulsos é registrado no sistema a cada pulso emitido e conhecendo-se a base fixa (D), conforme Figura 3, entre o sensor e a (s) câmara (s), por meio de um processo de calibração, determina-se a posição dos pontos refletidos pelo objeto (DALMOLIN, 2004).

Figura 3 - Princípio da Triangulação.

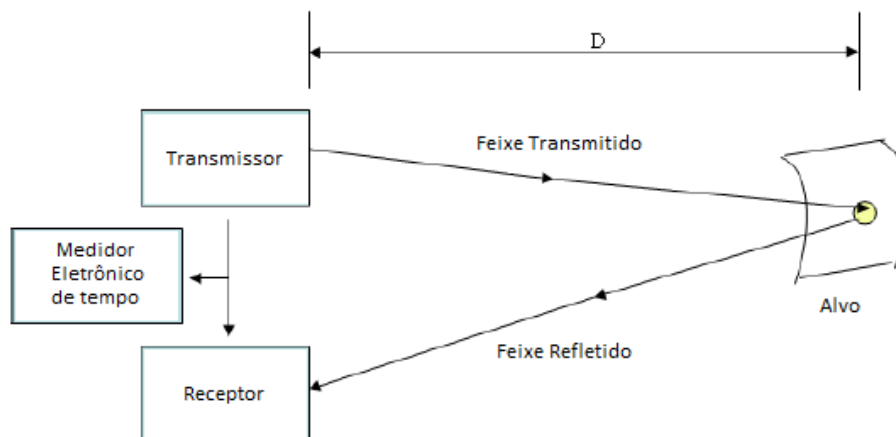


Fonte: Lerma Garcia *et al.* (2008).

Ainda no princípio da triangulação, um pulso laser é emitido pelo sistema e a luz que é refletida pelo objeto é registrada por uma matriz de sensores CCD (*Charge-Coupled Device*). O sensor transforma a luz refletida em sinais elétricos e estes são convertidos em bits através de um conversor analógico digital. A precisão da reconstrução do modelo do objeto depende de elementos geométricos semelhantes, como a relação base/ distância (TOMASELLI, 2003). Assim, com esta tecnologia (triangulação), pode alcançar uma precisão de alguns micrômetros.

Os SVLT que funcionam com o princípio do tempo de vôo de sinal, são equipamentos com medidores de distâncias, que normalmente empregam componentes, tais como, um transmissor laser, um receptor, um relógio para medir o tempo e um transmissor e receptor óptico. Segundo Schofield e Breach (2007), no princípio de tempo de vôo, um curto e intenso pulso de radiação é emitido pelo transmissor ao refletor, que reflete um sinal paralelo até o receptor. Assim, a distância é calculada pelo tempo decorrido entre a emissão e a recepção do sinal, o qual é multiplicado pela velocidade da luz.

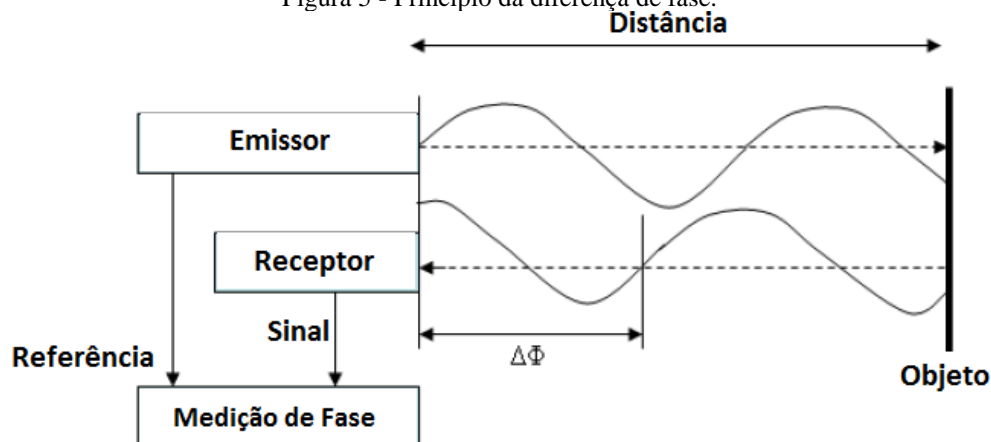
Figura 4 - Princípio de funcionamento de tempo de voo de sinal.



Fonte: Lerma Garcia *et al* (2008).

Segundo Tomaselli (2003), no princípio de tempo de voo, conforme Figura 4, o instrumento registra o tempo, a intensidade da energia refletida pelo objeto e os parâmetros de atitude do feixe, que são coordenadas polares do ponto em relação ao referencial do laser. Com estes dados é possível calcular a distância e as coordenadas cartesianas tridimensionais dos pontos medidos em relação ao sensor.

Figura 5 - Princípio da diferença de fase.



Fonte: Lerma Garcia *et al*. (2008).

San Jose Alonso (2011) define os SVLT baseados no método da medida de diferença de fase (Figura 5), como aqueles que comparam a diferença de fase da fonte emissora, no caso o SVLT, e a reflexão dessa onda eletromagnética após ela interagir com alguma superfície. A diferença de fase, entre os sinais transmitidos e refletidos, da parte fracionada do comprimento é menor que o valor da parte inteira do comprimento da onda modulada.

Seu intervalo de medição de distâncias é restrito ao máximo de 100 metros com precisão de medidas de distância de alguns milímetros (FRÖHLICH e METTENLEITER, 2004).

Na Figura 6, há exemplos dos diferentes tipos de SVLT em função do método de obtenção de distâncias ou princípio de funcionamento.

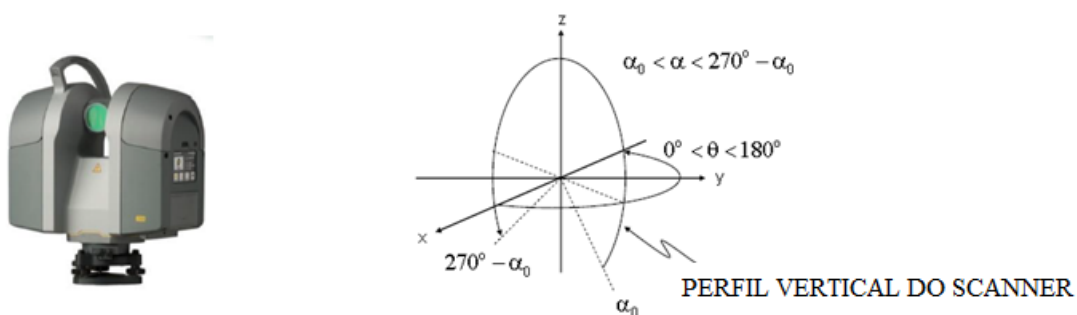
Figura 6 - Diferentes tipos de SVLT.



Fonte: Chow (2014).

Vosselman e Mass (2010) classificam os SVLT em três grupos de acordo com a cobertura angular. O primeiro grupo é o tipo Panorâmico, onde o sistema fornece uma cobertura angular total de 360° no plano horizontal que passa pelo centro do instrumento e normalmente têm uma cobertura angular mínima 180° no plano vertical, conforme Figura 7. Nesse estudo o SVLT Faro se enquadra no sistema Panorâmico.

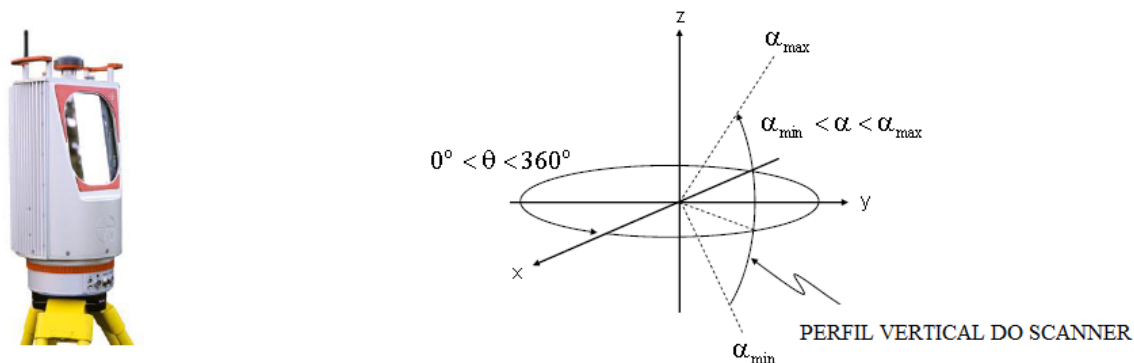
Figura 7 – SVLT Panorâmico.



Fonte: Chow (2014).

O segundo grupo é o do tipo SVLT Híbrido, que são aqueles que possuem de 50 a 60° de cobertura angular vertical e cobertura horizontal de até 360° conforme Figura 8.

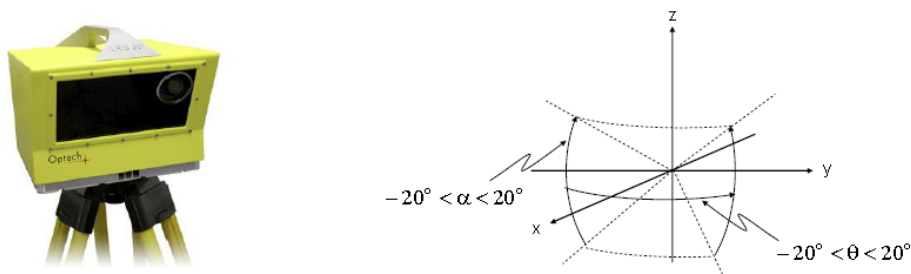
Figura 8 – SVLT Híbrido.



Fonte: Chow (2014).

O terceiro grupo, é aquele formado por câmaras que possuem um alcance angular mais limitado em comparação com os híbridos e Panorâmicos. No exemplo da Figura 9, o SVLT Optech Ilris 3D com cobertura angular vertical e horizontal de 40° x 40°.

Figura 9 – SVLT Tipo Câmera.

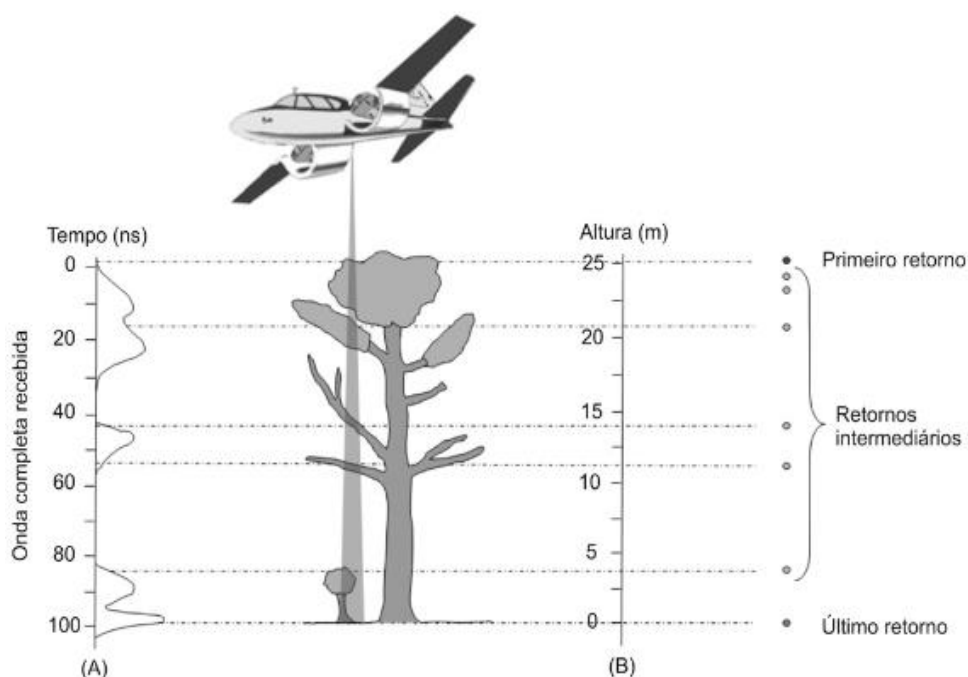


Fonte: Chow (2014).

Shan e Toch (2008). também classificam os SVLT a partir da distância máxima medida. Os autores consideram os SVLT de curto alcance aqueles com alcance máximo de 50 a 150 metros. Os de médio alcance aqueles com alcance máximo de 150 a 350 metros e os de longo alcance aqueles que medem distâncias superiores a 350 metros. Por essa classificação o SVLT Faro enquadra-se como de curto alcance e o SVLT Optech como de longo alcance.

Em relação aos sistemas aerotransportados, cujo princípio de funcionamento é semelhante aos sistemas de varredura terrestre, durante o escaneamento um pulso de energia é enviado diretamente em direção ao alvo com um determinado ângulo em relação ao espelho do sensor. Dependendo da posição do instrumento cada pulso irá iluminar no alvo uma área com um formato de um círculo, denominada de área de cobertura laser instantânea ou *footprint*. Esse pulso pode gerar um retorno ou múltiplos retornos (JENSEN, 2011).

Figura 10 - Retornos Lidar.

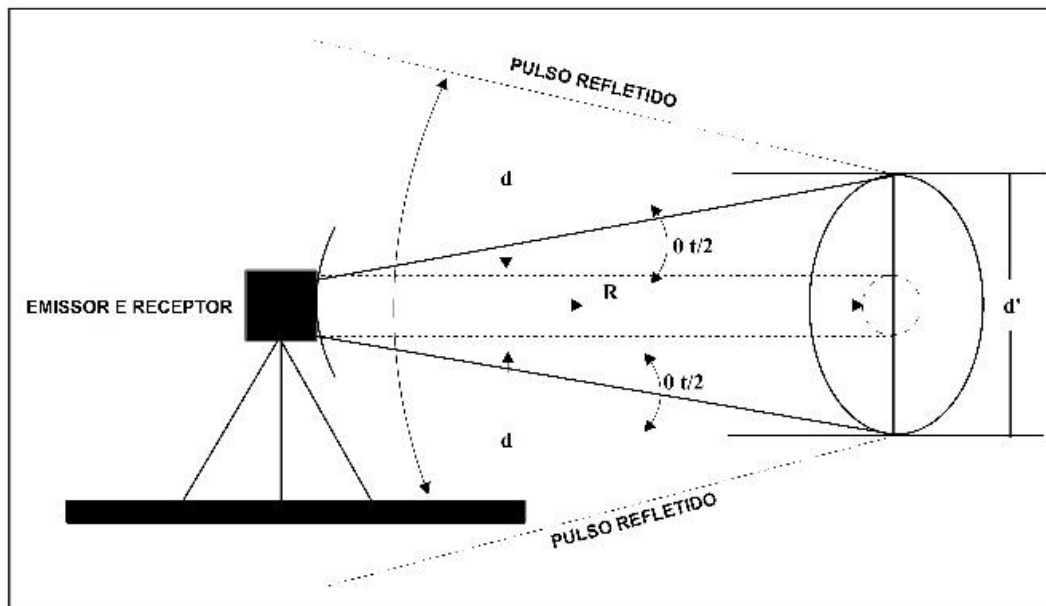


Fonte: Wagner et al (2004).

Assim toda energia emitida pelo sensor (Figura 10) interage com a superfície do terreno e seria assumido que essa interação resultasse num único retorno. Entretanto as diferentes feições que compõem o terreno irão gerar diferentes retornos em função da forma e dimensão do alvo que receberá a energia incidente. Desta forma, cada pulso transmitido da fonte emissora pode gerar múltiplos retornos.

Quando é efetuado o escaneamento a partir de sistema de varredura a laser (terrestre ou aerotransportado), cada pulso ao atingir um alvo projeta nele um círculo que pode ter um determinado diâmetro d' . Na Figura 11, há um exemplo do círculo projetado por um SVLT.

Figura 11 - Diâmetro do círculo a partir de um pulso laser.



Fonte: Adaptado de Shan e Toch (2008).

Esse diâmetro é influenciado diretamente pela divergência do pulso emitido pelo SVLT (Figura 11). O retorno do sinal é função da dispersão da energia do pulso laser dentro da área formada pela projeção do ponto no alvo (BRANDALIZE, 2001).

Quanto maior esse círculo, maior será a dispersão do valor da coordenada do ponto medido. Baltsavias (1999), descreve a fórmula da Equação 4, para calcular o diâmetro de um círculo, para um SVLA projetado a partir do ângulo de varredura (θ), distância do alvo (R) e divergência do feixe laser (γ).

$$d' = \frac{R}{\cos^2(\theta)} \cdot (\gamma) \quad (4)$$

Onde:

d' = Diâmetro do círculo projetado;

R = Distância entre o SVLT e o alvo;

γ = Divergência do feixe laser.

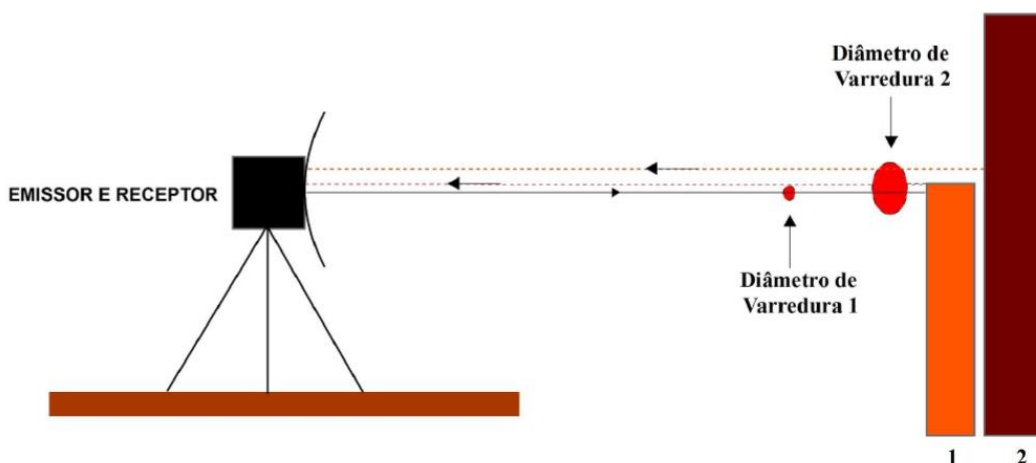
θ = Ângulo de varredura.

Usando a Equação 4 com os parâmetros do SVLT Optech ($\theta = 40^\circ$, $h = 100\text{m}$, $\gamma = 150\mu\text{m}$) para uma distância de 100 (cem) metros o valor do diâmetro do círculo projetado pelo equipamento é de 2 centímetros, que é um valor máximo aceitável com a acurácia de dados GNSS e levantamentos topográficos de alta precisão. Para distâncias de

400 e 1200 metros, que são valores de distâncias medidas pelo sistema com refletividade de 10% e 80% esses valores ficam em 10,2 cm e 30,6 cm respectivamente.

O diâmetro do círculo gerado por um pulso laser possui influência direta na medição de coordenadas em superfícies como aquelas demonstradas nos anteparos 1 e 2 da Figura 12. Quanto mais distante o alvo e maior o ângulo de varredura maior será o diâmetro do círculo gerado por um pulso laser. A coordenada medida pelo diâmetro de varredura 2, da Figura 12, poderá ser registrado pelo SVLT como a média das coordenadas medidas pelo diâmetro de varredura 1 e 2 em função da incerteza gerado pelo tamanho do diâmetro de varredura ou *footprint*.

Figura 12 -Diâmetro de varredura para um SVLT.

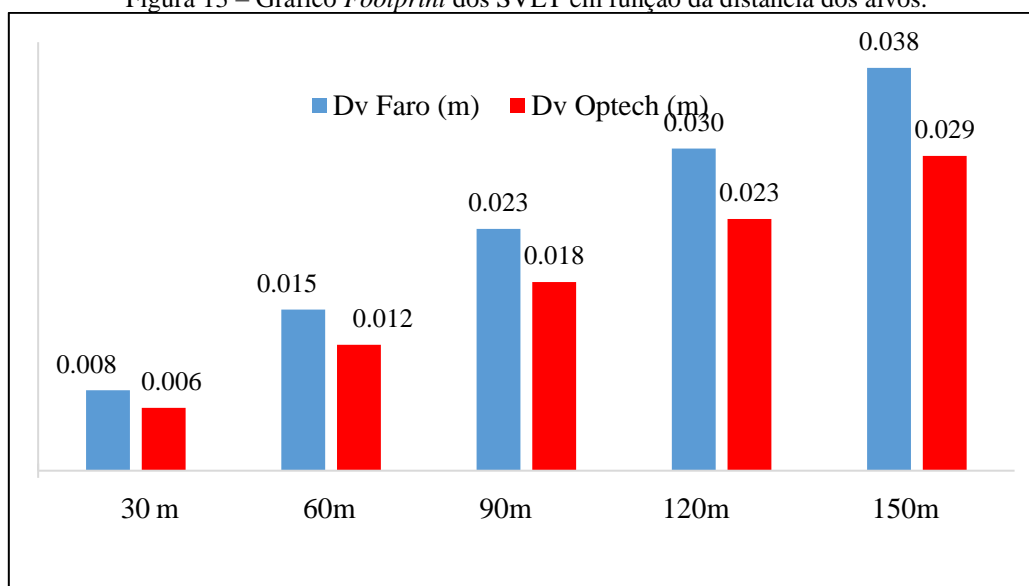


Fonte: Elaborado pelo autor.

No gráfico da Figura 13, foram determinados os valores dos diâmetros de varredura ou *footprint* para cada SVLT. Foram utilizadas distâncias de 30, 60, 90, 120 e 150 metros e um ângulo de varredura de 40 ° (quarenta graus). Assim, foram determinados os valores dos diâmetros de varredura ou *footprint* para cada SVLT. Foram utilizadas distâncias de 30, 60, 90, 120 e 150 metros e um ângulo de varredura de 40 ° (quarenta graus). Nota-se que a partir de 90 metros os diâmetros de varreduras dos dois SVLT ficam próximos de 2 cm o que demonstra que quanto maior a distância do alvo para o SVLT maior será a incerteza no valor de cada coordenada medida.

Na Figura 13, os diâmetros de varredura (D_v) de cada SVLT sofrem influência direta da distância do objeto escaneado. Assim, quanto mais longe um objeto estiver do sensor, maior será o valor do diâmetro de varredura gerado e maior será a incerteza no valor da coordenada medida. Assim, para uma distância de 90 m (noventa metros) os diâmetros de varredura dos SVLT Faro e Optech serão de 2,3 cm e 1,8 cm respectivamente. Nota-se que esses valores são bem diferentes das acurácias instrumentais de cada equipamento onde para o SVLT Optech as acurácias variam de 4 a 7 mm para uma distância de 100 metros e para o SVLT Faro esses valores são de 2 mm para uma distância de 25 metros.

Figura 13 – Gráfico *Footprint* dos SVLT em função da distância dos alvos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos valores demonstrados na Figura 13, ou seja, para coordenadas que podem sofrer dispersão em seus valores em até 2 cm, adotou-se as distâncias de varredura entre cada ponto onde o SVLT deveria ser instalado entre 50 e 100 metros.

Um fator que tem interferência no retorno do sinal é a deflexão dos pulsos emitidos pelo SVLT. Este desvio é da ordem de 10 a 20% em terrenos arenosos, de 30 a 50% em vegetação e de 50% a 80% em coberturas metálicas de edifícios. Quanto mais reflexiva for a superfície, maior será o desvio dos pulsos emitidos (BRANDALIZE, 2001).

Habbib (2008) compara os métodos de aquisição de pontos tridimensionais por laser e fotogrametria e cita vantagens e desvantagens dos dois métodos. Uma das

vantagens da tecnologia *Lidar* é que a obtenção de coordenadas é realizada de maneira direta enquanto que na fotogrametria a obtenção de coordenadas é obtida de maneira indireta. Já, uma das vantagens da fotogrametria, principalmente a terrestre é a mesma bem mais barata comparada com o escaneamento laser.

Na Tabela 1, há uma relação de materiais com percentuais de reflexão para um comprimento de onda de 900µm. Quanto maior o percentual, melhor a capacidade de retorno do pulso ao sistema e melhor a qualidade posicional da coordenada medida (BRANDALIZE, 2001).

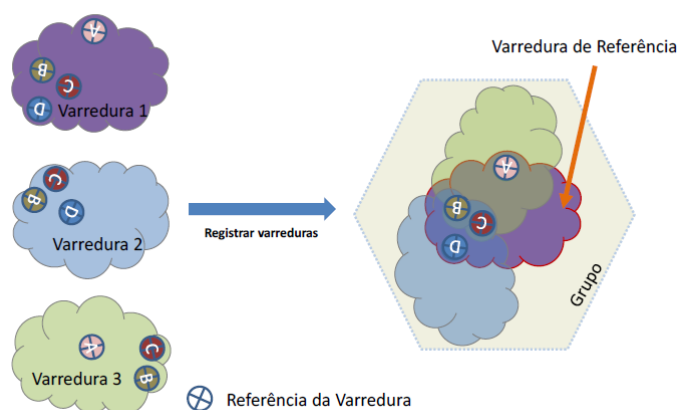
Tabela 1 - Refletividade de algumas superfícies.

MATERIAL	REFLEXÃO (%)
Madeira clara, seca e limpa	94
Neve	80-90
Pedras claras	85
Calcário, Argila	Até 75
Vegetação mista	Média 60
Coníferas	Média 50
Areia seca	57
Areia molhada	41
Areia de praia	Média 50
Madeira Bruta Rugosa	25
Concreto	24
Asfalto	17
Borracha sintética	5

Fonte: Wehr e Lohr (1999).

As varreduras utilizando os SVLT Faro e Optech, possuem como referência o centro de fase do aparelho. Em gabinete, ocorre a etapa de registro, que corresponde a conexão das nuvens de pontos entre si através de feições homólogas entre elas (Figura 14). O processo de registro de nuvem de pontos é parecido com a fototriangulação por modelos independentes descrita por Lugnani (1987) onde cada modelo fotogramétrico é conectado a outro a partir de feições homólogas.

Figura 14 - Registro de nuvens de pontos.



Fonte: Faro Scene – Manual do usuário (2013).

Outro fator a se considerar em relação ao processo de registro de nuvens de pontos conforme a Figura 14, é que os valores referentes a acurácia dos equipamentos não citam os erros dos SVLT à medida que mais nuvens de pontos sejam adicionadas ao processo de registro.

Após o registro, pode-se efetuar o georreferenciamento das nuvens de pontos a partir de alvos ou feições notáveis (placas, paredes, janelas, etc) existentes no terreno.

Voseelman e Maas (2010) classificam os processos de registro de nuvens de pontos em duas etapas. O primeiro processo é denominado de registro por correspondências pontuais e o segundo é denominado de registro sem correspondências onde esse processo é realizado através de um algoritmo que realiza iterações por proximidades de pontos (*Iterative Closest Points – ICP*). No primeiro processo o registro é efetuado com implantação de alvos na cena que será escaneada. E a medição de pontos nesses alvos pode ser realizada manualmente ou de maneira automática através de softwares comerciais. Em relação ao algoritmo ICP o processo é realizado de maneira iterativa, onde o usuário efetua um alinhamento a priori realizado de forma manual determinando uma nuvem adotada como referência, denominada de mestre, e outra denominada de escrava que será alinhada em sua relação. Essa etapa serve para se determinar os parâmetros iniciais de transformação, que é basicamente uma transformação tridimensional de corpo rígido. Após a determinação desses parâmetros, esses valores são aplicados a nuvem escrava e ela sofre rotações e translações iterativamente até atingir o referencial da nuvem mestre. O erro de registro é calculado e comparado com um critério de convergência. Se o processo falhar, a etapa é repetida.

Para mais detalhes em relação ao algoritmo ICP pode-se consultar Williams e Bennamoun (2001), Rusinkiewicz e Levoy (2001), Gruen e Akca (2005), Bae e Lichti (2008).

Ao SVLT Optech, Figura 15, pode-se acoplar um sistema GNSS. Em função dessa característica, pode-se determinar a posição do equipamento nas nuvens de pontos e a partir de três escaneamentos efetua-se o georreferenciamento.

Figura 15 - SVLT Optech.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 2 - Características do SVLT Optech Ilris 3D Hd.

Características	Optech Ilris 3D Hd
Alcance	1250 m (80% Refletividade)
	400 m (10% Refletividade)
Frequência	10 Khz
Ângulo de Visada (H x V):	40° x 40°
Divergência do feixe laser:	0.008594°
Acurácia linear:	4 mm para distâncias até 100m com refletividade de 80% e 7mm para distâncias até 100 m com refletividade de 10%
Comprimento de onda:	1535 nm

Fonte: Teledyne Optech.

Em relação a Tabela 2, onde constam informações que foram pesquisadas a partir do manual do equipamento, nota-se que o termo acurácia linear refere-se a objetos que encontram-se perpendicularmente ao SVLT e também para o escaneamento de uma

nuvem de pontos. No manual do SVLT Faro também consta o termo acurácia linear que, como em relação ao SVLT Optech, também refere-se a objetos ou superfícies que se encontrem perpendicularmente ao SVLT.

O SVLT Faro (Figura 16), efetua varreduras em distâncias de até 120 metros (Tabela 3). Efetuando o mesmo cálculo para se determinar o diâmetro de varredura gerado por um pulso, nesse caso adotando uma distância de 100 metros (com o mesmo ângulo de abertura do SVLT Optech), irá gerar um valor de 3 cm de incerteza em cada coordenada medida.

Figura 16 - SVLT Faro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 3 - Características do SVLT Faro.

Características	Faro Focus 3D
Alcance	0.60 m – 120 m (90% Refletividade) 0.60 m – 20 m (Refletividade menor que 10%)
Frequência	976 Khz
Ângulo de Visada (H x V):	360° x 300°
Divergência do feixe laser:	0.011°
Acurácia linear:	2 mm para distâncias entre 10 m e 25 m para superfícies com refletividade entre 10% e 90%
Comprimento de onda:	905 nm

Fonte: Faro Scene – Manual do usuário (2013).

Na sequência, será abordado um outro tema que se refere a representação digital dos dados obtidos por SVLT. Analisando diversos dicionários e literatura técnica, uma

variedade de definições ou significados para as palavras e termos que representam o terreno são encontrados. Por exemplo, pode ser definido como "superfície sólida da Terra", "uma base sólida ou fundação", "a superfície da Terra", ou "uma porção da superfície da terra." A partir destas definições, pode-se definir alguns termos:

Existem alguns termos que são utilizados para se referir a modelagem de dados do terreno como modelo digital de Elevação (MDE), modelo digital de terreno (MDT) e modelo digital de superfície (MDS).

Quadro 1 – Diferentes definições para a representação digital do terreno.

MDE	A palavra elevação enfatiza a medida de altura acima de um <i>Datum</i> e a altitude absoluta ou elevação dos pontos do modelo. O MDE, como um termo em utilização generalizada nos Estados Unidos, se refere a criação de uma matriz regular de elevações, normalmente uma malha quadrangular ou hexagonal no terreno.
MDT	Um conceito mais complexo que envolve não só a altura e elevações, mas também outras funcionalidades de SIG, como rios e linhas de cume. Além disso, DTM também podem incluir dados derivados sobre o terreno, tais como inclinação, aspecto, e visibilidade.
MDS	Corresponde à vegetação juntamente com edificações existentes na superfície do solo como prédios, casas e postes sem a presença do terreno.

Fonte: EL-SHEIMY *et al*, 2005.

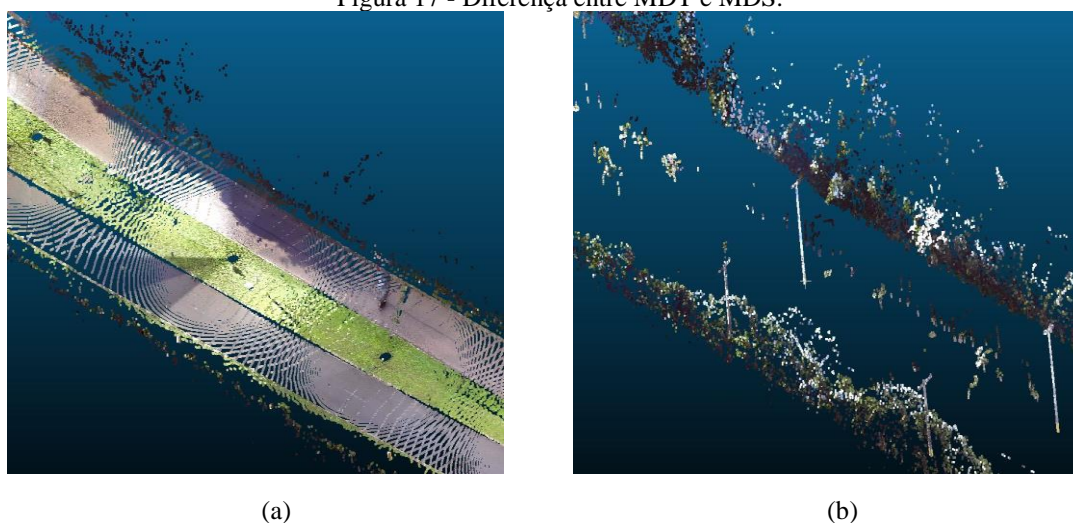
Os termos MDE, MDT e MDS, conforme Quadro 1, são alguns dos termos mais utilizados. Estes termos são frequentemente utilizados como sinônimos. Geralmente, o acrônimo MDT refere-se à altitude do próprio solo. Outrossim, um MDE inclui a altitude máxima em toda a parte (incluindo telhados dos edifícios e copas das árvores) (EL-SHEIMY *et al*, 2005).

Miller (2004) descreve modelos digitais de elevação como uma base de dados ou um arquivo contendo pontos de elevação numa área contígua. O autor também especifica que os modelos digitais de elevação (MDE) são divididos em modelos digitais de terreno (MDT) e modelos digitais de superfície (MDS). O autor não especifica se essa base deve estar em formato matricial ou vetorial.

Jensen (2011) descreve um MDT sendo um MDE contendo apenas informações da superfície da terra desconsiderando feições como vegetação ou estruturas construídas pelo homem. Em relação a um MDS, o autor descreve que corresponde a um MDE que contém todas as feições acima do terreno como vegetação, prédios, postes e outras construções realizadas pelo homem. Vosselman (2010) utiliza a mesma definição de El-Sheimi (2005) para a definição de MDS e MDT porém não cita o termo MDE.

Na Figura 17, há um exemplo gráfico das diferenças entre MDT (Figura 17a) e MDS (Figura 17b) e, de acordo com a literatura citada nos dois parágrafos anteriores o MDE corresponde a uma junção do MDS e MDT.

Figura 17 - Diferença entre MDT e MDS.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O método de varredura a laser é bastante efetivo na tarefa de aquisição de MDT. Em Fotogrametria esta mesma tarefa pode ser realizada com níveis parecidos de automação, mas o método de varredura a laser possui vantagens em relação aos métodos fotogramétricos convencionais de geração de MDT. Uma vantagem notável é a capacidade (de parte dos pulsos laser) de penetrar áreas de vegetação e atingir o terreno, permitindo a eliminação da vegetação de maneira rápida e eficaz. Os métodos de eliminação de vegetação e outras feições existentes no terreno, de forma a deixar somente pontos laser pertencentes ao terreno, são conhecidos como filtragem (DAL POZ, 2013).

2.2 FILTRAGEM DE DADOS EM NUVENS DE PONTOS

A filtragem de dados, principalmente em MDE ou MDS, com a finalidade de se obter um MDT, é uma das tarefas das mais complexas já que existem diversos algoritmos

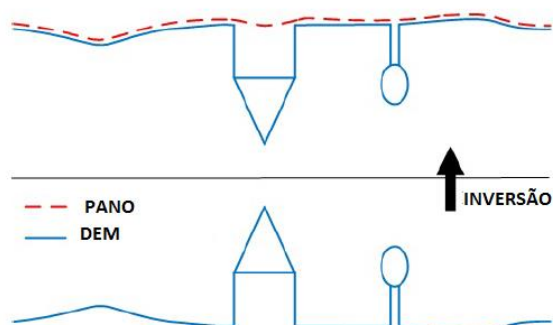
comerciais desenvolvidas para essa finalidade, mas mesmo assim, às vezes, torna-se necessário a edição manual desse tipo de dados. Diversos são os parâmetros e etapas que se seguem para a conversão de MDE ou MDS em MDT. Alguns dos parâmetros que são considerados em processos de filtragem são a declividade do terreno, tipo de superfície e morfologia do terreno. Tradicionalmente o processo de criação de um MDT é gerado a partir de pares fotogramétricos orientados e essa etapa era realizada em estações fotogramétricas ou restituidores analógicos. Hoje, os pares fotogramétricos geram nuvens de pontos e a partir deles são gerados processos de classificação para se converter o MDS em MDT.

Sithole (2001) apresentou um filtro que utiliza a declividade como parâmetro para diferenciar os pontos que fazem parte do MDT daqueles que fazem parte do MDS.

Pirotti *et al* (2012) também realizaram estudos utilizando filtros morfológicos de classificação de vegetação utilizando um SVLT Riegl VZ-400. Uma visão geral dos métodos de filtragem em nuvens de pontos utilizando plataformas aerotransportadas é apresentado em Vosselman e Maas (2010) e são divididas em três grupos: um baseado em morfologia matemática, um de densificação progressiva de uma malha de triângulos, e outro baseado em interpolação linear hierárquica.

Neste trabalho foi utilizado a filtragem descrita por Zhang *et al* (2016). Os autores elaboraram um filtro para separar nas nuvens de pontos, o terreno da superfície sobre o terreno. A metodologia utilizada pelos autores foi um algoritmo que praticamente inverte o eixo de elevação das nuvens de pontos e depois recobre as nuvens de pontos invertidas com um pano, conforme Figura 18.

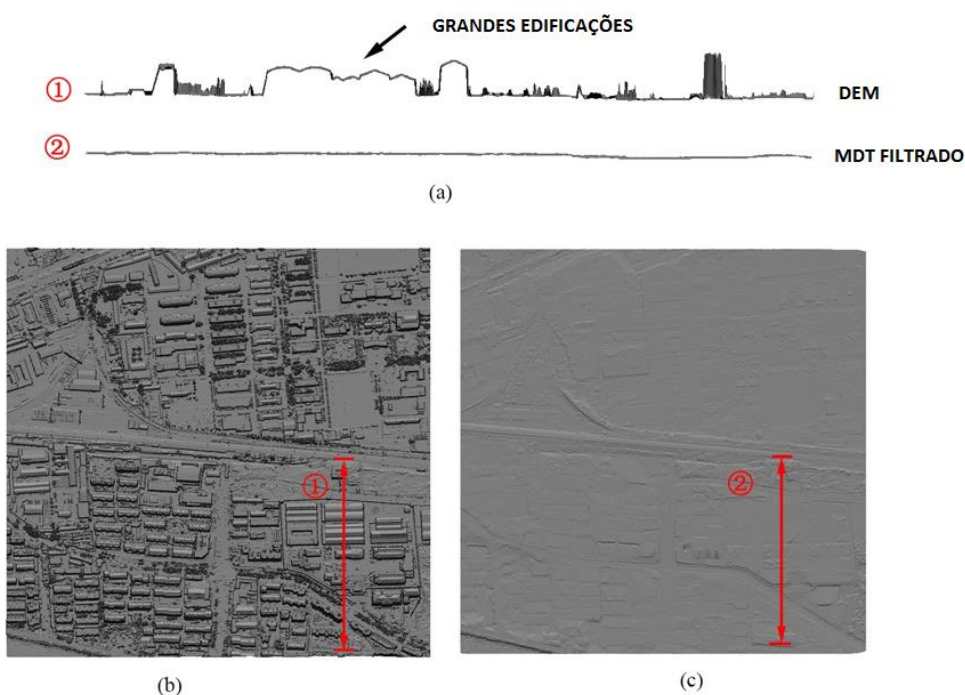
Figura 18 – Filtro utilizado para gerar o MDT.



Fonte: Zheng *et al* (2016).

Os autores fizeram diversos testes com esse tipo de filtragem. Realizaram esses testes em áreas urbanas com grandes e pequenas edificações e chegaram a um erro médio de 4.58% nos dados analisados. Segundo os autores esse tipo de filtro apresenta problema em obras de arte criadas pelo homem como pontes, elevadas e viadutos. A grande vantagem desse método é que ele é aplicado em um software livre de manipulação de nuvem de pontos que é o *Cloudcompare*. Esse filtro é denominado de CSF (*cloth simulation filtering* – filtro de simulação de pano). Na Figura 19, há um exemplo da simulação do filtro numa área urbana com grandes edificações.

Figura 19 – Avaliação do filtro conforme o autor.



Fonte: Zheng *et al* (2016).

Outros filtros também utilizados nesse estudo foram filtros de ruídos (*noise filter*) e filtros para eliminação de pontos isolados (*SOR Filter*).

2.3 NIVELAMENTO GEOMÉTRICO E GNSS

Nivelamento é o termo geral aplicado a qualquer um dos vários processos pelos quais as elevações ou diferenças em altitude são determinadas. É uma operação essencial na produção de dados aplicados em mapeamento, desenhos de engenharia e construção. Os dados oriundos de nivelamento são utilizados para construção de rodovias, ferrovias, canais, rede de esgotos, sistemas de abastecimento etc (GHILANI E WOLF, 2011).

A determinação do valor da cota ou altitude é fundamentada em métodos que permitem obter o desnível entre pontos. Conhecendo-se os valores altimétricos de um determinado ponto adotado como origem é possível calcular as demais cotas ou altitudes. Estes métodos são denominados de nivelamento. Existem diferentes métodos que permitem determinar os desníveis, com precisões que variam de alguns centímetros até abaixo do milímetro (VEIGA *et al*, 2012).

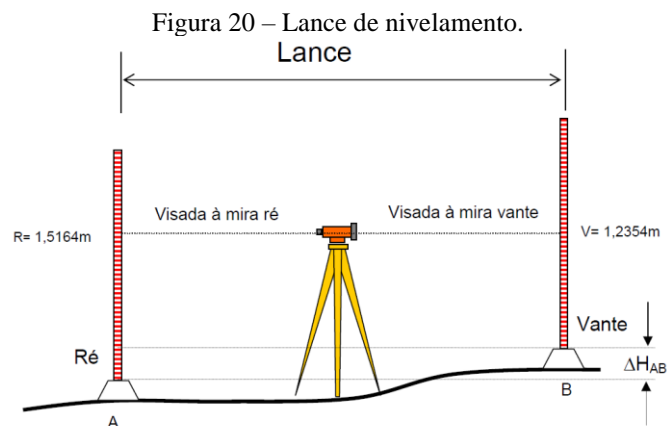
No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, IBGE, é o Órgão responsável pelo Sistema Geodésico Brasileiro e pela Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP). Não existe uma normatização que obrigue os levantamentos altimétricos a utilizarem a RAAP, porém órgãos ligados ao estado brasileiro, geralmente possuem normas que cobram a utilização de levantamentos a partir da RAAP. Mesmo assim o IBGE, disponibiliza na internet, em seu banco de dados geodésico, as Referências de Nível (RN) que fazem parte da RAAP (IBGE, 2016).

Para a determinação da cota ou altitude de um determinado ponto é necessária a determinação do desnível entre dois pontos e ainda deve-se conhecer a cota de um ponto adotado como referência. O termo cota refere-se a um referencial arbitrário, já o termo altitude adota como referência o nível médio dos mares não perturbados. Existem métodos diretos e indiretos que permitem determinar os desníveis com precisão podendo chegar a uma acurácia milimétrica.

O nivelamento geométrico consiste em uma técnica, vista superficialmente como simples, onde a determinação da diferença de altura entre pontos é feita por visadas horizontais em miras verticais (MOREIRA, 2003).

A NBR13.133 define o Nivelamento Geométrico como a realização da medida da diferença de nível entre pontos do terreno através de leituras correspondentes a visadas horizontais, obtidas com um nível, em miras colocadas verticalmente nos referidos pontos.

Os pontos que serão nivelados são ocupados pelas miras, com o nível estacionado em posição equidistante entre eles. A diferença de nível, ou desnível, obtém-se subtraindo a leitura da mira de ré pela leitura da mira a vante. (GOMES, 2006).

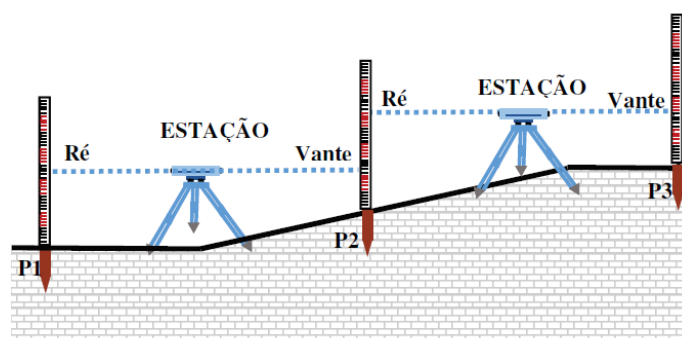


Fonte: Gomes (2006)

Gomes (2006) define o Nivelamento Geométrico como o método de determinação de desníveis mediante visadas horizontais, obtidas com um instrumento de medição denominado de nível topográfico e com a utilização de réguas graduadas denominadas de miras topográficas ou estadimétricas.

Para Silva (2003), o nivelamento geométrico consiste na criação de um plano horizontal e determinar as interseções deste plano com uma série de verticais levantadas nos pontos e em seguida obter a distância vertical destes ao plano adotado como referência. O nivelamento geométrico pode ser simples, quando é realizada apenas uma visada (Figura 20) entre o nível e a mira ou composto (Figura 21) quando é realizada várias trocas de posição entre o aparelho e as miras.

Figura 21 – Nivelamento geométrico composto.



Fonte: Junior *et al* (2014)

Outro assunto será abordado nesse estudo se refere ao posicionamento global por satélites uma vez que esse tipo de levantamento foi utilizado nesse trabalho para realizar o georreferenciamento das nuvens de pontos na área de estudo. Existem diversos assuntos que podem ser estudados em relação ao posicionamento global. Nesse tópico

será apenas analisado os conceitos em relação a técnica que foi utilizada para a medição de coordenadas.

O Sistema de Posicionamento Global foi desenvolvido na década de 70 por militares das forças armadas dos Estados Unidos. A principal finalidade era a determinação de posição, velocidade e tempo em qualquer lugar da Terra independente de condições atmosféricas (MÔNICO, 2008).

Mais recentemente, diversos países vem desenvolvendo o seu próprio Sistema Global de Navegação como o europeu Galileu, o russo *Glonass* e o chinês *Beidou*. O sistema utilizado pelos americanos é denominado de GPS (*global positioning system*) e a junção de todos esses sistemas, no caso o americano, europeu, russo, chinês e outros é denominado de GNSS. Os receptores GNSS fornecem dados posicionais terrestres a partir da sincronização de sinais codificados vindos do espaço (GHILANI E WOLF, 2011).

A medição original de distâncias é denominada de pseudodistâncias em função da falta de sincronismo entre o relógio do usuário e dos satélites. Assim, cada equação de distâncias apresenta-se com quatro incógnitas, três posicionais e uma referente ao erro do relógio do receptor. Assim, inicialmente, a concepção do sistema americano previa um mínimo de quatro satélites em órbita permitindo a determinação posicional do usuário juntamente com a correção da falta de sincronismo dos relógios dos receptores.

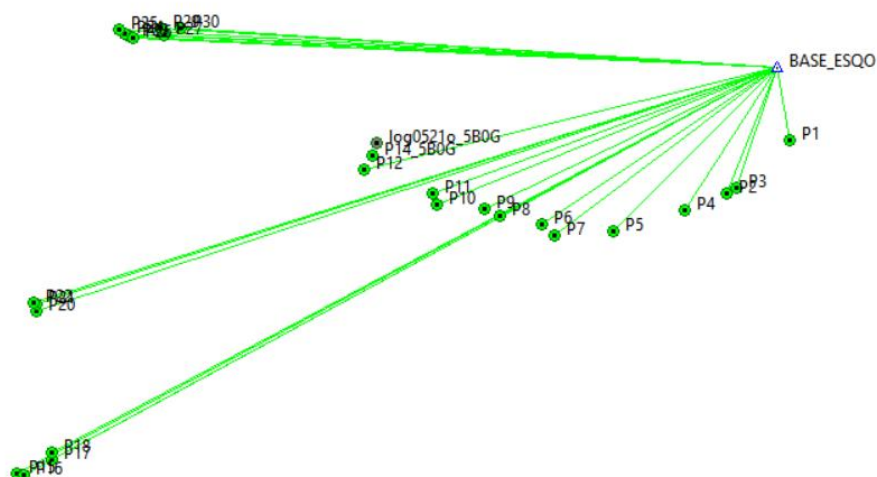
Existem diversas técnicas de posicionamento que podem ser realizadas com a utilização de receptores GNSS. Existem técnicas de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), *Real Time Kinematic* (RTK) e o método relativo. Nesse estudo foi realizado a técnica de posicionamento utilizando o método relativo estático pós-processado.

Para realizar o posicionamento relativo o usuário deve utilizar dois ou mais receptores. Nessa técnica uma base foi rastreada por um tempo de aproximadamente cinco horas. Essa base foi ajustada por duas estações da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) do IBGE. Assim, as coordenadas de todos os pontos levantados em campo foram referenciadas a esse ponto ajustado.

Dependendo da literatura o método relativo é dividido em relativo estático ou estático rápido. Mônico (2008) descreve o método relativo rápido estático aquele em que a base fica numa distância de até 20 km da área de trabalho e a ocupação dos pontos não excedem em 20 minutos. Para Mônico (2008), o método relativo estático rápido é adequado para levantamentos com linhas de base de até 10 km.

A base da Figura 22 foi determinada utilizando o método relativo estático. Os pontos de controle e checagem, este estudo, foram determinados utilizando o método relativo rápido estático com tempo de ocupação de cinco minutos em cada ponto.

Figura 22 – Método de posicionamento relativo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4 AJUSTAMENTO DE OBSERVAÇÕES

O ajustamento de observações faz parte de um ramo da matemática aplicada. O seu principal objetivo é uma solução única para problemas onde existe uma abundância de observações e o sistema de equações lineares é consistente. O ajustamento também tem por objetivo a estimativa de qualidade da solução e utiliza a expansão do método dos mínimos quadrados desenvolvidos por Gauss e Legendre (DALMOLIN, 2002).

Gemael (1994) descreve três métodos de ajustamento. O primeiro método é denominado de Método Paramétrico, o segundo de Método das Equações de Condição ou Método dos Correlatos e o terceiro denominado de Método Combinado.

No método paramétrico cada observação proporciona uma equação. As equações são de tal forma que se pode explicitá-las em função dos parâmetros envolvidos (CAMARGO, 2010). Gemael (1994) define o modelo matemático para o caso linear como:

$$F(Xa) = La \quad (05)$$

Onde:

L_a = Vetor das Observações Ajustadas

X_a = Vetor dos Parâmetros Ajustados.

O ajustamento pelo Método dos Correlatos também pode ser chamado de ajustamento das observações diretas condicionadas. O modelo matemático envolve apenas observações onde os parâmetros não participam do ajustamento. O modelo matemático do Método dos Correlatos é definido por (CAMARGO, 2008):

$$F(L_a) = 0 \quad (6)$$

Onde:

L_a : Vetor das Observações Ajustadas.

O Método combinado é um caso particular de uma junção dos dois métodos anteriores. Ele reúne parâmetros ajustados como valores observados ajustados ligados por uma função não explícita. O modelo matemático do Método Combinado é descrito por (GEMAEL, 1994):

$$F(L_a, X_a) = 0 \quad (7)$$

Onde:

L_a = Vetor das Observações Ajustadas

X_a = Vetor dos Parâmetros Ajustados.

Nesse estudo será utilizado o Método dos Correlatos cujas principais matrizes e vetores encontram-se descritos abaixo. Foi escolhido esse método de ajustamento em função do mesmo levar em consideração a distância entre os vértices das observações na matriz dos pesos e também pelo fato de método lidar apenas com observações ajustadas diferentemente do Método Paramétrico.

$$L_a = L_b + v \quad (8)$$

$$W = F(L_b) \quad (9)$$

$$B = \left. \frac{\partial F}{\partial L_a} \right|_{L_b} \quad (10)$$

$$BV + W = 0 \quad (11)$$

$$K = BP^{-1}B^T \quad (12)$$

$$V = P^{-1}B^TK \quad (13)$$

$$M = BP^{-1}B^T \quad (14)$$

$$\Sigma La = [I - B^TM^{-1}BP^{-1}] \quad (15)$$

Onde:

Lb = Vetor das Observações.

W = Vetor Erro de Fechamento.

B = Matriz das Derivadas Parciais.

V = Vetor dos Resíduos.

P = Matriz Peso das Observações.

K = Vetor dos Correlatos.

ΣLa = Matriz de Variância e Covariância das Observações Ajustadas.

Para escrever a matriz peso, no Método dos Correlatos, admite-se que as observações (desníveis) são independentes e os pesos são inversamente proporcionais as distâncias entre os vértices das observações (CAMARGO, 2008).

Para mais detalhes dos métodos de ajustamento pode-se consultar (GEMAEL, 1994), DALMOLIN (2002), WOLF e GHILANI (2006) e CAMARGO (2008).

Outra abordagem que também se faz necessária é sobre Controle de Qualidade Posicional. O trabalho de mensuração envolve diversas etapas. Desde os trabalhos de planejamento em gabinete, levantamentos de campo e a finalização e geração do produto final em escritório. Qualquer atividade que envolva a obtenção de medidas sempre existe algum tipo de erro associado. Esses tipos de erros podem ser classificados em: grosseiros, sistemáticos e aleatórios.

Os erros grosseiros podem ser oriundos da falta de experiência ou por desatenção de quem realiza o processo de medição. Os erros sistemáticos podem indicar algum problema no instrumento de medição e os erros aleatórios ou acidentais são aqueles que ocorrem de maneira fortuita, ao acaso.

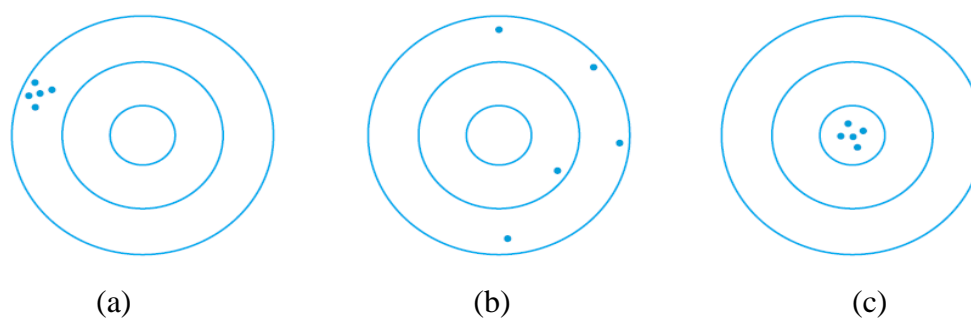
Como existem diversas fontes e tipos de erros, nota-se que a grandeza denominada de valor verdadeiro nunca é conhecida. Assim, para cada tipo de mensuração

adota-se um valor como referência. Assim, para se estimar a qualidade de qualquer dado que foi medido, compara-se o mesmo com o seu valor de referência. Porém, para tentar minimizar a existência de erros, faz-se necessário uma determinada quantidade de medições para que exista redundância e assim se possa determinar uma solução única para o problema em questão (MIKHAIL e ACKERMANN ,1976).

O ideal de cada processo de medição seria a inexistência de erros. A inexistência de erros recebe o nome de exatidão. Ou seja, a exatidão é considerada um processo sem qualquer tipo de erro. A acurácia representa a proximidade de uma medida em relação a um valor adotado como verdadeiro. O termo precisão demonstra o grau de consistência de uma medida em relação à sua média (MIKHAIL e ACKERMANN ,1976).

Um exemplo muito comum de se encontrar na literatura é o do tiro ao alvo, conforme Figura 23. No exemplo 23.a, os resultados são precisos, mas não são acurados. Em 23.b, os resultados não são precisos nem acurados e em 23.c, os resultados são precisos e acurados. Mikhail e Ackermann (1976) definem o termo acurácia como o grau de proximidade de um valor ou estimativa com um valor adotado como verdadeiro e precisão denota o grau de consistência de uma medida comparada com a sua média. Definições semelhantes também podem ser encontradas em Wolf (2006), Guilani e Wolf (2011).

Figura 23 – Análise de exemplos de precisão e acurácia.



Fonte: Guilani e Wolf (2011).

Assim, nota-se que o termo exatidão se refere a um processo de medição considerado ideal com ausência total de erros, algo impossível de acontecer. O termo acurácia envolve apenas erros aleatórios, ou seja, que ocorrem ao acaso que fica regulado pela lei das probabilidades. O termo precisão engloba tanto efeitos aleatórios como sistemáticos, ou seja, além de falhas ocasionais no processo de medição também está sujeito a falhas instrumentais (MIKHAIL e ACKERMANN ,1976).

Como todo processo de medição é passível de erros o ideal é a sua minimização. Para a eliminação de erros grosseiros pode-se adotar um maior rigor no momento da medição.

Os erros sistemáticos podem ser determinados a partir de testes estatísticos que utilizam como parâmetros a média (Equação 16), desvio-padrão (Equação 17) e a variância (Equação 18) dos dados analisados.

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (16)$$

$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \overline{\Delta x})^2} \quad (17)$$

$$\sigma_{\Delta x}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \overline{\Delta x})^2 \quad (18)$$

Onde $\overline{\Delta x}$, $\sigma_{\Delta x}$ e $\sigma_{\Delta x}^2$ representam respectivamente a média das discrepâncias, desvio-padrão e variância.

Os erros sistemáticos podem ser analisados a partir de um teste de tendência que utiliza a distribuição *t Student*. Para a determinação da existência de erros sistemáticos formula-se um teste de hipóteses que adota as seguintes premissas:

- $H_0 = 0$, denominado de hipótese nula ou básica, onde adota-se que o dado não possui erro sistemático, ou seja, ausência de tendência. Usa-se um intervalo de confiança baseado num nível de significância. Caso o valor mensurado fique fora desse intervalo de confiança, rejeita-se a hipótese nula.

- $H_1 > 0$, denominado de hipótese alternativa, onde adota-se que o dado possui erro sistemático, assim aceita-se a hipótese alternativa e rejeita-se a hipótese nula baseado num determinado intervalo de confiança (WOLF e GHILANI, 2006).

O teste para a determinação de existência de tendência utiliza como parâmetros a média das discrepâncias, desvio-padrão da amostra analisada e o valor de graus de liberdade (gl) que corresponde ao tamanho da amostra subtraído de uma unidade. Assim, determina-se o valor de T_{calc} , conforme a Equação 19.

$$T_{calc} = \frac{\overline{\Delta x}}{\sigma_{\Delta x}} \cdot \sqrt{gl} \quad (19)$$

Assim, compara-se o valor de T_{calc} , com um valor teórico existente na distribuição *t Student* a partir de um nível de significância. Caso o valor de T_{calc} seja inferior ao valor teórico, aceita-se a hipótese nula e rejeita-se a hipótese alternativa.

O teste de tendência apenas informa a existência de tendência na amostra analisada. O valor de tendência pode ser determinado a partir do erro médio quadrático (EMQ), Equação (20) (MIKHAIL E ACKERMAN, 1976)

$$EMQ = \sigma p^2 + (b)^2 \quad (20)$$

Onde σp^2 representa a variância e b representa o valor de tendência ou vício do estimador.

Para a análise da acurácia dos dados analisados utiliza-se o a variância amostral junto com o valor teórico existente na tabela de distribuição χ^2 (qui-quadrado). Assim, o valor da acurácia é determinado pela Equação 21.

$$Acurácia = (gl) \cdot \frac{\sigma_{\Delta x}^2}{\chi^2_{Teórico}} \quad (21)$$

Nota-se que o valor da acurácia pode ser determinado de duas maneiras distintas. Na Equação 20 o dado será considerado acurado com a eliminação do valor de tendência de cada observação analisada. Pela Equação 21, o dado será considerado acurado caso o teste de tendência indique a inexistência de erros sistemáticos nos dados analisados.

Outro aspecto a ser abordado é que se pressupõe que os dados amostrais obedeçam uma distribuição normal. O número de amostras também é outro fator a se considerar. A legislação brasileira não especifica como se deve determinar o tamanho da amostra. Miller (2004) cita um número mínimo de 20 pontos amostrais. Santos (2010), adotou uma amostra entre 20 e 30 pontos na análise de controle de qualidade de imagens de satélite. Para Montgomery e Runger (2008) o teste de tendência deve ser aplicado para amostras com até trinta elementos.

Outro método que também pode-se avaliar a qualidade posicional de um produto cartográfico é o descrito por Miller (2004) como o padrão de acurácia geoespacial para dados planimétricos e altimétricos definidos pelo FGDC (*Federal Geographic Data Comitee*) e também pela ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) é baseado no cálculo do Erro Médio Quadrático (EMQ) (Equação 22).

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta^2}{n}} \quad (22)$$

Onde Δ é a diferença entre a medida do ponto de verificação obtida no terreno e a medida obtida pelo SVLT no mesmo local. O padrão recomenda que seja usado um mínimo de 20 pontos de controle e os mesmos devem ter uma acurácia substancialmente maior do que os produtos obtidos pelo SVLT (MILLER, 2004).

A acurácia planimétrica (AP) (Equação 23) com um nível de confiança de 95% é calculada usando a seguinte fórmula:

$$AP = 2,447 \cdot \frac{(EMQ_x + EMQ_y)}{2} \quad (23)$$

A acurácia vertical (AV) (Equação 24) com um nível de confiança de 95% é calculada usando a seguinte fórmula:

$$AV = 1,96 \cdot EMQ_z \quad (24)$$

As Equações 23 e 24 são aplicadas quando o $EMQ_x \neq EMQ_y$ e os multiplicadores 2,447 na AP e 1,96 na AV são adotados para que os dados obedeçam uma distribuição normal.

A legislação brasileira em relação a padronização e normatização de produtos cartográficos ainda carece de ajustes. Em relação à qualidade posicional de produtos cartográficos, existem duas legislações básicas existentes dentro da cartografia nacional. A primeira legislação é regulada pelo Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984. Nesse Decreto as cartas são classificadas quanto ao padrão de exatidão cartográfica (PEC). Em virtude da limitação tecnológica da época alguns conceitos contidos nessa legislação encontram-se atualmente desatualizados. Principalmente o § 4º do Art.8º onde são considerados equivalentes os termos desvio-padrão, erro padrão e erro médio quadrático.

Na ET-ADGV Versão 2.1.3, segunda edição de 2011, que faz parte da INDE, existem valores tabelados referentes ao padrão de exatidão cartográfica dos produtos cartográficos digitais (PEC-PCD). O PEC-PCD tem a limitação de ir até a escala 1:1.000, mas é a legislação brasileira mais atualizada em relação a controle de qualidade posicional de produtos cartográficos.

Porém tanto o Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984, quanto a ET-ADGV Versão 2.1.3, segunda edição de 2011, não abordam todos os conceitos envolvendo os tipos de análises que devem ser realizadas para se realizar um controle de qualidade posicional. Por exemplo, o número de amostras, e tipos de testes estatísticos para se verificar a acurácia de um determinado produto cartográfico não são abordadas por essas

legislações. A legislação brasileira também não aborda como se deve determinar a acurácia de um determinado produto cartográfico. Como foi visto acima a acurácia de um produto cartográfico pode ser determinada através do teste de tendência através da distribuição *t Student* e caso o produto não possua tendência, a partir do teste de precisão ou acurácia utilizando a Tabela χ^2 . O FGDC e a ASPRS determina a acurácia de um produto cartográfico a partir do erro médio quadrático. Outro fator a se considerar é que a premissa básica para o cálculo da acurácia de um dado é que os dados analisados obedeçam a uma distribuição normalizada. A legislação brasileira não aborda a questão da normalidade dos dados e o FGDC e a ASPRS assumem que a distribuição é normalizada para as equações 23 e 24.

2.5 ALGUNS TRABALHOS RELACIONADOS COM O TEMA

Foram pesquisados alguns trabalhos sobre o tema. Principalmente envolvendo atividades desenhadas com SVLT em levantamentos topográficos e também em controle de qualidade de dados oriundos de escaneamentos efetuados a partir de SVLT.

Figura 24 – Viaduto Falsenau localizado em Berna – Suíça.



Fonte: Zogg e Ingensand (2008).

Zogg e Ingensand (2008) realizaram um experimento visando realizar testes de carga utilizando um SVLT *Imager 5006 Zoller+Froehlich* no viaduto Falsenau localizado em Berna na Suíça (Figura 24).

Foram realizados levantamentos tradicionais da topografia com nivelamento geométrico, taqueometria e escaneamentos utilizando SVLT para monitorar as deformações no viaduto. Os testes de carga foram realizados em duas noites e envolveram

dois tanques de 54 toneladas. Os procedimentos adotados para a realização dos testes de carga foram executados em quatro etapas : a primeira etapa com a medição inicial cujos dados serviram de referência para o cálculo das discrepâncias , carregamento de um tanque (P1) , carregamento com dois tanques (P2) e as medições finais sem qualquer tanque (P3).

As medições form realizadas em 40 (quarenta) parafusos que foram implantadas na estrutura do viaduto, conforme Figura 25. O software utilizado para o registro das nuvens de pontos foi o *Cyclone* da Leyca e para a análise das deformações das estruturas foi o *Geomagic Studio*.

Figura 25 – Medições envolvendo SVLT e Nivelamento Geométrico (NG).



Fonte: Zogg e Ingensand (2008).

Na

Tabela 4, consta os resultados obtidos nas situações P1, P2 e P3 analisadas. De acordo com os autores, para esse tipo de situação, no caso análise de deformações estruturais em viadutos, o SVLT poderia substituir o nivelamento geométrico haja vista que os resultados obtidos encontram-se na precisão de ambos os equipamentos analisados.

Tabela 4 - Análise dos resultados obtidos.

Método	Discrep. (P1) (mm)	Discrep. (P2) (mm)	Discrep. (P3) (mm)
Niv. Geom. (NG)	-3,2	-8,1	0,7
SVLT	-2,8	-8,9	0,7
Δ (SVLT – NG)	0,4	-0,8	0,0

Fonte: Zogg e Ingensand (2008).

Alkan e Karsida (2012) realizaram um trabalho envolvendo medições obtidas a partir de feições geométricas extraídas de nuvens de pontos oriundas de um SVLT Z+F IMAGER 5006i. Os dados obtidos pelo SVLT foram comparados com medições realizadas com um paquímetro, conforme Figura 26. Os testes foram realizados no Laboratório de Hidráulica da Universidade Técnica de Istanbul na Turquia.

Figura 26 – Medidas de comprimento obtidas por um paquímetro.



Fonte: Alkan e Karsida (2012).

No estudo analisado, foram utilizados seis objetos de aço inoxidável com diferentes formas geométricas: um prisma retangular (30 cm x 40 cm x 100 cm), um cilindro com diâmetro de 15cm e comprimento de 50 cm e um cubo com (40 cm x 40 cm x 40 cm), conforme Figura 27.

Figura 27 – Formas geométricas escaneadas e analisadas.



Fonte: Alkan e Karsida (2012).

Os autores realizaram dois tipos de varreduras utilizando diferentes parâmetros de escaneamento. Foram feitas varreduras com distâncias entre 0 (zero) e 3 (três) metros

de distâncias dos alvos e também com distâncias entre 10 (dez) e 15 (quinze) metros. Os parâmetros de escaneamento configurados no SVLT foram o alto e super-alto. Os resultados obtidos, no caso média das discrepâncias, forneceram os seguintes os resultados constantes na Tabela 5.

Tabela 5 – Resultados obtidos a partir das diferentes varreduras.

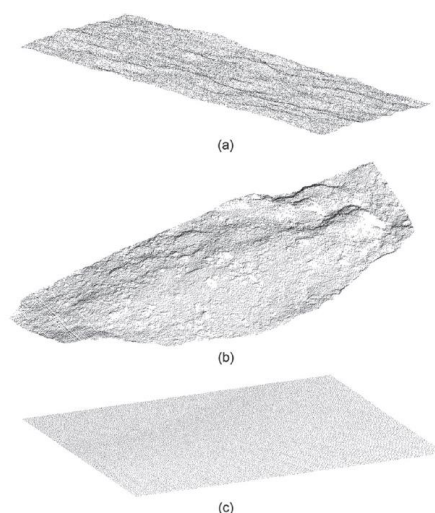
Modo	Valor Mínimo (mm)	Valor Máximo (mm)
Alto 3m	-4,5	8,2
Super-Alto 3 m	-2,8	9,2
Alto 10 m	-7,3	17,0
Super-Alto 10 m	-1,8	11,6

Fonte: Alkan e Karsida (2012).

Nota-se que a partir dos resultados obtidos na Tabela 5, os menores valores de discrepâncias encontrados foram aqueles obtidos por escaneamentos efetuados para objetos que se encontravam mais próximos do SVLT, nesse caso a uma distância de 3 (três) metros.

Outro trabalho relacionado com o tema dessa dissertação foi realizado por Fan e Atkinson (2015). Os autores realizaram um estudo testando a acurácia de modelos digitais de elevação gerados a partir de SVLT a partir de três características de superfícies físicas de terreno. No caso eles testaram os fatores declividade (a), deslizamento de superfície de materiais (b) e terreno plano (c) conforme Figura 28.

Figura 28 – Superfícies de terreno analisadas.

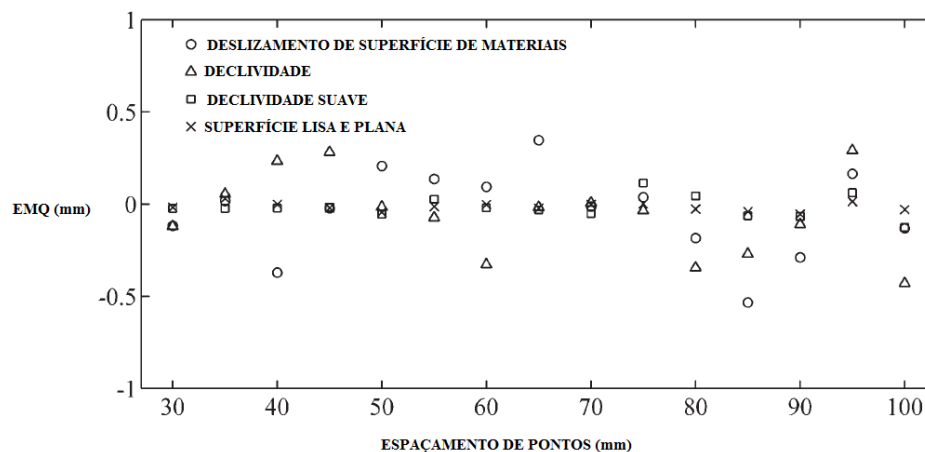


Fonte: Fan e Atkinson (2015).

O SVLT utilizado pela análise foi o modelo C10 da *Leica* e os estudos foram realizados em corredores de transporte de cargas no sul e sudoeste da Inglaterra. A avaliação foi realizada a partir de 100 (cem) pontos de checagem cujos valores altimétricos adotados como referência foram medidos com estação total. Além do tipo de terreno analisado também foram testados diferentes espaçamento de pontos a partir das nuvens de pontos geradas conforme Figura 29.

Os resultados foram avaliados a partir do erro médio quadrático das discrepâncias analisadas em cada situação para cada tipo de terreno analisado juntamente com o seu respectivo espaçamento de pontos em cada nuvem de pontos gerada. Nota-se, a partir da Figura 29, que os resultados obtidos para cada tipo de situação variaram entre -0.5 mm e 0.5 mm para diferentes espaçamentos.

Figura 29 – Resultados obtidos a partir de cada tipo de situação.



Fonte: Fan e Atkinson (2015).

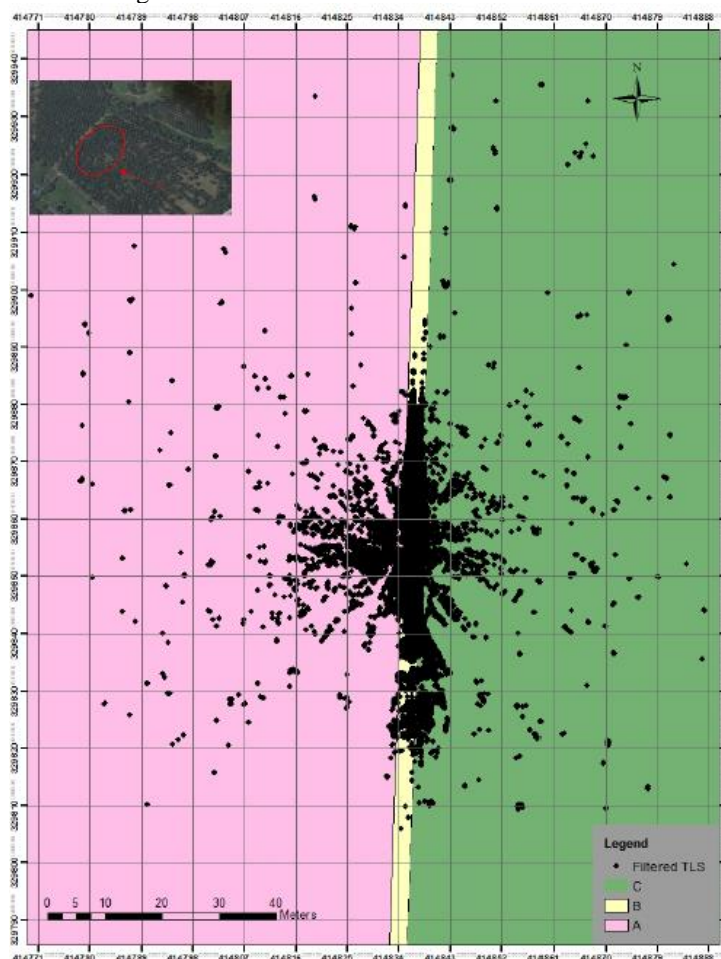
Muhadi *et al* (2016) realizaram um experimento utilizando o SVLT Faro numa plantação de óleo de palma na Malásia. A finalidade de se testar esse experimento era a determinação de uma área adequada para plantação baseada no critério de declividade do terreno e se obter uma estimativa do erro altimétrico associado aos dados obtidos pelo SVLT Faro. A acurácia dos dados altimétricos foram comparadas com a altimetria obtida por rastreamento de pontos utilizando tecnologia *GNSS* utilizando o método de medição de pontos através de posicionamento *RTK*. Interessante notar que o SVLT Faro desse estudo é o mesmo equipamento utilizado nos estudos envolvidos nessa dissertação.

Os testes foram desenvolvidos utilizando 50 (cinquenta) pontos de checagem. Primeiramente os testes foram realizados sem a execução do processo de filtragem das

nuvens de pontos com a finalidade de se eliminar pontos isolados medidos entre cada nuvem de pontos. Sem o processo de filtragem os valores de EMQ variaram entre 8 mm até 1.63 m.

Depois, foi realizado um processo de filtragem, com a finalidade de se eliminar as árvores e pontos isolados nas nuvens de pontos. Após a filtragem, 31 (trinta e um) dos cinquenta pontos ficaram dentro das nuvens de pontos. Além disso, após o processo de filtragem, foram realizadas análises em três áreas distintas onde ficaram os pontos remanescentes: A plantação de óleo de palmeira (A), a vegetação nativa (C) e a estrada (B) que separava a plantação da vegetação nativa, conforme Figura 30.

Figura 30 – Análise realizada na área de estudo.



Fonte: Muhadi *et al* (2016).

Assim, após o processo de filtragem e a divisão da área de estudo em três partes os valores de EMQ ficaram entre 2 mm (valor mínimo) e 8,2 cm (valor máximo).

Cuartero *et al* (2010) realizaram um experimento utilizando um SVLT Riegl LMS-Z390i com alcance de 1,5 até 400 metros. O teste foi realizado numa parede de 9,80

m x 3,22 m com 53 pontos de controle. Foram avaliados os erros posicionais métricos e angulares das coordenadas tridimensionais geradas pelo SVLT. O erro posicional métrico foi avaliado a partir do EMQ e do desvio-padrão da resultante das coordenadas tridimensionais (X, Y e Z). O erro foi calculado a partir das discrepâncias das coordenadas obtidas por um medidor eletrônico de distâncias Proliner 5.7 com precisão de 0,3 mm. Foram obtidos resultados de erro modular resultante entre as três componentes (X, Y e Z) de 3,23 mm com desvio-padrão de 0,44 mm. Os erros angulares foram determinados a partir de estatística esférica onde os parâmetros analisados foram a média direcional e a média modular. A média direcional foi analisada a partir dos ângulos horizontais e verticais obtidos pelo vetor resultante desses dados. A média modular foi obtida a partir do comprimento do vetor resultante das componentes horizontais e verticais analisadas. Também foi utilizado um parâmetro de concentração de dados (κ) visando avaliar a tendência do instrumento numa determinada direção. Assim, os resultados obtidos foram de 249,7° e -3,8° de média direcional nas componentes horizontal e vertical, o valor do desvio-padrão circular foi de 27,9° e o valor da média modular foi de 0,8. O valor da média modular foi considerado alto pelos autores, fato esse que demonstra a não uniformidade da distribuição dos dados angulares analisados. O valor de κ obtido foi de 6,7 que não foi considerado um valor pequeno para os autores, indicando que alguns desses dados apresentam falta de simetria em uma determinada direção.

Park *et al* (2011) realizaram estudos visando estimar a qualidade posicional de dados altimétricos de modelos tridimensionais de prédios e edificações numa região ao redor do Campus da Universidade de New South Wales em Sydney, Austrália. Os dados altimétricos foram obtidos a partir de um SVLA e a textura dos prédios e do terreno foram obtidas com a integração de ortofotos adicionadas aos modelos. A acurácia das alturas dos prédios foi realizada utilizando o Erro Médio Quadrático (EMQ) entre os topos das alturas das edificações que foram medidas com tecnologia GNSS em comparação com as alturas obtidas pelo SVLA. As análises realizadas obtiveram acurácia menor que 22 cm para os topos das alturas dos prédios.

Liu e Zhang (2013) verificaram a influência de *breaklines* na acurácia de modelos digitais de elevação gerados por um SVLA no sudoeste da Austrália. A metodologia de avaliação foi realizada a partir do EMQ e também do Erro Médio Absoluto (EMA). Os testes foram realizados com nuvens de pontos reamostradas com 5%, 10%, 25%, 50% e 75% dos dados originais visando maior desempenho no

processamento dos dados. Foram obtidos valores de acurácia dos dados altimétricos que variaram entre 16.9 cm e 78.2 cm.

Na literatura nacional existem estudos que abordam o tema sobre a qualidade posicional dos mais diversos tipos de dados, desde imagens do *google*, cartas topográficas, imagens de satélite entre outros. Porém, na literatura nacional o controle de qualidade posicional é realizado a partir do enquadramento dos mais diversos tipos de dados cartográficos no PEC que é regido pelo Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984, diferentemente do padrão adotado pelo FGDC que utiliza o EMQ como estimador de acurácia.

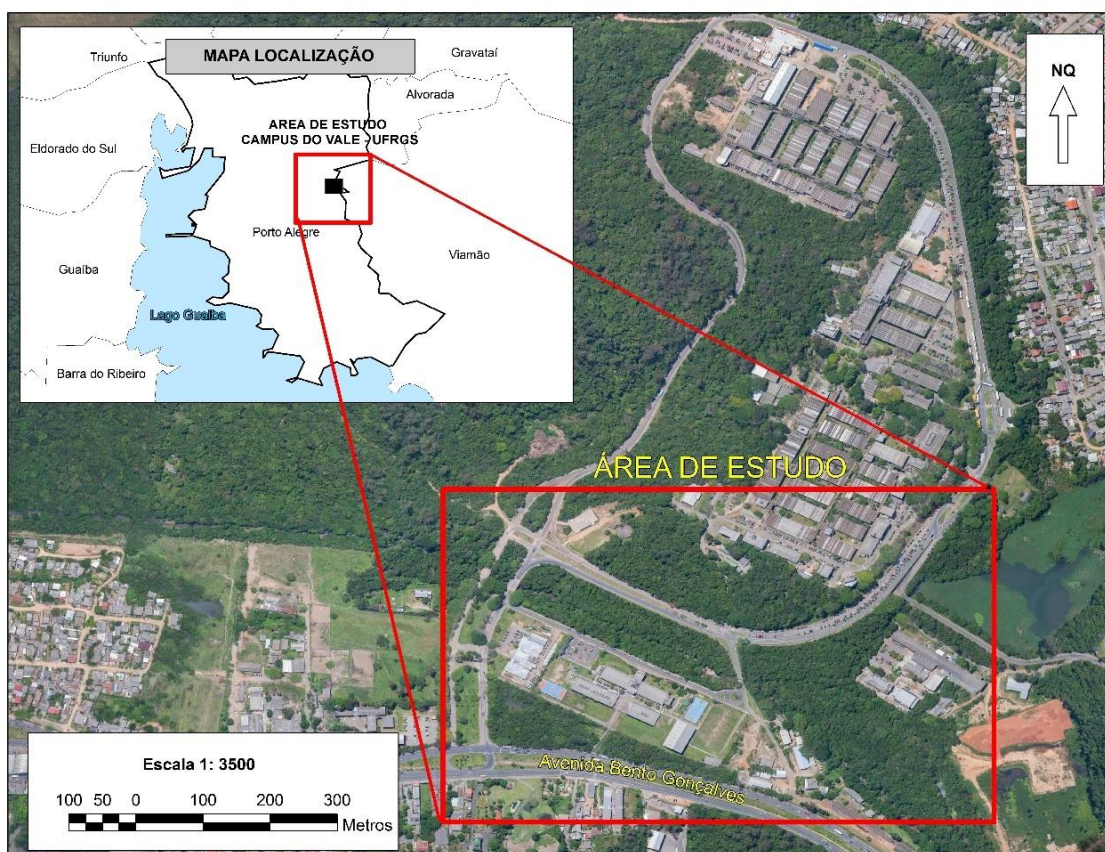
Também é muito comum na literatura nacional além da utilização dos PEC que amarra os erros obtidos a uma escala de trabalho, a utilização do teste de tendência utilizando a distribuição *t Student* e a estimativa de acurácia ou precisão a partir da distribuição χ^2 (qui-quadrado). Nesse contexto, Gallo e Camargo (1994), Rocha (2002) e Santos (2010) são exemplos de estudos desenvolvidos no Brasil envolvendo o CQP de produtos cartográficos. Pereira e Nero (2012) realizaram estudos que abordam o controle de qualidade posicional em outros países. Nesse estudo, os autores abordaram a metodologia de avaliação em pelo menos um país de cada continente. Foram avaliados como é realizado o CQP na África do Sul, Austrália, Brasil, Japão, México e Portugal. Interessante que o indicador estatístico utilizado para avaliar o CQP na Austrália, México e Portugal é o EMQ.

Olsen (2013) aborda aspectos referentes a utilização de dados *Lidar* em plataformas móveis na utilização de projetos rodoviários. O autor denomina esse tipo de dado adquirido de *Mobile Lidar*. E a avaliação do CQP é realizado de maneira análoga à do FGDC, ou seja, a partir do EMQ e separado em duas componentes denominadas de planimétrica e altimétrica.

3. EXPERIMENTOS REALIZADOS

Os experimentos realizados foram desenvolvidos no Campus do Vale da UFRGS, localizado no bairro Agronomia em Porto Alegre – RS, quase na divisa com o município de Viamão (Figura 31).

Figura 31 – Área de estudo dentro do município de Porto Alegre.

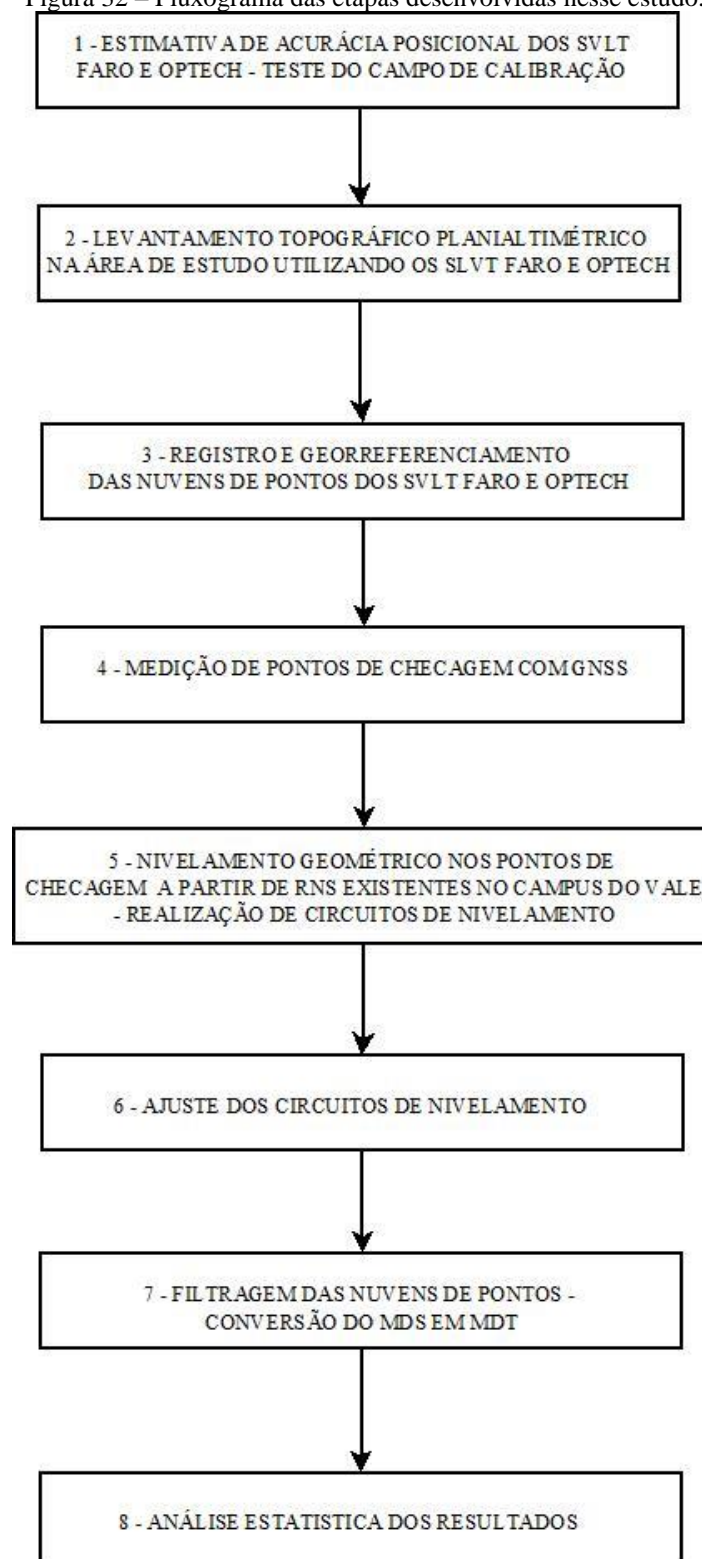


Fonte: Google Maps (2017).

Os experimentos realizados na área de estudo foram desenvolvidos em 8 (oito) etapas. O primeiro experimento, constante na etapa 1 da Figura 32, consiste num teste realizado num campo de calibração para se estimar a qualidade posicional dos dados brutos gerados pelos dois SVLT.

As etapas 2 e 3 do fluxograma, Figura 32, consistem num levantamento topográfico planialtimétrico com múltiplas varreduras utilizando os SVLT Faro e Optech. Na mesma etapa foi realizado o registro e o georreferenciamento das nuvens de pontos geradas.

Figura 32 – Fluxograma das etapas desenvolvidas nesse estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na etapa 4, da Figura 32, foram medidos 21 (vinte e um) pontos de checagem na área de estudo com tecnologia GNSS e na etapa 5 são realizados circuitos de nivelamento a partir de RN existentes no Campus do Vale na UFRGS, no caso as RN 3093F e 3093M,

e um marco de centragem forçada pertencente a rede geodésica municipal de Porto Alegre, o M17.

Na etapa 6, do fluxograma foi realizado o ajuste dos circuitos de nivelamento utilizando o método dos Correlatos com a finalidade de se obter a matriz de variância e covariância para poder estimar os desvios-padrões dos pontos de checagem nivelados no terreno.

Na etapa 7, foi realizada a filtragem das nuvens de pontos com o objetivo de converter o MDS em MDT. Na etapa 8, foram realizados testes estatísticos sobre o modelo digital de terreno visando estimar o CQP dos modelos digitais de terreno gerados pelos dois SVLT.

3.1 EXPERIMENTO EM UM CAMPO DE CALIBRAÇÃO

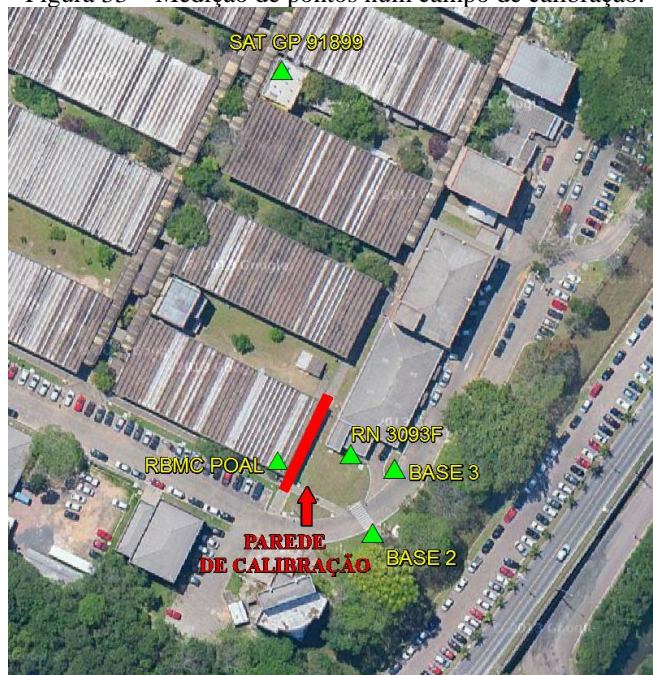
Inicialmente, foram medidas as coordenadas de dois marcos denominados de Base 3 e Base 2 (conforme Figura 33) que ficam a aproximadamente 25 (vinte e cinco) metros do campo de calibração localizada no Departamento de Geodésia no Campus do Vale da UFRGS.

As coordenadas desses marcos foram medidas a partir das Estações POAL da RBMC e da Estação SAT GPS 91899 do IBGE, utilizando o método relativo estático. O tempo de rastreamento deles foi de uma hora e meia. A Estação POAL fica a uma distância de 27 (vinte e sete) metros da Base 3 e a Estação SAT GPS91899 fica a 100 metros.

Após a determinação das coordenadas dos marcos, estacionou-se a estação total na Base 3 visou-se a ré na Base 2 e foram realizadas irradiações diretas entre a Base 3 e os alvos do campo de calibração. Esse procedimento foi realizado três vezes, sendo que cada vez a estação total foi desmontada de sua base e estacionada novamente de modo que houvesse variação de altura do instrumento. Após esse procedimento foi realizado a média aritmética simples de cada coordenada para cada ponto medido (nos três levantamentos) e esses valores foram adotados como valores de referência para os testes estatísticos realizados no campo de calibração.

Assim, foi realizado o primeiro experimento que teve a finalidade de se verificar a qualidade posicional das nuvens de pontos geradas pelos dois SVLT em um campo de calibração. Essa análise foi realizada utilizando uma nuvem de pontos de cada SVLT e os dados não sofreram nenhum tipo de filtragem, ou seja, a análise foi realizada nos dados brutos com a finalidade de se estimar o CQP nesse tipo de situação.

Figura 33 – Medição de pontos num campo de calibração.

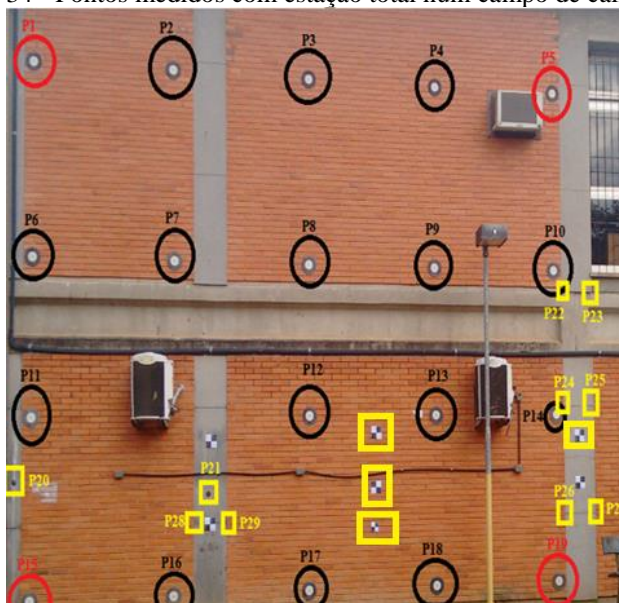


Fonte: Elaborado pelo autor.

A altitude ortométrica da Base 2 e Base 3 (Figura 33), foram determinadas utilizando nivelamento geométrico simples a partir da RN 3093F que fica a uma distância de 03 (três) metros da Base 3 e 17 (dezesete) metros da Base 2.

Ao todo, foram medidos 30 (trinta) pontos no campo de calibração com uma estação total modelo Topcon 7500, com precisão angular de 5" (cinco segundos) e linear de 10mm + 1ppm conforme Figura 34.

Figura 34 - Pontos medidos com estação total num campo de calibração.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir desses pontos medidos, foram utilizados quatro pontos (conforme Figura 35) para fazer o georreferenciamento das nuvens de pontos gerados pelos dois SVLT. A distância entre o SVLT e o campo de calibração é de 23 metros aproximadamente.

Figura 35 – Georreferenciamento das nuvens de pontos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os alvos em formato circular possuem diâmetro de 30 (trinta) centímetros e os alvos em formato de tabuleiros possuem a dimensão de 20 x 20 centímetros.

O software utilizado para fazer o georreferenciamento das nuvens de pontos foi o *Clodcompare* versão 2.8. A nuvem de pontos do SVLT faro possui 384.156 (trezentos e oitenta e quatro mil cento e cinquenta e seis) pontos e a nuvem do SVLT Optech possui 415.122 (quatrocentos e quinze mil cento e vinte e dois) pontos. Não foi utilizado nenhum processo de filtragem ou reamostragem dessas nuvens de pontos haja que o objetivo desse estudo é estimar o CQP dos dados brutos gerados pelos SVLT.

Assim, foram realizados testes estatísticos a partir das nuvens de pontos georreferenciadas com a finalidade de se estimar o CQP delas. Foi realizado o teste utilizando a distribuição *t* Student para a verificação da existência de erros sistemáticos nas nuvens de pontos. A estimativa de acurácia com intervalo de confiança de 95% foi realizada utilizando o método descrito pelo FGDC e também pela ASPRS utilizando as equações 22, 23 e 24. Na Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8, seguem as análises estatísticas realizadas a partir da média, desvio-padrão e EMQ encontradas.

Tabela 6 - Análise estatística do CQP utilizando o SVLT Optech.

OPTECH ILRIS 3D HD			
Discrepâncias (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Média (m)	-0,005	0,002	0,001
Desvio-Padrão (m)	0,008	0,008	0,007
Máximo (m)	0,010	0,022	0,024
Mínimo (m)	-0,023	-0,019	-0,014
Amostra	30	30	30
G. Liberdade (gl)	29	29	29
T Std Teórico	2,045	2,045	2,045
T Std Amostral	3,365	1,346	0,769
Tendencioso	SIM	NÃO	NÃO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 - Análise estatística do CQP utilizando o SVLT Faro.

FARO FOCUS 3D			
Discrepâncias (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
Média (m)	-0,0006	0,0002	0,0006
Desvio (m)	0,006	0,008	0,008
Máximo (m)	0,015	0,014	0,011
Mínimo (m)	-0,015	-0,017	-0,015
Amostra	30	30	30
G. Liberdade (gl)	29	29	29
T Std Teórico	2,045	2,045	2,045
T Std Amostral	0,539	0,135	0,403
Tendencioso	NÃO	NÃO	NÃO

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Acurácia planimétrica e altimétrica conforme o FGDC.

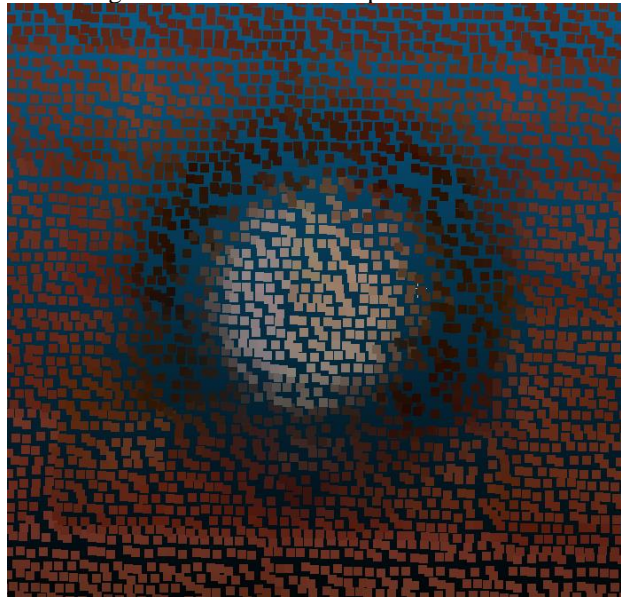
ACURÁCIA	SVLT FARO	SVLT OPTECH
Acurácia Plan. (m)	0,016	0,021
Acurácia Alt. (m)	0,015	0,013

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se que a estimativa do valor da acurácia utilizando a equação 21, que utiliza a distribuição χ^2 , não obteve valores compatíveis com as acurácias descritas nos manuais dos SVLT Optech e Faro. As acurácias instrumentais constantes nos manuais dos SVLT Optech e Faro são respectivamente de 4 a 7 mm para distâncias de até 100 metros e de 2 mm para distâncias de até 25 metros. Esperava-se que as acurácias obtidas fossem superiores a 2 mm para o SVLT Faro e 4 mm do SVLT Optech. Os valores de acurácia obtidos nessas tabelas foram muito inferiores (muito abaixo do milímetro) aos valores constantes nos manuais dos equipamentos. Esse fato demonstra que a determinação da acurácia das nuvens de pontos através da distribuição χ^2 não é um bom

estimador para a acurácia de dados gerados a partir de SVLT. Uma possível explicação para isso pode ser em função da grande quantidade de pontos que cada SVLT gera em cada alvo. Por exemplo, na Figura 36, nos alvos circulares com diâmetro de 30 centímetros o SVLT Optech gerou 1014 (mil e quatorze) pontos enquanto o SVLT Faro gerou 865 (oitocentos e sessenta e cinco) pontos.

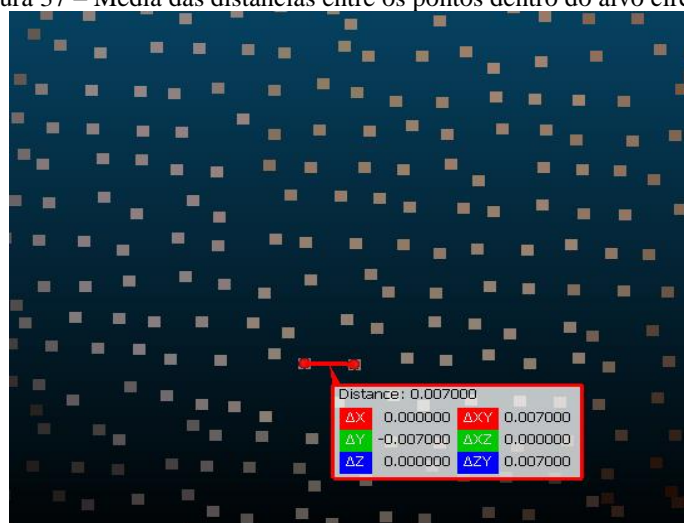
Figura 36 – Densidade de pontos nos alvos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A média das distâncias entre cada ponto dentro dos alvos circulares foi de 7 mm para o SVLT Optech e de 2 mm para o SVLT Faro, conforme Figura 37

Figura 37 – Média das distâncias entre os pontos dentro do alvo circular.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados da Tabela 8, são analisados a partir do EMQ das discrepâncias entre cada componente analisada. São resultados que variaram entre 1,5 e 2,1 cm de acurácia planimétrica para os SVLT Faro e Optech e entre 1,5 e 1,3 cm de acurácia altimétrica para os SVLT Faro e Optech.

3.2 LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO COM OS SVLT

O segundo experimento consiste num levantamento topográfico planialtimétrico no Campus do Vale na UFRGS utilizando os dois SVLT. O critério utilizado para o posicionamento de cada estação onde os SVLT Faro e Optech foi baseado na distância e intervisibilidade entre as estações. A distância foi baseada na acurácia nominal de cada equipamento, assim procurou-se adotar como distância padrão entre cada varredura do SVLT Faro de 50 metros e o SVLT Optech de 100 metros. Porém, foram realizados mais escaneamentos visando obter-mais visibilidade entre as estações para o posterior registro das nuvens de pontos. Outro critério utilizado para a utilização dessas distâncias foi a o diâmetro de varredura gerado por cada pulso laser gerado por cada sistema de varredura. A partir da Equação 4, para distâncias de 50 e 100 metros para cada SVLT os diâmetros de varredura gerados para um ângulo de abertura de 40° correspondem a 1,6 cm para o SVLT Faro e 2,5 cm para o SVLT Optech.

Também poderia-se realizar uma adaptação da Equação 4 para se fazer um estudo preliminar para a determinação das distâncias em cada estação onde os SVLT Faro e Optech deveriam ser posicionadas.

$$R = \frac{d'}{\gamma} \cdot \cos^2(\theta) \quad (25)$$

Onde:

R = Distância entre o SVLT e o alvo;

d' = Diâmetro do círculo projetado;

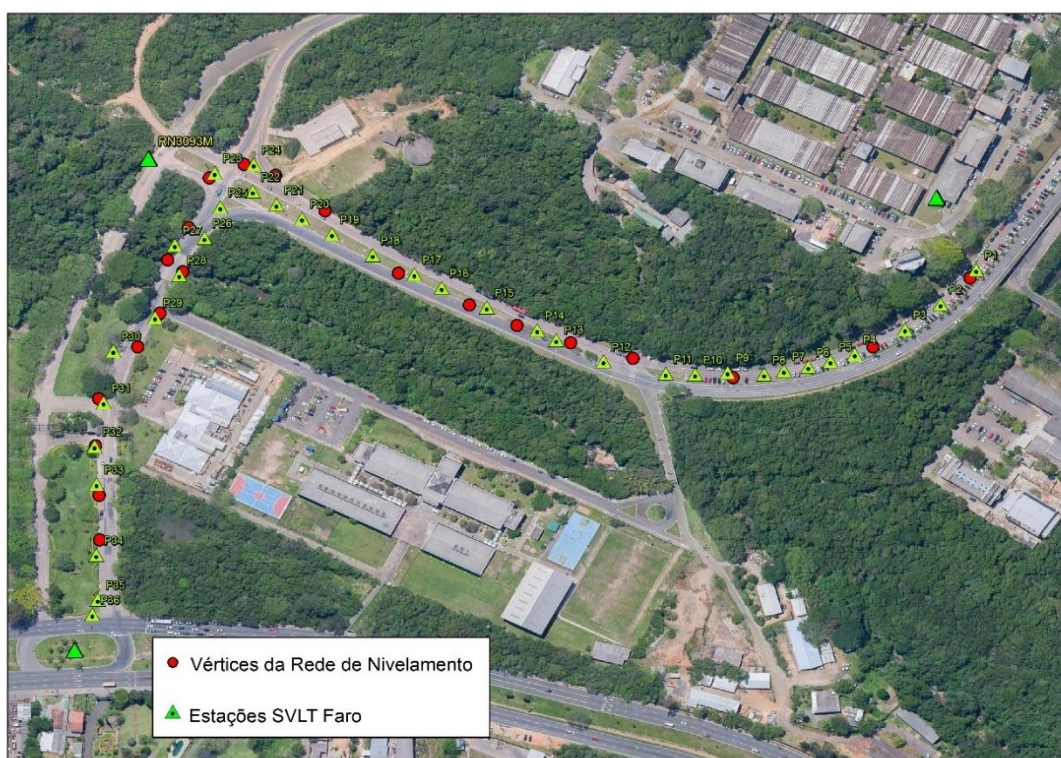
γ = Divergência do feixe laser.

θ = Ângulo de varredura.

Caso o profissional ou usuário desejasse um diâmetro de varredura de pulso laser (d') de 2 cm para um ângulo de varredura de 40° (θ), a distância (R) entre cada estação

de varredura seria, utilizando a Equação 25, de 78,27 m para o SVLT Optech e 61,15 m para o SVLT Faro. Na Figura 38 consta as estações onde foram realizados os escaneamentos do SVLT Faro. Outro aspecto a ser considerado, é que a Equação 25 estima a distância, porém deve haver sobreposição e intervisibilidade entre as nuvens de pontos já que o algoritmo que efetua o registro das cenas utiliza esse fator, no caso a sobreposição entre as estações, para efetuar o registro.

Figura 38 – Estações de escaneamento do SVLT Faro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A distância média entre as estações onde foram efetuadas as varreduras com o SVLT Faro e os vértices da rede de nivelamento foi de 40 metros. Foi adotado esse parâmetro, no caso uma distância média de 40 metros até os vértices da rede de nivelamento, para minimizar o tamanho do diâmetro de varredura gerado por cada pulso *Lidar*. Em relação ao SVLT Optech, as distâncias entre cada estação de varredura foi de 90 (noventa) metros e a distância média entre cada estação de varredura e os vértices da rede de nivelamento foi de 50 metros.

Com o SVLT Faro foram executadas 36 (trinta e seis) varreduras, conforme Figura 39. A distância média entre cada estação escaneada foi de 40 metros. O georreferenciamento do SVLT Faro é diferente do SLVT Optech.

Figura 39 - Estações de escaneamento do SVLT Optech.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse sistema primeiramente são realizadas várias varreduras com uma região de sobreposição entre elas. A partir de feições homólogas existentes entre duas cenas são medidos pontos de ligação entre cada varredura. Esses pontos de ligação são medidos nas fotografias tiradas pelo sistema de varredura.

Esses pontos homólogos foram medidos basicamente nas placas de sinalização vertical, na sinalização horizontal e nos postes. O registro das nuvens de pontos que consiste na conexão de uma nuvem com outra foi realizado utilizando o software *Faro Scene 5.1*.

Em diversos estudos o registro de nuvens de pontos é realizado com a utilização de alvos em formatos quadrangulares ou através de esferas. Porém, em regiões urbanas onde existam feições que possuam feições poligonares, como paredes e placas de sinalização rodoviária, pode-se utilizar essas feições como alvos naturais existentes no

terreno. Na Figura 40, há um exemplo de pontos de ligação entre estações de escaneamento.

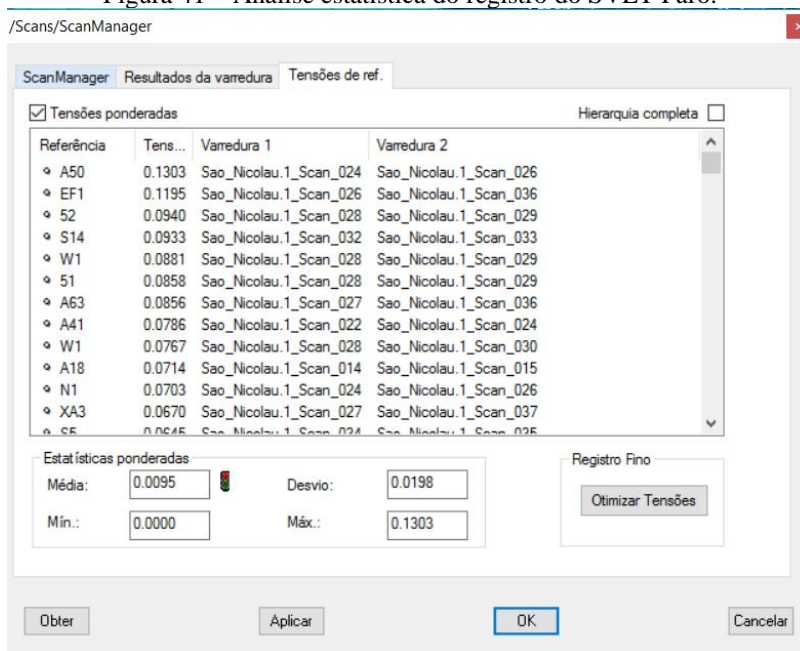
Figura 40 – Ponto de ligação entre nuvens de pontos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o registro, o software de processamento fornece uma análise estatística do registro das diversas nuvens de pontos que sofreram o processo de registro, conforme a Figura 41. Pode-se notar que a análise estatística é bem parecida com os softwares tradicionais de Fotogrametria como o *Erdas LPS* e o *Agisoft Photoscan*.

Figura 41 – Análise estatística do registro do SVLT Faro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A única diferença em comparação com os softwares fotogramétricos citados é que o *Faro Scene* não fornece o resultado do registro das nuvens de pontos em função do Erro Médio Quadrático. Para realizar o registro ele usa uma transformação de isogonal com três translações, três rotações e o fator de escala igual a um.

Após o registro das nuvens de pontos foram medidos 12 pontos de controle. Esses pontos foram obtidos juntamente com o escaneamento conforme Figura 42.

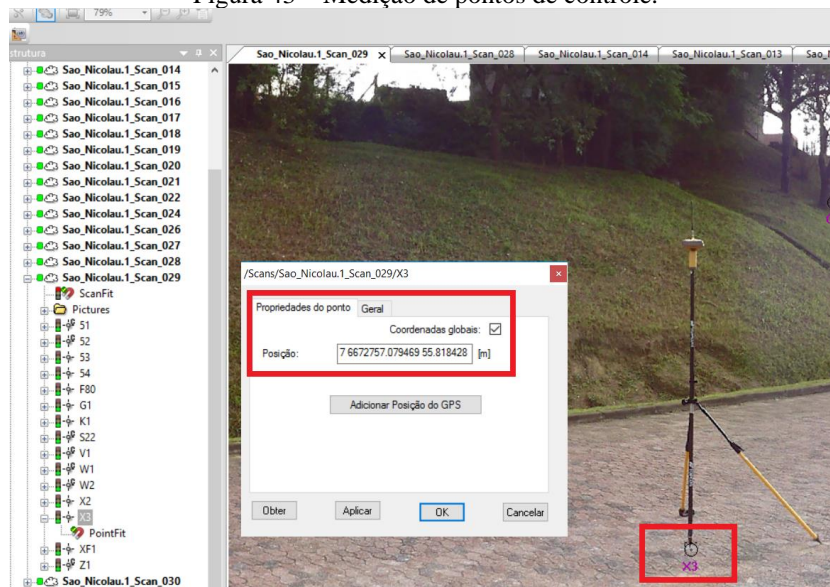
Figura 42 - Georreferenciamento do SVLT Faro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma característica do SVLT Faro é que os pontos de ligação, controle e de checagem podem ser medidos nas fotografias, conforme Figura 43, e a partir deles pode-se efetuar o registro e georreferenciamento de todas as nuvens que fazem parte do levantamento.

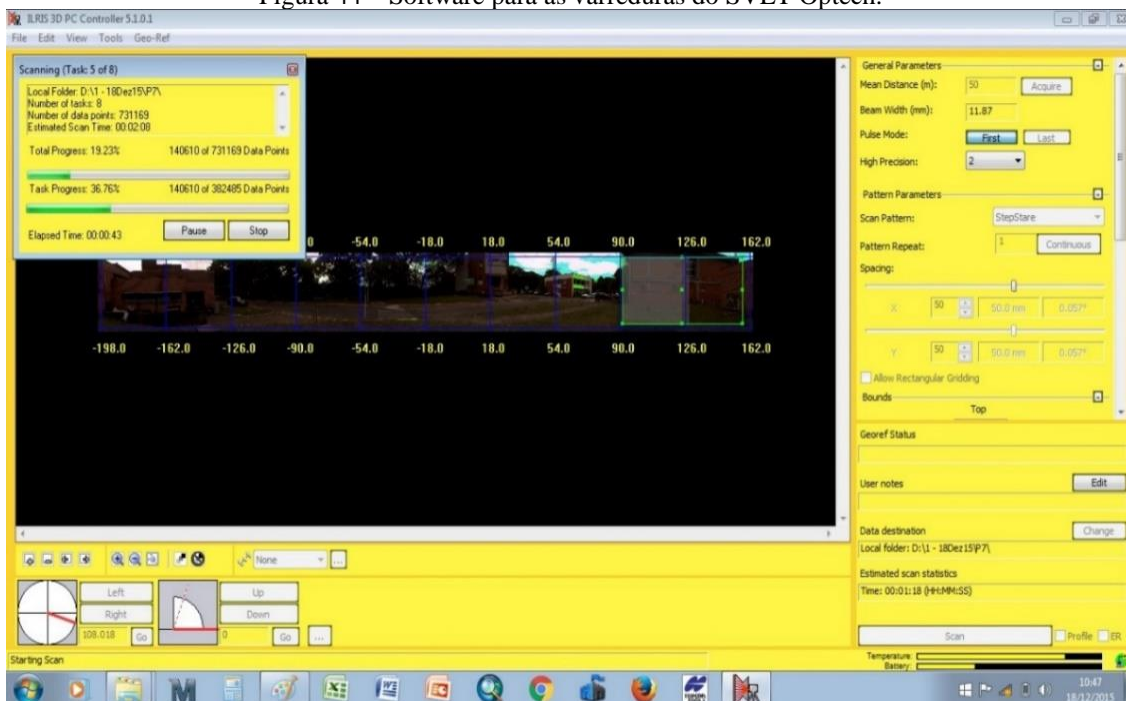
Figura 43 – Medição de pontos de controle.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o SVLT Optech foram executadas 13 (treze) varreduras com uma distância média entre cada estação de 90 (noventa) metros. Em relação ao SVLT Faro, o SVLT Optech é bem diferente, tanto na medição dos pontos quanto no pós-processamento.

Figura 44 – Software para as varreduras do SVLT Optech.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Primeiramente, o SVLT Optech necessita de um software que faça a conexão do sistema de varredura com um notebook. Nesse software, *PC Controller*, Figura 44, pode-se determinar vários parâmetros como a densidade mínima e máxima de pontos, modos de medição e se o usuário deseja utilizar o primeiro ou último pulso laser durante o escaneamento. Isso é de grande importância pois utiliza-se o último pulso em dias nublados ou em condições de névoa ou muita poeira.

Existe também um parâmetro que também pode-se configurar nesse software, que é denominado de alta precisão. Esse parâmetro pode ser configurado com os valores zero, dois, quatro e oito. Onde o valor zero informa que ele registra apenas o pulso refletido. O parâmetro dois mede duas vezes o pulso refletido e registra a média desses valores. Para os valores 4 e 8 cada pulso é medido 4 e 8 vezes e o valor registrado pelo SVLT é a média deles. Nesse experimento foi utilizado o parâmetro dois.

A questão da escolha do pulso tem importância já que o SVLT mede uma resposta diferente sob diferentes condições climáticas.

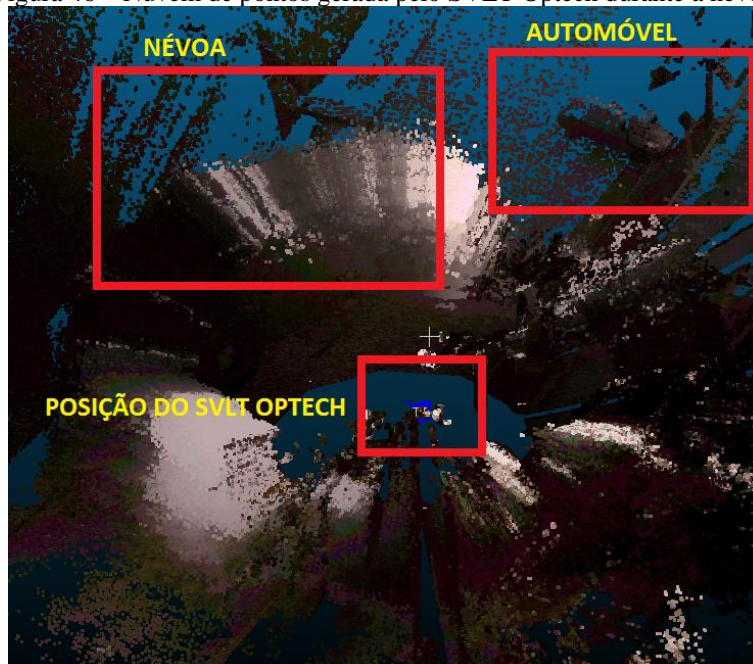
Figura 45 – Automóvel escaneado durante uma névoa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 45, há um exemplo de um automóvel que acabou sendo escaneado durante uma névoa por volta das nove horas da manhã. Nesse caso foi utilizado o primeiro pulso laser como modo de medição. Na Figura 46, nota-se que se criou um círculo de pontos ao redor do SVLT durante essa varredura.

Figura 46 – Nuvem de pontos gerada pelo SVLT Optech durante a névoa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Diferentemente do SVLT Faro, onde podia-se medir pontos nas fotografias, o registro e o georreferenciamento das nuvens de pontos do SVLT Optech é realizado a partir da posição do SVLT no terreno. Existe um parâmetro que vem no manual do sistema de varredura que é um valor que funciona como se fosse o bastão do GNSS. Assim a distância do centro de fase do SVLT Optech até a base do GNSS, conforme Figura 47, é o valor de 0,315 m.

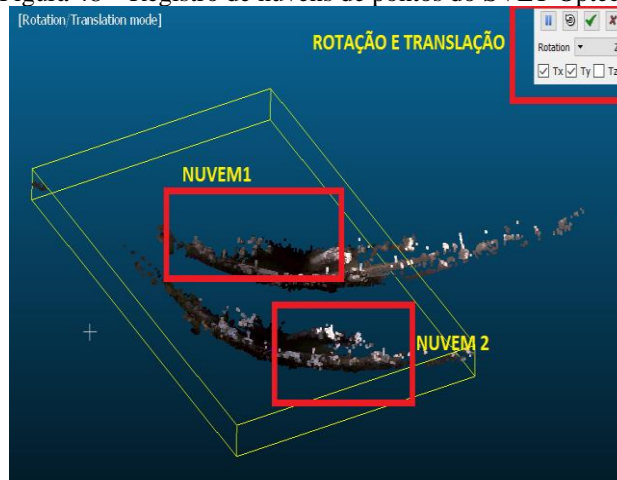
Figura 47 – Georreferenciamento de nuvens de pontos no SVLT Optech.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a realização do registro, as nuvens foram transladadas manualmente a partir de seus eixos até que elas estivessem bem próximas umas das outras, conforme Figura 48.

Figura 48 – Registro de nuvens de pontos do SVLT Optech.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após essa etapa, o software realiza um processo iterativo buscando pontos comuns entre cada cena escaneada pelo SVLT. O registro, ou seja, a junção de pares de nuvens de pontos é realizada através do algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*). As nuvens de pontos são transladadas manualmente até ficarem próximas umas das outras e define-se um valor de EMQ e iterações para que o algoritmo realize o reconhecimento por proximidade e efetue o registro.

Após o registro, utilizou-se a posição do SVLT no terreno para a realização do georreferenciamento das de cada cena escaneada, conforme Figura 49.

Figura 49 – Posição do SVLT Optech na nuvem de pontos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

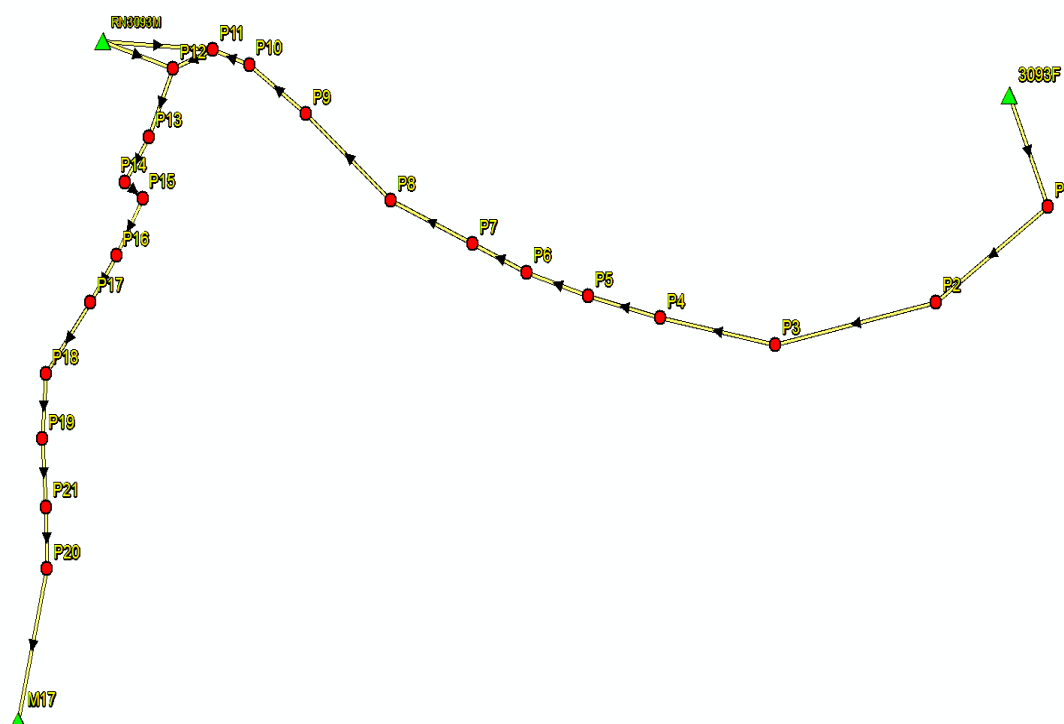
Assim os dois SVLT possuem vantagens e desvantagens que serão abordadas nos próximos tópicos. Mas a principal vantagem do SVLT Faro é que o registro, pontos de ligação entre nuvens de pontos e o georreferenciamento podem ser medidos nas fotografias tiradas pelo sistema.

Em relação ao SVLT Optech a principal vantagem dele é que o processo de registro e georreferenciamento de nuvens de pontos pode ser executado em *software* livre, no caso o *Cloudcompare* versão 2.8.

3.3 CRIAÇÃO DE CIRCUÍTO DE NIVELAMENTO

Os nivelamentos geométricos executados foram gerados a partir das RN 3093F e 3093M. Também foi utilizado o M17 que é um marco de centragem forçada da rede geodésica pertencente ao município de Porto Alegre. Esse marco geodésico, M17, possui altitude ortométrica com desvio-padrão na sua monografia.

Figura 50 – Circuitos de nivelamento executados no Campus do Vale.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As RN 3093F e 3093M (Figura 50) pertencem a rede do IBGE. Porém o desvio-padrão dessas duas RN é de 6 cm. Para trabalhos de altimetria de alta precisão, ou nivelamento geométrico para redes de 1ª ordem, esses valores de desvio-padrão são considerados muito altos.

Assim, optou-se pela criação vários circuitos de nivelamento conforme a Figura 50, onde os pontos em vermelho são os vértices da rede de nivelamento e os triângulos verdes correspondem às RN 3093F, 3093M e o M17. O percurso total nivelado, a partir da RN 3093F até o M17 é de aproximadamente 1 km.

As coordenadas planimétricas dos vértices da rede de nivelamento foram obtidas através de rastreamento de pontos utilizando tecnologia GNSS.

Figura 51 – Nivelamento geométrico – marco M17.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 51 mostra o marco M17 que pertence a um dos trajetos executados nos circuitos de nivelamento. Na Figura 52, consta o nível eletrônico, modelo DL 202, com precisão de 1,5 mm/km com utilização de mira com código de barras.

Figura 52 – Nível eletrônico utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Optou-se também por efetuar o ajustamento dessa rede de nivelamento para se determinar a estimativa de qualidade posicional do nivelamento geométrico a partir da matriz de variância e covariância. O método utilizado para se determinar o ajustamento dessa rede foi o método das equações de condição ou método dos correlatos. Optou-se por utilizar esse método em função de a matriz dos pesos das observações desse método

levar em consideração as distâncias entre os vértices da rede e por ser um método onde apenas as observações são ajustadas.

Na Tabela 9, consta os dados que serviram de base para o ajuste da rede de nivelamento, no caso os desníveis entre cada vértice dos diversos circuitos efetuados e a distâncias entre eles.

Tabela 9 – Dados da rede de nivelamento.

Observação	Percurso	Desníveis (m)	Distância (Km)
LB1	RN3093F-P1	-10,319	0,079
LB2	P1-P2	-1,939	0,074
LB3	P2-P3	-4,138	0,085
LB4	P3-P4	-3,479	0,061
LB5	P4-P5	-1,360	0,038
LB6	P5-P6	-0,807	0,034
LB7	P6-P7	-0,472	0,031
LB8	P7-P8	-0,386	0,047
LB9	P8-P9	-0,376	0,061
LB10	P9-P10	-0,051	0,038
LB11	P10-P11	0,240	0,020
LB12	P11-P12	0,316	0,022
LB13	P12-P13	-0,266	0,036
LB14	P13-P14	0,159	0,025
LB15	P14-P15	-0,102	0,012
LB16	P15-P16	-0,656	0,031
LB17	P16-P17	0,126	0,026
LB18	P17-P18	-0,226	0,042
LB19	P18-P19	-0,255	0,032
LB20	P19-P21	0,211	0,034
LB21	P21-P20	-0,286	0,030
LB22	P20-M17	3,643	0,119
LB23	RN3093M-P12	0,390	0,049
LB24	RN3093M-P11	0,065	0,071
LB25	M17 - P18	-3,299	0,213
LB26	P3 - RN3093F	16,391	0,190
LB27	RN3093M - RN3093F	23,154	0,468
LB28	M17 - RN3093M	-2,675	0,379

Fonte: Elaborado pelo autor.

A precisão adotada para esse nivelamento, a partir da Tabela 9, foi utilizada como $4 \text{ mm}\sqrt{K}$, onde K corresponde a distância em quilômetro dos vértices dos circuitos de nivelamento. O fator 4 mm foi adotado em função da acurácia nominal em comum de cada instrumento que é de 2 mm para o SVLT Faro e de 4mm para o SVLT Optech.

Na Tabela 10, consta os dados adotados como condições de equação. Foram adotadas cinco condições de equação. Num levantamento isento de erros, a soma dos desníveis de cada circuito fechado deveria ser zero. Como existem diversos erros inerentes ao levantamento essa diferença é denominada de vetor erro de fechamento.

Tabela 10 – Equações de condição.

EQ1	LB1+LB2+LB3+LB4+LB5+LB6+LB7+LB8+LB9+LB10+LB11-LB24+LB27
EQ2	LB23-LB12-LB24
EQ3	LB19+LB20+LB21+LB22+LB25
EQ4	LB1+LB2+LB3+LB26
EQ5	LB12+LB13+LB14+LB15+LB16+LB17+LB18+LB19+LB20+LB21+LB22+LB28

Fonte: Elaborado pelo autor.

As coordenadas planimétricas, medidas com GNSS, dos vértices dos circuitos de nivelamento encontram-se na Tabela 11. O método de medição dessas coordenadas foi o método relativo estático. O Software utilizado foi o Topcon Tools versão 8.2.3.

Tabela 11 – Coordenadas dos vértices dos circuitos de nivelamento.

Ponto	Coord Este (m)	Coord Norte (m)	σE (m)	σN (m)
P1	488493,471	6672958,210	0,006	0,006
P2	488436,042	6672911,341	0,012	0,017
P3	488353,364	6672890,355	0,015	0,020
P4	488294,223	6672903,349	0,005	0,005
P5	488257,330	6672914,035	0,003	0,003
P6	488225,567	6672925,709	0,003	0,003
P7	488197,585	6672939,651	0,003	0,003
P8	488155,568	6672961,007	0,003	0,003
P9	488112,124	6673003,457	0,005	0,005
P10	488082,919	6673027,637	0,004	0,004
P11	488064,076	6673035,010	0,007	0,007
P12	488043,673	6673025,660	0,004	0,004
P13	488031,442	6672992,036	0,004	0,005
P14	488019,100	6672970,006	0,006	0,006
P15	488028,095	6672961,992	0,015	0,009
P16	488014,619	6672933,830	0,003	0,003
P17	488001,472	6672910,967	0,003	0,003
P18	487978,465	6672875,508	0,004	0,004
P19	487976,595	6672843,558	0,007	0,007
P20	487979,158	6672779,713	0,003	0,003
P21	487978,748	6672810,052	0,003	0,003

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Matriz B, o vetor das Observações ajustadas – La, a matriz peso das observações – P, encontram-se no anexo bem como a análise da qualidade do ajustamento e a estimativa do fator de variância a posteriori.

Nas coordenadas planimétricas, nos pós processamento dos dados GNSS, é possível obter o valor do desvio-padrão de cada componente. Em relação aos dados altimétricos o valor do desvio-padrão é obtido a partir da matriz de variância e covariância dos dados ajustados, no caso os pontos nivelados, conforme Tabela 12.

Tabela 12 – Altitudes ajustadas com seus desvios-padrões.

Ponto	Alt Ort. H (m)	σ_H (m)
P1	52,403	0,0008
P2	50,465	0,0008
P3	46,328	0,0008
P4	42,849	0,0005
P5	41,489	0,0003
P6	40,682	0,0003
P7	40,209	0,0003
P8	39,823	0,0004
P9	39,447	0,0005
P10	39,396	0,0003
P11	39,636	0,0002
P12	39,954	0,0004
P13	39,690	0,0003
P14	39,851	0,0003
P15	39,750	0,0002
P16	39,096	0,0003
P17	39,223	0,0003
P18	38,999	0,0004
P19	38,742	0,0004
P20	38,952	0,0005
P21	38,664	0,0004

Fonte: Elaborado pelo autor.

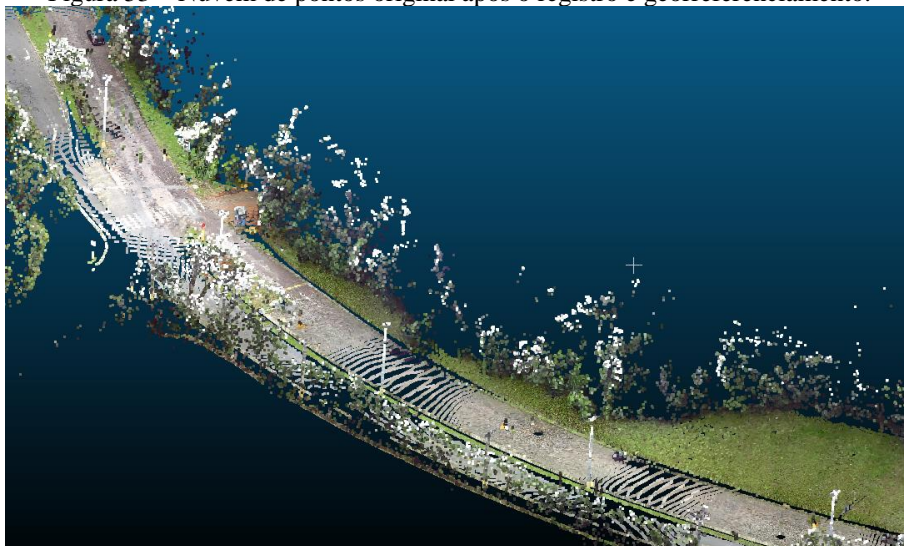
3.4 FILTRAGEM DAS NUVENS DE PONTOS

Após a determinação das coordenadas tridimensionais ajustadas obtidas através de nivelamento geométrico, antes de se realizar os testes estatísticos, foi necessário executar a filtragem das nuvens de pontos para transformar o MDS em MDT,

A filtragem das nuvens de pontos geradas foi realizada utilizando o software livre *Cloudcompare*. O filtro utilizado foi o *CSF Plugin (Cloth Simulation Filter)*.

Basicamente essa ferramenta executa uma filtragem de nuvem de pontos convertendo MDS em MDT. A descrição desse tipo de filtragem encontra-se o item 2.3 desse trabalho.

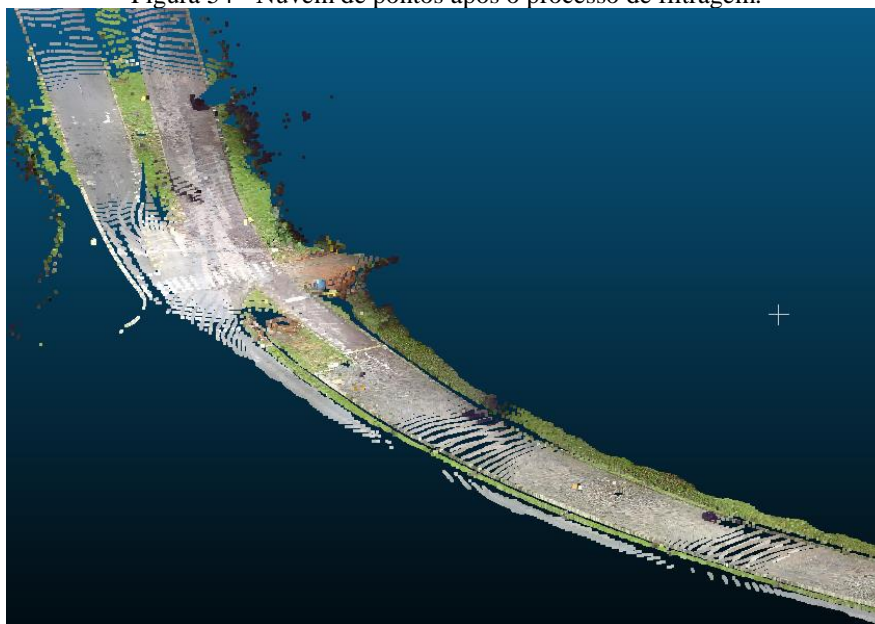
Figura 53 – Nuvem de pontos original após o registro e georreferenciamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para se gerar o MDT a partir do *CSF Filter* no software *Cloudcompare* foram adotados os parâmetros básicos descritos em Zhang (2016). Na Figura 53, há o exemplo da nuvem de pontos original, no caso, após o registro e georreferenciamento. A Figura 54 demonstra o MDT gerado após o processo de filtragem.

Figura 54 - Nuvem de pontos após o processo de filtragem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que todas as feições acima do solo como postes e vegetação constituem o MDS. Basicamente o algoritmo de filtragem funciona invertendo o eixo de elevação do terreno e a partir desse processo traça uma linha contínua em cima do terreno invertido. Essa linha o algoritmo ICP interpreta como sendo os pontos de terreno que posteriormente irão gerar o MDT.

3.5 ESCOLHA DOS PONTOS DE CHECAGEM PARA O CQP

Para a realização do controle de qualidade posicional das nuvens de pontos geradas pelos dois SVLT foram selecionados 21 (vinte e um) pontos no percurso de nivelamento. Os mesmos foram medidos em feições identificáveis nas nuvens de pontos no SVLT Optech e nas fotografias tiradas no SVLT Faro, conforme a Figura 55 e Figura 56.

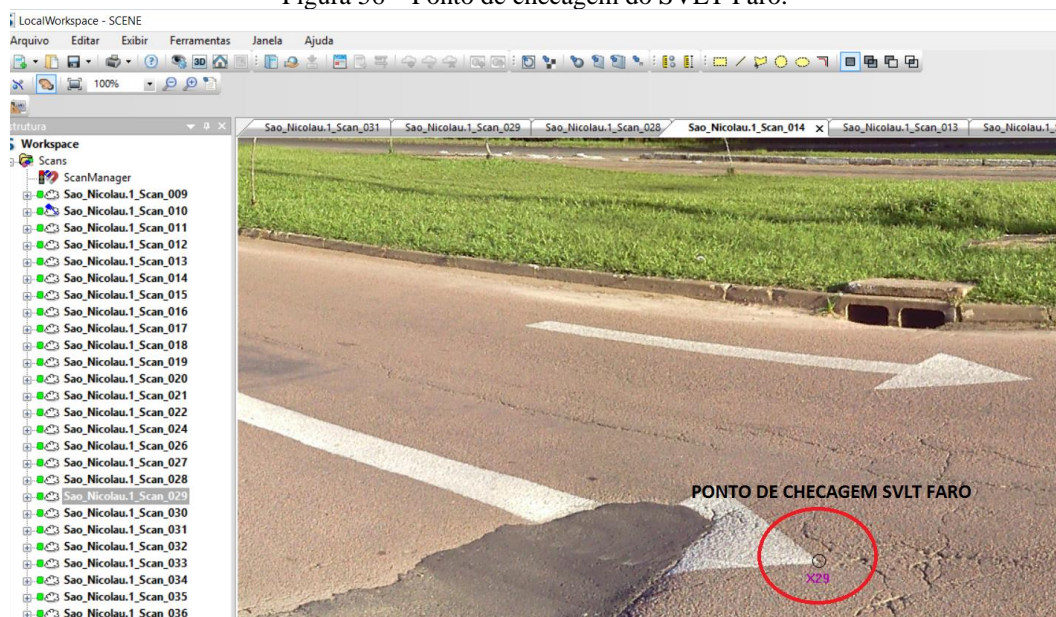
Figura 55 – Pontos de checagem do SVLT Optech.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os pontos de checagem foram medidos em feições facilmente identificáveis no terreno como as faixas de pedestres e as faixas de sentido de fluxo ao longo do percurso de nivelamento.

Figura 56 – Ponto de checagem do SVLT Faro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os testes estatísticos utilizados para a estimativa de qualidade posicional foram os mesmos descritos no teste do campo de calibração do tópico 3.1. Assim, os dados foram analisados a partir das discrepâncias de cada componente (coordenada E, N e H). Adotando como dados de referência na planimetria os pontos medidos a partir de rastreamento GNSS e da altimetria os pontos da rede de nivelamento ajustados.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

O CQP no Brasil, como já foi mencionado anteriormente, é regulado pelo Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984. Porém esse decreto além de ser antigo considera equivalentes desvio-padrão, erro-padrão e EMQ. Para a determinação do erro padrão utiliza-se uma escala de trabalho, que não é o foco da análise desse estudo.

Assim, as análises dos resultados obtidos foram baseadas utilizando o EMQ já que o objetivo principal deste trabalho é estimar a acurácia dos dados altimétricos gerados pelos dois SVLT. O valor da acurácia foi estimado a partir do método utilizado pelo padrão Americano descrito pelo FGDC (Miller, 2004) e também pela ASPRS (2014). Inicialmente foram calculadas as discrepâncias dos dados altimétricos obtidos pelo SVLT Faro em comparação com os dados obtidos por nivelamento geométrico, conforme Tabela 13.

Tabela 13 – Discrepâncias das coordenadas Altimétricas do SVLT Faro.

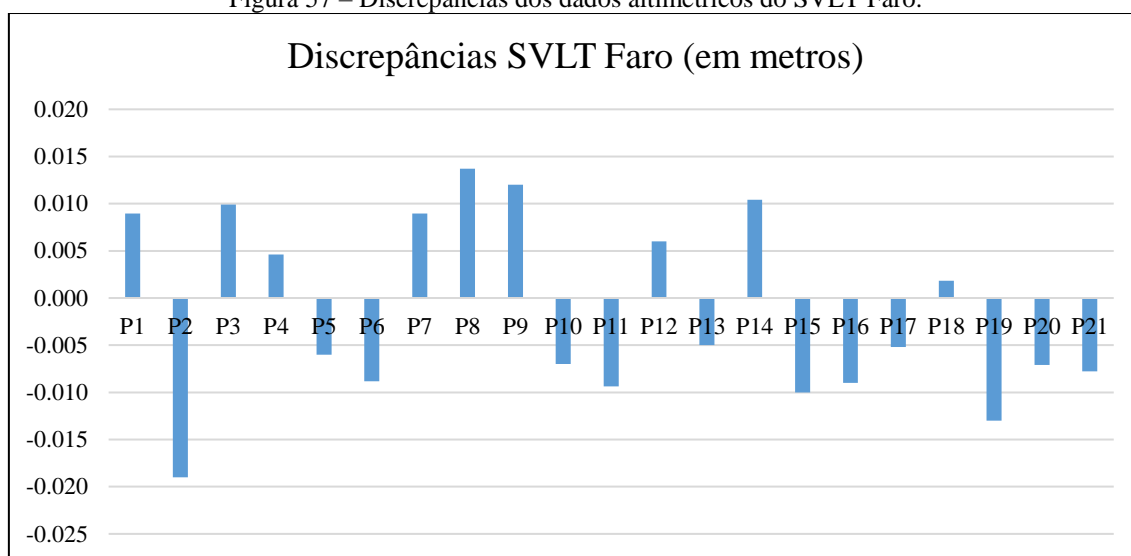
Ponto	Δh (m)
P1	0,009
P2	-0,019
P3	0,010
P4	0,005
P5	-0,006
P6	-0,009
P7	0,009
P8	0,014
P9	0,012
P10	-0,007
P11	-0,009
P12	0,006
P13	-0,005
P14	0,010
P15	-0,010
P16	-0,009
P17	-0,005
P18	0,002
P19	-0,013
P20	-0,007
P21	-0,008

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir dos dados obtidos na Tabela 13, nota-se que os valores de discrepâncias ficaram, em valores absolutos, entre 2 mm e 1,9 cm.

Na Figura 57, há uma demonstração gráfica das discrepâncias de ponto a ponto, de todos os vértices da rede de nivelamento em comparação com os dados obtidos a partir das varreduras efetuadas com o SVLT Faro. Os pontos que apresentaram maiores valores de discrepância foram os pontos 2, 8 e 19. Os que apresentaram menores valores de discrepância foram os pontos 4, 5 e 18.

Figura 57 – Discrepâncias dos dados altimétricos do SVLT Faro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 14, há um resumo dos dados estatísticos a partir das discrepâncias analisadas na Tabela 13. Não foi utilizado os testes a partir da Tabela χ^2 (Qui-Quadrado) haja vista que os mesmos forneceram informações muito inferiores àquelas compatíveis com a acurácia do equipamento.

Tabela 14 – Análise estatística das discrepâncias (em metros) do SVLT Faro.

Tamanho da Amostra	21
Graus de Liberdade	20
Média	-0,001
Desvio-Padrão	0,010
Variância	0,000
EMQ	0,009
EMQ FGDC/ASPRS (IC95%)	0,019
t Student Calc	0,685
t Student Teórico	2,086

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi utilizado a distribuição t Student para a verificação da existência de componente sistemática nos dados altimétricos oriundos a partir do SVLT Faro. Nota-se que por esse teste, não existe componente sistemática nos dados altimétricos gerados a partir do SVLT Faro.

Logo, baseado nos dados da Tabela 13 e Tabela 14, a acurácia dos dados altimétricos gerados a partir do SVLT Faro é de 1,9 cm.

Os dados referentes as discrepâncias dos dados altimétricos encontrados no SVLT Optech encontram-se na Tabela 15. Em comparação com os mesmos dados em relação ao SVLT Faro nota-se um acréscimo nos valores obtidos já que o menor valor observado foi de 7 mm e o maior valor obtido foi de 6,1 cm.

Tabela 15 - Discrepâncias das coordenadas Altimétricas do SVLT Optech.

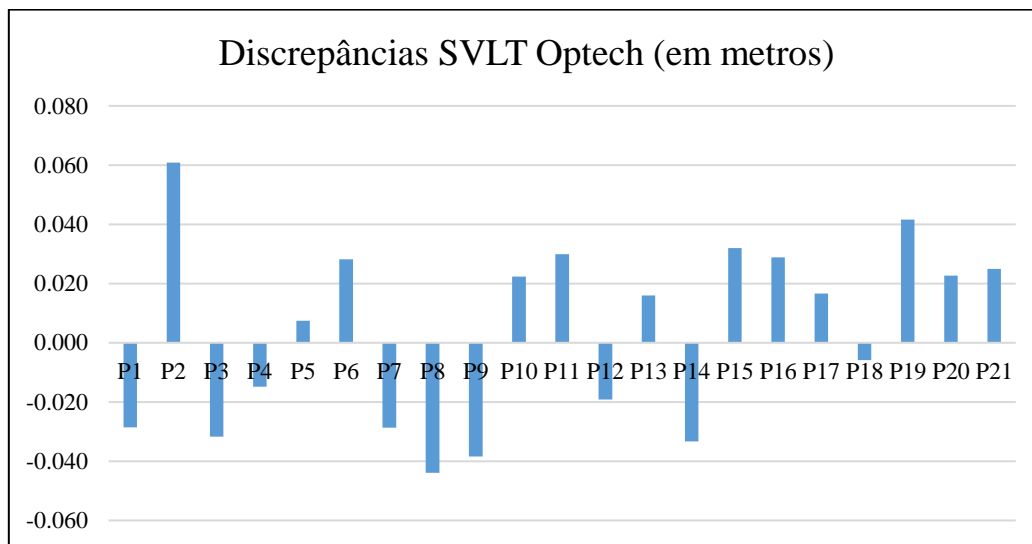
Ponto	Δh (m)
P1	-0,029
P2	0,061
P3	-0,032
P4	-0,015
P5	0,007
P6	0,028
P7	-0,029
P8	-0,044
P9	-0,038
P10	0,022
P11	0,030
P12	-0,019
P13	0,016
P14	-0,033
P15	0,032
P16	0,029
P17	0,017
P18	-0,006
P19	0,042
P20	0,023
P21	0,025

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 58, nota-se que os pontos que apresentaram maiores discrepâncias foram os pontos 2, 8, 14 e 19. Os pontos 4, 5 e 18 foram os que apresentaram menores valores de discrepância. De todos os experimentos realizados o ponto P2 foi o que apresentou maior valor de discrepância de todos. No início dos levantamentos com o

SVLT Optech havia muita névoa, assim estima-se que isso tenha afetado no processo de medição de coordenadas do ponto P2 conforme a Figura 58.

Figura 58 - Discrepâncias dos dados altimétricos do SVLT Optech.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 16, há um resumo dos dados estatísticos analisados em relação ao SVLT Optech. A partir do Teste T, nota-se que não existe componente sistemática nos dados altimétricos oriundos a partir do SVLT Optech.

Tabela 16 - Análise estatística das discrepâncias (em metros) do SVLT Optech.

Tamanho da Amostra	21
Graus de Liberdade	20
Média	0,004
Desvio-Padrão	0,031
Variância	0,001
EMQ	0,030
EMQ FGDC/ASPRS (IC95%)	0,059
t Student Calc	0,607
t Student Teórico	2,086

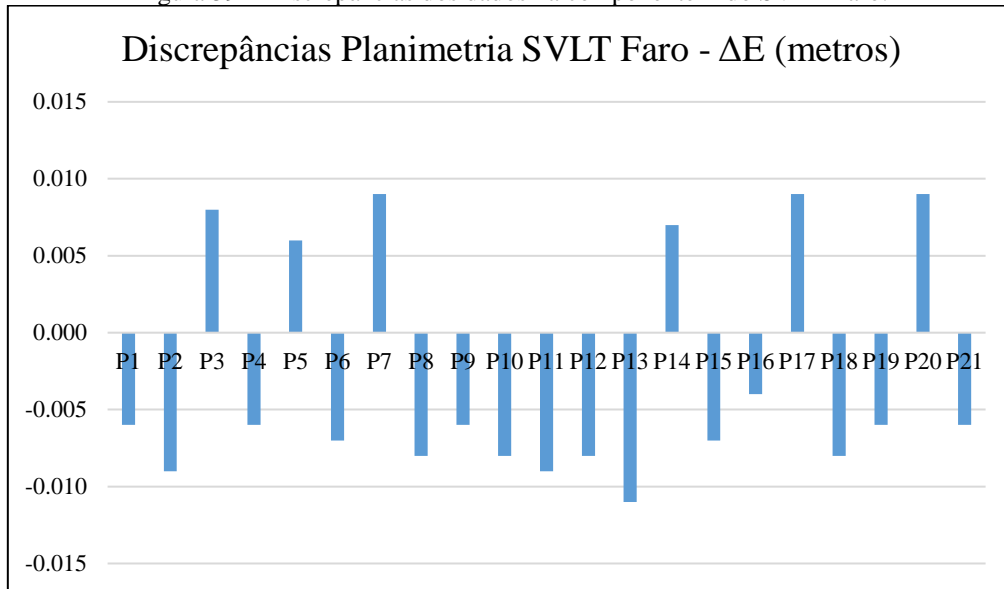
Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Tabela 16, e estimativa de acurácia dos dados altimétricos gerados a partir do SVLT Optech é de 5,9 cm.

Após a análise dos dados altimétricos dos dois SVLT foi realizada a análise dos dados planimétricos obtidas pelos dois sistemas de varredura.

A partir dos dados analisados na Figura 59, nota-se que os valores máximos em módulo na componente E fica próximo de 1,5 cm. Os valores mínimos de discrepâncias em torno de 5 mm.

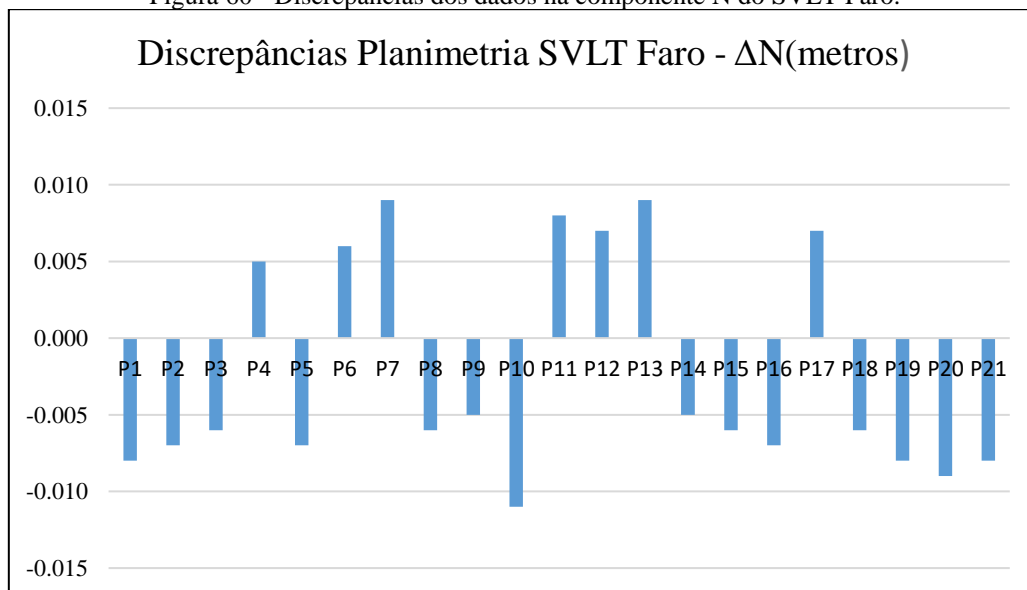
Figura 59 – Discrepâncias dos dados na componente E do SVLT Faro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na componente N, os valores máximos e mínimos (valores em módulo) ficam respectivamente entre 1 cm e 5 mm, conforme Figura 60.

Figura 60 - Discrepâncias dos dados na componente N do SVLT Faro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 17, nos fornece um resumo dos dados estatísticos dos dados planimétricos, a partir das componentes E e N do SVLT Faro.

Tabela 17 – Análise estatística das coordenadas E e N do SVLT Faro.

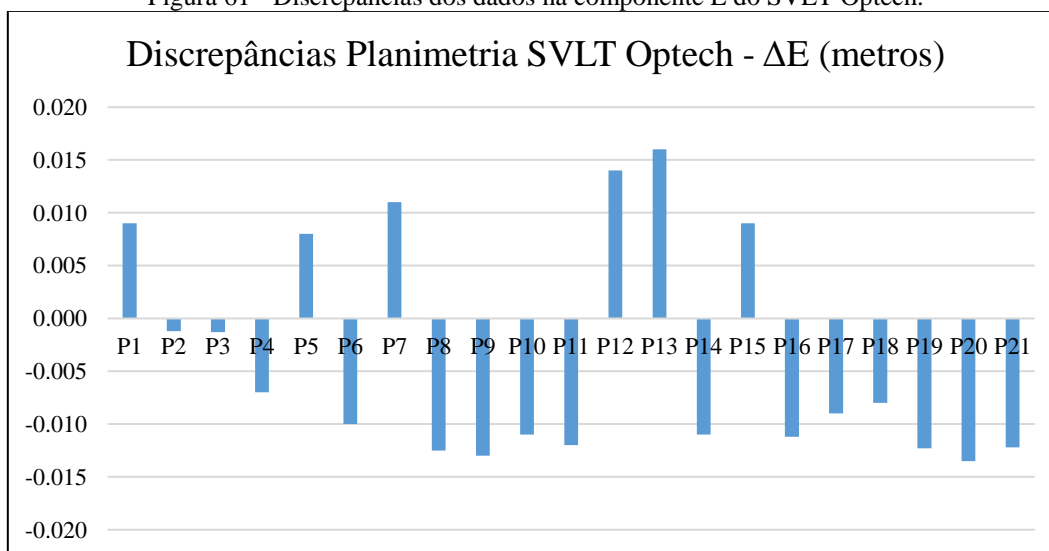
Componente	E (m)	N (m)
Tamanho da Amostra	21	21
Graus de Liberdade	20	20
Média	-0,003	-0,002
Desvio-Padrão	0,007	0,007
Variância	0,000	0,000
EMQ	0,008	0,007
EMQ FGDC/ASPRS (IC95%)	0,019	0,018
<i>t</i> Student Calc	1,795	1,438
<i>t</i> Student Teórico	2,086	2,086

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse experimento, a média das discrepâncias, em valores absolutos, foi de 2 e 3 mm para as componentes N e E respectivamente, que é um valor compatível com a acurácia descrita no manual do equipamento. Nota-se que a partir do Teste T não existe a presença de componente sistemática significativa e o valor da acurácia desses dados para as componentes E e N são respectivamente 1,9 e 1,8 cm.

A análise do CQP do SVLT Optech segue conforme os dados descritos na Figura 61 e Figura 62. Os valores das médias das discrepâncias para a componente E, em metros, ficaram com um mínimo de -7 mm e um valor máximo de 1,3 cm.

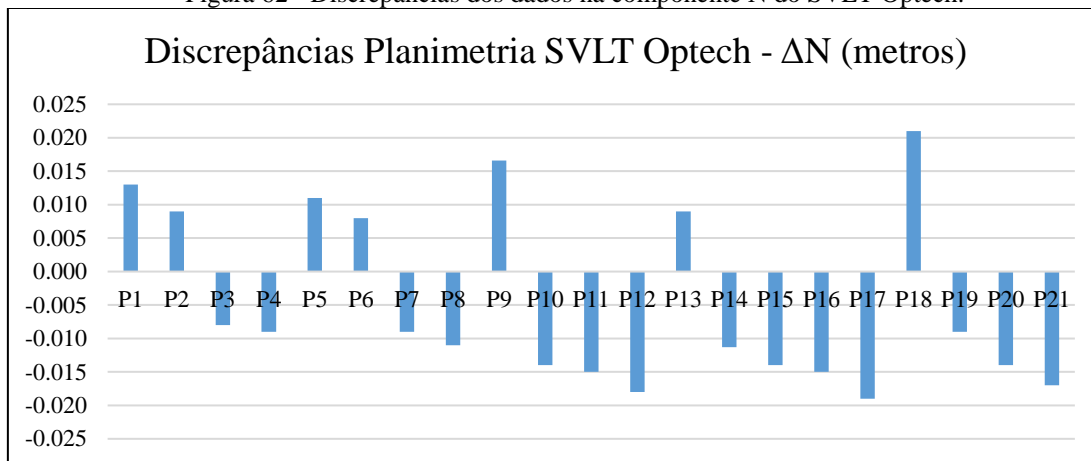
Figura 61 - Discrepâncias dos dados na componente E do SVLT Optech.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em relação a componente N, conforme os dados descritos na Figura 62, os valores das médias oscilaram entre um valor mínimo de -8 mm e um valor máximo de 2,1 cm.

Figura 62 - Discrepâncias dos dados na componente N do SVLT Optech.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 18, segue um resumo da análise estatística, da análise efetuada a partir dos dados obtidos do SVLT Optech.

Tabela 18 – Análise estatística das coordenadas E e N do SVLT Optech.

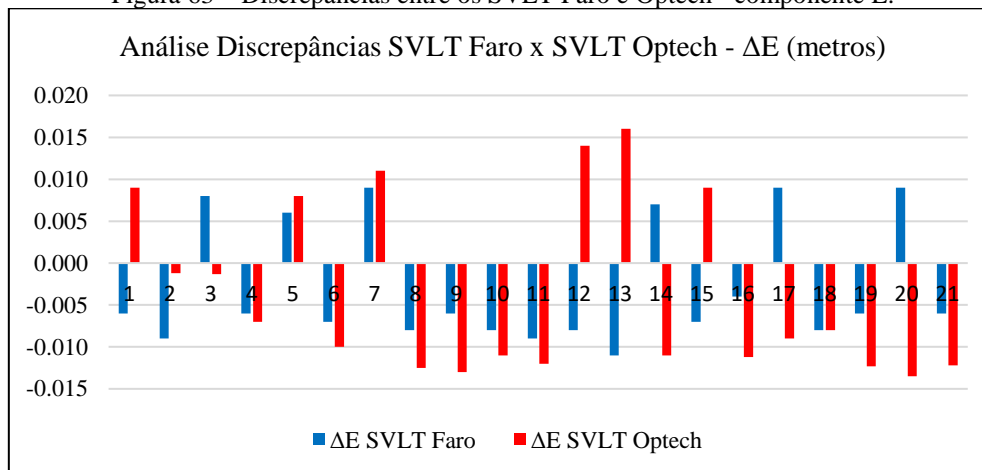
Componente	E (m)	N (m)
Tamanho da Amostra	21	21
Graus de Liberdade	20	20
Média	-0,004	-0,005
Desvio-Padrão	0,010	0,013
Variância	0,000	0,000
EMQ	0,011	0,013
EMQ FGDC/ASPRS (IC95%)	0,026	0,033
<i>t</i> Student Calc	1,616	1,571
<i>t</i> Student Teórico	2,086	2,086

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do Teste T, nota-se que as componentes E e N não apresentaram a existência de componente sistemática e a estimativa de acurácia desses dados para as componentes E e N são respectivamente 2,6 e 3,3 cm. A média das discrepâncias, em valores absolutos, obtidas nesse experimento é compatível com a acurácia descrita no manual do equipamento que varia de 4 a 7 mm para distâncias de até 100 metros.

Na Figura 63, há uma análise das discrepâncias da componente E dos dois SVLT em comparação com os vértices da rede de nivelamento.

Figura 63 – Discrepâncias entre os SVLT Faro e Optech - componente E.

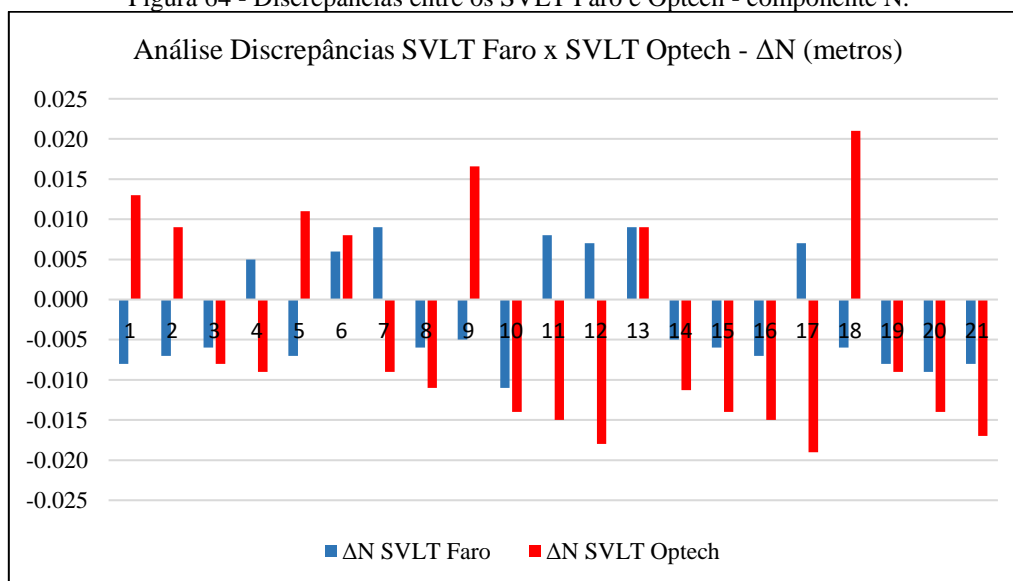


Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que na maioria dos 21 (vinte e um) pontos os valores das discrepâncias do SVLT Optech foram superiores em comparação com o SVLT Faro.

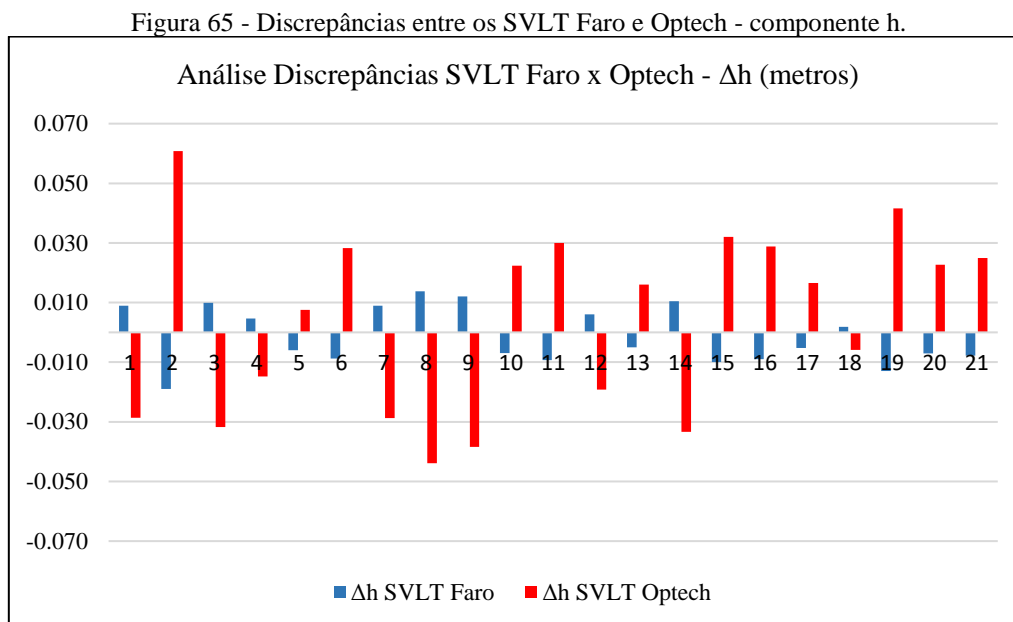
Em relação a componente N, conforme a Figura 64, o comportamento é semelhante ao da componente E, ou seja, os valores das discrepâncias do SVLT Optech são bem superiores em relação ao SVLT Faro.

Figura 64 - Discrepâncias entre os SVLT Faro e Optech - componente N.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os mesmos dados mantiveram também o mesmo padrão para a componente da altimetria, conforme Figura 65, ou seja, os valores de discrepâncias do SVLT Optech mantiveram-se superiores em relação ao SVLT Faro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma explicação para os valores de discrepâncias das três componentes (E, N e h) do SVLT Optech ser superior em relação ao SVLT Faro deve-se as características de cada equipamento. A partir dos gráficos das Figuras 59, 60 e 61, nota-se que em todas as componentes os valores das discrepâncias do SVLT Optech em 90% (noventa por cento) dos pontos são pelo menos três vezes superiores ao SVLT Faro.

O SVLT Faro possui ângulo de abertura de escaneamento de $360^\circ \times 300^\circ$ (horizontal x vertical), e a acurácia desse equipamento é de 2 mm para distâncias até 25 metros. Assim, para esse tipo de levantamento foi utilizado um total de 36 (trinta e seis) escaneamentos de modo a manter a posição do SVLT Faro a uma distância de até 30 (trinta) metros dos vértices da rede de nivelamento com a finalidade de se obter uma acurácia próxima daquela constante no manual do equipamento.

Em relação ao SVLT Optech, esse tipo de equipamento durante cada escaneamento possui um ângulo de varredura de $40^\circ \times 40^\circ$ (horizontal x vertical). Como esse equipamento consegue medir pontos até a distância de 1200 metros, procurou-se posicioná-lo durante os escaneamentos a uma distância média de 50 metros de cada

vértice da rede de nivelamento com a finalidade de se obter uma melhor qualidade posicional nas nuvens de pontos geradas.

Na Tabela 19, segue os valores de acurácias (em metros) utilizando a metodologia do FGDC/ASPRS que utiliza como parâmetro para avaliação da acurácia posicional o EMQ, com um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 19 – Resumo dos valores de acurácia obtidos em cada SVLT.

Parâmetro	SVLT Optech (m)	SVLT Faro (m)
Acurácia Planimétrica	0,030	0,019
Acurácia Altimétrica	0,059	0,019

Fonte: Elaborado pelo autor.

Existem algumas considerações que se deve fazer comparando os dois experimentos que foram realizados visando a obtenção de estimativa de acurácia dos dados altimétricos e planimétricos dos dois SVLT.

O primeiro teste foi realizado num campo de calibração, onde os dois SVLT ficaram a uma distância de 23 metros da superfície escaneada. A finalidade principal deste teste foi estimar a acurácia das coordenadas obtidas a partir de alvos que se encontravam praticamente perpendiculares ao SVLT.

No segundo experimento, os vértices da rede de nivelamento encontravam-se no chão, aumentando o ângulo de inclinação entre o alvo e o equipamento. Esse efeito, do aumento da inclinação do ângulo de abertura acabou degradando a acurácia das medições obtidas pelo SVLT Optech em virtude de o ângulo de abertura desse equipamento ser menor que o do SVLT Faro

Na Tabela 20, há um quadro comparativo das acurácias obtidas nos dois experimentos realizados. Onde o valor (1) representa o experimento realizado no campo de calibração e o valor (2) representa o experimento realizado no levantamento topográfico planialtimétrico realizado com os dois SVLT.

Tabela 20 – Análise comparativa dos experimentos.

Situação	SVLT Optech (m)	SVLT Faro (m)
Acurácia Plan. (1)	0,021	0,016
Acurácia Plan. (2)	0,030	0,019
Acurácia Altimétrica (1)	0,013	0,015
Acurácia Altimétrica (2)	0,059	0,019

Fonte: Elaborado pelo autor.

No experimento 1 a posição do SVLT ficou posicionado praticamente perpendicular aos alvos escaneados e no experimento 2 o SVLT teve que escanear os pontos localizados no chão. Nota-se que os as acurácias planimétricas sofreram maior incremento no SVLT Optech em função do ângulo de abertura desse equipamento. Em relação a acurácia planimétrica houve uma piora na acurácia do SVLT Optech, onde o valor estimado na rede de nivelamento foi quase cinco vezes maior que o obtido do campo de calibração. O SVLT Faro sofreu degradação da acurácia altimétrica, mas esse valor foi praticamente igual ao da acurácia planimétrica.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal desse estudo, que consistiu, na análise do controle de qualidade posicional de dados altimétricos gerados pelos Sistemas de Varredura a Laser Terrestre Faro e Optech foram obtidos. Para atingir esses objetivos foram realizados dois experimentos. Um realizado num campo de calibração utilizando apenas uma nuvem de pontos de cada SVLT, com os dados brutos obtidos por cada sistema e sem o processo de registro. O outro experimento realizado num levantamento topográfico onde o SVLT Faro, com 36 nuvens de pontos e o SVLT Optech com 13 nuvens de pontos, ambos com a realização do registro e filtragem das nuvens de pontos com a finalidade da obtenção do modelo digital de terreno. A finalidade do primeiro experimento era estimar o controle de qualidade posicional altimétrico de nuvens de pontos numa superfície praticamente perpendicular aos sistemas de varreduras onde foram obtidos valores de acurácia planimétrica e altimétrica de 2,1 cm e 1,3 cm para o SVLT Optech e de 1,6 cm e 1,5 cm para o SVLR Faro. A finalidade do segundo experimento era estimar o CQP altimétrico dos dados gerados pelos SVLT em um levantamento topográfico onde os pontos de checagem não ficam numa posição perpendicular aos sistemas de varredura e onde os dados brutos gerados sofrerem vários processos de registro das nuvens de pontos. Assim, nesse experimento obteve-se valores de acurácia planimétrica e altimétrica, respectivamente, de 3,0 cm e 5,9 cm para o SVLT Optech e de 1,9 cm de acurácia planimétrica e altimétrica para o SVLT Faro.

Além da abordagem do CQP em relação aos dois SVLT, faz-se necessário algumas considerações observadas a partir da análise dos experimentos realizados. A tecnologia *Lidar*, principalmente a que envolve os SVLT, é relativamente nova no Brasil juntamente com as pesquisas científicas voltadas para a área de levantamentos. O produto básico dos SVLT são nuvens de pontos que vem com coordenadas tridimensionais que podem também vir acompanhados da informação de intensidade de retorno do sinal associadas a cada ponto.

Existem algumas literaturas que foram citadas neste estudo que informam que existem SVLT que medem distâncias a partir do princípio de tempo de vôo de sinal. Porém, isso é um fator questionável já que deveria existir um relógio muito preciso acoplado a este tipo de equipamento para medir o tempo de emissão e recepção do pulso emitido pelo sensor. A maioria das literaturas que abordam essa situação não citam o tipo de relógio que mede o intervalo de tempo entre a emissão e a recepção dos pulsos *Lidar*.

Assim, com a exceção dos SVLT que medem distâncias a partir do método de triangulação, pode-se supor que os SVLT medem distâncias utilizando o método da diferença de fase entre a onda eletromagnética emitida e a recebida.

Os SVLT são equipamentos que possuem ampla utilização em levantamentos topográficos. Porém, nesse estudo, nos equipamentos que foram utilizados, não existe a opção de o usuário informar no aparelho os dados da posição onde eles se encontram. Fato esse que implica em novos procedimentos para se realizar o georreferenciamento das nuvens de pontos. A partir dos experimentos realizados, foi utilizado um georreferenciamento de modo indireto para as nuvens de pontos geradas a partir do SVLT Faro, onde foram medidas coordenadas em pontos notáveis no terreno e a partir desses pontos foi realizado o georreferenciamento das nuvens de pontos desse SVLT. Em relação ao georreferenciamento das nuvens de pontos do SVLT Optech, pode-se dizer que o mesmo foi realizado de maneira direta a partir da posição do equipamento na nuvem de pontos. Assim, pode-se definir que existem dois tipos diferentes de se realizar o georreferenciamento de nuvens de pontos de SVLT, um de maneira direta que é feito a partir da posição do SVLT no terreno e outro de maneira indireta a partir de feições bem identificáveis no terreno.

Outro fator que deve ser levado em consideração é em relação a metodologia para a realização dos levantamentos. Nos manuais os SVLT são utilizados alvos em formatos esféricos ou impressos em folhas de papel com formas geométricas visando auxiliar o registro e a posterior orientação das nuvens de pontos. No experimento 2 desse trabalho, foram utilizadas feições existentes na área de estudo como placas de sinalização rodoviária, postes, faixas de segurança pintadas no chão e vértices de feições geométricas existentes nas paradas de ônibus. Ou seja, para levantamentos topográficos onde existam aglomerados urbanos como casas, igrejas, postes, sinalização rodoviária, não é necessário a utilização de alvos poligonares como esferas ou alvos de tabuleiro. Esses alvos poligonares devem ser utilizados em lugares onde não existam esses tipos de feições.

Fazendo uma comparação com levantamentos tradicionais com a utilização de Estações Totais (ET) os SVLT possuem algumas particularidades que devem ser consideradas. Por exemplo, em levantamentos com uma ET ou um teodolito, esses equipamentos possuem colimação e fios estadimétricos, assim o usuário pode escolher o ponto que ele quer medir e a qualidade do valor dessa coordenada está amarrada a qualidade posicional do equipamento e a habilidade do indivíduo que está operando o mesmo. Nos SVLT não existe a opção de se escolher qual ponto pode ser medido. O

equipamento vai efetuar varreduras dentro de seu campo de visada e em função da distância do objeto, características físicas como cor e rugosidade, ele vai medir milhares de pontos ao longo do seu campo de visualização.

Os SVLT, como já foi citado anteriormente, possuem amplo emprego em levantamentos topográficos. No SVLT Faro, as nuvens de pontos foram orientadas e georreferenciadas a partir de pontos homólogos medidos nas fotografias registradas pelo equipamento. Assim, além de levantamentos topográficos o SVLT Faro também pode ser utilizado para fotogrametria terrestre onde o registro das nuvens de pontos ocorre num processo muito parecido com a fototriangulação por modelos independentes, formação de bloco, descrita em Lugnani (1987).

Algumas vantagens e desvantagens observadas durante os levantamentos foram observadas em relação ao processamento desse tipo de dado, no caso as nuvens de pontos. A situação considerada ideal seria que todos os dados pudessem ser processados e manipulados a partir de *softwares* livres. Nesse estudo, os dados obtidos a partir do SVLT Optech foram processados no *software Cloudcompare* que é livre. O registro das nuvens de pontos efetuado pelo software citado utiliza o algoritmo ICP (*Iterative Closest Point*) que detecta pontos com formas geométricas bem definidas entre as nuvens de pontos como quadrados, retângulos, círculos e os utiliza para realizar um registro automático de forma iterativa.

Assim, o registro, georreferenciamento e filtragem das nuvens de pontos gerados pelo SVLT Optech foram realizados em *softwares* livres. Em relação ao SVLT Faro, as nuvens de pontos geradas também podem ser manipuladas no *software Cloudcompare*, porém com a finalidade de tornar o processamento desses dados mais agil optou-se por processá-los no software Faro *Scene 5.1* que é um software comercial adquirido pela UFRGS.

Outra vantagem observada foi a utilização dos filtros estatísticos para remoção de ruídos, *noise filter*, e o filtro de eliminação de pontos isolados, *SOR Filter*. Esses filtros, juntamente com o *CSF Filter*, são filtros que vem incorporados ao *software* livre *Cloudcompare* e a partir das análises estatísticas realizadas nos levantamentos, forneceram bons resultados na conversão de MDS para MDT.

Em relação a qualidade posicional dos dados analisados, observou-se que quando os alvos estão localizados quase que perpendicularmente ao SVLT, como no caso do experimento 1, obtiveram melhores valores de acurácia posicional planimétrica e altimétrica em comparação com pontos localizados no chão. Isso, muito se deve em

função do ângulo de visada de cada equipamento, onde no caso o SVLT Faro possui maior ângulo de visada que o SVLT Optech e assim obteve melhores resultados de acurácia posicional. Porém, no experimento 2, foram necessários 36 (trinta e seis) nuvens de pontos para levantar um percurso de aproximadamente 1 (um) quilômetro enquanto o SVLT Optech levantou o mesmo percurso com 13 (treze) nuvens de pontos.

Abaixo, segue algumas recomendações para futuros trabalhos que podem ser desenvolvidos a partir desse estudo.

- Verificação da influência da quantidade de nuvens de pontos na qualidade posicional de coordenadas medidas por SVLT.

- Verificação da influência de diferentes condições atmosféricas na qualidade posicional de coordenadas medidas por SVLT.

- Registro e georreferenciamento de nuvens de pontos do SVLT Faro em software livre.

- Classificação supervisionada de nuvens de pontos geradas por SVLT utilizando software livre.

- Influência de diferentes espaçamentos de pontos na qualidade posicional de nuvens de pontos geradas por SVLT.

- Verificação de controle de qualidade posicional dos dados angulares com a utilização de parâmetros como a média direcional, para se obter um valor de discrepâncias das coordenadas angulares e um parâmetro de concentração (κ) visando estimar os erros sistemáticos nos eixos horizontal e vertical do instrumento de medição.

REFERENCIAS

ALKAN, Reha Metin; KARSIDAG, Gokcen. **Analysis of the accuracy of terrestrial laser scanning measurements**. In: FIG Working Week. 2012. p. 6-12.

ASPRS. **Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data**. Edition 1. Version 1.0. 2014.

BAE, Kwang-Ho; LICHTI, Derek D. **A method for automated registration of unorganised point clouds**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 63, n. 1, p. 36-54, 2008.

BARBER, David; MILLS, Jon; BRYAN, Paul. **Towards a standard specification for terrestrial laser scanning of cultural heritage**. CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage, v. 19, p. 619-624, 2003.

BOULAASSAL, Hakin.; LANDES, Tania.; GRUSSENMEYER, Pierre. **Automatic extraction of planar clusters and their contours on building façades recorded by terrestrial laser scanner**. International Journal of Architectural Computing, v. 7, n. 1, p. 1-20, 2009.

BRANDALIZE, Amauri Alfredo. **Perfilamento a laser: comparação com métodos fotogramétricos**. In: XX congresso Brasileiro de Cartografia, Rio Grande do Sul, Brasil. 2001.

BALTSAVIAS, Emmanuel. **Airborne laser scanning: basic relations and formulas**. ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, v. 54, n. 2, p. 199-214, 1999.

CAMARGO, Paulo de Oliveira. **Ajustamento de Observações. Notas de Aula**. UNESP. 2008.

CAMARGO, Paulo de Oliveira. **Mínimos Quadrados Não Negativos: Solução Pelo Método de Lemke**. III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife - PE. 2010

CHOW, Jacky. **Multi-Sensor Integration for Indoor 3D Reconstruction**. 2014. Tese de Doutorado. University of Calgary.

CUARTERO, Aurora et al. **Error analysis of terrestrial laser scanning data by means of spherical statistics and 3D graphs**. Sensors, v. 10, n. 11, p. 10128-10145, 2010.

DAL POZ, Aluir Porfírio. **Filtragem de dados de varredura a laser: Princípios e exemplos**. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, v. 13, 2013.

DALMOLIN, Quintino; SANTOS, Daniel Rodrigues dos. **Sistema laserscanner: Conceitos e princípios de funcionamento**. 3. ed. Curitiba: Ufpr, 2004. 97 p.

D'ORAZIO, Tiziana et al. **Automated extraction of archaeological traces by a modified variance analysis**. Remote Sensing, v. 7, n. 4, p. 3565-3587, 2015.

EL-SHEIMY, Naser; VALEO, Caterina; HABIB, Ayman. **Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and applications**. Artech House, 2005.

FAN, Lei; ATKINSON, Peter M. **Accuracy of digital elevation models derived from terrestrial laser scanning data**. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, v. 12, n. 9, p. 1923-1927, 2015.

FARO SCENE. **Manual do Usuário**. Fevereiro de 2013.

FRÖHLICH, Christofer et al. **Terrestrial laser scanning—new perspectives in 3D surveying**. International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, v. 36, n. Part 8, p. W2, 2004.

GALO, M.; CAMARGO, Paulo de Oliveira. **O uso do GPS no controle de qualidade de cartas**. 1º CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO - COBRAC. Tomo II, p. 41-48, Florianópolis – Brasil. 1994.

GEMAEL, Camil. **Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas**. Curitiba: Editora da Ufpr, 1994.

GHILANI, Charles D.; WOLF, Paul R. **Adjustment computations: spatial data analysis**. John Wiley & Sons, 2006.

GHILANI, Charles D.; WOLF, Paul R. **Elementary surveying**. Prentice Hall. Thirteenth Edition. 2011.

GOMES, Jorge Pinto. **Determinação de desníveis de precisão utilizando Estação Total**. 2006. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná.

GOOGLE MAPS. [Campus do Vale – UFRGS]. [2017]. Porto Alegre. Disponível em: <https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1Q31mqi8aoBvak1WgpuZONa9iUDE&hl=pt_BR&ll=-30.07395250245491%2C-51.12236441667176&z=17>. Acesso em: 10 de abr. 2017.

GRUEN, Armin; AKCA, Devrim. **Least squares 3D surface and curve matching**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 59, n. 3, p. 151-174, 2005.

HABIB, Ayman. et al. **Lidar strip adjustment using conjugate linear features in overlapping strips**. Proceedings of International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, p. 385-390, 2008.

HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física 4—Ótica e Física Moderna**; 9ª edição. 2010.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Rede altimétrica**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/altimetica.shtm>>. Acesso em 04 dez 2016.

JENSEN, John R.; EPIPHANIO, José Carlos Neves. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2011.

LERMA GARCÍA, José Luis; VAN GENECHTEN, B.; SANTANA QUINTERO, M. **3D Risk Mapping. Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning. Training Material Based on Practical Applications**. Universidad Politecnica de Valencia, Spain, 2008.

LIU, Xiaoye; ZHANG, Zhenyu. **Effects of Lidar data reduction and breaklines on the accuracy of digital elevation model**. Survey Review, v. 43, n. 323, p. 614-628, 2011.

LUGNANI, João Bosco. **Introdução à fototriangulação**. Curitiba: Ed. da UFPR, v. 134, 1987.

MIKHAIL, Edward, ACKERMANN, Friedrich . **Observations and least squares**. 1976.

MILLER, Scott. **Photogrametric Products in Manual of Photogrametry**, 5th Ed, Bethesda: ASPRS. 2004.

GALERA MONICO, João Francisco. **Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações**. 2da. Edição, São Paulo. Editora UNESP, 2008.

MOREIRA, Antonio Sérgio Bento. **Nivelamento trigonométrico e nivelamento geométrico classe IIN da NBR 13.133: limites e condições de compatibilidade**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

MUHADI, Nur Atirah, ABDULLAH, Ahmad, Fikri, KASSIM, Muhamad Saufi. Mohd. **Quantification of terrestrial laser scanner (TLS) elevation accuracy in oil palm plantation for IFSAR improvement**. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, p. 012042, 2016.

NBR 13133 - **Execução de Levantamento Topográfico**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994.

OGUNDARE, John Olusegun. **Precision surveying: the principles and geomatics practice**. John Wiley & Sons, 2015.

OLSEN, Michael James. **Guidelines for the use of mobile LIDAR in transportation applications**. Transportation Research Board, 2013.

PARK, Hongjoo; SALAH, Mahmoud; LIM, Samsung. **Accuracy of 3D models derived from aerial laser scanning and aerial ortho-imagery**. Survey Review, v. 43, n. 320, p. 109-122, 2011.

PEREIRA, Tullio Aullus. Jó, NERO, Marcelo Antônio. **Análise de Normas de Controle de Qualidade Posicional em Cartografia Ao Redor do Mundo: Exemplos Atuais de Alguns Países**. IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Recife – PE. 2012.

PIROTTI, Francesco; GUARNIERI, Alberto; VETTORE, Antonio. **Ground filtering and vegetation mapping using multi-return terrestrial laser scanning**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 76, p. 56-63, 2013.

ROCHA, Ronaldo Santos. **Exatidão cartográfica para cartas digitais urbanas**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2002.

RUSINKIEWICZ, Szymon; LEVOY, Marc. **Efficient variants of the ICP algorithm**. In: 3-D Digital Imaging and Modeling, 2001. Proceedings. Third International Conference on. IEEE, 2001. p. 145-152.

SAN JOSE ALONSO, J. I. et al. **Comparing time-of-flight and phase-shift. The survey of the royal pantheon in the basilica of San Isidoro (Leon)**. Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 38, p. 5, 2011.

SANTOS, Afonso de Paula dos et al. **Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais com o uso da estatística espacial**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. 2010.

SCHOFIELD, Wilf., BREACH, Mark. **Engineering Surveying**. 6ª edição. Butterworth-Heinemann Ltda. 2007.

SHAN, Jie; TOTH, Charles K. (Ed.). **Topographic laser ranging and scanning: principles and processing**. CRC press, 2008.

SILVA, Jorge Luiz Barbosa da. **Nivelamento Geométrico. Notas de Aula da disciplina de Topografia I**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2003.

SITHOLE, George. **Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter**. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, n. 3/W4, p. 203-210, 2001.

TELEDYNE OPTECH. **Optech Iris terrestrial laser scanner**. Disponível em: <<http://www.teledyneoptech.com/index.php/product/optech-iris/>>. Acesso em: 13 de mar. 2016.

TIPLER, Paul Allen; MOSCA, Gene. **Física para cientistas e engenheiros**. Vol. 2: eletricidade, magnetismo e óptica. Grupo Gen-LTC, 2006.

TOMMASELLI, Antonio Maria Garcia. **Um estudo sobre as técnicas de varredura a laser e fotogrametria para levantamentos 3D a curta distância**. GEODÉSIA Online-Revista da Comissão Brasileira de Geodésia, v. 4, p. 1415-1111, 2003.

VEIGA Luis Augusto Koenig, ZANETTI Maria Aparecida Zanetti, FAGGION Pedro Luis. **Fundamentos de Topografia**. Universidade Federal do Paraná- UFPR. 2012

VOSSelman, George; MAAS, Hans-Gerd (Ed.). **Airborne and terrestrial laser scanning**. Whittles Publishing, 2010.

WAGNER, Wolfgang et al. **From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges**. 2004.

WEHR, Aloysius; LOHR, Uwe. **Airborne laser scanning - an introduction and overview**. ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, v. 54, n. 2, p. 68-82, 1999.

WILLIAMS, John; BENNAMOUN, Mohammed. **Simultaneous registration of multiple corresponding point sets**. Computer Vision and Image Understanding, v. 81, n. 1, p. 117-142, 2001.

ZHANG, Wuming et al. **An Easy-to-Use Airborne Lidar Data Filtering Method Based on Cloth Simulation**. Remote Sensing, v. 8, n. 6, p. 501, 2016.

ZOGG, H. M.; INGENSAND, H. **Terrestrial laser scanning for deformation monitoring—load tests on the Felsenau Viaduct (CH)**. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 37, p. 555-561, 2008.

APÊNDICES**MATRIZES DO AJUSTAMENTO DOS CIRCUITOS DE NIVELAMENTO**

Vetor das Observações – Lb.

LB1	-10,319
LB2	-1,939
LB3	-4,138
LB4	-3,479
LB5	-1,360
LB6	-0,807
LB7	-0,472
LB8	-0,386
LB9	-0,376
LB10	-0,051
LB11	0,240
LB12	0,316
LB13	-0,266
LB14	0,159
LB15	-0,102
LB16	-0,656
LB17	0,126
LB18	-0,226
LB19	-0,255
LB20	0,211
LB21	-0,286
LB22	3,643
LB23	0,390
LB24	0,065
LB25	-3,299
LB26	16,391
LB27	23,154
LB28	-2,675

Vetor das Derivadas Parciais em relação as Observações - B

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1

Vetor Erro de Fechamento – W

0,002
0,009
0,014
-0,005
-0,011

Vetor dos Resíduos – V

LB1	0,00094
LB2	0,00100
LB3	0,00098
LB4	-0,00029
LB5	-0,00023
LB6	-0,00022
LB7	-0,00020
LB8	-0,00025
LB9	-0,00029
LB10	-0,00023
LB11	-0,00017
LB12	0,00296
LB13	0,00187
LB14	0,00155
LB15	0,00109
LB16	0,00173
LB17	0,00158
LB18	0,00202
LB19	-0,00188
LB20	-0,00194
LB21	-0,00181
LB22	-0,00293
LB23	-0,00351
LB24	0,00253
LB25	-0,00544
LB26	0,00209
LB27	-0,00051
LB28	0,00676

Comparação do Fator de Variância a Priori e a Posteriori

- Hipótese Básica: $H_0 : \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$, ou seja, o ajustamento encontra-se dentro da região de aceitação com $\alpha= 5\%$,
- Hipotese Alternativa: $H_1: \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2$
- Fator de Variância a Priori = 1
- Observações = 28
- Parâmetros = 22
- Graus de Liberdade = 6
- Fator de Variância a Posteriori (FVPos): 0,02111
- χ^2 Calculado = 0,12667
- χ^2 Teórico $\alpha= 5\%$ - 12,5916

Como o Valor de χ^2 calculado encontra-se dentro da zona de aceitação com $\alpha= 5\%$, a hipótese básica não é rejeitada a nível de significância de 5%

PUBLICAÇÃO NA REVISTA BRASILEIRA DE GEOMÁTICA

Laser Scanner Terrestre – Teoria, Aplicações e Prática.

Terrestrial laser scanner and airborne – Theory, Applications and Practice.

Rodrigo da Silva Ferraz¹
Sérgio Florêncio de Souza¹
Mário Luiz Lopes Reiss²

¹ Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia (CEPSRM) - UFRGS - Avenida Bento Gonçalves 9500 - Campus do Vale, Bairro Agronomia, CEP: 91501-970, Porto Alegre – RS.

² Laboratório de Pesquisas em Fotogrametria - Departamento de Geodésia - Instituto de Geociências - UFRGS - Avenida Bento Gonçalves 9500 - Campus do Vale, Bairro Agronomia, CEP: 91501-970, Porto Alegre – RS.

rferraz1980@gmail.com, sergio.florencio@ufrgs.br, mario.reiss@ufrgs.br

RESUMO – A utilização de um Sistema de Varredura Laser Terrestre (SVLT) possui inúmeras aplicações nas diversas áreas envolvidas em levantamentos tridimensionais, Possui ampla utilização na mineração para cálculos de volumes, registro de monumentos históricos, geração de modelos digitais de superfície (MDS), modelos digitais de terreno (MDT) e aplicações na arquitetura, O produto principal gerado por um SVLT é uma nuvem de pontos com coordenadas tridimensionais referenciadas ao centro de fase do sensor, que, após processos matemáticos denominado de registro, gera uma nuvem de pontos georreferenciada, Além das coordenadas tridimensionais o SVLT fornece também a intensidade de retorno do sinal, que é a energia captada pelo sensor em função da resposta espectral emitida pelo alvo, Dependendo das características do sistema, à nuvem de pontos pode-se adicionar cores a partir de fotografias das cenas que são obtidas durante as varreduras, As nuvens de pontos modelam diferentes tipos de feições existentes no terreno como vegetação, edificações, rochas, estruturas, etc, Assim, o objetivo desse trabalho é realizar uma abordagem dos principais conceitos envolvidos em relação a um SVLT, classificação de dados oriundos das nuvens de pontos e suas aplicações na geração de MDT.

Palavras-chave: Sistema de Varredura Laser Terrestre, Modelo Digital de Terreno, intensidade de retorno de sinal.

ABSTRACT – Terrestrial Laser Scanner System (SVLT) systems have several applications in three-dimensional surveys, It has widespread use in mining for calculating volumes, register of cultural heritage, generation of digital surface models (DSM), digital terrain models (DTM), and architectural applications, The main product generated by the SVLT systems is a cloud points with three-dimensional coordinates referenced to the phase center of the TLS, This cloud points can also be mathematical processed, generate a cloud points georeferenced, In addition to the three-dimensional coordinates, the SVLT also provide the laser return signal intensity that is the energy acquired by the sensor depending on the spectral response emitted by the target, Depends on the characteristics of the SVLT, the point clouds can have colors from scenes through photographs acquired by integration of the system with cameras, The point clouds model different types of features on the ground such as: vegetation, buildings, rocks, structures, etc, The purpose of this paper is to approach the main concepts involved in relation to an SVLT, data classification derived from point clouds and its applications for generate DTM.

Keywords: System Scanning Laser Terrestrial, Digital Terrain Model, intensity return signal.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas LIDAR (*Light Detection and Ranging* - Obtenção de medidas de distância através da luz) são uma tecnologia que envolvem sensores ativos que podem operar tanto na faixa

do espectro eletromagnético do visível até o infravermelho médio, Para fins cartográficos a tecnologia LIDAR pode ser utilizada a partir de plataformas terrestres e aerotransportadas, O presente estudo visa elaborar uma abordagem

conceitual em relação aos princípios de funcionamento de SVLT, Também serão abordados alguns conceitos envolvendo Modelos Digitais de Terreno (MDT) gerados a partir de

Sistemas de Varredura Aerotransportados (SVAT), assim como uma análise de controle de qualidade posicional de dados oriundos de dois diferentes SVLT, No presente trabalho também serão abordados pequenos tópicos envolvendo os sistemas aerotransportados bem como uma pequena comparação desse tipo de aquisição com as plataformas terrestres.

Um SVLT é um aparelho que usa um laser para medir as coordenadas tridimensionais de uma dada região ou a superfície de um objeto automaticamente, Os dados coletados são denominados de "nuvens de pontos" que fornecem os valores de X, Y, Z dos pontos medidos na superfície escaneada, bem como um valor de intensidade de retorno do sinal (BARBER, 2003).

Segundo Wutke (2006), existem dois tipos de sistemas de varredura laser: os sistemas estáticos, em que o equipamento fica estacionado em um determinado local para coleta de dados, e os sistemas dinâmicos, em que o equipamento fica em movimento durante a aquisição dados, Os sistemas estáticos são aqueles, cuja aquisição das varreduras é feita a partir de uma posição fixa no terreno, Os sistemas dinâmicos podem ser os sistemas utilizados acoplados a uma plataforma em movimento, na

Figura 66), há exemplo dos diferentes tipos de sistemas dinâmicos.



Figura 66- Diferentes tipos de sistemas dinâmicos.
Fonte: Chow (2014).

Os sistemas estáticos podem ser classificados em três grupos, de acordo com o seu princípio de funcionamento, sendo eles: tempo

de voo do sinal, diferença de fase e triangulação (WUTKE, 2006), Porém Chow (2014) dá a mesma classificação de Wutke (2006), mas a denomina como sendo a partir do princípio de medição de distâncias.

As coordenadas (X, Y, Z) dos pontos sobre o objeto estão referenciadas ao centro de fase do equipamento, cuja definição é dada pela interseção do eixo principal e do seu eixo secundário.

Estas coordenadas são função dos parâmetros medidos conforme as Equações (1) a (3) (MEDINA, 2012):

$$X = DI \cdot \cos(V) \cdot \text{sen}(Hz) \quad (1)$$

$$Y = DI \cdot \cos(V) \cdot \cos(Hz) \quad (2)$$

$$Z = DI \cdot \text{sen}(V) \quad (3)$$

onde:

DI: é a distância inclinada entre o SVLT e o objeto;

V: é o ângulo vertical;

Hz: é o ângulo horizontal.

No princípio baseado na triangulação (Figura 67), um pulso de laser é emitido pelo sistema em direção ao objeto de interesse e é refletido em direção a uma ou mais câmaras de digitais, que fazem o registro do sinal, Os ângulos de varredura dos pulsos são registrados no sistema a cada emissão e conhecendo-se a base fixa entre o sensor e a câmara, por meio de um processo de calibração, determina-se a posição dos pontos refletidos pelo objeto (DALMOLIN, 2004).

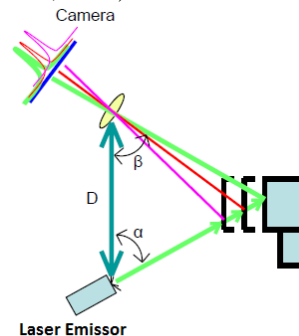


Figura 67 - Princípio da Triangulação,
Fonte: Lerma Garcia et al, (2008).

O sensor que captura o pulso laser transforma a luz refletida em sinais elétricos e estes são convertidos em bits através de um conversor analógico digital, A precisão da reconstrução do modelo do objeto depende de elementos geométricos semelhantes, como a relação base/ distância (TOMMASELLI, 2003), Logo, com esta tecnologia, pode alcançar uma precisão de alguns micrômetros.

Os SVLT que funcionam com o princípio do tempo de voo de sinal são equipamentos com medidores de distâncias, que normalmente empregam componentes, tais como, um transmissor laser, um receptor, um relógio para medir o tempo e um transmissor e receptor óptico, Segundo Schofield e Breach (2007), no princípio de tempo de voo (Figura 68), um curto e intenso pulso de radiação é emitido pelo

transmissor ao alvo, que reflete um sinal paralelo até o receptor. Assim, a distância é calculada pelo tempo decorrido entre a emissão e a recepção do sinal, o qual é multiplicado pela velocidade da luz.

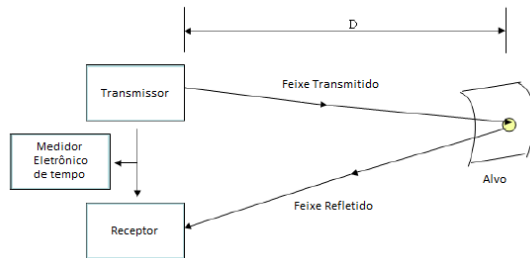


Figura 68 - Princípio do tempo de voo de sinal, Fonte: Lerma Garcia *et al*, (2008).

Segundo Tommaselli (2003), o instrumento registra o tempo, a intensidade da energia refletida pelo objeto escaneado, e os parâmetros de atitude do feixe, que são coordenadas polares do ponto em relação ao centro de fase do laser, com estes dados é possível calcular a distância e as coordenadas cartesianas tridimensionais dos pontos medidos em relação ao centro de fase do sensor.

Já em relação ao princípio da diferença de fase (Figura 69), Medina (2012) define os sistemas LST baseados naqueles que usam ondas do espectro infravermelho, luz visível ou micro-ondas para a medição da distância.

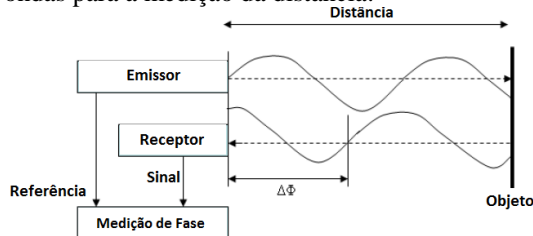


Figura 69 - Princípio da diferença de fase, Fonte: Lerma Garcia *et al*, (2008).

A diferença de fase, entre os sinais transmitidos e refletidos, da parte fracionada do comprimento é menor que o valor da parte inteira do comprimento da onda modulada, seu intervalo de medição de distâncias é restrito ao máximo de 100 metros com precisão de medidas de distância de alguns milímetros (FRÖHLICH e METTENLEITER, 2004).

Na Figura 70, há exemplos dos diferentes tipos de SVLT em função do método de obtenção de distâncias ou princípio de funcionamento.



Figura 70 - Diferentes tipos de LST. Fonte: Chow (2014).

2. ALGUMAS APLICAÇÕES DE SISTEMAS DE VARREDURA A LASER

Há diversas marcas de equipamentos no mercado e, dentre as marcas mais conhecidas, pode-se citar as das empresas Optech, Leica, Riegel, etc (Figura 71).



Figura 71 - Diversas marcas comerciais de LST. Fonte: Lerma Garcia *et al*, (2008).

Mais detalhes sobre as características técnicas de cada tipo de aparelho podem ser encontrados em Wutke (2006) e Gonçalves (2007).

Um exemplo de aplicação é apresentado por Meouche *et al* (2013), que utilizaram um LST para gerar uma modelagem numérica de terreno com a finalidade de determinar zonas de risco de inundação em áreas urbanas, Guarnieri *et al* (2009) fizeram uma abordagem de utilização de filtros para a geração de modelos digitais de terreno em uma região de pântano em Veneza na Itália, Outro exemplo pode ser encontrado em Schulz (2007), que estudou aspectos referentes à calibração e avaliação da qualidade das medições de distância e ângulo, e os parâmetros que influenciam essas medições e etapas que envolveram o pós-processamento de nuvens de pontos.

Pirotti *et al* (2013) fizeram uma análise que aborda estudos referentes ao estado da arte nas pesquisas que utilizaram SVLT em relação a resolução de nuvens de pontos, precisão e acurácia de medidas obtidas com a utilização desse tipo de sensores, Pfeifer e Briese (2007) abordaram a aquisição e processamento de dados utilizando plataformas aéreas e terrestres, Gonçalves (2007) fez estudos com aplicação na engenharia civil, utilizando um LST voltado à construção de túneis.

A utilização de tecnologia LIDAR, nesse caso utilizando uma plataforma aerotransportada, também possui aplicações em função do comprimento de onda do sensor. A maioria dos sistemas que utilizam a tecnologia LIDAR que são utilizadas com aplicações topográficas empregam a luz laser na faixa espectral infravermelho (IR), médio ou próximo, na região entre 900 e 1500 nm.

Também existem sensores que utilizam a luz azul-verde centrada aproximadamente em 532 nm, que são usados em mapeamentos batimétricos devido a sua capacidade de penetração na água (MIKHAIL et al, 2001). A medição da profundidade é feita utilizando dois feixes de REM (radiação eletromagnética), um na faixa do infravermelho e outro na faixa do visível (azul-verde) (Figura 72).

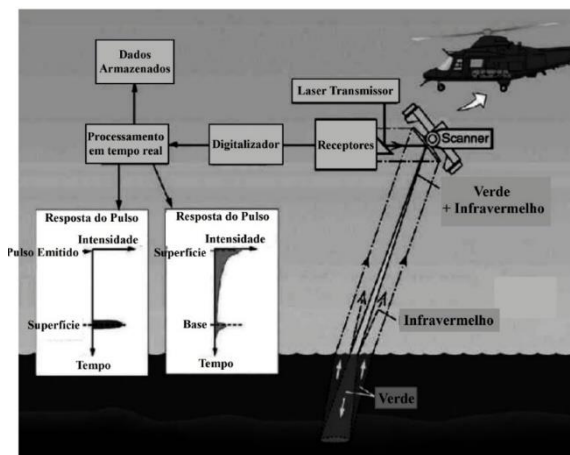


Figura 72 - Medições batimétricas utilizando tecnologia LIDAR.

Fonte: Shan e Toth (2009).

A radiação infravermelha é refletida a partir da superfície da água (Figura 72), enquanto que a luz visível (verde-azul) penetra na água e é refletido pelo fundo do mar, que retorna ao sensor. A profundidade real que pode ser medida está limitada a 25-70 m, dependendo do sistema que está sendo utilizado e as características físicas da água (limpidez, velocidade da água, algas, etc.) através do qual a radiação penetra (SHAN e TOTH, 2009).

3. INTENSIDADE DE RETORNO DO SINAL

Os dados brutos de uma varredura LST fornecem as coordenadas tridimensionais de uma nuvem de pontos, os valores de intensidade do retorno do sinal, os dados RGB por meio das fotografias adquiridas por câmaras fotográficas integradas, mais os valores das normais (vetores normalizados) das coordenadas X, Y e Z (

Figura 73).

1	2	3	4	5	6	7
X	Y	Z	Red (0-255)	Green (0-255)	Blue (0-255)	Scalar
488454.80274863	667303.11063383	65.15806380	76	88	74	0.63120
488454.79344849	667303.14240334	65.17798015	70	84	69	0.59750
488454.71911839	667303.19615772	65.14497323	96	72	99	0.500240
488454.71088990	667303.15726089	65.25963347	62	78	65	0.547140
488454.72972107	667303.15823312	65.27625275	62	79	63	0.551050
488454.75214722	667303.15703378	65.29211426	67	84	68	0.590130
488454.75422095	667303.142484473	65.306174205	73	90	72	0.633230
488454.75073242	667303.14526275	65.32266235	77	94	76	0.664690
488454.75542008	667303.15241790	65.34264374	78	95	77	0.672200
488454.75320816	667303.15241172	65.35033875	50	65	62	0.449440
488454.75868225	667303.15879659	65.360597137	55	68	61	0.480760
488454.75226111	667303.16239430	65.38246130	38	67	62	0.488520
488454.72896912	667303.19192554	65.19828796	47	61	48	0.422080

Figura 73 - Dados brutos de um SVLT.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Jensen (2011) afirma que a intensidade de retorno do sinal representa os picos de voltagens dos sinais de retorno registrados pelo controlador do LST, ou seja, a intensidade representa o número de fótons e a energia que retornam para o receptor e que a intensidade é uma função do material que constitui a superfície escaneada. Com essa informação o LST é capaz de detectar eflorescências, umidade, biodeterioração e realizar a detecção de fissuras em estruturas.

A característica de geração de nuvens de pontos tridimensionais da superfície escaneada com dados de intensidade e cor pode possibilitar o armazenamento de informações de uma inspeção para acompanhamento de evolução de manifestações patológicas ao longo da vida útil de uma estrutura.

A intensidade do feixe de laser refletido tem importância uma vez que a amplitude do sinal recebido está correlacionado com a qualidade de alcance do sinal emitido pelo sensor. A intensidade (I) é influenciada por três parâmetros (SCHULZ, 2007):

- A distância do objeto ($I \sim 1/d^2$);
- A reflectância do objeto;
- O ângulo de incidência.

A Figura 74, apresenta a intensidade de um alvo com uma reflectância de 90% e mostra que a intensidade diminui também sistematicamente. Por exemplo, a linha de intensidade do alvo com uma reflectância de 20% corresponde à linha de intensidade para um alvo com uma reflectância de 90% e um ângulo de incidência de 30°, Na Figura 75, demonstra os valores de intensidade em função do ângulo de incidência do alvo escaneado.

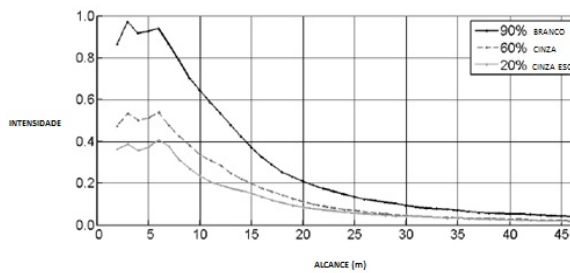


Figura 74 - Valores de intensidade de retorno do sinal em função da refletância de determinados alvos.

Fonte: Schulz (2007).

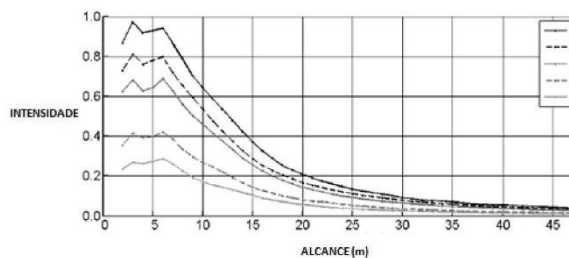


Figura 75 - Valores de intensidade de retorno do sinal em função do ângulo de incidência.

Fonte: Schulz (2007).

Os valores da intensidade apresenta-se menores em relação aos baixos valores de reflectância e baixos ângulos de incidência, Na Figura 76, há um exemplo da utilização de uma imagem e intensidade de uma parede localizada no Departamento de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).



Figura 76 - Imagem de intensidade de uma edificação Campus do Vale da UFRGS.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados obtidos através de varreduras laser podem gerar dois tipos de abordagens, Uma geométrica, onde são realizadas análises a partir das coordenadas tridimensionais, obtidas durante a varredura com controle de qualidade na geração de mapas topográficos, registro de monumentos históricos, cálculos de volumes e etc, A outra abordagem que pode ser analisada é em relação ao comportamento físico oriundo da informação

espectral fornecida pelo SVLT, já que o sensor opera na faixa do infravermelho (médio ou próximo), Essa análise pode ser obtida em relação ao comportamento físico, que pode ser obtida a partir da imagem de intensidade.

Godycka *et al* (2014) realizaram uma experiência com uma viga de concreto sofrendo diferentes tensões a partir de uma prensa hidráulica (Figura 77).

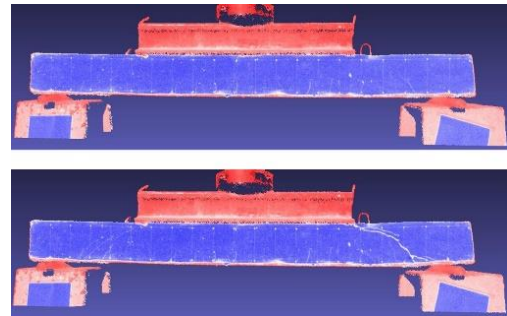


Figura 77 - Análise de deformação em estruturas usando imagem de intensidade gerada por um SVLT.

Fonte: Godycka et al (2014).

Foram aplicadas diferentes tensões na viga e foram realizados escaneamentos durante a aplicação da força, depois foi realizada uma análise do comportamento da estrutura a partir da imagem de intensidade.

4. RETORNOS LIDAR

Durante o escaneamento um pulso de energia é enviado diretamente em direção ao alvo com um determinado ângulo em relação ao espelho do LST, Dependendo da posição do instrumento cada pulso irá iluminar no alvo uma área com um formato de um círculo, denominada de área de cobertura laser instantânea, Esse pulso pode gerar um retorno ou múltiplos retornos (JENSEN, 2011).

Assim toda e energia emitida pelo sensor interage com a superfície do terreno e seria assumido que essa interação resultasse num único retorno, Entretanto as diferentes feições que compõem o terreno irão gerar diferentes retornos em função da forma e dimensão do alvo que receberá a energia incidente, Desta forma, cada pulso transmitido da fonte emissora pode gerar múltiplos retornos (Figura 78).

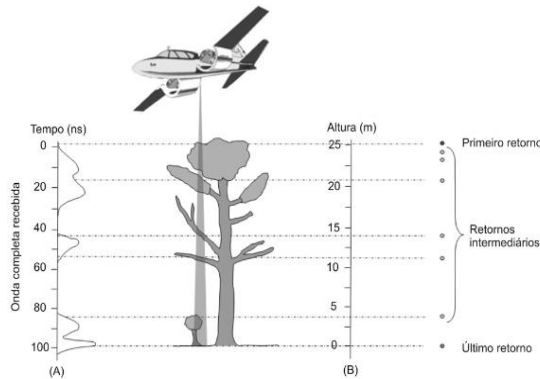


Figura 78 - Retornos LIDAR.

Fonte: Wagner *et al* (2004).

Esses retornos podem ser manipulados e separados, As informações referentes aos primeiros retornos serão direcionadas para a geração de Modelos Digitais de Superfície (MDS), últimos retornos para Modelos Digitais de Terreno (MDT) e de todos os retornos para Modelos Digitais de Elevação (MDE).

5. CONDIÇÕES AMBIENTAIS PARA USO DE UM LST

A temperatura no interior do scanner pode ser muito superior a da atmosfera circundante devido ao aquecimento do ambiente ou aquecimento interno resultante da radiação externa, ou seja, o Sol, Esta fonte de radiação externa pode aquecer um lado do tripé ou o escaner, distorcendo lentamente os dados do SVLT, Não só a temperatura do equipamento, mas a temperatura da superfície a ser escaneada é de importância fundamental, Ao escanear um alvo quente, por exemplo, num ambiente industrial, a radiação de fundo causada pela superfície quente reduz a relação entre o alvo e o feixe de radiação eletromagnética e, assim, a precisão das medições de distância (LERMA GARCIA, 2008).

Os SVLT só irão funcionar corretamente quando utilizado num determinado intervalo de temperatura, Mesmo dentro de distâncias curtas pode-se observar desvios em medições, Como em todas as operações de medição à distância baseados em laser, erros naturais decorrem, principalmente de variações atmosféricas de temperatura, pressão e umidade, que afetam o índice de refração, e modificam o comprimento de onda de energia eletromagnética, Isto significa, que a velocidade da luz laser é fortemente dependente da densidade do ar.

A maioria dos softwares de aquisição de varredura a laser prevê e corrige essa refração, definindo um parâmetro para ela, Em geral, os SVLT são predefinidos usando o parâmetro de atmosfera padrão ISO (15 ° C, 1013,25 hPa), Ao

trabalhar sob diferentes condições atmosféricas, diferentes da atmosfera padrão, estes parâmetros devem ser adaptados, Uma diferença de temperatura de 10 ° C ou na pressão de ar de 35 hPa leva a um erro de distância de 1 milímetro / 100m (LERMA GARCIA, 2008).

Uma vez que o sensor opera numa banda de frequências muito estreita, a precisão da medição do intervalo pode ser influenciada também por radiação externa, por exemplo a partir de fontes de forte iluminação exterior, Filtros de interferência óptica especiais podem ser aplicados na unidade receptora, permitindo apenas as frequências corretas para alcançar o receptor.

6. DIÂMETRO DE VARREDURA GERADOS POR PULSOS EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA DE ESCANEAMENTO

Quando é efetuado o escaneamento a partir de um SVLT, cada pulso ao atingir um alvo projeta nele um círculo que pode ter um determinado diâmetro d' (Figura 79).

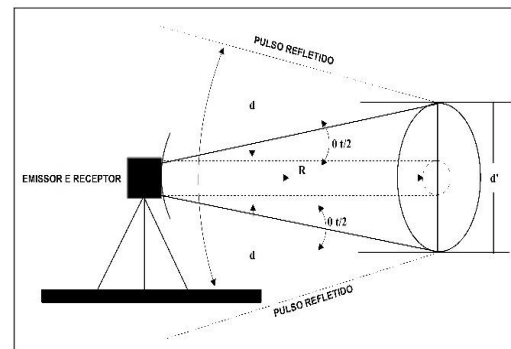


Figura 79 - Diâmetro do círculo projetado por um pulso emitido pelo SVLT.

Fonte: Adaptado de Shan e Toch (2009).

Esse diâmetro é influenciado diretamente pela divergência do pulso emitido pelo SVL, O retorno do sinal é função da dispersão da energia do pulso laser dentro da área formada pela projeção do ponto no alvo (BRANDALIZE, 2001).

Na Tabela 1, há as especificações de um LST fabricado pela empresa Optech, modelo Ilris 3D Hd.

Acurácia de Alcance	4 a 7mm para 100 metros
Acurácia angular	8mm para 100 metros
Alcance máximo	400 metros, para objetos com refletividade de 10%
	1250 metros, para objetos com 80% de refletividade
Campo de Visão	40° x 40°
Frequência	10 Khz
Comprimento de onda do laser (λ)	1535 nm
Classe Laser	Classe 1 (inofensivo aos olhos)
Divergência do feixe laser	0,008594° (150 μ rad)

Tabela 21 - Características do SVLT Optech Iiris 3D HD.

Fonte: Teledyne Optech (2016).

Quanto maior esse círculo maior será a dispersão do valor da coordenada do ponto medido, Baltsavias (1999), descreve a fórmula da Equação 4, para calcular o diâmetro de um círculo, para um Sistema de Varredura Aerotransportado (SVAT) projetado, a partir do ângulo de varredura, distância do alvo e divergência do feixe laser.

$$d' = \frac{R}{\cos^2(\theta)} \cdot (\gamma) \quad (4)$$

Onde:

- d' = Diâmetro do círculo projetado,
- h = Distância entre o SVLT e o alvo,
- γ = Divergência do feixe laser,
- θ = Ângulo de abertura do sensor.

Usando a Equação 4 e os dados referente a Tabela 1 ($\theta = 40^\circ$, $h = 15\text{m}$, $\gamma = 150\mu\text{m}$) para uma distância de 15 (quinze) metros o valor do diâmetro do círculo projetado ficará em 3,8 milímetros.

Para distâncias de 400 e 1200 metros, que são valores de distâncias medidas pelo LST Optech com refletividade de 10% e 80% esses valores ficam em 10,2 cm e 30,6 cm respectivamente.

6. UTILIZAÇÃO DE FILTROS E COMPARAÇÃO COM A FOTOGRAMETRIA NA GERAÇÃO DE MDT

Existem diversas maneiras de se obter um modelo digital de terreno, Pode se adquirir um MDT por interpolação de pontos obtidos por estação total ou com rastreamento GNSS, por interpolação de curvas de nível ou pontos cotados extraídos de cartas topográficas, através de Radar, Fotogrametria e também através de nuvens de pontos oriundas de tecnologia LIDAR (terrestre ou aerotransportada), Todos os métodos possuem vantagens e desvantagens, porém aqueles que conseguem informações tridimensionais do terreno de maneira mais abrangente (maior área) e mais rápida são a Fotogrametria, Radar e LIDAR.

Habbib (2007) compara os métodos de aquisição de pontos tridimensionais por laser e Fotogrametria e cita vantagens e desvantagens dos dois métodos, Uma das vantagens da tecnologia LIDAR é que a obtenção de coordenadas é realizada de maneira direta enquanto que na Fotogrametria a obtenção de coordenadas é obtida de maneira indireta, Já, uma das vantagens da Fotogrametria, principalmente a terrestre é que ela é bem mais barata comparada com o escaneamento laser, Habbib (2007) também descreve que a acurácia vertical da tecnologia LIDAR é melhor que a obtida por Fotogrametria, porém a acurácia horizontal da Fotogrametria é melhor.

O método de varredura a laser é bastante efetivo na tarefa de aquisição de MDT, Em Fotogrametria esta mesma tarefa pode ser realizada com níveis parecidos de automação, mas o método de varredura a laser possui vantagens em relação aos métodos fotogramétricos convencionais de geração de MDT, Uma vantagem notável e a capacidade (de parte dos pulsos laser) de penetrar áreas de vegetação e atingir o terreno, permitindo a eliminação da vegetação de maneira rápida e eficaz, Os métodos de eliminação de vegetação e outras feições existentes no terreno, de forma a deixar somente pontos laser pertencentes ao terreno, são conhecidos como de filtragem (DAL POZ, 2013).

Sithole (2001) apresentou um filtro que utiliza a declividade como parâmetro para diferenciar os pontos que fazem parte do MDT daqueles que fazem parte do MDS.

Pirotti *et al* (2012) também realizaram estudos utilizando filtros morfológicos de classificação de vegetação utilizando um LST Riegl VZ-400, Uma visão geral dos métodos de filtragem em nuvens de pontos utilizando

plataformas aerotransportadas é apresentado em Vosselman e Maas (2010) e são divididas em três grupos: um baseado em morfologia matemática, um de densificação progressiva de uma malha de triângulos, e outro baseado em interpolação linear hierárquica.

7. AQUISIÇÃO DE MDT A PARTIR DE DADOS LIDAR

Conforme Andrade (1998), modelar um terreno significa reproduzir a sua forma. Quando esta reprodução é realizada por meios digitais, diz-se que se fez um modelo digital de terreno (MDT). Existem muitas formas de modelar a superfície de um terreno. No processo de interpolação de altitudes é que fica definida a forma de representação da superfície que se pretende modelar.

Para Jensen (2011) modelos digitais de terreno são aqueles que contêm informação de elevação da superfície desnuda da Terra, sem influência de vegetação ou de feições construídas pelo homem como postes, prédios, casas etc.

A obtenção de um MDT a partir de dados LIDAR, seja através de uma plataforma aérea ou terrestre, requer a identificação de pontos que correspondem a feições existentes no terreno, para que em gabinete esses dados possam ser manipulados. Lohmann *et al* (2000) designa o termo “filtragem” ao processo de identificação de pontos no terreno e pontos elevados acima dele, enquanto o termo “classificação” é adotado por Briese e Pfeifer (2001). Em virtude da eliminação dos pontos acima do terreno, ocorre uma significativa redução dos dados obtidos, cujas lacunas são preenchidas por processos de interpolação (SHIMALESKY, 2007). Segundo Sithole e Vosselman (2005), pode-se ainda gerar o modelo digital do terreno numa área coberta por vegetação, identificando do conjunto de dados, os pontos mais baixos que são os pulsos que atingiram o terreno (últimos retornos), e filtrando o restante dos pulsos.

Para Sithole e Vosselman (2005), os métodos de filtragens assumem diferentes abordagens a respeito da estrutura do terreno no local, o que condiciona a seleção da metodologia adotada pelo filtro afetando seu desempenho.

8. ACURÁCIA DOS DADOS GERADOS

O trabalho de mensuração envolve diversas etapas, desde os trabalhos de planejamento em gabinete, levantamentos de campo e a finalização e geração do produto final em escritório. Qualquer atividade que envolva a obtenção de medidas sempre existe algum tipo de erro associado. Esses tipos de erros podem ser

classificados em: grosseiros, sistemáticos e aleatórios.

Os erros grosseiros podem ser oriundos da falta de experiência ou por desatenção de quem realiza o processo de medição. Os erros sistemáticos podem indicar algum problema no instrumento de medição e os erros aleatórios ou acidentais são aqueles que ocorrem de maneira fortuita, ao acaso.

Como existem diversas fontes e tipos de erros, nota-se que a grandeza denominada de valor verdadeiro nunca é conhecida. Assim, para cada tipo de mensuração adota-se um valor como referência. Assim, para se estimar a qualidade de qualquer dado que foi medido, compara-se ele com o seu valor de referência. Porém, para tentar minimizar a existência de erros, faz-se necessário uma determinada quantidade de medições para que exista redundância e assim possa-se determinar uma solução única para o problema em questão.

O ideal de cada processo de medição seria a inexistência de erros. A inexistência de erros recebe o nome de exatidão, ou seja, a exatidão é considerada um processo sem qualquer tipo de erro. A acurácia representa a proximidade de uma medida em relação a um valor adotado como verdadeiro. O termo precisão demonstra o grau de consistência de uma medida em relação a sua média.

Assim, nota-se que o termo exatidão se refere a um processo de medição considerado ideal com ausência total de erros, algo impossível de acontecer. O termo acurácia envolve apenas erros aleatórios, ou seja, que ocorrem ao acaso que fica regulado pela lei das probabilidades. O termo precisão engloba tanto efeitos aleatórios como sistemáticos, ou seja, além de falhas ocasionais no processo de medição também está sujeito a falhas instrumentais.

Como todo processo de medição é passível de erros o ideal é a sua minimização, para a eliminação de erros grosseiros pode-se adotar um maior rigor no momento da medição.

No Brasil, não existe uma definição clara e objetiva quanto aos métodos para a determinação de controle de qualidade posicional de dados cartográficos. A legislação classifica os produtos cartográficos em função do padrão de exatidão cartográfica (PEC) que é normatizado pelo Decreto-Lei 89,817.

Diversos autores como Mikhail e Ackermann (1976), Galo e Camargo (1994), Rocha (2002) e Santos (2010) realizaram trabalhos que abordaram temas envolvendo controle de qualidade posicional de produtos cartográficos, nesses trabalhos conceitos de

acurácia, exatidão, precisão e estatística espacial são analisados.

Para a determinação da acurácia de um modelo digital de terreno ou de superfície, normalmente determinam-se pontos de controle com coordenadas tridimensionais espalhados ao longo da área de estudo, usando uma técnica de alta precisão de levantamentos.

Pode-se combinar dados de levantamento GNSS (*Global Navigation Satellite System*) com estação total e a partir desses dados verificar as discrepâncias dos valores das coordenadas comparadas, Para Miller (2004) o padrão de acurácia geoespacial para dados planimétricos e altimétricos definidos pelo FGDC (*Federal Geographic Data Comitee*) é baseado no cálculo do Erro Médio Quadrático (EMQ).

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta^2}{n}} \quad (5)$$

Onde Δ é a diferença entre a medida do ponto de verificação obtida no terreno e a medida obtida pelo LST no mesmo local, O padrão recomenda que seja usado um mínimo de 20 pontos de controle e os mesmos devem ter uma acurácia substancialmente maior do que os produtos obtidos pelo LST (MILLER, 2004).

A acurácia planimétrica (AP) (Equação 6) com um nível de confiança de 95% é calculada usando a seguinte fórmula:

$$AP = 2.447 \cdot \frac{(EMQ_x + EMQ_y)}{2} \quad (6)$$

A acurácia vertical (AV) (Equação 7) com um nível de confiança de 95% é calculada usando a seguinte fórmula:

$$AV = 1.96 \cdot EMQ_z \quad (7)$$

Miller (2004) descreve que as acurácias verticais de dados laser obtidos através de varreduras aerotransportadas variam normalmente entre 05 e 30 cm.

Porém, esses dados são afetados por elementos como a influência da cobertura do solo, declividade, presença ou ausência de folhagens nas vegetações existentes no terreno e posição do sensor.

Mikhail e Ackerman (1976), definem acurácia como o grau de proximidade de uma estimativa com seu parâmetro ou valor utilizado como verdadeiro, outrossim, os autores definem o termo precisão como grau de inconsistência da grandeza medida com a sua média.

Também outro método de se avaliar a acurácia ou precisão posicional é a partir de dois testes estatísticos que verificam se existe tendência nas componentes (coordenadas E, N e h) analisadas.

Primeiramente são feitas duas formulações que irão embasar um teste de hipótese:

$H_0 = 0$, consiste na primeira hipótese, define que os dados da amostra analisada estão dentro de um intervalo de confiança analisado, assim definido como hipótese básica.

$H_0 > 0$, denominada de hipótese alternativa, informa que os dados da amostra analisada estão fora do intervalo de confiança determinado, assim a hipótese básica é rejeitada.

Depois são realizados dois testes, baseado na média (Equação 8), desvio-padrão (Equação 9) e variância das discrepâncias dos dados analisados.

O primeiro teste, denominado de teste de tendência, ou teste T (Santos, 2010) analisa se existe tendência nas componentes analisadas, O teste T, utiliza como parâmetros a média (Equação 8), desvio-padrão (Equação 9) e os graus de liberdade (gl) da amostra.

Assim, utilizando a Equação 10 é definido um valor, no caso, T_{calc} , Esse valor é comparado com a tabela *T Student*, a partir no intervalo de confiança e dos graus de liberdade da amostra analisada.

Caso o valor encontrado na Equação 10, seja, menor que o valor teórico, o encontrado na tabela *T Student*, a hipótese nula é aceita, Caso o valor calculado seja maior que o teórico a hipótese nula é rejeitada e a hipótese alternativa é aceita indicando que existe tendência na amostra.

$$\bar{\Delta x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (8)$$

$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \bar{\Delta x})^2} \quad (9)$$

$$T_{calc} = \frac{\bar{\Delta x}}{\sigma_{\Delta x}} \cdot \sqrt{gl} \quad (10)$$

O teste de precisão (Santos, 2010) é realizado utilizando como parâmetro a variância da amostra, que nada mais é que a raiz quadrada positiva do desvio-padrão, nesse teste é utilizada a Tabela χ^2 (qui-quadrado).

$$\chi^2_{\text{calculado}} = (gl) \cdot \frac{\sigma_{\Delta x}^2}{\sigma_x^2} \quad (11)$$

O teste T, nos informa se existe tendência nas componentes analisadas, para se determinar o valor da tendência em cada coordenada, pode-se utilizar a Equação 12 (MIKHAIL e ACKERMAN,1976):

$$EMQ = \sigma p^2 + (b)^2 \quad (12)$$

Onde σp^2 representa a incerteza ou variância das observações e b representa o vício do estimador (tendência).

Para ratificar os conceitos abordados, segue abaixo uma comparação de controle de qualidade posicional gerado por dois SVLT, Um sistema fabricado pela empresa Optech, modelo Iliris 3D Hd e o outro, fabricado pela empresa Faro, modelo Focus 3D 120S.

Os testes foram realizados em Porto Alegre-RS, no Campus do Vale da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

Foi utilizado uma parede de calibração, Figura 80, onde nela foram medidos 29 pontos, com visadas duplas, com uma estação total da marca Topcon modelo 7500.

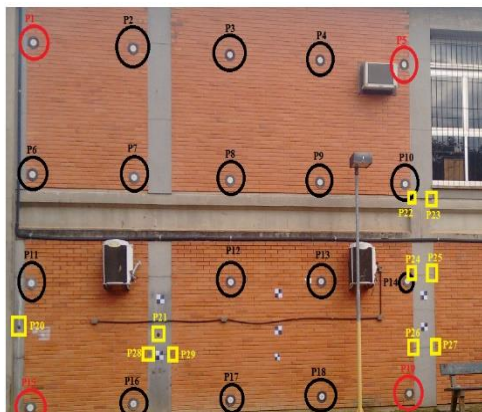


Figura 80 - Parede de calibração no Campus do Vale da UFRGS.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os pontos P1, P5, P15 e P19, foram utilizados para fazer o georreferenciamento das nuvens de pontos gerados pelos dois LST, os outros pontos, total de 25, serviram de comparação com as coordenadas medidas com estação total.

A acurácia descrita nos manuais dos LST são de 2mm (LST Faro) para distâncias de até 25 metros e 4 a 7 mm (LST Optech) para distâncias de até 100 metros.

Analisando os resultados descritos na Tabela 22 e Tabela 23, nota-se que os valores de acurácia estão bem abaixo daquela descrita no manual dos LST.

OPTECH ILIRIS 3D HD

Discrepâncias (m)	E	N	H (Ortom.)
Média (m)	-0,0056	0,0014	0,0002
Desvio-Padrão (m)	0,008	0,008	0,007
EMQ (m)	0,0095	0,0081	0,0067
Máximo (m)	0,010	0,022	0,024
Mínimo (m)	-0,023	-0,019	-0,014
Amostra	25	25	25
G, Liberdade (gl)	24	24	24
T Std Teórico	2,064	2,064	2,064
T Std Amostral	3,548	0,821	0,155
Tendencioso	SIM	NÃO	NÃO
χ^2 Teórico	37,652	37,652	37,652
Acurácia (m)	0,00004	0,00004	0,00003

Tabela 22 - Análise de controle de qualidade posicional utilizando um LST da empresa Optech modelo Iliris 3D Hd.

Fonte: Elaborado pelo autor.

FARO FOCUS 3D

Discrepâncias (m)	E	N	H (Ortom.)
Média (m)	-0,0007	0,0003	0,0006
Desvio (m)	0,006	0,008	0,008
EMQ (m)	0,0055	0,0077	0,0077
Máximo (m)	0,015	0,014	0,011
Mínimo (m)	-0,015	-0,017	-0,015
Amostra	25	25	25
G, Liberdade (gl)	24	24	24
T Std Teórico	2,064	2,064	2,064
T Std Amostral	0,540	0,186	0,370
Tendencioso	NÃO	NÃO	NÃO
χ^2 Teórico	37,652	37,652	37,652
Acurácia (m)	0,00002	0,00004	0,00004

Tabela 23 - Análise de controle de qualidade posicional utilizando um LST da empresa Faro modelo Focus 3D.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da análise dos resultados da Tabela 22 e Tabela 23, o valor mais coerente para a acurácia posicional dos dois sistemas de varreduras laser, são os resultados a partir do EMQ que variam em cada componente desde 5,5 mm a 9,5 mm, valores esses compatíveis com os valores de acurácia descritos no manual de operação dos LST.

Efetuada o cálculo da acurácia planimétrica e altimétrica, com intervalo de confiança de 95%, descrita por Miller (2004) utilizando as Equações 6 e 7, chega-se aos resultados descritos na Tabela 24.

ACURÁCIA	SVLT	SVLT
Acurácia Plan.	0,016	0,021
Acurácia Alt.	0,015	0,013

Tabela 24 - Acurácia planimétrica e altimétrica conforme o FGDC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

9. DISCUSSÕES E CONCLUSÃO

A utilização de um LST possui inúmeras aplicações em diversas áreas do conhecimento como engenharias, arquitetura, geologia, arqueologia e estudos ambientais.

Modelos de elevação e de terreno, que são produtos que podem ser extraídos das nuvens de pontos possuem muitas aplicações nas áreas das engenharias como em construção de estradas, cálculos de volumes na área de mineração, estudos de bacias hidrográficas, etc, A obtenção de MDT, a partir de um LST, possui uma alta acurácia vertical em comparação com os métodos tradicionais como o Radar, Fotogrametria e também de varreduras laser aerotransportadas.

No presente trabalho foram abordados conceitos voltados para a geração de MDT a partir de nuvens de pontos oriundas de varreduras, Um LST fornece informações físicas (intensidade) e geométricas (coordenadas X, Y e Z) de diversas feições existentes no terreno, que caracterizam os elementos que constituem um MDS, Assim para se gerar um MDT pode-se utilizar técnicas de classificação de dados através de diferentes tipos de filtros, Onde, a partir deles pode-se identificar feições tipo postes, árvores, rochas, prédios e eliminá-las das nuvens de pontos, Depois, partir de processos de interpolação, pode-se iniciar a criação do MDT.

Em todo produto cartográfico deve ser realizado um controle de qualidade para se verificar a precisão ou acurácia oriunda de testes estatísticos, A partir dos resultados obtidos pelo controle de qualidade pode-se determinar para quais finalidades o produto pode utilizado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, J. B. Fundamentos de Fotogrametria. 1998. páginas 202 a 204.
- BARBER, D., MILLS, J., & BRYAN, P. (2003), Towards a standard specification for terrestrial laser scanning of cultural heritage, CIPA International Archives for Documentation of Cultural Heritage, 19, 619-624.
- BALTSAVIAS, E.P., Airborne Laser Scanning: Basic Relations and Formulas. Institute of Geodesy and Photogrammetry. Switzerland. 1999.
- BRANDALIZE, A. A. Perfilamento a Laser: Comparação com Métodos Fotogramétricos, XX congresso Brasileiro de Cartografia. Rio Grande do Sul. Brasil. 2001.
- BRASIL. DECRETO LEI nº 89,917 de 20 de junho de 1984.
- BRIESE, C., PFEIFER, N. Airborne LASER Scanning and Derivation of Digital Terrain Models, In Grün/Kahmen (Eds.): Optical 3-D Measurement Techniques. Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung – I.P.F. Vienna. 2001.
- CHOW, J.C.K. Multi-Sensor Integration for Indoor 3D Reconstruction. Department of Geomatics Engineering, University Of Calgary – CAN. 2014.
- DAL POZ, A.P. Filtragem de dados de varredura laser: Princípios e exemplos. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. Foz do Iguaçu, PR. 2013.
- DALMOLIN, Q. SANTOS. D. R. Sistema Laser Scanner: conceitos e princípios de funcionamento. Curitiba. UFPR. 2004.
- FRÖHLICH, C., METTENLEITER, M. Terrestrial laser scanning – new perspectives in 3D surveying, International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Freiburg, v, 36, n, 8/W2.p. 7 -13. Oct. 2004.
- GALO, M.; CAMARGO, P. de O. O uso do GPS no controle de qualidade de cartas, In: 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Tomo II. P. 41-48. Florianópolis – Brasil. 1994.

- GODYCKA K. N., SZULWIC, J., ZIÓLKOWSKI, P. The Method Of Analysis Of Damage Reinforced Concrete Beams Using Terrestrial Laser Scanning. Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology. Poland. 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference - SGEM. 2014.
- GONÇALES, R. Dispositivo de varredura laser 3D terrestre e suas aplicações na Engenharia, com ênfase em túneis. Dissertação de Mestrado da Escola politécnica de São Paulo. São Paulo. 2007.
- GUARNIERIA, A., VETTOREA, A., PIROTTIA, F., & MARANIB, M. Filtering of TLS point clouds for the generation of DTM in salt-marsh areas. 2009.
- HABIB A., KERSTING A., P., RUIFANGA, Z., AL-DURGHAM KIM, M., C., LEE, D., C. 2007. Lidar Strip Adjustment Using Conjugate Linear Features in Overlapping Strips. The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII, Part B1. Beijing 2007. Pp. 386-390.
- JENSEN, J., R. Sensoriamento Remoto do Ambiente - Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. Editora Parêntese. 2011.
- LERMA GARCÍA, J.L., VAN GENECHTEN, B., HEINE, E., SANTANA QUINTERO, M. Theory and Practice on Terrestrial Laser Scanning, Training Material Based on Practical Applications. ISBN: 978-84-8363-379-3. 2 DVDs. 2008.
- LOHMANN, P., KOCH, A.; SCHAEFFER, M. Approaches to the filtering of LASER scanner data. The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Amsterdam. 2000.
- MEDINA, A.S. Uma Proposta De Metodologia para A Extração Semi-automática De Formas Arquitetônicas Planas Utilizando Dados Provenientes De Laser Escaner Terrestre. Tese Doutorado. 2012.
- MIKHAIL, E. M., BETHEL, J. S., MCGLONE, J.C. Introduction to Modern Photogrametry. 2001.
- MIKHAIL, E.; ACKERMAN, F. Observations and Least Squares. University Press of America. 1976. 497 p.
- MILLER, S. B. Photogrametric Products in Manual of Photogrametry. 5th Ed. Bethesda: ASPRS. 2004.
- MEOUCHE, R., E., REZOUQ, M., W., VANDEVENNE, W., HAMZAOU, R. Using a Laser Scanning to Construct a 3D Numerical Model to Study the Flooding Risk in Urban Area. IACSIT - International Journal of Engineering and Technology. Vol 5. No 3. June 2013.
- PIROTTI, F., GUARNIERI, A., VETTORE A. Ground filtering and vegetation mapping using multi-return terrestrial laser scanning. ISPRS. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2012.
- PIROTTI, F., GUARNIERI, A., VETTORE A. State of the Art of Ground and Aerial Laser Scanning Technologies for High-Resolution Topography of the Earth Surface. European Journal of Remote Sensing. 2013.
- PFEIFER N., BRIESE, C. Geometrical Aspects Of Airborne Laser Scanning And Terrestrial Laser Scanning. IASPRS. Volume XXXVI, Part 3 / W52. 2007.
- PFEIFER, N. Theory and Application of Laser Scanning. International Symposium of Photogrammetry Remote Sensing. ISPRS. Summer School. Ljubljana. Slovenia. Germany. 2007.
- ROCHA, R., S. Exatidão cartográfica para cartas digitais urbanas. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2002.
- SANTOS, A. P. Avaliação da Acurácia Posicional de Dados Espaciais com uso de Estatística Espacial. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. 2010.
- SHIMALESKY, V. Avaliação da qualidade da informação altimétrica derivada da varredura a LASER em uma região coberta por vegetação: um estudo de caso. Dissertação de Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas - Universidade Federal do Paraná. Curitiba - Paraná. 2007.
- SCHOFIELD, W., BREACH, M. Engineering Surveying. 6a edição. Butterworth-Heinemann Ltda. 2007.

SCHULZ, T. Calibration of a Terrestrial Laser Scanner for Engineering Geodesy. Technical University of Berlin. 2007.

SITHOLE, G. Filtering of laser altimetry data using a slope adaptive filter, International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2001.

SITHOLE, G., VOSELMAN, G. Comparison of Filter Algorithms. International Archives of Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2005. V. 34 (3/W13), Pag. 71-78.

SHAN, J., TOTH, C., K. Topographical Laser Ranging and Scanning Principles and Processing. 2009.

TELEDYNE OPTECH. Disponível em: <http://www.teledyneoptech.com/index.php/product/optech-ilris/>. Acesso em: 13 de mar. 2016.

TOMMASELLI A. M. G. Um Estudo sobre as Técnicas de Varredura a Laser e Fotogrametria para Levantamento 3D a Curta Distância. Geodésia online. 2003.

VOSELMAN, G.; MAAS, H. Airborne and terrestrial laser scanning. Whittles Publishing. 2010.

WUTKE, J., D. Métodos Para Avaliação De Um Sistema Laser Scanner Terrestre. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 2006.