



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CÂMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS

JULIANE MENDONÇA KOMAZAKI

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL DE NUVEM DE
PONTOS LiDAR AEROTRANSPORTADO: ANÁLISE
COMPARATIVA DE NORMAS E PADRÕES**



PRESIDENTE PRUDENTE – SP

2021

JULIANE MENDONÇA KOMAZAKI

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA POSICIONAL DE NUVEM DE
PONTOS LiDAR AEROTRANSPORTADO: ANÁLISE
COMPARATIVA DE NORMAS E PADRÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, para a obtenção do título de Mestre em Ciências Cartográficas.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Oliveira Camargo
Coorientador: Prof. Dr. Mauricio Galo

PRESIDENTE PRUDENTE – SP

2021

K81a

Komazaki, Juliane Mendonça

Avaliação da acurácia posicional de nuvem de pontos LiDAR
aerotransportado : análise comparativa de normas e padrões / Juliane
Mendonça Komazaki. -- Presidente Prudente, 2021
88 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente

Orientador: Paulo de Oliveira Camargo

Coorientador: Mauricio Galo

1. Acurácia. 2. LiDAR. 3. Normas. 4. Avaliação. 5. Nuvem de
pontos. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de
Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação da acurácia posicional de nuvens de pontos LIDAR aerotransportado: análise comparativa de normas e padrões

AUTORA: JULIANE MENDONÇA KOMAZAKI

ORIENTADOR: PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO

COORIENTADOR: MAURICIO GALO

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em CIÊNCIAS CARTOGRÁFICAS, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. PAULO DE OLIVEIRA CAMARGO (Participação Virtual)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Prof. Dr. DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS (Participação Virtual)
Departamento de Geomática / Universidade Federal do Paraná

Prof. Dr. ANTONIO MARIA GARCIA TOMMASELLI (Participação Virtual)
Departamento de Cartografia / Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente

Presidente Prudente, 30 de março de 2020.

DADOS CURRICULARES

Juliane Mendonça Komazaki

NASCIMENTO:	06/09/1993 – Regente Feijó – SP
FILIAÇÃO:	Marcos Nobuo Komazaki Sonia de Paula Mendonça Komazaki
2012-2017:	Curso de Graduação Engenharia Cartográfica Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP
2017-2021	Curso de Pós-Graduação Mestrado em Ciências Cartográficas Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos pais, por todo o apoio, incentivo, compreensão e carinho, que não mediram esforços para que eu chegasse a essa etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Desejo externar os meus sinceros agradecimentos a todos que colaboraram com o desenvolvimento desse trabalho, em especial:

A Deus, que sempre me guiou pelos melhores caminhos, pois sem Sua ajuda não conseguiria seguir em frente para alcançar meus objetivos.

A meus pais, Sônia e Marcos, ao meu marido Fernando, a minha irmã Jéssica, ao meu cunhado José, minha amiga Simone e ao restante da minha família, principalmente minhas avós Dirce e Helena, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e torcendo pelo meu sucesso.

Ao meu orientador Prof. Paulo de Oliveira Camargo, por toda ajuda no desenvolvimento do trabalho, e ao meu coorientador Prof. Mauricio Galo, que foi de fundamental importância na colaboração e andamento desta pesquisa.

Aos amigos que conquistei no ambiente do PPGCC, em especial ao Caio por toda sua ajuda e contribuição no desenvolvimento da minha pesquisa, e a minha “best” Ana Lucia, que esteve comigo desde a graduação e se tornou uma grande amiga.

A Engemap Geoinformação, uma empresa do Grupo Engemap, pela disponibilização da nuvem de pontos LiDAR aerotransportado.

A Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente – SP e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) por toda estrutura e suporte disponibilizados.

Ao Projeto CIGALA/GALIBRA, administrado pela Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente – SP, ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo pela disponibilização dos dados RINEX das estações.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Devido às novas tecnologias para obtenção de informações espaciais nas mais variadas áreas de conhecimento, cresce a cada dia a quantidade de dados espaciais disponíveis. Dessa forma, eleva-se proporcionalmente o número de usuários não especialistas na área de mapeamento, sendo que muitos deles não têm conhecimento sobre a qualidade dos dados gerados a partir destas informações. Isso ocorre principalmente pelos novos dispositivos e sistemas de aquisição, como é o caso do sistema de varredura a LASER aerotransportado, que permite a aquisição de dados da superfície terrestre, em curto espaço de tempo e com um grande detalhamento. Entretanto, os dados LiDAR adquiridos estão sujeitos a erros de natureza sistemática e aleatória, introduzidos pelo mecanismo de varredura a LASER e pelas incertezas dos parâmetros de integração dos componentes dos sistemas de navegação e posicionamento. Consequentemente, a avaliação da precisão e validação da qualidade dos produtos derivados de acordo como os padrões estabelecidos por órgãos e instituições nacionais e internacionais é de suma importância. O presente trabalho tem o objetivo de analisar e comparar as normas e padrões existentes que se referem à qualidade de dados obtidos por um Sistema de Varredura a LASER Aerotransportado (SVLA). Neste contexto, foram analisadas as normas definidas pela USGS e ASPRS (americanas), pela DSG (brasileira), pelo NRCan (canadense) e pelo ICSM (australiana). As etapas apresentadas nesta pesquisa podem ser divididas em: avaliação da acurácia relativa (com base no RMSD_z), avaliação da acurácia absoluta horizontal ($\text{RMSE}_{\text{plan}}$) e avaliação da acurácia absoluta vertical (RMSE_z). Para a avaliação da acurácia com base nestas normas, utilizou-se um conjunto de quatro faixas de pontos 3D sobrepostas, obtidas por SVLA, recobrindo uma área urbana de aproximadamente 13 km² do município de Presidente Prudente/SP, cuja densidade média é de 5 pontos/m². Os resultados obtidos para o controle de qualidade relativo da componente altimétrica, previstas pelas normas americana e canadense, indicam que os valores calculados atenderam às especificações das normas analisadas. A análise da acurácia absoluta horizontal foi feita com base em todas as normas consideradas nesta pesquisa, sendo os valores calculados compatíveis aos limiares estabelecidos pelas mesmas. Quanto à acurácia absoluta vertical, esta foi feita com base em dois produtos: a nuvem de pontos LiDAR e o MDT gerado a partir desta, uma vez que as normas brasileira e australiana são específicas para este tipo de dados (MDT ou MDS). Os resultados mostraram que somente o MDT atendeu às especificações das normas analisadas, sendo a nuvem de pontos reprovada pelas normas americana e canadense. Isso ocorreu pelo fato de que estas normas são específicas para o controle de qualidade da nuvem de pontos e, portanto, são mais rigorosas e mais adequadas para realização deste controle. Além disso, a partir do teste de tendência, pode-se verificar a existência de efeitos sistemáticos na nuvem de pontos, o que ocasionou o resultado em desacordo com as normas. Ademais, foi observado que a norma brasileira não foi elaborada visando à avaliação da acurácia desse tipo de conjunto de dados, o que a torna menos rigorosa que as normas estudadas, sendo sugerida uma revisão da mesma, tomando como referência a norma americana (USGS/ASPRS).

Palavras-chaves: LiDAR; Acurácia; Normas; Avaliação.

ABSTRACT

Due to new technologies for obtaining spatial information in the most varied areas of knowledge, the amount of available spatial data grows every day. Thus, the number of non-specialist users in the mapping area increases proportionately, and many of them are unaware of the quality of the data generated from this information. This is mainly due to the new devices and acquisition systems, as is the case with the airborne LASER scanning system, which allows the acquisition of data from the Earth's surface, in a short time and with great detail. However, the acquired LiDAR data are subject to errors of a systematic and random nature, introduced by the LASER scanning mechanism and by the uncertainties of the integration parameters of the components of the navigation and positioning systems. Consequently, the evaluation of the precision and quality validation of derived products according to the standards established by national and international bodies and institutions is of paramount importance. This work aims to analyze and compare the existing norms and standards that refer to the quality of data obtained by an Airborne LASER Scanning System (SVLA). In this context, the standards defined by the USGS and ASPRS (American), DSG (Brazilian), NRCan (Canadian) and ICSM (Australian) were analyzed. The steps presented in this research can be divided into: assessment of relative accuracy (based on RMSD_Z), assessment of absolute horizontal accuracy ($\text{RMSE}_{\text{plan}}$) and assessment of absolute vertical accuracy (RMSE_Z). To assess accuracy based on these standards, a set of four bands of overlapping 3D points was used, obtained by SVLA, covering an urban area of approximately 13 km² in the city of Presidente Prudente / SP, whose average density is 5 points/m². The results obtained for the relative quality control of the altimetric component, foreseen by the American and Canadian standards, indicate that the calculated values met the specifications of the analyzed standards. The analysis of absolute horizontal accuracy was made based on all the standards considered in this research, with the calculated values being compatible with the thresholds established by them. As for the absolute vertical accuracy, it was based on two products: the LiDAR point cloud and the MDT generated from it, since the Brazilian and Australian standards are specific to this type of data (MDT or MDS). The results showed that only the MDT met the specifications of the analyzed standards, and the point cloud was disapproved by the American and Canadian standards. This was due to the fact that these standards are specific to the quality control of the point cloud and, therefore, are more rigorous and more suitable for carrying out this control. In addition, from the trend test, it is possible to verify the existence of systematic effects in the point cloud, which caused the result in disagreement with the rules. In addition, it was observed that the Brazilian standard was not designed to assess the accuracy of this type of data set, which makes it less rigorous than the standards studied, and a review of it is suggested, taking the American standard as reference (USGS / ASPRS).

Keywords: LiDAR; Accuracy; Standards; Evaluation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Medição da distância. (a) Método de medição do intervalo de tempo entre emissão/recepção do pulso laser. (b) Pulso transmitido e refletido pela superfície.	18
Figura 2 – Componentes de um sistema de varredura a LASER.	19
Figura 3 – Espelhos de varredura. (a) Tipos de espelhos de varredura. (b) Configuração da varredura em relação ao tipo de espelho.	20
Figura 4– Elementos relacionados à geometria de aquisição de dados LASER. Elementos envolvidos na determinação do diâmetro do ponto projetado (a) e na largura da faixa de varredura (b).	21
Figura 5 – Múltiplos retornos do pulso LASER.....	23
Figura 6 – Registro de múltiplos ecos de cada pulso.	23
Figura 7 – Varredura laser. (a) Área sem informação devido à presença de edificação alta. (b) Minimização das áreas sem informação a partir de sobreposição entre faixas de 50%.	24
Figura 8 – Parâmetros e coordenadas envolvidos na aquisição de dados LiDAR.	25
Figura 9 – Área de estudo. (a) Dados LiDAR, com destaque para a área de recorte. (b) Grau de detalhamento dos dados.....	47
Figura 10 – Disposição dos pontos de verificação para o controle relativo.	49
Figura 11 – Exemplo da coleta de dados dos pontos de verificação em áreas planas. (a) Ponto 14a entre as faixas 1 e 2, localizado em um estacionamento. (b) Ponto 01b entre as faixas 2 e 3, localizado em um parque. (c) Ponto 08c entre as faixas 3 e 4, localizado em um campo de futebol.	50
Figura 12 – Fluxograma da avaliação da acurácia relativa.	51
Figura 13 – Disposição dos pontos de verificação para o controle absoluto.....	53
Figura 14 – Detalhe da nuvem de pontos LiDAR sobreposta a imagem intensidade no ponto de verificação 10.	54
Figura 15 – Coleta de dados no ponto de verificação. (a) Levantamento de dados GNSS em campo. (b) Obtenção do ponto correspondente na imagem intensidade.....	55
Figura 16 – Fluxograma da avaliação da acurácia absoluta.	56
Figura 17 – Discrepâncias planimétricas nos 15 pontos de verificação.	60
Figura 18 – Discrepâncias altimétricas obtidas da nuvem de pontos LiDAR.	64
Figura 19 – Discrepâncias altimétricas obtidas do MDT.	65
Figura 20 – Discrepâncias altimétricas entre as faixas 1 e 2.	66
Figura 21 – Discrepâncias altimétricas entre as faixas 2 e 3.	66
Figura 22 – Discrepâncias altimétricas entre as faixas 3 e 4.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Acurácia vertical absoluta para nuvem de pontos LiDAR, de acordo com o USGS.....	30
Tabela 2 – Acurácia vertical relativa para nuvem de pontos LiDAR, de acordo com o USGS.....	30
Tabela 3 – Acurácia Horizontal para Dados Geoespaciais, de acordo com a ASPRS.....	33
Tabela 4 – Número de pontos de verificação recomendados com base na área de estudo, de acordo com a ASPRS.....	34
Tabela 5 – PEC-PCD para planimetria e altimetria, em metros.....	35
Tabela 6 – Letra-código de acordo com o tamanho do lote e nível de inspeção.....	38
Tabela 7 – Tamanho da amostra e número de aceitação, segundo a letra-código e o LQA.....	39
Tabela 8 – Acurácia requerida para a nuvem de pontos LiDAR segundo o departamento de recursos naturais do Canadá.....	40
Tabela 9 – Acurácia requerida para a nuvem de pontos LiDAR, segundo o ICSM.....	42
Tabela 10 – Comparação das normas apresentadas.....	43
Tabela 11 – Discrepância na coordenada altimétrica e respectivo $RMSD_z$	57
Tabela 12 – Discrepâncias nas coordenadas planimétricas e respectivos valores de RMSE.	59
Tabela 13 – Cálculo da tendência nas coordenadas planimétricas.....	60
Tabela 14 – Classes comuns de acurácia horizontal de acordo com a ASPRS (2015).	61
Tabela 15 – Discrepâncias na coordenada altimétrica e respectivo valor de RMSE.	64
Tabela 16 – Cálculo da tendência para componente altimétrica.	65
Tabela 17 – Cálculo da tendência para componente altimétrica.	67
Tabela 18 – Resumo dos resultados obtidos na análise da acurácia relativa.....	69
Tabela 19 – Resumo dos resultados obtidos na análise da acurácia absoluta horizontal.	70
Tabela 20 – Resumo dos resultados obtidos na análise da acurácia absoluta vertical.	70

LISTA DE SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
ANPS	<i>Aggregate Nominal Pulse Spacing</i>
ASPRS	<i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>
CCMEO	<i>Canada Centre for Mapping and Earth Observation</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
DSG	Diretoria de Serviço Geográfico
EM	Erro Máximo Admissível
EP	Erro Padrão
ET-CQDG	Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais
EUA	Estados Unidos da América
FOV	<i>Field Of View</i>
GLONASS	<i>Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
ICSM	<i>Intergovernmental Committee on Surveying & Mapping</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
LAS	<i>Log ASCII Standard</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LQA	Limite de Qualidade Aceitável
MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
NRCan	<i>Natural Resources Canada</i>
NVA	<i>Non Vegetated Vertical Accuracy</i>
PEC-PCD	Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais
QL	<i>Quality Level</i>
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos sistemas GNSS
RMSD _z	<i>Root Mean Square Difference in the Z direction (Elevation)</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
RMSE _{plan}	<i>Horizontal Linear RMSE in the radial direction that includes both X and</i>

Y errors

RMSE _x	<i>Root Mean Square Error in the X direction (Easting)</i>
RMSE _y	<i>Root Mean Square Error in the Y direction (Northing)</i>
RMSE _z	<i>Root Mean Square Error in the Z direction (Elevation)</i>
SCN	Sistema Cartográfico Nacional
SVLA	Sistema de Varredura a LASER Aerotransportado
TBC	<i>Trimble Business Center</i>
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
VVA	<i>Vegetated Vertical Accuracy</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Objetivos.....	15
1.2	Justificativa	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
2.1	Sistema de Varredura a LASER	17
2.1.1	Componentes do sistema de varredura a LASER aerotransportado	18
2.1.2	Elementos relacionados à geometria de aquisição.....	21
2.1.3	Modelo Matemático.....	24
2.1.4	Erros envolvidos no sistema de varredura a LASER aerotransportado.....	26
2.2	Controle de Qualidade de Dados LiDAR	28
2.3	Normas e padrões para avaliação da acurácia posicional de nuvens de pontos LiDAR	29
2.3.1	Especificações básicas para dados LiDAR (USGS 2014) e padrões de acurácia vertical para dados de elevação (ASPRS 2015)	29
2.3.2	Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) – DSG (2016)	35
2.3.3	Diretriz Federal de Aquisição de Dados LiDAR Aerotransportado – NRCan (2017) ..	39
2.3.4	Especificações de Aquisição de Dados LiDAR e Modelo de Proposta – ICSM (2010).....	41
2.3.5	Comparação das normas	43
3	MATERIAIS E MÉTODOS	46
3.1	Materiais	46
3.2	Metodologia.....	47
3.2.1	Avaliação da acurácia relativa	47
3.2.2	Avaliação da acurácia absoluta.....	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1	Análise da acurácia relativa	57
4.2	Análise da acurácia absoluta.....	58
4.2.1	Análise da acurácia horizontal.....	59
4.2.2	Análise da acurácia vertical	63
4.3	Análise crítica das normas em análise	69
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	73
	REFERÊNCIAS	77
	APÊNDICE A – Coordenadas dos pontos utilizados na análise da acurácia relativa	81
	APÊNDICE B – Coordenadas dos pontos utilizados na análise da acurácia absoluta planimétrica.....	84
	APÊNDICE C - Coordenadas dos pontos utilizados na análise da acurácia absoluta altimétrica.....	86

1 INTRODUÇÃO

O LASER, acrônimo de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*, corresponde a um dispositivo eletro-óptico que gera radiação baseada no princípio da emissão estimulada da radiação. De acordo com Wehr e Lohr (1999), duas siglas são frequentemente usadas para denominar os sistemas de varredura a LASER: LADAR (*LAser Detection And Ranging*) e LiDAR (*Light Detection And Ranging*). Em geral, o termo LADAR é empregado por este deixar claro a utilização do LASER, entretanto, no Brasil, o termo LiDAR é mais utilizado.

Os sistemas de varredura a LASER aerotransportado (SVLA) podem ser utilizados em inúmeras aplicações nas mais diversas áreas. Ele permite a determinação das coordenadas tridimensionais de pontos sobre a superfície terrestre a partir da medida de distância entre o sensor e o objeto, determinada em função da medida do tempo de emissão-retorno do pulso laser, do ângulo de varredura, dos dados de posicionamento obtidos por um receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e do sistema de navegação inercial (INS), como visto em Wehr e Lohr (1999).

Conforme destacado por Schimalesky e Centeno (2008) e Zanardi *et al.* (2013), a principal vantagem do sistema de varredura a LASER aerotransportado (SVLA) é o grande volume de dados 3D adquiridos de forma rápida e precisa, quando comparado com os demais métodos, como os levantamentos topográficos convencionais e nuvem de pontos fotogramétricos, além de sua capacidade de obter pontos sobre o terreno, mesmo em áreas cobertas por vegetação. Entretanto, os SVLA são complexos, constituídos pelos sensores de navegação (GNSS + INS) e o sistema de varredura a LASER. Dessa forma, a integração e a calibração adequada dos sistemas, incluindo a calibração de cada sensor, bem como a sincronização de tempo entre os componentes é primordial para atingir a acurácia necessária para o mapeamento, como pode-se ver em Bang (2010) e Habib *et al.* (2010).

A qualidade da nuvem de pontos obtida de um SVLA é influenciada por erros aleatórios e sistemáticos presentes nas observações e parâmetros do sistema. A magnitude dos erros aleatórios depende da precisão das medidas do SVLA, que compreendem as medidas de posição e orientação do sistema, determinadas pelo GNSS/INS, o ângulo de varredura e a distância medida entre o sensor e o objeto. Por outro lado, a magnitude dos erros sistemáticos é causada principalmente por tendências nos parâmetros de montagem do sistema e nas medidas do SVLA: distância, ângulo de varredura, ângulos de atitude e posição do sensor

(BALTSAVIAS, 1999; HABIB *et al.*, 2008). Mesmo após a devida calibração desses sistemas, que contribui para a minimização do impacto dos erros sistemáticos, erros aleatórios inerentes ao processo de medição ainda estão presentes. Como consequência, a avaliação da qualidade e validação de desempenho dos produtos derivados desta fonte de dados é uma tarefa de suma importância, como salientam May e Toth (2007).

A análise da qualidade de um produto cartográfico refere-se aos procedimentos estabelecidos para a avaliação da acurácia do produto final. De acordo com Monico *et al.* (2009), o termo acurácia envolve tanto erros sistemáticos como aleatórios, enquanto precisão está unicamente vinculada com erros aleatórios.

De acordo com Habib e Rens (2007) e com a norma ISO 19157:2013, a acurácia posicional do produto final pode ser realizado por meio da acurácia relativa, ou interna, e da acurácia absoluta, ou externa. O controle de qualidade da acurácia relativa pode ser realizado avaliando o grau de consistência entre pontos LiDAR em faixas sobrepostas, ou seja, no processo de avaliação são analisados somente os dados advindos do levantamento LiDAR aerotransportado, enquanto o controle de qualidade da acurácia absoluta pode ser realizado comparando os dados da superfície LiDAR com pontos de controle (*checkpoints*) coletado de forma independente, ou seja, uma informação externa ao levantamento SVLA, como pode-se ver em Habib e Rens (2007). Ambos têm por finalidade verificar se a qualidade esperada para o produto foi atingida.

Pesquisas vêm sendo realizadas a fim de verificar a qualidade de nuvens LiDAR, ou dos produtos derivados. Hodgson e Bresnahan (2004), para evitar o uso de interpolação das altitudes na nuvem de pontos a partir dos pontos de controle, coletaram as coordenadas planimétricas (X, Y) dos pontos LiDAR diretamente na nuvem de pontos e as locaram em campo, obtendo assim a altitude para realização do controle de qualidade. A acurácia vertical foi avaliada para várias coberturas de solo, sendo obtidos os valores da raiz do erro médio quadrático (RMSE) variando de 17 a 19 cm para áreas de pavimentação, grama baixa e florestas perenes, chegando a 26 cm para regiões de florestas decíduas.

Liu (2011) realizou a verificação da acurácia vertical em diferentes tipos de cobertura do solo, explorando o desempenho de diferentes métodos de determinação da altitude a partir de dados LiDAR para os pontos de controle correspondentes. Dresch (2015) apresenta um método automático para controle de qualidade posicional relativa de dados LiDAR por meio da comparação de feições pontuais, lineares e superfícies planas correspondentes, extraídas em faixas adjacentes. Silva (2014) avaliou a qualidade posicional planimétrica das feições

pontuais em imagens de intensidade provenientes do SVLA. A avaliação da acurácia foi baseada na análise de pontos e medidas de feições lineares obtidas com as imagens de intensidade do SVLA comparadas com medidas obtidas em levantamento GNSS e restituição fotogramétrica, sendo estas avaliadas de acordo com o PEC-PCD. Lohani, Ghosh e Dashora (2018) apresentam uma revisão sobre as normas existentes, delineando os requisitos técnicos básicos necessários para o estabelecimento de especificações para uso de dados LiDAR.

Atualmente, as nuvens de pontos LiDAR derivados de SVLA são empregadas em diversos projetos, tais como: mapeamento florestal e topográfico, monitoramento de áreas costeiras, aplicações no planejamento e desenvolvimento urbano, como modelagem 3D de ambientes, manutenção e gerenciamento de obras, projetos de engenharia, como estradas e rodovias, simulação de enchentes, entre muitas outras. De acordo com Dalmolin e Santos (2003), Dresh (2015) e Aguilar e Mills (2008), apesar das inúmeras aplicações dos dados derivados de um SVLA, esses normalmente são apresentados sem uma estimativa adequada de sua acurácia. Além disso, são poucos os padrões estabelecidos para avaliar a qualidade posicional dos produtos derivados, bem como a taxa de amostragem adequada para esta análise.

Preocupados com a natureza dos erros dos produtos derivados da tecnologia SVLA, alguns países estabeleceram normas e determinaram padrões para execução do levantamento, bem como para o controle de qualidade posicional (da planimetria e altimetria). Um exemplo é a USGS (Serviço geológico dos Estados Unidos), que se fundamenta nas normas da ASPRS (Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto). Além disso, outras normas a serem utilizadas referem-se aos países como Brasil, Canadá e Austrália, sendo determinadas pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), Departamento dos Recursos Naturais do Canadá (NRCan) e Comitê Intergovernamental de Levantamento e Mapeamento (ICSM), respectivamente.

1.1 Objetivos

O objetivo principal desse trabalho é analisar e comparar normas e padrões estabelecidos em alguns países, como Austrália, Estados Unidos, Brasil e Canadá, referentes à qualidade de dados espaciais, mais especificamente em relação à acurácia posicional de nuvens de pontos determinadas a partir de um sistema de varredura a LASER

aerotransportado. Para isso, serão utilizadas como base as normas existentes no Brasil e as estabelecidas por órgãos e instituições internacionais ligadas à Fotogrametria.

Destacam-se como objetivos específicos:

- Fazer a análise crítica da literatura que trata das normas e padrões da qualidade de nuvem de pontos gerada por um sistema de varredura LASER aerotransportado (SVLA);
- Comparar as normas, destacando os aspectos relevantes, como a amostragem dos pontos de verificação, bem como suas limitações;
- Realizar a avaliação da acurácia posicional planimétrica e altimétrica de uma nuvem de pontos por meio do controle de qualidade relativo, considerando a sobreposição de faixas, e absoluto, considerando pontos de verificação coletados e campo;
- Analisar e comparar os resultados obtidos do controle de qualidade com as normas selecionadas, observando se estes obedeceram aos limiares estabelecidos pelas mesmas.

1.2 Justificativa

Uma das principais justificativas dessa pesquisa é contribuir para a discussão das possibilidades da estimativa da qualidade dos produtos advindos do uso da tecnologia SVLA, tendo em vista que são poucos os padrões estabelecidos para avaliar a qualidade posicional dos produtos derivados, bem como a taxa de amostragem adequada para esta análise. Outro ponto relevante tratado neste trabalho se refere ao fato de que a norma estabelecida pela DSG (Brasil) aborda apenas a acurácia dos produtos gerados a partir da nuvem de pontos LiDAR (Modelo Digital de Superfície e Modelo Digital de Terreno), enquanto as normas dos demais países abordam limiares tanto para os produtos gerados pela nuvem de pontos, quanto para a própria nuvem gerada do aerolevanteamento, permitindo assim avaliar os pontos mais relevantes e limitações de cada uma delas, evidenciando o que há de consonância entre estas.

Ademais, o advento do SVLA vem se mostrando amplamente aplicado em diversas áreas, entretanto, normalmente os produtos são apresentados sem uma estimativa adequada da sua acurácia, logo se faz necessário testar e investigar as normas existentes a fim de fornecer maior rigor na avaliação da acurácia e validação de desempenho dos produtos LiDAR.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica objetiva apresentar os principais conceitos e embasamento teórico e metodológico que foram utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Sistema de Varredura a LASER

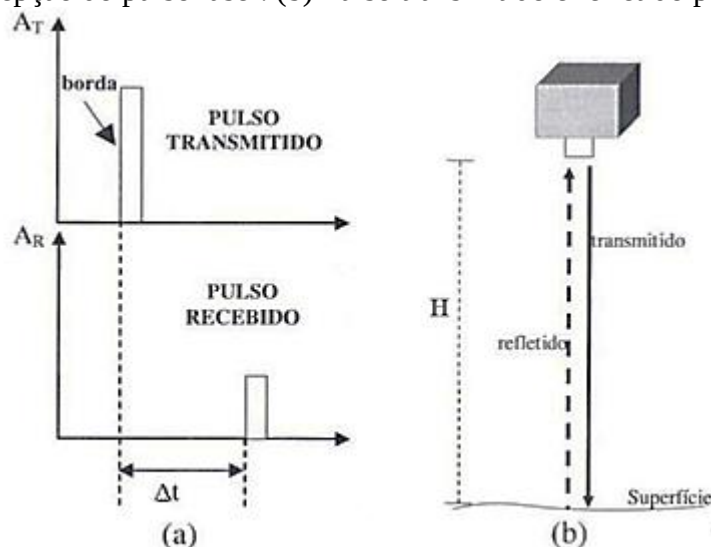
O Sistema de varredura a LASER aerotransportado (SVLA) é uma das alternativas para a geração de nuvens de pontos com coordenadas 3D no espaço, a partir da emissão de um pulso LASER na direção da superfície terrestre. O princípio de funcionamento destes sistemas é simples, podendo ser explicado de forma sintética da seguinte maneira: os pulsos LASER são gerados e, fazendo uso de um espelho de varredura, eles são emitidos em direção ao terreno. A superfície reflete o pulso emitido, retornando ao sistema parte da energia. Com isso, a medida da distância entre sensor e objeto é calculada a partir do intervalo de tempo entre a emissão e reflexão (retorno) (BALTSAVIAS, 1999; DALMOLIN e SANTOS, 2003).

De acordo com Wehr e Lohr (1999) e Shan e Toth (2009), os dois princípios fundamentais aplicados na medição de distância por meio do LASER aerotransportado (SVLA) são: baseado na medição do tempo de propagação do pulso LASER, ou seja, é medido o tempo que o sinal se propaga do sensor ao objeto e retorna ao sistema; e medição a partir da diferença de fase do sinal LASER.

A forma mais direta de medição de distância é determinada pelo tempo de propagação entre o pulso LASER emitido e o recebido. A Figura 1 ilustra esse procedimento de determinação de distância (D) entre o sensor e objeto, que é calculada a partir da velocidade da luz ($c \sim 300 \times 10^3 \text{ km/s}$) e do tempo de emissão-retorno do pulso laser (Δt), por meio da Equação (1) (WEHR e LOHR, 1999):

$$D = c \left(\frac{\Delta t}{2} \right). \quad (1)$$

Figura 1 - Medição da distância. (a) Método de medição do intervalo de tempo entre emissão/recepção do pulso laser. (b) Pulso transmitido e refletido pela superfície.



Fonte: Dalmolin e Santos (2003)

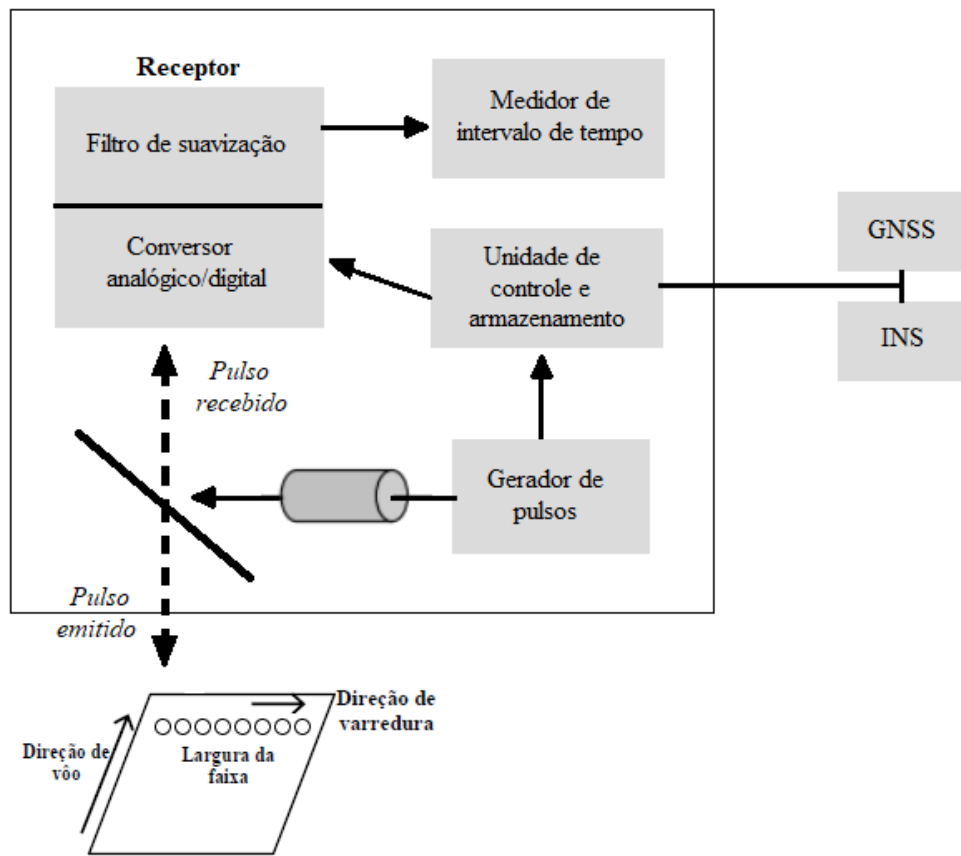
Para a determinação da posição tridimensional dos pontos no terreno é necessário a utilização de unidades auxiliares de posicionamento e, desta forma, obter dados complementares sobre a orientação do sensor no instante de emissão/registro do pulso e a posição da aeronave. Com isso, o sistema de varredura LASER aerotransportado é dividido em três componentes principais: receptor GNSS, sistema de navegação inercial e a unidade LASER a qual é composta pelo dispositivo de emissão e recepção do sinal laser e pelo mecanismo de varredura. Portanto, a partir da integração dessas componentes, é possível obter as coordenadas tridimensionais da nuvem de pontos (WEHR e LOHR, 1999; CENTENO e MITISHITA, 2007; LOHANI, 2008).

2.1.1 Componentes do sistema de varredura a LASER aerotransportado

Conforme já exposto anteriormente, o sistema de varredura é formado por alguns componentes fundamentais, que quando corretamente sincronizadas e referenciadas entre si, possibilitam a geração de coordenadas tridimensionais com alta qualidade (OLIVEIRA, 2013). Assim, o entendimento do sistema SVLA é importante para o conhecimento da qualidade do conjunto de dados LASER e, conseqüentemente, a qualidade do produto final proporcionado por tal tecnologia.

A Figura 2 mostra as componentes do sistema de varredura a LASER aerotransportado.

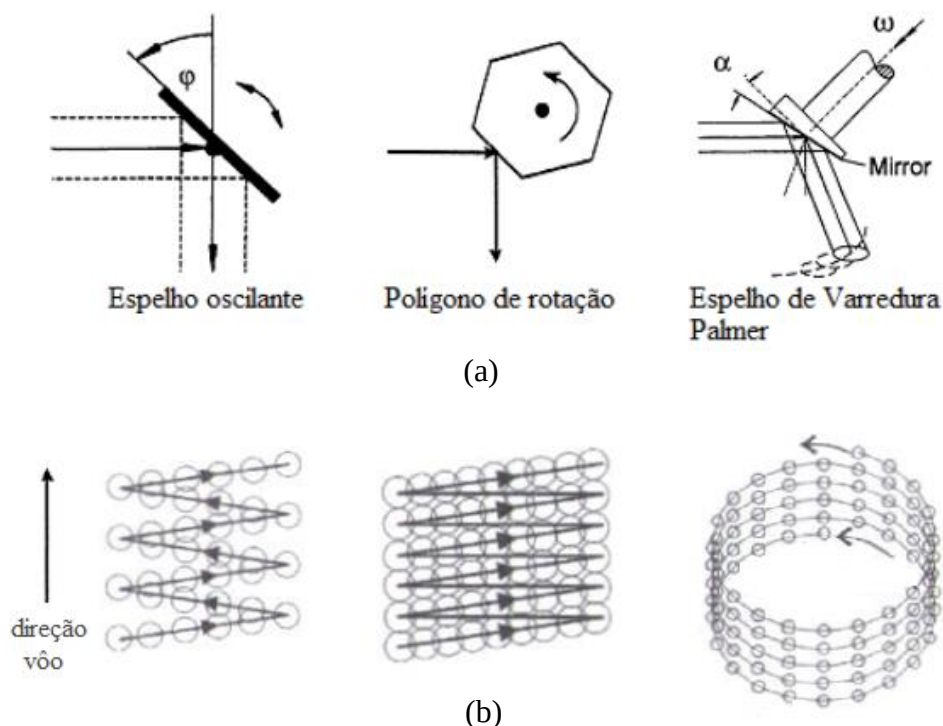
Figura 2 - Componentes de um sistema de varredura a LASER.



Fonte: Adaptado de Dalmolin e Santos (2003)

O gerador de pulsos é o componente principal do sensor LASER, sendo responsável pelo estímulo, por meio de um cristal, da emissão da radiação amplificada da luz. Após a geração dos pulsos LASER, estes são dirigidos para o espelho de varredura, onde o conjunto óptico de lentes e espelhos os orientam, direcionando-os para os objetos (WEHR e LOHR, 1999; DALMOLIN e SANTOS, 2003). A Figura 3 apresenta alguns exemplos de espelhos de varredura utilizados nos sistemas LASER, bem como seus respectivos padrões de varredura.

Figura 3 - Espelhos de varredura. (a) Tipos de espelhos de varredura. (b) Configuração da varredura em relação ao tipo de espelho.



Fonte: Adaptado de Dalmolin e Santos (2003); Shan e Toth (2009)

Segundo Wehr e Lohr (1999) e Dalmolin e Santos (2003), após a reflexão do pulso pelos alvos parte do sinal retorna ao sensor, sendo registrado pelo o receptor. O sinal de retorno que chega ao receptor é analógico, e a partir de um conversor A/D é transformado em digital. O sinal digital passa por um filtro de suavização (controlador de ruídos) que compara a intensidade do sinal emitido com o recebido, podendo este variar, dependendo de alguns fatores, como a distância e material do alvo.

O medidor de intervalo de tempo é responsável por medir o tempo de propagação entre a emissão e recepção do pulso laser. A contagem inicia quando o pulso é disparado e termina quando o pulso correspondente retorna (WEHR e LOHR, 1999). Já a unidade de controle e processamento permite sincronizar as medidas de distâncias e ângulos de varredura com as medidas de posição e orientação da plataforma. Essa integração ocorre graças ao sincronismo do sistema de medida de distância/varredura com as unidades de posicionamento (GNSS) e orientação (INS).

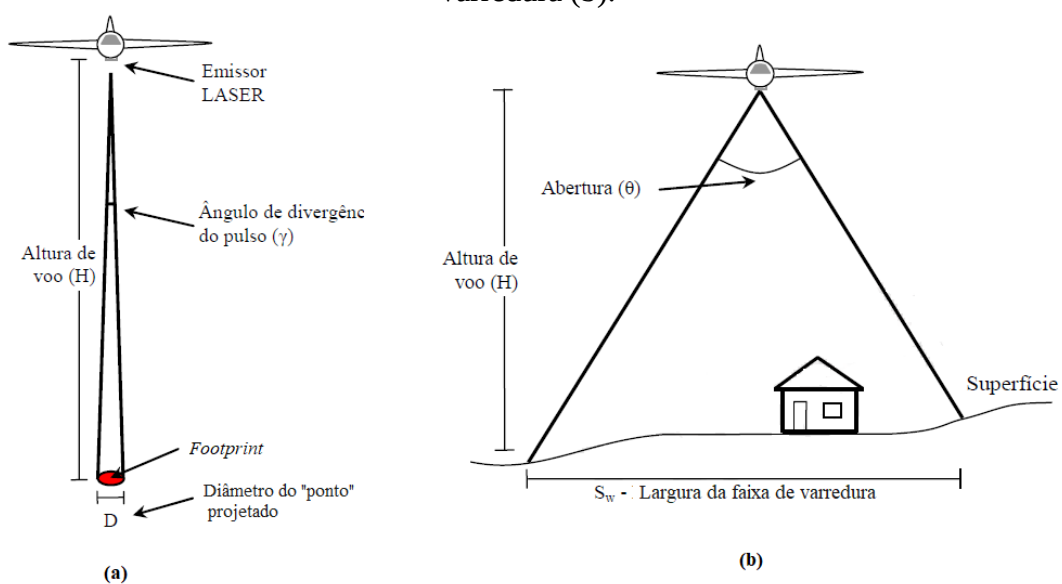
A integração GNSS/INS é fundamental para utilização do sistema. Segundo Kraus (2007), a posição e orientação do sensor durante a aquisição de dados pode ser obtida por meio do INS. Informações de posição e velocidade também podem ser obtidas por meio do

GNSS, se mantendo estáveis por longo período, exceto quando o sinal é perdido ou a configuração dos satélites é deficitária. Deste modo, a posição e atitude do sensor são obtidas por meio da integração GNSS/INS, onde as informações do GNSS fornecem suporte às informações do INS (KRAUS, 2007). Ademais, tal integração permite que o INS ajude a recompor o GNSS e melhorar a acurácia, e que o GNSS corrija problemas devido à deriva do INS. Por isso, os sistemas GNSS e INS são considerados complementares (SCHIMALESKY e CENTENO, 2008).

2.1.2 Elementos relacionados à geometria de aquisição

O levantamento da superfície terrestre a partir de um SVLA é feito de modo que o movimento da aeronave permita a cobertura na direção da linha de voo, enquanto que a varredura permite o deslocamento do feixe LASER na direção transversal à linha do voo (GALVANI e DAL POZ, 2013). Conforme exposto em Baltsavias (1999), o diâmetro do “ponto” LASER projetado no terreno (*footprint*) depende do ângulo de divergência do pulso (γ), da altura de voo (H), do ângulo de abertura do sistema LASER e da inclinação do terreno (Figura 4a). Já a largura da faixa de varredura no terreno (S_w) é obtida em função da altura de voo média (H_m) e do ângulo de abertura máximo ($\theta - FOV$) (Figura 4b).

Figura 4 - Elementos relacionados à geometria de aquisição de dados LASER. Elementos envolvidos na determinação do diâmetro do ponto projetado (a) e na largura da faixa de varredura (b).



Fonte: Galo (2016)

De acordo com Baltsavias (1999), esses elementos podem ser obtidos a partir das Equações (2) e (3), para o caso em que se tem terreno plano e o ângulo de divergência (γ) pequeno.

$$D = 2H \operatorname{tg} \left(\frac{\gamma}{2} \right), \quad (2)$$

$$S_w = 2H_m \operatorname{tg} \left(\frac{\theta}{2} \right), \quad (3)$$

Outros elementos como número de pontos por linha de varredura (N_{LIN}), distância entre os pontos amostrados transversais à linha de voo (d_T) e ao longo da mesma (d_{LVoo}), podem ser calculados a partir das Equações (4), (5) e (6) (BALTSAVIAS, 1999).

$$N_{LIN} = \frac{F}{f_{SC}}, \quad (4)$$

$$d_T = \frac{S_w}{N_{LIN}}, \quad (5)$$

$$d_{LVoo} = \frac{|\vec{v}|}{f_{SC}}, \quad (6)$$

sendo:

F – Frequência ou taxa de repetição dos pulsos;

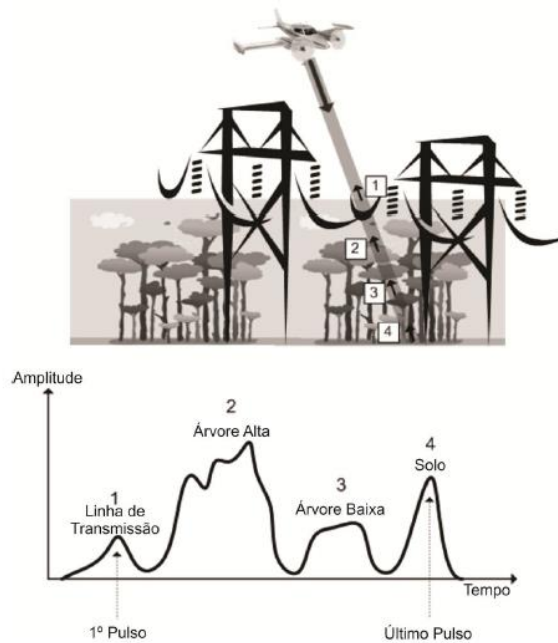
f_{SC} – Frequência de varredura (número de linhas escaneadas por segundo);

$\vec{v}$ – Velocidade da aeronave.

Em função da divergência do pulso laser, o diâmetro do *footprint* varia e, como consequência, um pulso LASER pode interceptar parcialmente diferentes objetos na sua trajetória, que permite registrar múltiplos retornos para um único pulso emitido (Figura 5). Com isso, o ponto mais próximo ocasiona um retorno mais rápido, correspondendo ao primeiro eco. Já o ponto mais distante ocasiona um retorno mais demorado, sendo este o último eco. Um SVLA geralmente captura o primeiro e último retorno, sendo que muitos sistemas são capazes de registrar de quatro a cinco ecos separadamente. Atualmente, existem sensores que armazenam a forma completa da onda de retorno, ou seja, grava todo o sinal refletido discretamente. Alguns estudos mostraram que os dados LiDAR em forma de onda completa fornecem não apenas nuvens de pontos 3D, mas também informações adicionais

sobre as propriedades do alvo, como a largura do pulso (MALLET e BRETAR, 2009; DRESCH, 2015; SHINOHARA et al., 2020).

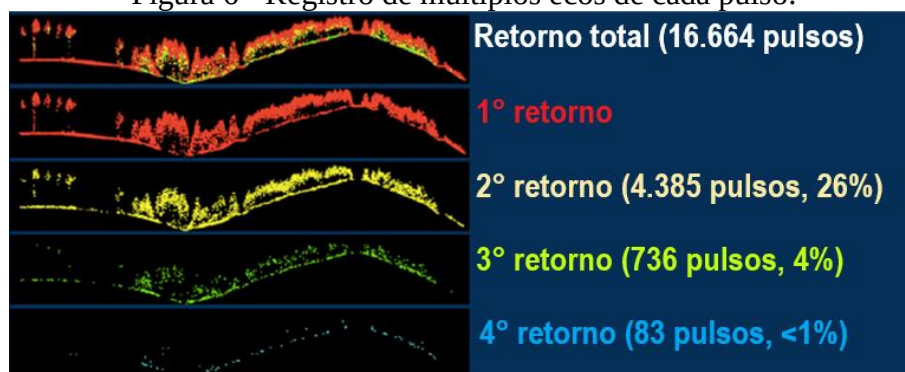
Figura 5 - Múltiplos retornos do pulso LASER.



Fonte: Dresch (2015).

Ainda de acordo com Mallet e Bretar (2009), os múltiplos ecos normalmente ocorrem quando o feixe incide em superfícies que permitem a passagem de parte do feixe, como a vegetação, bordas de objetos e edificações. Além disso, os dois primeiros ecos contêm cerca de 90% da potência total do sinal refletido, conforme apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Registro de múltiplos ecos de cada pulso.

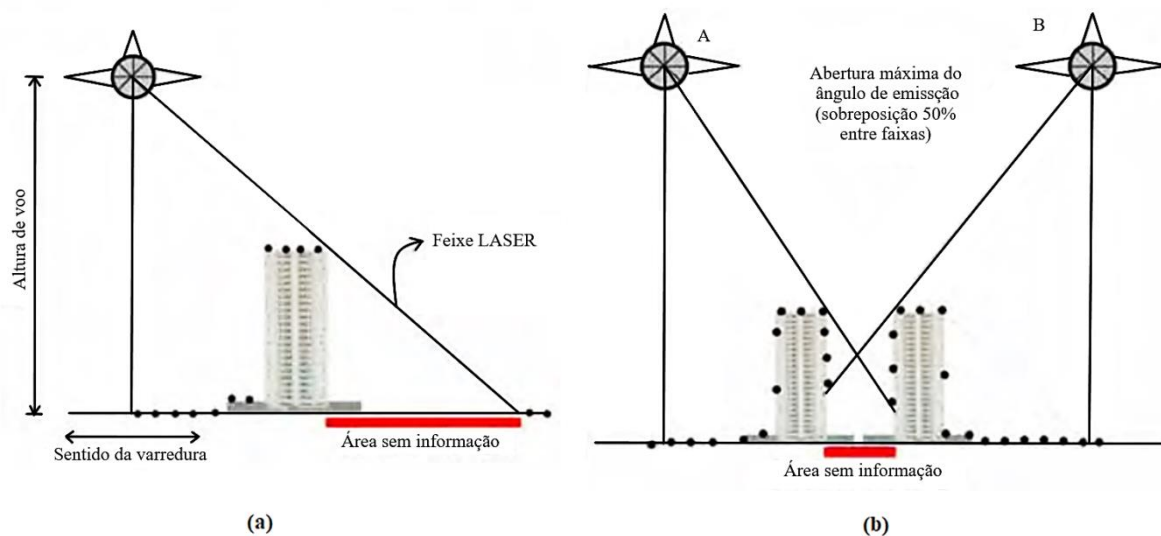


Fonte: Adaptado de Dal Poz (2017).

Além disso, áreas urbanas com edificações altas tem grande influência na aquisição de dados LiDAR, uma vez que os dados tridimensionais coletados sobre a superfície possuem regiões sem informação. Como a varredura é feita de forma transversal às linhas de voo,

algumas regiões não são alcançadas pelos feixes do LASER, como apresentado na Figura 7a. Entretanto, essas regiões sem informação podem ser minimizadas a partir de um planejamento de voo adequado, onde é possível elevar a altura de voo e/ou aumentar a sobreposição entre as faixas, conforme é indicado na Figura 7b (OLIVEIRA, 2013).

Figura 7 - Varredura laser. (a) Área sem informação devido à presença de edificação alta. (b) Minimização das áreas sem informação a partir de sobreposição entre faixas de 50%.

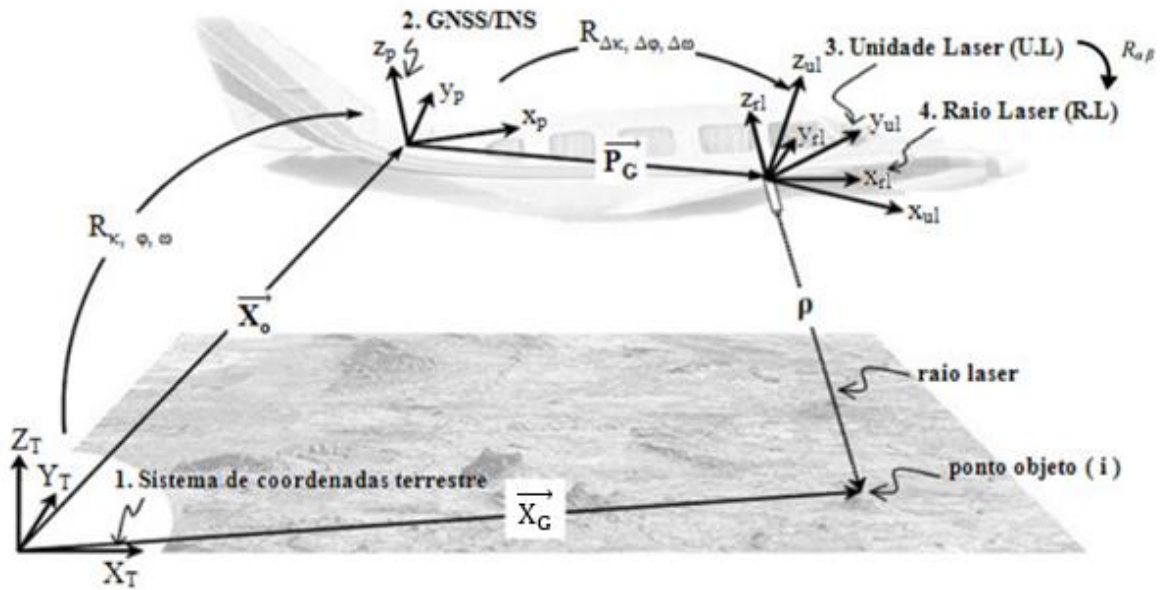


Fonte: Adaptado de Oliveira (2013).

2.1.3 Modelo Matemático

Alguns autores como Baltsavias (1999), Wehr e Lohr (1999) e Centeno e Mitishita (2007) enfatizam a importância do sincronismo entre os dados oriundos dos componentes do sistema LiDAR para obtenção de dados posicionais (terreno) com boa qualidade. De acordo com El-Sheimy *et al.* (2005), para obter as coordenadas de um ponto no terreno é necessário a integração de quatro sistemas de coordenadas (Figura 8), sendo eles: sistema de coordenadas terrestre; sistema de coordenadas GNSS/INS, com origem no centro do sistema de coordenadas INS; sistema de coordenadas da unidade LASER, onde o eixo “x” pode ser definido como coincidente com a direção do voo, enquanto o eixo “z” aponta para o zênite; e sistema de coordenadas do raio laser, com origem no pontos de disparo do pulso LASER, onde o eixo “z” coincide com a direção do raio LASER.

Figura 8 - Parâmetros e coordenadas envolvidos na aquisição de dados LiDAR.



Adaptado de Habib *et al.* (2008).

Além disso, nessa ilustração, para simplificar, considera-se que o centro de fase da antena do receptor GNSS coincide com a origem do sistema de coordenadas do INS. Isso é possível visto que o vetor que liga a origem do sistema de coordenadas do INS e o sistema de coordenadas da antena GNSS seja conhecido e previamente determinado com alta precisão (EL-SHEIMY *et al.*, 2005).

Segundo Habib *et al.* (2008) e a partir da Figura 8, pode-se observar que o vetor posição de um ponto i no espaço objeto ($\vec{X}_G$) é obtido a partir da somatória de três vetores ($\vec{X}_0$, $\vec{P}_G$, $\vec{\rho}$) após aplicar as devidas rotações ($R_{\kappa, \varphi, \omega}$, $R_{\Delta \kappa, \Delta \varphi, \Delta \omega}$, $R_{\alpha, \beta}$), conforme a seguinte formulação:

$$\vec{X}_G(t) = \vec{X}_0(t) + R_{\kappa, \varphi, \omega}(t) \cdot \vec{P}_G + R_{\kappa, \varphi, \omega}(t) \cdot R_{\Delta \kappa, \Delta \varphi, \Delta \omega} \cdot R_{\alpha, \beta}(t) \vec{\rho}(t), \quad (7)$$

sendo:

$\vec{X}_G$ – Vetor das coordenadas do ponto i no sistema de coordenadas terrestre associado ao mapeamento;

$\vec{X}_0$ – Vetor das coordenadas da origem do sistema de coordenadas INS no sistema de coordenadas terrestre associado ao mapeamento;

$R_{\kappa, \varphi, \omega}$ – Matriz de rotação entre o sistema de coordenadas GNSS/INS e o sistema de coordenadas terrestre associado ao mapeamento;

$R_{\Delta\kappa, \Delta\varphi, \Delta\omega}$ – Matriz de rotação entre o sistema de coordenadas INS e o sistema de coordenadas da unidade LASER, onde $\Delta\kappa$, $\Delta\varphi$ e $\Delta\omega$ são chamados ângulos de *boresight*;

$\vec{P}_G$ – Vetor translação entre a origem do sistema de coordenadas GNSS/INS e a origem do sistema de coordenadas da unidade LASER, determinado pela calibração do sistema;

$R_{\alpha, \beta}$ – Matriz de rotação entre o sistema de coordenadas da unidade LASER e o pulso laser, onde α e β são os ângulos de varredura, que correspondem aos ângulos de rotação em torno do eixo z e y da unidade LASER, respectivamente;

$\vec{\rho}(t)$ – Vetor posição que relaciona a origem do sistema de coordenadas da unidade LASER e o ponto objeto i no terreno, dado por $\vec{\rho}(t) = [0 \quad 0 \quad -\rho(t)]^T$.

t – Instante de recepção do pulso LASER.

Ainda de acordo com Habib *et al.* (2008), os parâmetros envolvidos na equação do ponto LiDAR (Equação (7)) são obtidos durante o processo de aquisição, exceto as componentes de translação ($\vec{P}_G$) e desalinhamento angular ($\Delta\kappa$, $\Delta\varphi$, $\Delta\omega$) (conhecidas como parâmetros de montagem), que são determinadas a partir da calibração do sistema.

De acordo com a Equação (7), as coordenadas tridimensionais medidas por um SVLA podem ser influenciadas por várias fontes de erros (EL-SHEIMY *et al.*, 2005):

- Erros nas posições e orientações da plataforma, determinadas pela integração das unidades GNSS e INS;
- Erros nos parâmetros de translação e desalinhamento angular (parâmetros de montagem) entre os vários componentes dos sistemas;
- Erros na medição da distância LASER;
- Erros na medição dos ângulos de varredura que relacionam os sistemas de coordenadas da unidade LASER e do raio LASER.

2.1.4 Erros envolvidos no sistema de varredura a LASER aerotransportado

A qualidade da nuvem de pontos derivada de um SVLA é influenciada pelos erros aleatórios e sistemáticos presentes nas observações e parâmetros de integração do sistema (HABIB *et al.*, 2008). As principais fontes que causam esses erros estão relacionadas com o sistema de posição e orientação (GNSS e INS), condições ambientais e a superfície do alvo.

Os erros sistemáticos são causados principalmente por tendências (*bias*) presentes nos parâmetros de montagem do sistema (ângulos de desalinhamento entre o sistema de coordenadas GNSS/INS e o sistema de coordenadas da unidade LASER ($\Delta\kappa$, $\Delta\omega$, $\Delta\varphi$); e componentes de translação entre a origem do sistema GNSS/INS e a origem do sistema da unidade LASER (ΔX , ΔY , ΔZ)) e nas medidas do SVLA (distância, ângulo de varredura, ângulos de atitude e posição do sensor). Já os erros aleatórios, que afetam as coordenadas da nuvem de pontos gerada pelo sistema LiDAR, depende da precisão das medidas do sistema varredura LASER, que abrangem as medidas de posição e orientação determinadas pelo conjunto GNSS/INS, o ângulo de varredura, e a distância entre sensor e objeto (HABIB *et al.*, 2008).

O estudo dos erros aleatórios permite o entendimento da natureza do ruído presente na nuvem de pontos, bem como estabelecer a precisão que pode ser alcançada para um voo, levando em consideração a configuração do sistema (BANG, 2010). O influência dos erros aleatórios no sistema LiDAR, ou seja, na nuvem de pontos, são feitos por simulação ou pela lei de propagação de variância e covariância aplicada no modelo funcional dado pela Equação (7), que permite determinar a posição de um ponto i no espaço objeto ($\overrightarrow{X_G}$), conforme pode ser visto em Dashora e Lohani (2013) e Santos (2015).

Conforme Bang (2010), a lei de propagação de erros (ou propagação de covariâncias) pode ser usada para estimar a precisão das coordenadas do “ponto” no terreno (*footprint*) dada a precisão das observações obtidas com o sistema. O método permite estimar a “melhor precisão possível” para uma dada configuração de sistema em um voo, entretanto, cabe ressaltar que a lei de propagação de erros assume que as medidas são tomadas em uma superfície sólida, horizontal e plana (BANG, 2010).

Em se tratando de erros sistemáticos, tendências presentes nos sistemas de medidas (por exemplo, ângulos de varredura e da medida laser) e parâmetros do sistema (por exemplo, ângulos de *boresight* e desalinhamento entre os componentes do SVLA) levarão erros sistemáticos para a nuvem de pontos, sendo que o impacto desses pode ser obtido através de simulação ou por meio de uma análise matemática da Equação (7) (BANG, 2010).

Em Bang (2010) é apresentado um estudo do impacto dos erros sistemáticos nos dados LiDAR fazendo uso de simulação, por meio de duas faixas LiDAR, assumindo terreno plano, *bias* no ângulos de *boresight*, desalinhamento entre os componentes do SVLA, bem como tendência na medida de distância e nos ângulos de varredura. Neste estudo, o autor mostra que o impacto dos erros sistemáticos em um sistema LiDAR vai depender da direção do voo

(*forward* ou *backward*), altitude de voo e ângulo de varredura. Mais detalhes podem ser encontrados em Bang (2010).

De acordo com Maas (2003), as principais fontes de erros que afetam a qualidade da nuvem de pontos LiDAR são:

- 1) A medição de distâncias (cada pulso emitido e recebido) do LASER é influenciada pela qualidade da medição do tempo ou pela medição da fase da onda portadora. Além disso, a medição de distância pode ser influenciada significativamente pelo tipo de cobertura terrestre local e pela inclinação do terreno;
- 2) Erros derivados do funcionamento dos sistemas mecânicos, que controlam o espelho de varredura, vibrações ou oscilações dos componentes do SVLA;
- 3) As posições da aeronave e do sistema de varredura são determinadas por técnicas de posicionamento GNSS e, portanto, são afetadas pelos erros envolvidos no posicionamento, como a influência da ionosfera e troposfera;
- 4) Erros sistemáticos no posicionamento por SVLA são ocasionados pelos erros de desalinhamento entre os componentes do SVLA, e falhas de sincronização entre estes;
- 5) Erros na transformação de coordenadas entre sistemas; e
- 6) Desalinhamento e deriva do giroscópio da INS.

2.2 Controle de Qualidade de Dados LiDAR

O controle de qualidade refere-se aos procedimentos estabelecidos para a avaliação da acurácia relativa e da acurácia absoluta do produto final (HABIB e RENS, 2007). De um modo simplificado, estes procedimentos têm por finalidade verificar se a acurácia esperada para o produto foi atingida.

Segundo Shan e Toth (2009) e Torres (2016), no controle de qualidade da acurácia absoluta as coordenadas tridimensionais dos pontos da nuvem de pontos LiDAR são comparadas com as coordenadas de alvos de referência levantados em campo, geralmente por técnicas geodésicas, como por exemplo, levantamento GNSS. Esse tipo de controle pode ser aplicado em projetos para uma única faixa de varredura, ou para múltiplas faixas. No caso de múltiplas faixas pode ser feito o controle de qualidade relativo, conforme pode-se ver em Shan e Toth (2009). Neste controle, é feita uma comparação das nuvens de pontos das

diferentes faixas de voo a partir da correspondência de feições similares que estejam presentes em faixas sobrepostas, avaliando o grau de consistência entre pontos LiDAR em faixas sobrepostas. Esse processo é realizado por meio da interpolação das intensidades de retorno, resultando em imagens de retorno, nas quais são identificadas as feições e extraídas suas coordenadas tridimensionais. Com isso, é feita a comparação entre as feições presentes na sobreposição de faixas. Devido à impossibilidade de associar pontos homólogos diretamente em uma nuvem de pontos, a identificação de planos e linhas retas, extraídas da intersecção de planos, é uma alternativa normalmente utilizada.

2.3 Normas e padrões para avaliação da acurácia posicional de nuvens de pontos LiDAR

A acurácia posicional de dados espaciais é avaliada a partir das coordenadas medidas no produto, comparadas com as coordenadas, obtidas de dados levantados em campo, por método de alta precisão, ou obtidas de outro produto com melhor qualidade, obtendo-se assim, um conjunto de discrepâncias posicionais. Essas discrepâncias são utilizadas para a classificação da acurácia posicional de acordo com alguma norma, como pode-se ver em Santos *et al.* (2016).

Atualmente, existem vários padrões para se proceder à avaliação da qualidade posicional de dados espaciais. Entretanto, esse projeto de pesquisa tem como objetivo analisar as normas e padrões referentes à avaliação da acurácia de nuvens de pontos gerados por SVLA, considerando as normas existentes no Brasil e no exterior, como as normas do USGS e ASPRS, do departamento de Recursos Naturas do Canadá e do ICSM da Austrália. Com isso, nos tópicos a seguir serão apresentadas as especificações de cada uma das normas citadas.

2.3.1 Especificações básicas para dados LiDAR (USGS 2014) e padrões de acurácia vertical para dados de elevação (ASPRS 2015)

A especificação do USGS (2014), assim como a norma da ASPRS, utiliza níveis de qualidade para realizar a avaliação da acurácia do produto. Nesse caso, o USGS considera 4 níveis de qualidade (QL0, QL1, QL2 e QL3), os quais permitem classificar o produto segundo sua acurácia vertical absoluta e relativa, conforme as Tabela 1 e Tabela 2, respectivamente.

Ainda segundo essa especificação, o nível mínimo de qualidade aceitável para os dados LiDAR é QL2. Além disso, as diretrizes da ASPRS (2015), conforme considerada pelo USGS (2014) recomendam que, para o cálculo da acurácia vertical em terrenos abertos (NVA – *Nonvegetated Vertical Accuracy*), onde a distribuição de erros possa ser considerada próxima a uma distribuição normal, seja utilizada a estatística RMSE_Z, conforme Equação (8), enquanto que para terrenos com a presença de vegetação (VVA – *Vegetated Vertical Accuracy*) utiliza-se o método do 95° percentil¹, que pode ser utilizado independentemente dos erros seguirem ou não uma distribuição normal, de acordo com Aguilar e Mills (2008).

Tabela 1 - Acurácia vertical absoluta para nuvem de pontos LiDAR, de acordo com o USGS.

Nível de Qualidade (QL)	RMSE _Z (cm) Sem vegetação	NVA com nível de confiança de 95% (cm) (1,96*RMSE _Z)	VVA com 95° percentil (cm)
QL0	≤ 5,0	≤ 9,8	≤ 14,7
QL1	≤ 10,0	≤ 19,6	≤ 29,4
QL2	≤ 10,0	≤ 19,6	≤ 29,4
QL3	≤ 20,0	≤ 39,2	≤ 58,8

Fonte: USGS (2014).

Tabela 2 - Acurácia vertical relativa para nuvem de pontos LiDAR, de acordo com o USGS.

Nível de Qualidade (QL)	Diferença de sobreposição de faixa: RMSD _Z (cm)	Diferença máxima de sobreposição de faixa (cm)
QL0	≤ 4	±8
QL1	≤ 8	±16
QL2	≤ 8	±16
QL3	≤ 16	±32

Fonte: USGS (2014).

Os valores dos RMSE_Z² e RMSD_Z³ podem ser obtidos pelas Equações (8) e (9), respectivamente:

$$RMSE_Z = \sqrt{\sum \frac{(Z_t - Z_R)^2}{n}}, \quad (8)$$

¹ Medida usada na estatística para indicar o valor abaixo do qual uma dada porcentagem de observações (erros em valor absoluto) em um grupo de observações pertencerá. Por exemplo, o 95° percentil é o valor (ou pontuação) abaixo do qual 95% das observações podem ser encontradas (USGS, 2014).

² RMSE_Z: raiz quadrada da média dos erros ao quadrado, obtida entre as coordenadas de um conjunto de dados e as coordenadas obtidas por uma fonte independente de maior precisão (USGS, 2014).

³ RMSD_Z: raiz quadrada da média das diferenças ao quadrado, obtida entre dois conjuntos de valores de coordenadas para o mesmo local (USGS, 2014).

$$RMSD_Z = \sqrt{\sum \frac{(Z_{fi} - Z_f)^2}{n}}, \quad (9)$$

sendo:

Z_t – Componente altimétrica dos pontos do produto que será testado;

Z_R – Componente altimétrica dos pontos de referência (controle);

Z_{fi} – Componente altimétrica dos pontos da faixa que será testada;

Z_f – Componente altimétrica dos pontos obtidos na faixa de referência;

n – Número de pontos de verificação.

A diferença entre o $RMSE_Z$ e $RMSD_Z$ é que o primeiro refere-se ao erro, visto que é calculado utilizando coordenadas de referência de maior precisão. Já no $RMSD_Z$, nenhum dos conjuntos de dados comparados tem sua acurácia conhecida, não sendo possível afirmar qual é mais ou menos acurado, logo, tais diferenças não podem ser tomadas como erros (USGS, 2014). Assim, o $RMSD_Z$ é utilizado para avaliar as diferenças entre duas faixas de dados sobrepostas.

Esta especificação recomenda o uso das Equações (10) e (11) para o cálculo da posição no vetor de observações e o valor associado mais apropriado ao percentil desejado para estimativa da acurácia vertical em terrenos cobertos com vegetação. Vale destacar que os cálculos do percentil são baseados nos valores absolutos dos erros, pois é a magnitude dos erros o motivo de preocupação, não o sinal. A posição do vetor de observações do enésimo percentil é calculada inicialmente para o percentil desejado usando a Equação (10):

$$np = \left(\left(\frac{P}{100} \right) * (N - 1) \right) + 1, \quad (10)$$

sendo:

np – Posição da observação que contém o enésimo percentil;

P – Proporção [0 a 100] na qual o enésimo percentil é desejado ($P = 95$ para o 95° percentil);

N – Número de observações da amostra.

Uma vez determinada a posição da observação, o valor da observação para o percentil desejado (Q_p) pode ser interpolado das observações superiores e inferiores a np usando a Equação (11) (USGS, 2014):

$$Q_P = \left(A[n_w] + (n_d * (A[n_w + 1] - A[n_w])) \right), \quad (11)$$

sendo:

Q_P – Valor do enésimo percentil;

A – Vetor dos valores absolutos das observações dispostos em ordem crescente (de 1 a N);

$A[i]$ – Valor da amostra do vetor A na posição i , onde i é um valor inteiro entre 1 e N;

n_w – Componente inteiro do valor de np (por exemplo, 3 de 3,14);

n_d – Componente decimal do valor de np (por exemplo, 0,14 de 3,14).

Em relação à acurácia horizontal, nada consta nas normas do USGS, visto que sua prioridade é a acurácia vertical. Desta forma uma alternativa é utilizar os padrões definidos pela ASPRS (2015), que define o erro horizontal nos dados de elevação derivados do LiDAR em função do erro de posição (derivado do GNSS), do erro de atitude (derivado do INS) e da altura de voo. Portanto, uma estimativa da acurácia horizontal para pontos derivados de SVLA, assumindo que a precisão do GNSS (ε_{GNSS}) e do INS (ε_{INS}), bem como a altura de voo (h_{voo}) sejam conhecidas, é dada pela Equação (12) (ASPRS, 2015):

$$RMSE_R = \sqrt{(\varepsilon_{GNSS})^2 + \left(\frac{\tan(\varepsilon_{INS})}{0,55894170} \times h_{voo} \right)^2}, \quad (12)$$

A Equação (12) considera a altura de voo (em m), o erro GNSS (em cm), e o erro do INS (em graus decimais) e outros fatores como erro na distância e erros na medida do tempo (que é estimado em 25% dos erros de orientação). Além disso, na equação acima os valores para ε_{GNSS} e ε_{INS} podem ser derivados de especificações de fabricante. Ressalta-se que a Equação (12) é umas das possibilidades para fazer a estimativa da acurácia horizontal, porém outras abordagens podem ser empregadas, como por exemplo, a realização da propagação de erros do modelo matemático apresentado na Equação (7).

Portanto, esse valor é utilizado para classificar o produto segundo sua classe de acurácia horizontal segunda a Tabela 3, determinada pela ASPRS (2015).

Tabela 3 – Acurácia Horizontal para Dados Geoespaciais, de acordo com a ASPRS.

Classe de Acurácia Horizontal (cm)	Acurácia Absoluta		
	RMSE _x e RMSE _y (cm)	RMSE _{plan} (cm)	Acurácia Horizontal com nível de confiança de 95% (cm)
X	≤ X	≤ 1,414*X	≤ 2,448*X

Fonte: ASPRS (2015).

Os valores de $RMSE_X$, $RMSE_Y$ e $RMSE_r$ são calculados pelas Equações (13), (14) e (15), respectivamente:

$$RMSE_X = \sqrt{\sum \frac{(X_t - X_R)^2}{n}}, \quad (13)$$

$$RMSE_Y = \sqrt{\sum \frac{(Y_t - Y_R)^2}{n}}, \quad (14)$$

$$RMSE_{plan} = \sqrt{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2}, \quad (15)$$

sendo:

X_t e Y_t – Coordenadas X e Y, respectivamente, dos pontos do produto que será testado;

X_R e Y_R – Coordenadas X e Y, respectivamente, dos pontos de referência (controle);

n – Número de pontos de verificação.

Segundo a ASPRS (2015), ambos indicadores, $RMSE_Z$ e 95° percentil, especificados anteriormente, são aceitos na prática e provaram ser adequados para conjuntos de dados de elevação derivados das tecnologias atuais. Entretanto, ambos indicadores têm limitações, principalmente quando se tem poucos pontos de verificação no terreno. Quanto a isso, essa norma determina que o número de pontos de verificação deva ser de no mínimo 20 pontos bem distribuídos.

Os pontos de verificação horizontais devem ser estabelecidos em pontos bem definidos, ou seja, um ponto no qual a posição horizontal pode ser medida com um alto grau de precisão. Ao contrário dos pontos de verificação horizontais, os pontos de verificação verticais não precisam ser claramente definidos. Os pontos de verificação verticais devem ser

estabelecidos em terrenos planos ou uniformemente inclinados, com declives menores ou iguais a 10%, devendo-se evitar medidas sobre artefatos verticais ou regiões com mudanças abruptas de elevação.

Uma metodologia para fornecer a quantidade e especificação da distribuição espacial dos pontos ainda é necessária, e, até que essa seja desenvolvida, a densidade e distribuição dos mesmos serão baseadas em resultados empíricos. Assim, a quantidade e a localização dos pontos de verificação devem seguir os requisitos estabelecidos pela USGS, sendo que esse considera as recomendações da ASPRS (2015), onde o número de pontos de verificação é determinado com base na dimensão da área que está sendo avaliada e a distribuição com base no tipo de cobertura (NVA e VVA), conforme pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 – Número de pontos de verificação recomendados com base na área de estudo, de acordo com a ASPRS.

Acurácia Vertical e Horizontal de conjunto de dados de elevação			
Área do projeto (km²)	Número de pontos de verificação 3D na NVA	Número de pontos de verificação 3D na VVA	Total de número de pontos de verificação
≤ 500	20	5	25
501-750	20	10	30
751-1000	25	15	40
1001-1250	30	20	50
1251-1500	35	25	60
1501-1750	40	30	70
1751-2000	45	35	80
2001-2250	50	40	90
2251-2500	55	45	100

Fonte: ASPRS (2015).

Embora os pontos de verificação verticais normalmente não sejam bem definidos, sempre que possível, a precisão horizontal dos conjuntos de dados LIDAR deve ser testada em áreas NVA através do levantamento de aproximadamente metade dos pontos de verificação, o quais devem estar bem localizados, como em faixas de pedestre ou outras feições pontuais que sejam visíveis na imagem de intensidade LiDAR.

As áreas de cobertura NVA são as áreas de terreno aberto, como solos expostos, areia, rochas e gramas curtas, e superfícies urbanas, como asfalto e superfície de concreto. Já o VVA considera todas as coberturas de vegetação, como ervas daninhas altas, culturas, e áreas levemente a totalmente arborizadas.

De acordo com estas normas, em áreas maiores de 2.500 km², para cada área adicional de 500 km² devem ser acrescentados cinco pontos de verificação vertical, sendo três para NVA e dois para VVA. O número recomendado e a distribuição dos pontos de verificação NVA e VVA podem variar de acordo com a importância de diferentes tipos de cobertura da terra e requisitos especificados pelo cliente. Ainda segundo o USGS, para um conjunto de dados que cubra uma área retangular com acurácia posicional uniforme, os pontos de verificação devem ser distribuídos de modo que estejam espaçados em intervalos de pelo menos 10% da distância diagonal e pelo menos 20% dos pontos devem estar localizados em cada quadrante do conjunto de dados.

2.3.2 Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) – DSG (2016)

A ET-CQDG de 2016, utiliza o procedimento de cálculos previsto no Decreto 89.817 de 1984, porém, com o surgimento de novas tecnologias os padrões até então estabelecidos foram revisados. Neste sentido, esta norma apresenta atualização dos valores de EM (erro máximo admissível) e EP (erro padrão) para alguns tipos de produtos (Tabela 5).

Para que um produto digital possa ser aceito como produto de Referência do Sistema Cartográfico Nacional (SCN), a seguinte condição estabelecida pela ET-CQDG de 2016 deve ser atendida:

Noventa por cento (90% ou $1,6449 \cdot EP$) dos erros dos pontos coletados no produto cartográfico, quando comparados com as coordenadas levantadas em campo por método de alta precisão, devem apresentar valores iguais ou inferiores aos previstos ao PEC-PCD, devendo ainda apresentar valores de EP também iguais ou inferiores aos previstos nas tabelas do presente tópico.

Tabela 5 – PEC-PCD para planimetria e altimetria, em metros.

Tipo	PEC PCD	1:1.000		1:2.000		1:5.000		1:10.000	
		EM	EP	EM	EP	EM	EP	EM	EP
Planimetria	A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85	2,80	1,70
	B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50	5,00	3,00
	C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50	8,00	5,00
	D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00	10,00	6,00
Altimetria	A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84
	B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67
	C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00
	D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50

Tipo	PEC PCD	1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
		EM	EP	EM	EP	EM	EP	EM	EP
Planimetria	A	7,0	4,25	14	8,5	28	17	70	42,5
	B	12,5	7,5	25	15	50	30	125	75
	C	20	12,5	40	25	80	50	200	125
	D	25	15	50	30	100	60	250	150
Altimetria	A	2,7	1,67	5,5	3,33	13,7	8,33	27	16,6 7
	B	5,0	3,33	10	6,67	25	16,67	50	33,3 3
	C	6,0	4,0	12	8,0	30	20	60	40
	D	7,5	5,0	15	10	37,5	25	75	50

Fonte: DSG (2016).

Para o cálculo da acurácia do produto é feita a raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) da amostra, de acordo com as Equações (16) à (21) (DSG, 2016):

$$e_X = X_t - X_R, \quad (16)$$

$$e_Y = Y_t - Y_R, \quad (17)$$

$$e_{plan} = \sqrt{e_X^2 + e_Y^2}, \quad (18)$$

$$e_Z = Z_t - Z_R, \quad (19)$$

$$RMSE_{plan} = \sqrt{\sum \frac{(e_{plan})^2}{n}}, \quad (20)$$

$$RMSE_Z = \sqrt{\sum \frac{(e_Z)^2}{n}}, \quad (21)$$

sendo:

e_X , e_Y , e_Z - erro em cada componente. Os pontos que serão testados são identificados pelo sufixo “t” e os pontos de referência (controle) são identificados com o sufixo “R”;

e_{plan} - erro na componente planimétrica (horizontal);

n - número de pontos de verificação.

Portanto, para avaliação da acurácia é necessário comparar cada valor de e_{plan} e e_Z com o erro máximo admissível (EM) da tabela da PEC para a classe analisada. O produto se

enquadra onde tiver pelo menos 90% dos pontos com erro inferior ao EM. Além disso, faz-se a comparação do $RMSE_{plan}$ e $RMSE_Z$ com o erro padrão (EP) da tabela da PEC para a classe identificada anteriormente. Se for menor, o produto se enquadra na classe encontrada na comparação com o EM. Se for maior, caminha-se na tabela PEC até encontrar um valor menor. Por exemplo, se o maior valor de e_z encontrado for igual a 0,30 m, neste caso, ao compará-lo com os valores do EM da tabela PEC, ele se enquadraria na classe “B” para a escala 1:1.000 e 1:2.000, e na classe “A” para a escala 1:5.000. Para finalizar a classificação do produto, faz-se a comparação do $RMSE_Z$ calculado com o EP da tabela PEC. Considerando que o valor do $RMSE_Z$ calculado foi de 0,17 m, este produto se enquadra nas mesmas classes já analisadas anteriormente. Entretanto, se olharmos para a tabela PEC, este valor de $RMSE_Z$ também se enquadraria na classe “A” na escala 1:1.000; porém, como o valor de e_z não é igual ou inferior ao EM desta classe para esta escala, o produto não pode ser classificado como tal.

Com relação à amostragem dos pontos, inicialmente é necessário conhecer alguns conceitos. Conforme definido na ET-CQDG (2016), existem 4 conceitos essenciais para aplicar os procedimentos amostrais: lote, item, limite de qualidade aceitável (LQA) e qualidade limite (QL). Lote é a unidade mínima em que podem ser aplicados os procedimentos de qualidade. Item é a menor unidade do lote que pode ser inspecionada. Isto significa que um lote pode ser definido como um conjunto de dados e o item são as feições geoespaciais representadas no produto. O LQA é o pior resultado aceitável (taxa de erros) em um procedimento de inspeção lote a lote. Já o QL representa um nível de qualidade para uma inspeção de lote isolado.

Em relação à inspeção lote a lote há dois conceitos complementares: tipo de inspeção e nível de inspeção. Os tipos de inspeção são classificados em: reduzida, normal e rigorosa. Já o nível de inspeção discrimina a quantidade relativa de inspeção, existindo 3 níveis gerais (I, II e III).

Para o procedimento de amostragem espacial, o produto deve ser particionado em células de 4x4 cm na escala do produto, usando valores inteiros. Por exemplo, em um produto na escala 1:10.000 a célula teria 400x400 m. Após o particionamento do produto, o avaliador deve analisar cada célula para verificar se esta é válida para compor a população a ser avaliada, considerando o produto como um MDT, por exemplo. São consideradas células válidas aquelas que possuam feições nas quais seja possível identificar um ponto no terreno.

Esses pontos são normalmente: cruzamento de vias de transporte, faixas sobre ruas, entre outros elementos bem definidos.

Em cada célula válida (onde há pelo menos 1 ponto de verificação) deve ser selecionado somente um ponto para compor a população que será submetida à amostragem. O conjunto de pontos selecionados é considerado a população do lote. Vale ressaltar que esses procedimentos são realizados para determinar os pontos para o controle posicional planimétrico. Entretanto, de forma a economizar recursos, esses pontos podem ser usados para avaliar a qualidade posicional altimétrica.

Com isso, para determinar o tamanho da amostra, considerando um MDT, segundo DSG (2016) é necessário adotar um LQA de 4% e considerar o nível de inspeção II. Portanto, com o nível de inspeção e o tamanho do lote (população), a partir da Tabela 6 é determinada uma letra-código.

Tabela 6 – Letra-código de acordo com o tamanho do lote e nível de inspeção.

Tamanho do lote	Níveis gerais de inspeção		
	I	II	III
2 a 8	A	A	B
9 a 15	A	B	C
16 a 25	B	C	D
26 a 50	C	D	E
51 a 90	C	E	F
91 a 150	D	F	G
151 a 280	E	G	H
281 a 500	F	H	J
501 a 1200	G	J	K
1201 a 3200	H	K	L
3201 a 10.000	J	L	M
10.001 a 35.000	K	M	N
35.001 a 150.000	L	N	P
150.001 a 500.000	M	P	Q
500.001 e maiores	N	Q	R

Fonte: DSG (2016)

A partir dessa letra e do valor de LQA fixado para o produto considerado, com base na Tabela 7 encontra-se o tamanho da amostra, bem como o número de aceitação, ou seja, a quantidade aceitável de itens não conformes.

Tabela 7 – Tamanho da amostra e número de aceitação, segundo a letra-código e o LQA.

Letra código	Tamanho da amostra	Limite de qualidade aceitável (LQA) em %									
		0,4	0,65	1,0	1,5	2,5	4,0	6,5	10	15	25
A	2	↓	↓	↓	↓	↓	↓	0	↑	↓	1
B	3	↓	↓	↓	↓	↓	0	↑	↓	1	2
C	5	↓	↓	↓	↓	0	↑	↓	1	2	3
D	8	↓	↓	↓	0	↑	↓	1	2	3	5
E	13	↓	↓	0	↑	↓	1	2	3	5	7
F	20	↓	0	↑	↓	1	2	3	5	7	10
G	32	0	↑	↓	1	2	3	5	7	10	14
H	50	↑	↓	1	2	3	5	7	10	14	21
J	80	↓	1	2	3	5	7	10	14	21	↑
K	125	1	2	3	5	7	10	14	21	↑	↑
L	200	2	3	5	7	10	14	21	↑	↑	↑
M	315	3	5	7	10	14	21	↑	↑	↑	↑
N	500	5	7	10	14	21	↑	↑	↑	↑	↑
P	800	7	10	14	21	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Q	1250	10	14	21	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
R	2000	14	21	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑

Fonte: DSG (2016)

Além desta norma brasileira, em 2019 o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) publicou a segunda edição do manual técnico “Avaliação da Qualidade de Dados Geoespaciais” (IBGE, 2019). Pode-se observar neste manual que o IBGE utiliza a mesma metodologia para realizar a amostragem dos pontos de controle e dos mesmos limiares contidos na norma estabelecida pela DSG em DSG (2016), sendo esta utilizada como referência em sua elaboração.

2.3.3 Diretriz Federal de Aquisição de Dados LiDAR Aerotransportado – NRCan (2017)

De acordo com o NRCan (2017), o desenvolvimento desta diretriz foi coordenado pelo Centro Canadense de Mapeamento e Observação da Terra (CCMEO) junto ao departamento de Recursos Naturais Canadense (NRCan) em resposta às necessidades da comunidade geoespacial e do governo por uma diretriz nacional para a aquisição de dados LiDAR aerotransportado. Uma estratégia do CCMEO é melhorar o conjunto de dados de elevação nacional por meio da aplicação consistente da tecnologia LiDAR a partir de sistemas aerotransportados.

Estes sistemas têm sido amplamente utilizados em todo o Canadá pelos municípios, províncias, territórios e departamentos do governo federal, como a principal tecnologia para

aquisição de dados de elevação de alta precisão. A intenção desta diretriz é fornecer as especificações mínimas para conduzir à consistência na aquisição de dados LiDAR em todos os níveis de governo no Canadá, bem como para melhorar a cooperação internacional com os Estados Unidos ao longo de áreas de coleta de dados na fronteira.

Uma das estratégias estabelecidas a partir da Diretriz Federal de Aquisição de Dados LiDAR Aerotransportado do Canadá é aumentar a cobertura de dados de elevação de alta resolução para todo o país. Com isso, os dados obtidos por sistemas de varredura a LASER aerotransportado são a tecnologia chave para apoiar esta ideia, sendo o objetivo principal desenvolver uma superfície de elevação nacional com 1 m de resolução para a porção sul do Canadá. Portanto, essa diretriz descreve os requisitos necessários para a utilização de dados desta natureza. Vale ressaltar que as normas da USGS e ASPRS foram utilizadas como referências para definição dessa diretriz e, portanto, também são consideradas as acurácias verticais para as regiões de vegetação (VVA) e não vegetação (NVA), considerando o controle de qualidade absoluto e relativo (NRCan, 2017). A Tabela 8 fixa os requisitos de qualidade Canadense nível 1 (CQL1 – *Canadian Quality Level 1*). Os valores de RMSE são calculados de maneira análoga à norma do USGS.

Tabela 8 – Acurácia requerida para a nuvem de pontos LiDAR segundo o departamento de recursos naturais do Canadá.

NVA	RMSE_Z	≤ 10,0 cm
	1,96 ⁴ *RMSE _Z (nível de confiança de 95%)	≤ 19,6 cm
VVA	95° percentil	≤ 29,4 cm
Acurácia Horizontal	RMSE _{plan}	≤ 35,1 cm
	1,7308 ⁵ *RMSE _{plan} (nível de confiança de 95%)	≤ 60,0 cm
	RMSE _R ⁶	≤ 60,0 cm
Acurácia Vertical Relativa	RMSE _{DZ}	≤ 8 cm
	Diferença máxima de sobreposição de faixa	± 16 cm

Fonte: NRCan (2017).

⁴ A análise da acurácia assume que os erros apresentam distribuição normal e, portanto, métricas como o RMSE são estatisticamente válidas. De acordo com a distribuição Normal, para um nível de confiança de 95%, o escore padrão corresponde a $1,96 \cdot \sigma$ (NRCan, 2017).

⁵ A acurácia horizontal é definida como o raio de um círculo de incertezas e assume distribuição normal (NRCan, 2017). De acordo com ASPRS (2015) a acurácia horizontal, com nível de confiança de 95% é de $2,448 \cdot \text{RMSE}_X = 2,448 \cdot \text{RMSE}_Y$ (Tabela 3); tomando $\text{RMSE}_{plan} = \sqrt{\text{RMSE}_X^2 + \text{RMSE}_Y^2}$, onde $\text{RMSE}_X = \text{RMSE}_Y$, a acurácia resultante equivalente é dada por $2,448/\sqrt{2} \cdot \text{RMSE}_{plan} = 1,7308 \cdot \text{RMSE}_{plan}$.

⁶ Acurácia horizontal calculada em função da influência da precisão do GNSS e do INS, bem como da altura de voo, fazendo uso da Equação (12) apresentada na ASPRS 2015.

Em relação à amostragem para controle de qualidade vertical, os pontos de verificação devem ser divididos em áreas com e sem vegetação. Os pontos de verificação para as análises NVA devem ser levantados em áreas abertas, desprovidas de características verticais, como áreas de grama baixa (gramados e campos de golfe), solos expostos e áreas urbanas pavimentadas. Já para as análises VVA, os pontos serão alocados onde há vegetação, como grama alta, culturas, árvores pequenas e florestas. A área de levantamento dos pontos deve ter um tamanho mínimo de $(ANPS \times 5)^2$, onde ANPS representa o espaçamento do pulso nominal; e deve ser um terreno plano com inclinação inferior a 10 graus. Além disso, os pontos devem ser adequadamente distribuídos para que cubra toda a área de estudo e todos os tipos de cobertura terrestre presentes nela (NRCan, 2017).

De acordo com esta norma, de modo geral, o número de pontos de verificação por área deve ser de aproximadamente 1 ponto a cada 25 km², sendo que o número mínimo não deve ser inferior a 20 pontos. A quantidade de pontos de verificação deve seguir as diretrizes da ASPRS (2015), que fornecem o número de pontos para avaliação da precisão dos dados em função do tamanho da área de interesse, conforme exposto na Tabela 4.

2.3.4 Especificações de Aquisição de Dados LiDAR e Modelo de Proposta – ICSM (2010)

De acordo com o ICSM (2010), os dados de elevação digital que descrevem o relevo e o fundo marinho da Austrália são cruciais para abordar questões relacionadas aos impactos das mudanças climáticas, gerenciamento de desastres, segurança da água, gerenciamento ambiental, planejamento urbano e projeto de infraestrutura.

Nos últimos anos, desenvolvimentos significativos da tecnologia LiDAR revolucionaram a capacidade do país em abordar essas questões a nível local. No entanto, as diversas e inconsistentes especificações de produtos, e a qualidade de diferentes tipos de dados geralmente dificultam a integração de conjuntos de dados para abordar problemas regionais, estaduais e nacionais. Com o intuito de otimizar o investimento e a utilidade das coleções de dados atuais e futuros, é necessária uma especificação base de âmbito nacional que defina um conjunto consistente de produtos mínimos que garantam a compatibilidade entre projetos e Estados (ICSM, 2010).

A intenção desta especificação e do modelo de proposta é melhorar ainda mais a qualidade, a consistência, a utilidade e a compatibilidade dos dados que estão sendo capturados pelo governo e produtos comerciais cada vez mais oferecidos pelo setor privado.

Além disso, as especificações e o modelo de proposta fornecem oportunidades para um maior investimento colaborativo em todos os níveis de governo. Ademais, esta especificação baseou-se na consulta com provedores de dados obtidos por sistemas LiDAR e no Centro de Informação, Coordenação e Conhecimento de dados LiDAR dos EUA (ICSM, 2010).

De acordo com o ICSM (2008), uma vez que os custos de levantamento são, geralmente, diretamente proporcionais à resolução, estes podem ser classificados em quatro grandes categorias para auxiliar seu planejamento em relação a diferentes requisitos de precisão. Segundo ICSM (2010), levantamento de dados LiDAR são classificados no padrão de Categoria 1, adequado para modelagem de inundações de enchentes ou surtos de tempestades em áreas de bens de alto valor; e arquivos de rede de alta resolução (1m DEM). Portanto, a acurácia posicional esperada para um intervalo de confiança de 95% é apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Acurácia requerida para a nuvem de pontos LiDAR, segundo o ICSM.

Acurácia Horizontal	$1,73 \cdot \text{RMSE}_{\text{plan}}$ (nível de confiança de 95%)	$\leq 80 \text{ cm}$
Acurácia Vertical	$1,96 \cdot \text{RMSE}_z$ (nível de confiança de 95%)	$\leq 30 \text{ cm}$

Fonte: ICSM (2010).

Em relação à amostragem, os pontos de verificação devem ser localizados somente em terrenos abertos e relativamente planos, onde há uma alta probabilidade de o sensor ter detectado a superfície do solo. A avaliação da acurácia da nuvem de pontos deve ser feita usando uma superfície TIN (*Triangular Irregular Network*) construída a partir da nuvem de pontos LiDAR. No que concerne ao número de pontos de verificação, esses dependem da extensão do levantamento. A seguinte estratégia deve ser usada (ICSM, 2010):

- 1) Os pontos de verificação devem ser definidos de modo a cobrir adequadamente a extensão total da área de levantamento;
- 2) Usar no mínimo de 20 pontos de verificação, sendo 1 por 50 km² onde a área levantada exceder 400 km². Quando os 20 pontos são testados, o intervalo de confiança de 95% geralmente permitiria a falha de 1 ponto no limiar dado nas especificações do produto.

Caso seja necessária uma validação independente adicional, os dados devem ser avaliados de acordo com as diretrizes da ASPRS.

2.3.5 Comparação das normas

Na Tabela 10 são apresentados alguns aspectos comparativos entre as normas analisadas, considerando os parâmetros referentes ao número de pontos de verificação, o indicador estatístico, o nível de confiança, a avaliação altimétrica e tipo de avaliação planimétrica (conjunto ou isolada).

Tabela 10 – Comparação das normas apresentadas.

País	Estados Unidos	Brasil	Canadá	Austrália
Fonte	USGS (2014) e ASPRS (2015)	DSG (2016)	NRCan (2017)	ICSM (2010)
Número de pontos de verificação	Com base no tamanho da área de estudo e tipo de cobertura do terreno	Com base na escala do produto	Com base no tamanho da área de estudo e tipo de cobertura do terreno	Mínimo de 20 pontos
Indicador Estatístico	RMSE, RMSD e 95° Percentil	Discrepância e RMSE	RMSE, RMSD e 95° Percentil	RMSE
Nível de Confiança	95%	90%	95%	95%
Avaliação Altimétrica	NVA e VVA; Acurácia Absoluta e Relativa	Acurácia Absoluta	NVA e VVA; Acurácia Absoluta e Relativa	Acurácia Absoluta
Avaliação Planimétrica	Conjunta	Conjunta	Conjunta	Não apresenta (somente o limiar)
Produto avaliado	Nuvem de pontos LiDAR	MDS e MDT	Nuvem de pontos LiDAR	MDT (Dados LiDAR)

Além disso, outra comparação que pode ser feita é que as determinações presentes nas normas dos Estados Unidos e Canadá são as mesmas, até mesmo os limiares. Isso ocorre devido à utilização da ASPRS como referência.

Outro aspecto que poderá ser analisado diz respeito à análise de tendência do conjunto de dados utilizados, que neste caso, refere-se à nuvem de pontos LiDAR. Portanto, para realizar a análise de tendência foi utilizada a metodologia proposta por Galo e Camargo (1994).

Segundo Galo e Camargo (1994), a análise da tendência é baseada em teste estatístico, e para isso é necessário observar as discrepâncias nas coordenadas planimétricas (ΔE e ΔN) e

altimétrica (ΔH) obtidas entre as coordenadas de referência (R), consideradas como verdadeiras, e as coordenadas obtidas no produto cartográfico (PC):

$$\Delta E_i = E_i^R - E_i^{PC}, \quad (22)$$

$$\Delta N_i = N_i^R - N_i^{PC}, \quad (23)$$

$$\Delta H = H_i^R - H_i^{PC}, \quad (24)$$

A média das discrepâncias de cada uma das componentes ($\Delta \bar{E}, \Delta \bar{N}, \Delta \bar{H}$), bem como os respectivos desvios padrão amostrais ($S_{\Delta E}, S_{\Delta N}, S_{\Delta H}$) são obtidos a partir das equações:

$$\Delta \bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta E_i}{n} \quad \text{e} \quad S_{\Delta \bar{E}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta E_i - \Delta \bar{E})^2}{(n-1)}}, \quad (25)$$

$$\Delta \bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta N_i}{n} \quad \text{e} \quad S_{\Delta \bar{N}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta N_i - \Delta \bar{N})^2}{(n-1)}}, \quad (26)$$

$$\Delta \bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta H_i}{n} \quad \text{e} \quad S_{\Delta \bar{H}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta H_i - \Delta \bar{H})^2}{(n-1)}}, \quad (27)$$

onde n é a quantidade de pontos utilizados na análise de tendência.

Para a realização do teste de tendência são analisadas duas hipóteses, constituídas das hipóteses básica ou nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_a), conforme:

$$H_0: \begin{cases} \Delta \bar{E} = 0 \\ \Delta \bar{N} = 0 \\ \Delta \bar{H} = 0 \end{cases} \quad \text{Versus} \quad H_a: \begin{cases} \Delta \bar{E} \neq 0 \\ \Delta \bar{N} \neq 0 \\ \Delta \bar{H} \neq 0 \end{cases}, \quad (28)$$

Para validar uma das hipóteses para cada uma das componentes (E, N, H) deve-se calcular a estatística amostral t :

$$t_E = \frac{\Delta \bar{E}}{S_{\Delta \bar{E}}} \sqrt{n}, \quad (29)$$

$$t_N = \frac{\Delta \bar{N}}{s_{\Delta \bar{N}}} \sqrt{n}, \quad (30)$$

$$t_H = \frac{\Delta \bar{H}}{s_{\Delta \bar{H}}} \sqrt{n}, \quad (31)$$

e comparar com o valor teórico ($t_{(n-1, \alpha/2)}$) da distribuição *t-student*, com (n-1) graus de liberdade, para um determinado nível de significância α . Se as desigualdades:

$$\begin{cases} |t_E| \\ |t_N| < t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})}, \\ |t_H| \end{cases} \quad (32)$$

forem satisfeitas, a hipótese (H_0) não é rejeitada a um determinado nível de significância igual $\alpha=10\%$, isto significa que 90% das discrepâncias entre as coordenadas dos pontos coletados no produto cartográfico não apresentam tendência, ou seja, estão isentos de efeitos sistemáticos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.

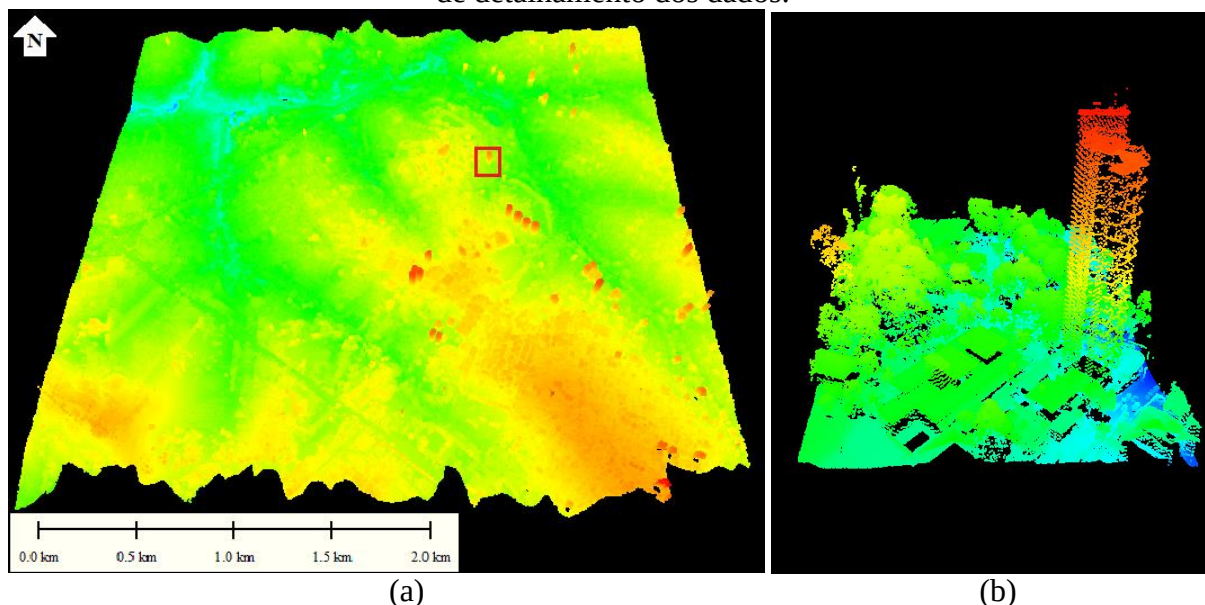
3.1 Materiais

Os dados empregados no desenvolvimento deste projeto foram adquiridos e fornecidos pela Engemap Geoinformação, uma empresa do Grupo Engemap, correspondendo a um conjunto de quatro faixas LiDAR sobrepostas no formato *.LAS, recobrindo a área urbana do município de Presidente Prudente – SP. Vale ressaltar que a nuvem de pontos fornecida pela empresa já foi processada pela mesma, sendo utilizado nesta pesquisa o produto final. O conjunto de dados amostrado pelo sistema de varredura LASER aerotransportado foram adquiridos em voo realizado dia 29 de novembro de 2018, possuindo densidade média de 5 pontos/m², sendo as coordenadas planimétricas associadas ao Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS 2000) e a altimetria ao marégrafo de Imbituba – SC, com projeção cartográfica UTM/Fuso 22 Sul. O sistema de varredura LASER utilizado na aquisição dos dados é o Riegl LMQ680i, possuindo as seguintes características:

- Frequência máxima de emissão do pulso: 400 kHz;
- Comprimento de onda: 1550 nm;
- Ângulo de divergência: < 0,5 mrad;
- Ângulo de abertura (FOV): 60°;
- Frequência de varredura: 10-200 linhas/s;
- Número de retornos: 6 pulsos;
- Mecanismo de varredura: polígono de rotação.

Para realização do trabalho foi utilizado um recorte da nuvem de pontos LiDAR, correspondendo a uma área de aproximadamente 13 km², compondo a área de estudo. As faixas de voo, no total de 4, foram feitas considerando a superposição lateral de cerca de 30%. Este primeiro conjunto de dados foi utilizado para fazer a avaliação da acurácia relativa e absoluta e, assim, comparar os resultados com as normas descritas na Seção 2.3. A Figura 9 apresenta a área de estudo e uma área recortada da mesma, onde é possível visualizar o grau de detalhamento da nuvem.

Figura 9 – Área de estudo. (a) Dados LiDAR, com destaque para a área de recorte. (b) Grau de detalhamento dos dados.



Nesse trabalho foram utilizados *softwares* tanto para a visualização dos dados, quanto para desenvolver as etapas envolvidas na extração de informações e filtragem dos dados para geração do MDT.

Para realizar alguns processamentos sobre a nuvem de pontos LiDAR foi utilizada a biblioteca *LasTools*. Esta biblioteca possui diversas funções que possibilitam realizar diferentes operações, tais como: interpolações, filtragem do conjunto de pontos LiDAR, recortes de arquivos, entre outras. O *software* utilizado na visualização dos dados foi o *Global Mapper*, que também permite gerar um MDT a partir da interpolação TIN.

3.2 Metodologia

No desenvolvimento do trabalho, a metodologia foi dividida em dois casos: avaliação da acurácia relativa e avaliação da acurácia absoluta.

3.2.1 Avaliação da acurácia relativa

O primeiro caso refere-se à avaliação da acurácia relativa dos dados LiDAR. Para condução do mesmo foi considerada a área de estudo referente ao recorte do voo realizado

sobre a área urbana de Presidente Prudente, uma vez que esta possui quatro faixas de varredura sobrepostas, permitindo assim a análise relativa dos dados.

A primeira etapa desta avaliação consistiu na determinação dos pontos de verificação utilizados. Com base nas normas selecionadas, não há nenhuma especificação quanto à amostragem dos pontos para a avaliação da acurácia relativa. Deste modo, optou-se por adotar a especificação de amostragem dos pontos de verificação para avaliação da acurácia absoluta para realizar a avaliação da acurácia relativa. Assim, chegou-se nos seguintes valores de acordo com cada norma:

- USGS (2014) e ASPRS (2015): de acordo com a Tabela 4 (Seção 2.3.1), considerando que a área de estudo é inferior a 500 km², o número total de pontos de verificação a ser utilizado é igual a 25.
- DSG (2016): considerando o procedimento descrito na Seção 2.3.2 para um produto em escala 1:10.000, na área de estudo 1 (13 km²), o produto passaria a ser analisado em 82 células de 400x400m cada. Supondo que todas as células sejam válidas, a população é igual a 82. Tomando nível de inspeção II, pela Tabela 6, a letra-código de acordo com tamanho do lote e nível de inspeção é E. A partir dessa letra e, considerando o LQA igual a 4%, pela Tabela 7 tem-se que o número total de pontos de verificação a ser utilizado é igual a 13.
- NRCan (2017): conforme Seção 2.3.3, deve-se seguir as recomendações ASPRS (2015), logo o número total de pontos de verificação a ser utilizado é igual a 25.
- ICSM (2010): de acordo com o que consta na Seção 2.3.4, considerando a área de estudo, o número mínimo de pontos a ser utilizado é igual a 20.

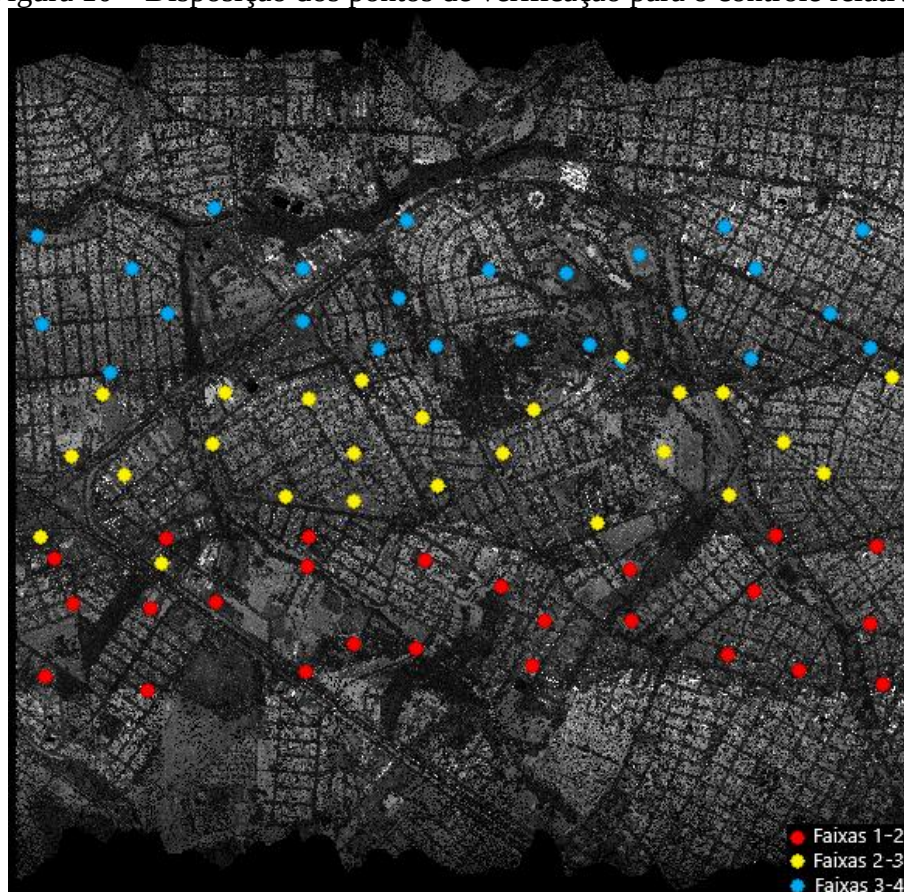
Vale ressaltar que, para a norma brasileira foi considerada a escala de 1:10.000 uma vez que, para as escalas maiores, o número de pontos seria muito grande e, portanto, impraticável. Para demonstrar esta situação, para uma escala de 1:1.000 o número de pontos de verificação calculados seriam 200; para a escala de 1:2.000 seriam 125 pontos e para a escala 1:5.000 seriam calculados 50 pontos de verificação, valores estes impraticáveis para a realização de um controle de qualidade.

Visando atender as quatro normas em estudo foram definidos 25 pontos para a avaliação da acurácia relativa. No entanto, somente as normas americana e canadense determinam especificações para acurácia relativa e, portanto, foram as únicas utilizadas nesta

análise. Além disso, estas normas especificam somente a avaliação da acurácia relativa na componente vertical.

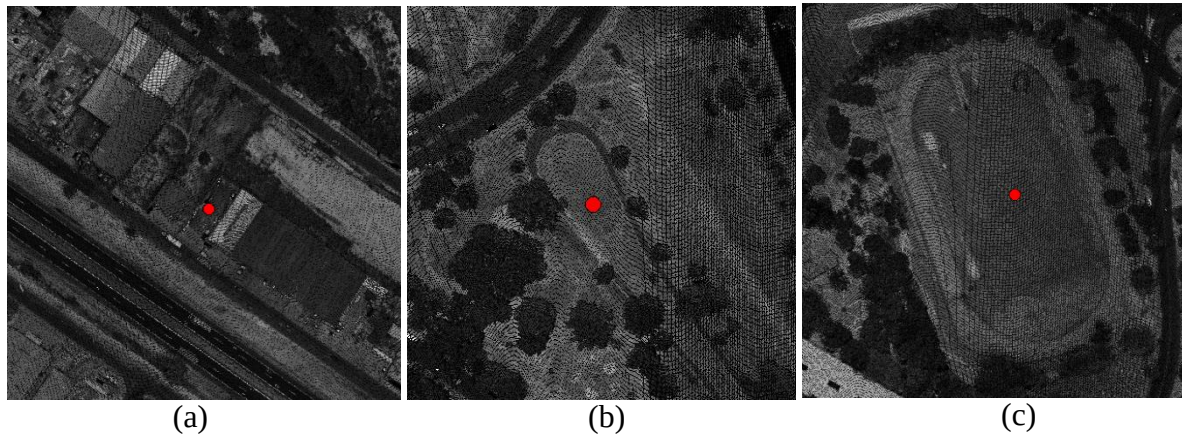
Definido o número de pontos de verificação, a etapa seguinte consistiu na realização da coleta dos dados para análise relativa a cada par de faixas (1-2, 2-3 e 3-4). Fazendo uso do *software Global Mapper*, os pontos de verificação foram amostrados manualmente ao longo da área de sobreposição em uma das faixas, determinando as coordenadas (E, N, H) dos mesmos e salvos em um arquivo .txt. A Figura 10 mostra a disposição dos pontos amostrados em cada par de faixas LiDAR.

Figura 10 – Disposição dos pontos de verificação para o controle relativo.



Na sequência, fazendo uso da função *lascontrol*, da biblioteca do *software LasTools*, foi realizada a busca do ponto correspondente na faixa adjacente de forma automatizada por meio das coordenadas horizontais (E, N), sendo a altitude (H) obtidas por meio de interpolação da malha TIN. Neste procedimento, a faixa 1 foi tomada como referência para busca na faixa 2; posteriormente, a faixa 2 foi tomada como referência para busca na faixa 3; finalmente, faixa 3 foi tomada como referência para busca na faixa 4. Para minimizar o erro devido à interpolação, os pontos de verificação foram amostrados em áreas planas.

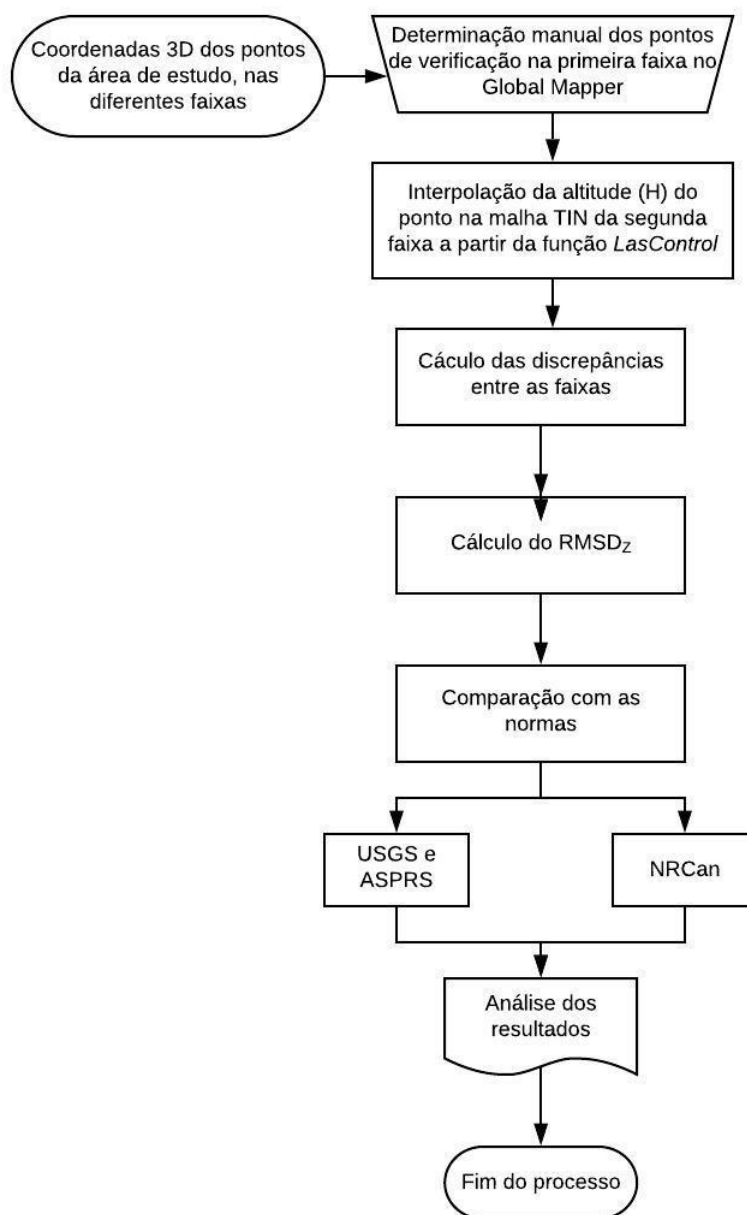
Figura 11 – Exemplo da coleta de dados dos pontos de verificação em áreas planas. (a) Ponto 14a entre as faixas 1 e 2, localizado em um estacionamento. (b) Ponto 01b entre as faixas 2 e 3, localizado em um parque. (c) Ponto 08c entre as faixas 3 e 4, localizado em um campo de futebol.



A última etapa do processo consistiu no cálculo do $RMSE_z$ para cada par de faixas e comparação com os limiares estabelecidos nas normas americana e canadense.

Na Figura 12 é apresentado o fluxograma com as etapas envolvidas na avaliação da acurácia relativa da nuvem de pontos LiDAR.

Figura 12 – Fluxograma da avaliação da acurácia relativa.



3.2.2 Avaliação da acurácia absoluta

Neste segundo caso foi realizada a avaliação da acurácia absoluta dos dados LiDAR. Ao analisar as normas selecionadas, observa-se que as normas americana e canadense referem-se a esta avaliação diretamente sobre a nuvem de pontos LiDAR, enquanto as normas brasileira e australiana consideram os produtos gerados a partir da nuvem de pontos, ou seja, o MDT. Deste modo, a análise dos dados LiDAR foi dividida em dois procedimentos: avaliação

da acurácia absoluta sobre a nuvem de pontos LiDAR e avaliação da acurácia absoluta sobre o MDT.

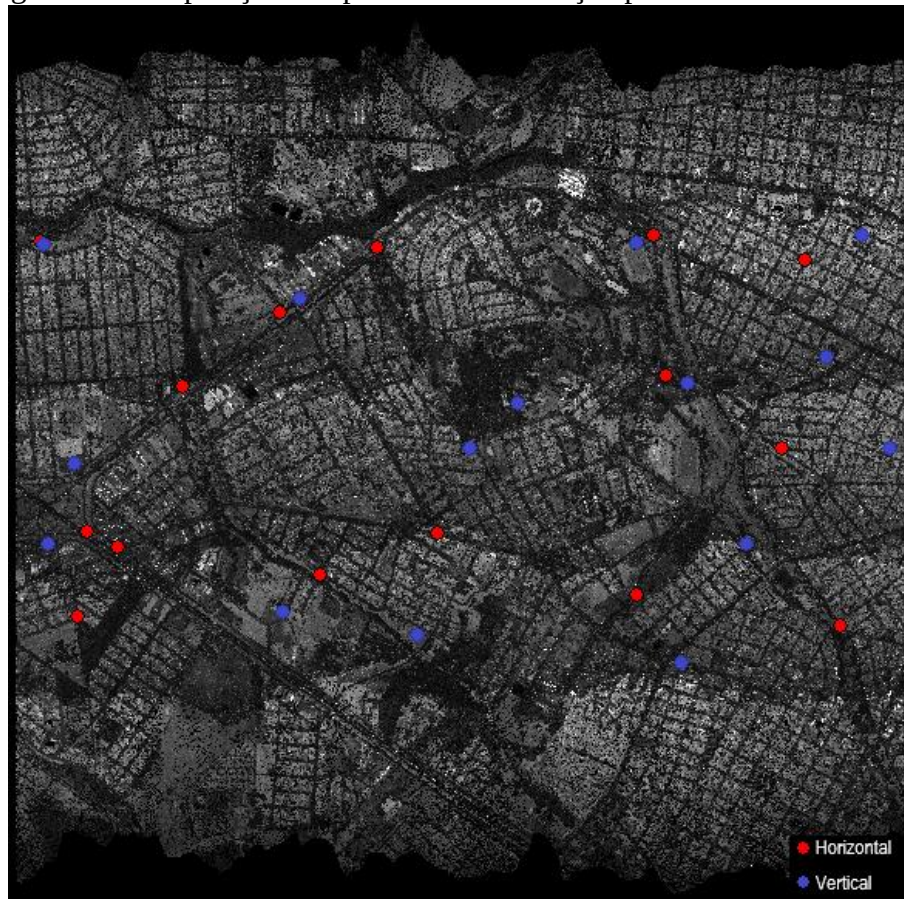
Assim como apresentado na Seção 3.2.1, o primeiro passo para avaliação da acurácia, tanto sobre a nuvem de pontos, quanto sobre o MDT, consistiu na determinação do número de pontos de verificação utilizados. Seguindo as normas selecionadas, chegou-se aos mesmos valores apresentados na Seção 3.2.1.

De modo a atender as quatro normas em estudo, seriam necessários 25 pontos de controle, entretanto, foram levantados 5 pontos a mais para se ter uma segurança, caso ocorresse algum erro na coleta dos mesmos. Como foram levantados 30 pontos e não houve problema na coleta de nenhum, foram utilizados todos os pontos na avaliação da acurácia absoluta, sendo 15 pontos para a avaliação da acurácia horizontal e 15 pontos para avaliação da acurácia vertical. Para a escolha da disposição dos pontos no terreno foi levado em consideração os terrenos abertos (NVA), uma vez que, as áreas de vegetação (VVA), devido as características das mesmas, podem ter sofrido alterações entre a data de aquisição da nuvem de pontos LiDAR e a coleta dos dados em campo. Cabe ressaltar que os pontos de verificação da acurácia horizontal foram escolhidos em feições bem definidas, como faixas sobre vias, e os pontos de verificação da acurácia vertical foram escolhidos em regiões planas.

Definido o número de pontos, a etapa seguinte consistiu na realização da coleta de dados GNSS em campo para determinação das coordenadas dos pontos de verificação. O levantamento GNSS foi realizado nos dias 27 e 28 de janeiro de 2020, por meio de posicionamento relativo estático rápido, uma vez que as linhas de base são inferiores a 10 km. Na execução do levantamento foi utilizado o receptor GNSS Topcon Hiper SR, configurado para coleta de dados das constelações GPS e GLONASS, máscara de elevação de 10° e taxa amostral de 15 seg. Posteriormente a coleta de dados GNSS, os mesmos foram processados no *software* TBC (*Trimble Business Center*), tomando como base as estações PPTE (Presidente Prudente – SP) da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos sistemas GNSS (RBMC), PRU2 e PRU4, ambas pertencentes a rede CIGALA/CALIBRA, localizadas nas dependências da Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente – SP. Deste modo, foram obtidas as coordenadas dos pontos de verificação no sistema de referência SIRGAS 2000 e sistema de projeção UTM/Fuso 22 Sul. As altitudes ortométricas foram obtidas por meio de correção da ondulação geoidal (ΔN) fazendo uso do Modelo de Ondulação Geoidal MAPGEO2015.

A Figura 13 mostra a disposição dos pontos de verificação coletados em campo para controle planimétrico (pontos em vermelho) e altimétrico (pontos em azul).

Figura 13 – Disposição dos pontos de verificação para o controle absoluto.

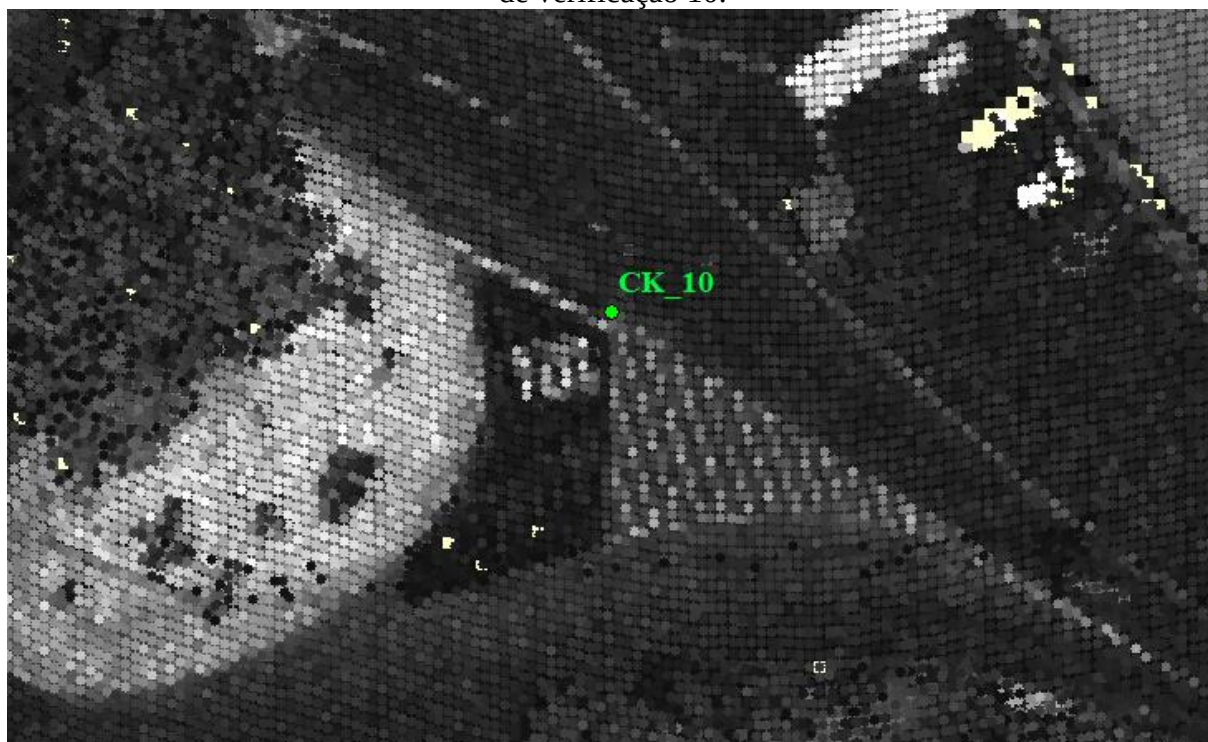


No que se refere à avaliação da acurácia absoluta sobre a nuvem de pontos LiDAR, a mesma foi dividida em duas etapas: análise da acurácia horizontal e análise da acurácia vertical, uma vez que a avaliação horizontal foi feita na imagem intensidade de acordo com a ASPRS e a avaliação vertical em regiões planas, e portanto, a determinação dos pontos foram determinadas de maneira distinta.

Se tratando da acurácia horizontal, adotou-se a utilização da imagem intensidade, a qual permite mapear variáveis de textura na forma de uma imagem em escala de cinza, auxiliando na extração de feições e classificação de pontos LiDAR (USGS, 2014). A geração da imagem intensidade em função dos dados LiDAR foi realizada por meio do *software Global Mapper*. Para auxiliar a realização da pontaria nos pontos de verificação horizontal, foi utilizada a nuvem de pontos LiDAR sobreposta a imagem intensidade (Figura 14), obtendo assim as coordenadas planimétricas dos mesmos. As coordenadas horizontais dos

pontos de verificação obtidas na imagem foram comparadas com as coordenadas obtidas no terreno e, na sequência realizou-se o cálculo do $RMSE_{plan}$ para análise acurácia horizontal, sendo o resultado obtido comparado aos limiares apresentados nas normas consideradas nesta análise.

Figura 14 – Detalhe da nuvem de pontos LiDAR sobreposta a imagem intensidade no ponto de verificação 10.



Para a análise da acurácia vertical, a mesma foi dividida em duas abordagens distintas: a primeira abordagem consistiu na análise da acurácia sobre a nuvem de pontos LiDAR, tomando como base as normas americana e canadense, enquanto a segunda abordagem foi efetuada a análise da acurácia sobre o MDT gerado a partir da nuvem de pontos, tomando como base as normas brasileira e australiana.

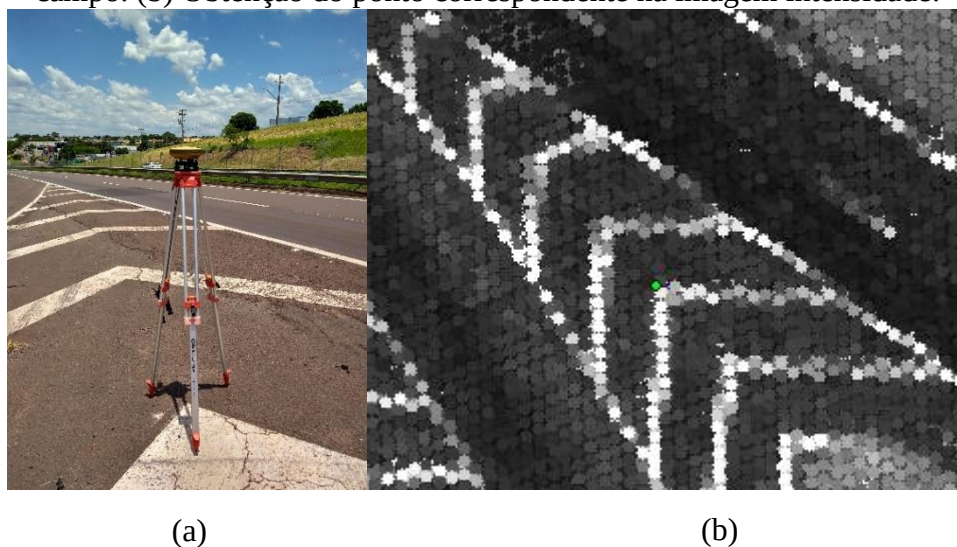
No primeiro procedimento, considerando a nuvem de pontos LiDAR, foi coletada a coordenada altimétrica de um conjunto de pontos na nuvem LiDAR que compõem uma região plana de 4 m², com cerca de 35 pontos, para cada ponto de verificação. Na sequência foi calculada a altitude média do local, tomando esta como a coordenada altimétrica do ponto na nuvem LiDAR.

No segundo procedimento, fez-se uso da biblioteca *LasTools*, onde foram utilizadas as ferramentas *lasground* para filtrar a nuvem de pontos e a ferramenta *lasclassify* para excluir os pontos de não terreno, deixando apenas os pontos referentes ao solo. Em seguida, foi

utilizada a função *las2dem* para geração do MDT a partir da triangulação dos pontos em uma malha irregular (*Triangular Irregular Network* – TIN). Por fim, fazendo uso da função *lascontrol* foi realizada a busca da coordenada altimétrica dos pontos de verificação no MDT, a qual interpola o valor da elevação (H) no MDT por meio de pontos cujos valores das coordenadas planimétricas (E, N) são conhecidas (coordenadas levantadas em campo). Uma vez obtidas as coordenadas altimétricas dos pontos de verificação por meio dos procedimentos descritos, as mesmas foram comparadas com as coordenadas obtidas no terreno e, posteriormente foram calculados os valores de $RMSE_z$ para a análise da acurácia vertical, sendo estes comparados aos limiares apresentados nas normas consideradas.

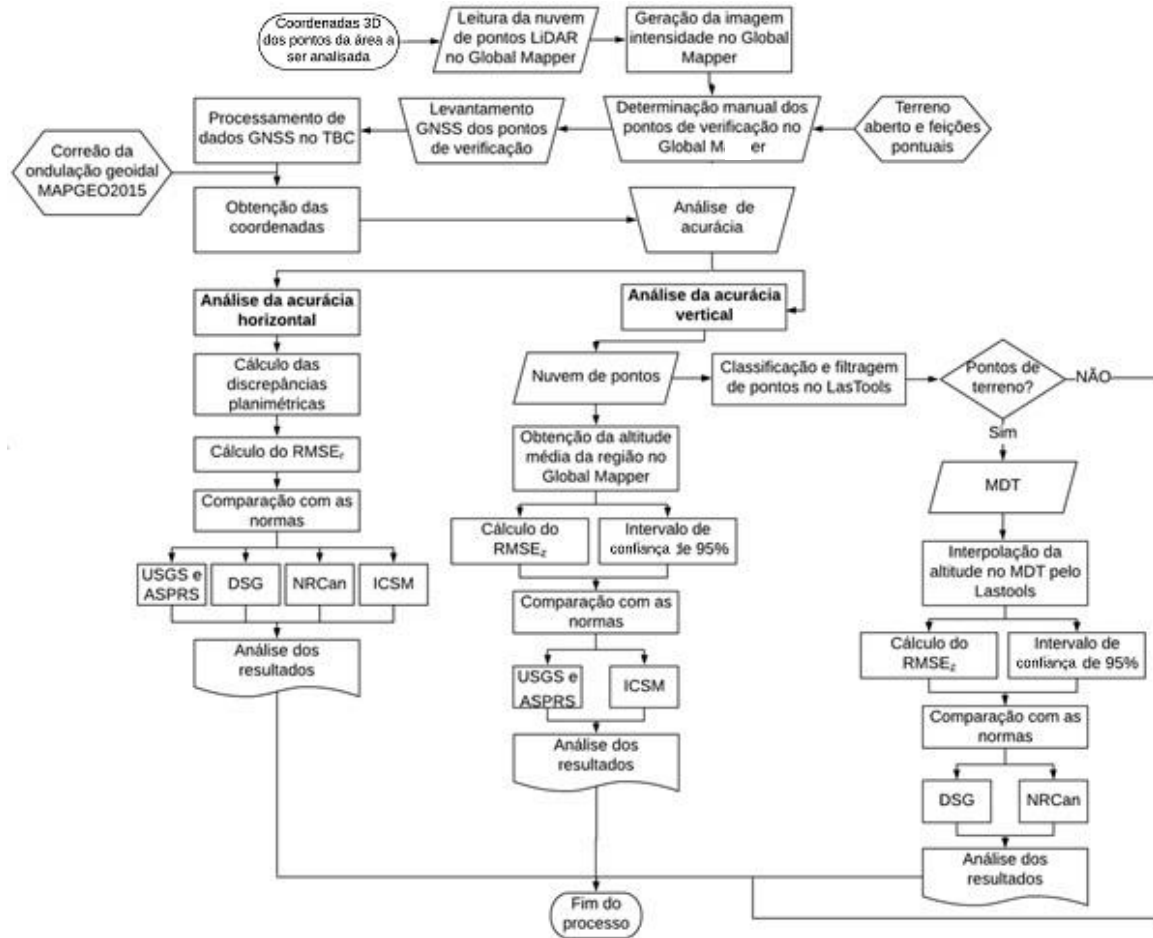
A Figura 15 exemplifica a realização da coleta dos dados GNSS em campo e posterior busca por correspondência na nuvem de pontos LiDAR no ponto de verificação 8.

Figura 15 – Coleta de dados no ponto de verificação. (a) Levantamento de dados GNSS em campo. (b) Obtenção do ponto correspondente na imagem intensidade.



O fluxograma das etapas envolvidas na análise da acurácia absoluta é apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Fluxograma da avaliação da acurácia absoluta.



4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e respectivas análises para cada experimento descrito no Capítulo 3.

4.1 Análise da acurácia relativa

Partindo da metodologia apresentada na Seção 3.2.1, foram obtidas as coordenadas tridimensionais (E, N, H) dos 25 pontos de verificação em cada par de faixas LiDAR para avaliação da acurácia relativa, bem como das diferenças de altitudes entre as faixas adjacentes. Estas coordenadas são apresentadas no Apêndice A.

Na sequência foram calculadas as discrepâncias na componente altimétrica em cada ponto, para cada par de faixas, e por meio destas, foi calculado o valor de $RMSD_z$ fazendo uso da Equação (9), sendo $n = 25$. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Discrepância na coordenada altimétrica e respectivo $RMSD_z$.

Faixas 1-2		Faixas 2-3		Faixas 3-4	
Ponto	Discrepância (m)	Ponto	Discrepância (m)	Ponto	Discrepância (m)
01a	0,002	01b	0,032	01c	0,004
02a	-0,009	02b	-0,007	02c	0,061
03a	0,000	03b	0,031	03c	0,026
04a	-0,019	04b	0,029	04c	0,035
05a	0,004	05b	0,061	05c	0,051
06a	-0,001	06b	-0,017	06c	-0,012
07a	-0,056	07b	0,000	07c	-0,015
08a	-0,014	08b	-0,027	08c	-0,016
09a	-0,038	09b	-0,036	09c	-0,018
10a	-0,069	10b	0,013	10c	0,028
11a	-0,036	11b	-0,036	11c	0,024
12a	-0,027	12b	-0,031	12c	0,046
13a	-0,027	13b	0,000	13c	0,041
14a	0,002	14b	0,003	14c	0,040
15a	-0,020	15b	0,089	15c	-0,005
16a	-0,050	16b	0,033	16c	-0,007
17a	-0,067	17b	0,008	17c	0,081
18a	-0,064	18b	0,087	18c	0,006
19a	-0,021	19b	0,019	19c	-0,054
20a	-0,037	20b	0,019	20c	0,009
21a	-0,080	21b	-0,001	21c	0,069
22a	0,005	22b	0,051	22c	-0,013
23a	-0,015	23b	-0,055	23c	0,037
24a	-0,076	24b	0,010	24c	0,031
25a	-0,032	25b	-0,001	25c	0,006

Mínimo	-0,080	Mínimo	-0,055	Mínimo	-0,054
Máximo	0,005	Máximo	0,089	Máximo	0,081
Média	-0,030	Média	0,011	Média	0,018
D. Padrão	0,027	D. Padrão	0,036	D. Padrão	0,032
<i>RMSD_z</i>	0,040	<i>RMSD_z</i>	0,037	<i>RMSD_z</i>	0,036

Por meio da Tabela 11, observa-se que nos três pares de faixas as discrepâncias entre os pontos não ultrapassam 9 cm. Na sequência, os valores de $RMSD_z$ foram comparados com as normas americana e canadense.

Iniciando pela norma americana apresentada, na Seção 2.3.1, comparando os valores de $RMSD_z$ apresentados na Tabela 11, correspondendo a 4,0 cm entre as faixas 1 e 2, a 3,7 cm entre as faixas 2 e 3 e a 3,6 cm entre as faixas 3 e 4; com os limiares de acurácia relativa estabelecidos na Tabela 2, observa-se que tais valores se enquadram no nível de qualidade QL0, cuja diferença de sobreposição deve ser menor ou igual a 4,0 cm. Por este resultado, tem-se que a nuvem de pontos atende o nível mínimo de qualidade aceitável para os dados LiDAR exigido pela norma USGS (2014) e ASPRS (2015), que é o QL2 (sobreposição da faixa ≤ 8 cm). Além disso, de acordo com a Tabela 2, a diferença máxima de sobreposição deve ser de ± 16 cm (nível de qualidade QL2), e com base nos valores obtidos, -8,0 cm entre as faixas 1 e 2, de 8,9 cm entre as faixas 2 e 3 e de 8,1 cm entre as faixas 3 e 4, todos atenderam aos limiares especificados.

Comparando agora os resultados obtidos com a norma canadense (Seção 2.3.3), tem-se que o valor de $RMSD_z$ deve ser menor que 8 cm. Pelos resultados obtidos na Tabela 11, os valores de $RMSD_z$ foram: 4,0 cm (entre as faixas 1 e 2), 3,7 cm (entre as faixas 2 e 3) e a 3,6 cm (entre as faixas 3 e 4), atendendo as especificações da norma. Adicionalmente, a norma estabelece que a diferença máxima nas áreas de sobreposição de faixas também deve ser de ± 16 cm (Tabela 8), e pelos resultados obtidos na Tabela 11, conforme descrito anteriormente, todos os valores atenderam as especificações da norma NRCan (2017).

4.2 Análise da acurácia absoluta

A análise da acurácia absoluta seguiu a metodologia apresentada na Seção 3.2.2, sendo dividida em análise da acurácia horizontal e análise da acurácia vertical.

Para realização das análises, inicialmente foram determinadas as coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação por meio do processamento dos dados do

levantamento GNSS. Estas coordenadas são apresentadas no Apêndice B, juntamente com os respectivos desvios padrão.

4.2.1 Análise da acurácia horizontal

Para a obtenção da acurácia horizontal foram obtidas então as coordenadas planimétricas (E, N) dos 15 pontos de verificação por meio da nuvem de pontos LiDAR. Estas coordenadas também são apresentadas no Apêndice B.

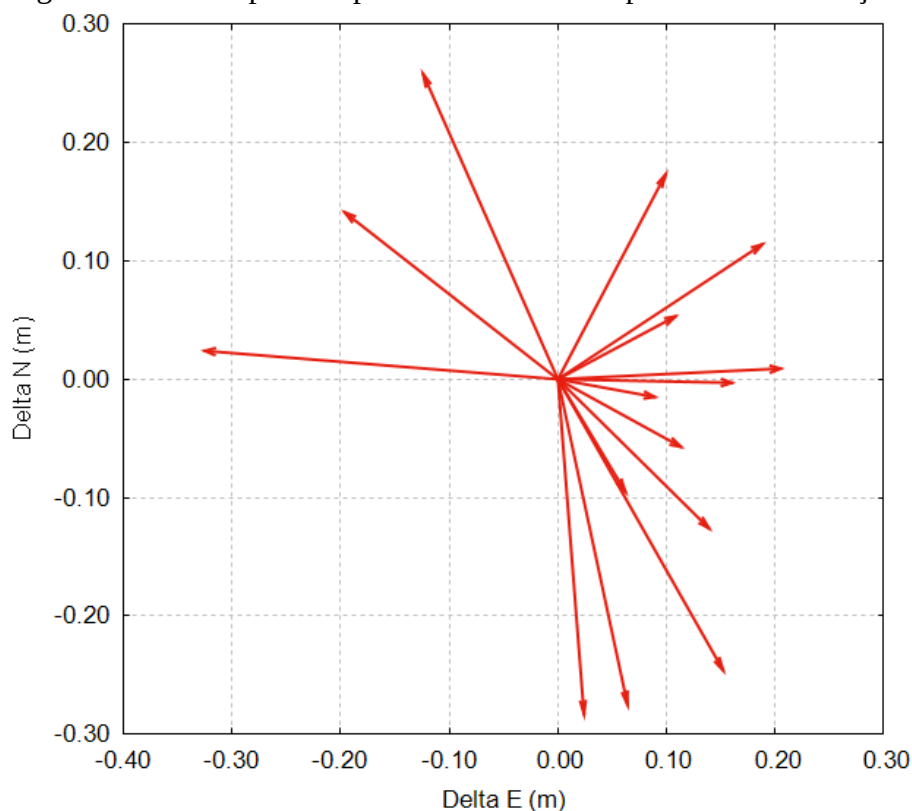
Na sequência foram calculadas as discrepâncias entre as coordenadas obtidas da nuvem LiDAR e do GNSS nas componentes planimétricas (E, N) em cada ponto, e por meio destas, calculados os valores de $RMSE_X$ e $RMSE_Y$ fazendo uso das Equações (13) e (14), respectivamente, sendo $n = 15$. Calculou-se ainda o erro na componente horizontal para cada ponto utilizando-se da Equação (18). Fazendo uso dos valores de $RMSE_X$ e $RMSE_Y$ foi possível calcular o valor de $RMSE_{plan}$ pela Equação (15). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 12, sendo apresentados na Figura 17 os vetores correspondentes às discrepâncias obtidas.

Tabela 12 – Discrepâncias nas coordenadas planimétricas e respectivos valores de RMSE.

Ponto	ΔE (m)	ΔN (m)	e_{plan} (m)
1	0,152	-0,246	0,289
2	0,139	-0,126	0,188
3	-0,196	0,141	0,241
4	0,064	-0,275	0,282
5	-0,124	0,258	0,286
6	0,024	-0,283	0,284
7	-0,325	0,024	0,326
8	0,113	-0,057	0,127
9	0,188	0,114	0,220
10	0,205	0,009	0,205
11	0,108	0,053	0,120
12	0,099	0,173	0,199
13	0,062	-0,095	0,113
14	0,089	-0,015	0,090
15	0,160	-0,003	0,160
Mínimo	-0,325	-0,283	0,090
Máximo	0,205	0,258	0,326
Média	0,051	-0,022	0,209
D. Padrão	0,151	0,163	-

RMSE	0,154	0,159	-
RMSE_{plan}	0,221		

Figura 17 – Discrepâncias planimétricas nos 15 pontos de verificação.



Como pode ser observado pela Figura 17, os vetores da resultante dos erros planimétricos encontram-se dispersos e para várias direções, o que caracteriza a ausência de tendência em E e N. Para melhor verificação, foi feito o teste de tendência de acordo com Galo e Camargo (1994) apresentado na Seção 2.3.5, conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Cálculo da tendência nas coordenadas planimétricas.

t-student calculado	$t_E = 1,300$	$t_N = -0,521$
t-student teórico	$t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})} = t_{(14; 0,025)} = 2,145$	

De acordo com a Equação (32), o valor de *t-student* calculado, em módulo, tem que ser menor que o valor de *t-student* teórico. Com base na Tabela 13, percebe-se que isto aconteceu, o que significa que 95% das discrepâncias dos pontos coletados na nuvem de pontos não apresentaram tendência, o que pode ser confirmado pela Figura 17.

Os valores obtidos na Tabela 12 foram submetidos ao controle de qualidade de cada uma das normas consideradas no presente trabalho.

Levando em consideração a norma americana (USGS e ASPRS, Seção 2.3.1) observou-se que a mesma apresenta uma abordagem diferenciada para análise da qualidade horizontal, definindo as classes de acurácia em função dos valores de $RMSE_X$ e $RMSE_Y$. Com isso, é possível obter uma maior flexibilidade para estipular a acurácia dos dados, atendendo assim às diferentes aplicações modernas (ASPRS, 2015). Na norma ASPRS (2015) são apresentadas as classes de acurácia horizontal, comumente empregadas, cujos valores são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Classes comuns de acurácia horizontal de acordo com a ASPRS (2015).

Classe de Acurácia Horizontal de $RMSE_X$ e $RMSE_Y$ (cm)	$RMSE_{plan}$ (cm)	Acurácia Horizontal com nível de confiança de 95% (cm)
0,63	0,9	1,5
2,50	3,5	6,1
5,00	7,1	12,2
10,00	14,1	24,5
15,00	21,2	36,7
17,50	24,7	42,8
20,00	28,3	49,0
45,00	63,6	110,1
60,00	84,9	146,9
100,00	141,4	244,8
200,00	282,8	489,5
300,00	424,3	734,3
500,00	707,1	1223,9
1000,00	1414,2	2447,7

Fonte: Adaptado de ASPRS (2015)

Comparando a Tabela 14 com os resultados da Tabela 12, tem-se que o conjunto de dados se enquadrou na classe de acurácia de 17,5 cm, uma vez que os valores de $RMSE_X$ e $RMSE_Y$ são inferiores a este valor, correspondendo a 15,4 cm e 15,9 cm, respectivamente. Considerando o valor de $RMSE_{plan}$ observa-se que esse também se enquadra na mesma classe de acurácia, uma vez que o valor do $RMSE_{plan}$ foi de 22,1 cm e o limiar de aceitação da classe é de 24,7 cm. Deste modo, tem-se que os as coordenadas da nuvem de pontos LiDAR aerotransportado atendem a classe de acurácia horizontal de 17,5 cm estabelecida pela norma americana.

Analisando os resultados obtidos em relação à norma brasileira (Seção 2.3.2), a mesma estabelece que um produto digital deve ser aceito em uma determinada classe quando pelo menos 90% dos pontos tenham erro horizontal (e_{plan}) inferior ao erro máximo admissível (EM). Assim, pela Tabela 12, tem-se que o segundo maior valor de erro planimétrico encontrado nos pontos foi de $e_{plan} = 0,289$ m. Comparando este valor com o EM apresentado na Tabela 5, ou seja, 0,56 m, verificou-se que o produto pode ser classificado como classe A na escala 1:2.000. Além disso, a norma DSG (2016) indica fazer a comparação do valor do $RMSE_{plan}$ com o erro padrão (EP) para a classe identificada. Comparando o valor do RMSE resultante, isto é, $RMSE_{plan} = 0,221$ m, com os valores de EP apresentados na Tabela 5 verificou-se que este se enquadra na classe já encontrada. Portanto, levando em consideração a norma brasileira, tem-se que a nuvem de pontos LiDAR pode ser empregada para geração de produtos classe A na escala 1:2.000.

Deste modo, considerando um produto na escala 1:2.000 pela classificação da norma brasileira, foi possível estipular o número de pontos de verificação de acordo com a mesma norma, considerando o procedimento descrito na Seção 2.3.2. Tomando a área de estudo de aproximadamente 13 km², considerando a divisão desta área em regiões de 4x4cm na escala do produto (1:2.000), são geradas células de 80x80m (0,0064 km²). Dividindo o tamanho da área de estudo pela área de cada célula, o produto passaria a ser analisado em 2032 células (13km² ÷ 0,0064 km²). Supondo que todas as células sejam válidas, a população é igual a 2032. Tomando o nível de inspeção II, pela Tabela 6, a letra-código de acordo com tamanho do lote e nível de inspeção é K. A partir desse nível e considerando o LQA igual a 4%, pela Tabela 7 tem-se que o número total de pontos de verificação a ser utilizado deve ser igual a 125. Deste resultado, tem-se que a norma brasileira exige um número elevado de pontos de verificação quando se trata de grandes escalas, mesmo com as atuais tecnologias que proporcionam dados de alta qualidade, tornando custoso o levantamento de dados em campo.

Considerando agora a norma canadense (Seção 2.3.3), tem-se que esta norma estabelece que o valor de $RMSE_{plan}$ não deve ser superior a 31,1 cm e, pelos resultados obtidos na Tabela 12, tem-se que o valor de $RMSE_{plan}$ corresponde a 22,1 cm, atendendo as exigências dessa norma. Adicionalmente, esta norma estabelece ainda que em um nível de confiança de 95% a acurácia horizontal deve ser inferior a 60 cm. Fazendo o cálculo apresentado na Tabela 8, obteve-se acurácia horizontal igual a 38,3 cm, atendendo as exigências da norma. Assim, tem-se que o conjunto de dados empregados atende os requisitos de qualidade Canadense nível 1 (CQL1 – *Canadian Quality Level 1*).

Por fim, considerou-se a norma australiana (Seção 2.3.4), que estabelece que em um nível de confiança de 95% a acurácia horizontal deve ser inferior a 80 cm. Com base na Tabela 9, obteve-se uma acurácia horizontal igual a 38,2 cm, atendendo às exigências da norma.

4.2.2 Análise da acurácia vertical

Na análise da acurácia vertical, duas abordagens foram consideradas: a primeira abordagem consistiu na análise da acurácia sobre a nuvem de pontos LiDAR, tomando como base as normas americana e canadense, enquanto a segunda abordagem foi efetuada a análise da acurácia sobre o MDT gerado a partir da nuvem de pontos, tomando como base as normas brasileira e australiana. Foram obtidas então as coordenadas altimétricas (H) dos 15 pontos de verificação.

Para a análise sobre a nuvem de pontos, conforme já descrito anteriormente, foi gerado um plano de aproximadamente 4 m² ao redor do ponto de verificação, onde a partir das coordenadas altimétricas de todos os pontos pertencentes ao plano, foi calculada uma altitude média. Já para análise da acurácia do MDT, foi utilizada a biblioteca *LasTools*, onde foram utilizadas as ferramentas *lasground* e *lasclassify* para filtrar a nuvem de pontos e deixar somente os pontos referentes ao terreno. Em seguida, foi gerado o MDT a partir da triangulação dos pontos em uma malha irregular (TIN) e utilizado a ferramenta *lascontrol* para calcular as diferenças de altitude entre os pontos de verificação e o MDT.

Na sequência, foram calculadas as discrepâncias entre as altitudes obtidas da nuvem LiDAR e do MDT, com as obtidas pelo GNSS, corrigidas da ondulação geoidal em cada ponto, e por meio destas, calculado o valor de $RMSE_z$, fazendo uso da Equação (8), com $n = 15$. As coordenadas H na nuvem de pontos LiDAR e no MDT são apresentadas no Apêndice C.

As discrepâncias calculadas entre as altitudes obtidas do processamento dos dados GNSS e as altitudes obtidas na nuvem de pontos LiDAR e no MDT (Tabela C.1 do Apêndice C) são apresentadas na Tabela 15 e representadas graficamente nas Figura 18 e Figura 19. Ressalta-se que foram utilizadas as coordenadas planimétricas (E, N) apenas para a plotagem e localização dos pontos, sendo que os vetores representam as discrepâncias altimétricas.

Tabela 15 – Discrepâncias na coordenada altimétrica e respectivo valor de RMSE.

Ponto	$\Delta H_{\text{LiDAR}} \text{ (m)}$	$\Delta H_{\text{MDT}} \text{ (m)}$
16	0,030	0,052
17	-0,105	-0,096
18	-0,101	-0,093
19	-0,133	-0,124
20	-0,134	-0,149
21	-0,134	-0,146
22	-0,072	-0,098
23	-0,098	-0,111
24	-0,128	-0,114
25	-0,135	-0,124
26	-0,118	-0,118
27	0,162	0,063
28	-0,118	-0,145
29	-0,111	-0,098
30	-0,120	-0,108
Mínimo	-0,135	-0,149
Máximo	0,162	0,063
Média	-0,088	-0,094
D. Padrão	0,080	0,064
$RMSE_z$	0,117	0,113

Figura 18 – Discrepâncias altimétricas obtidas da nuvem de pontos LiDAR.

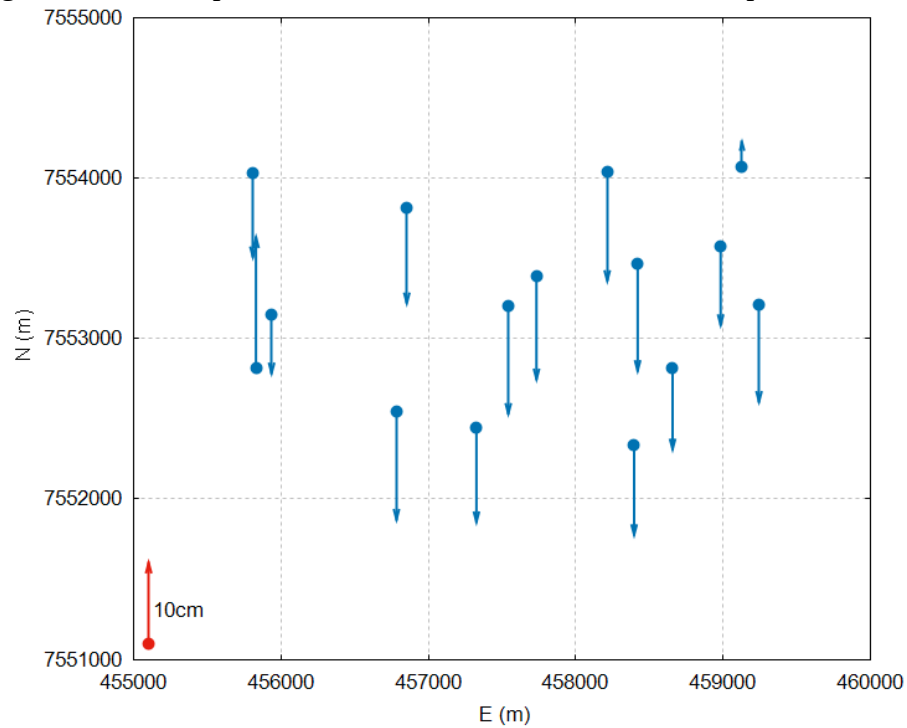
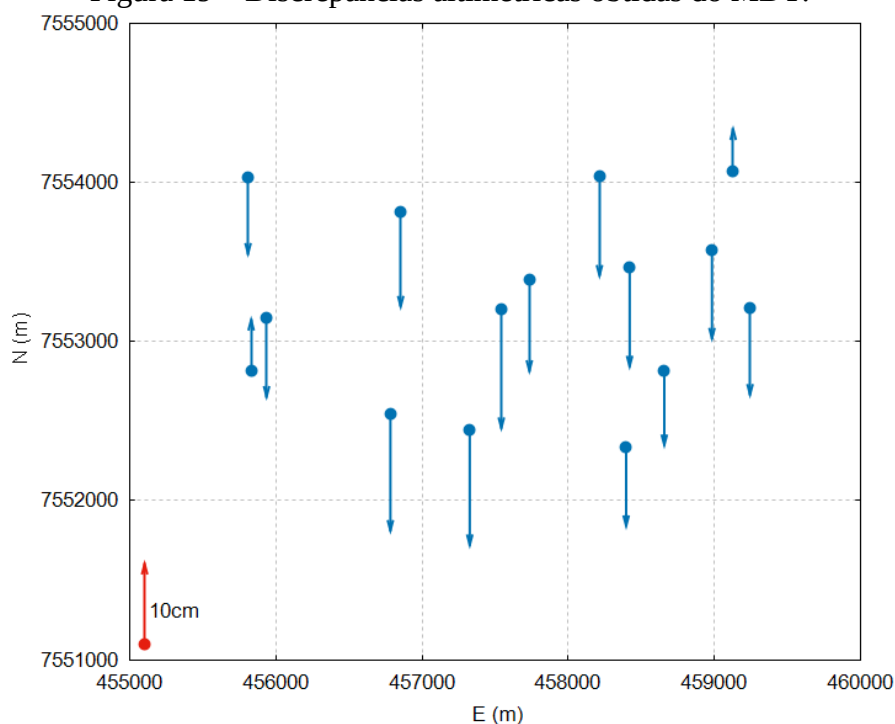


Figura 19 – Discrepâncias altimétricas obtidas do MDT.



Como pode ser observado pelas Figura 18 e Figura 19, as discrepâncias altimétricas obtidas tanto pela nuvem de pontos quanto pelo MDT apresentaram tendências, visto que, em ambos os casos, há a predominância de discrepâncias negativas. De maneira análoga ao realizado para as coordenadas planimétricas, para melhor verificação, foi feito o teste de tendência de acordo com Galo e Camargo (1994) apresentado na Seção 2.3.5, conforme apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Cálculo da tendência para componente altimétrica.

	LiDAR	MDT
t-student calculado	$t_H = -4,226$	$t_H = -5,672$
t-student teórico	$t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})} = t_{(14; 0,025)} = 2,145$	

De acordo com a Equação (32), o valor de *t-student* calculado, em valor absoluto, tem que ser menor que o valor de *t-student* teórico e, com base na Tabela 16, isto não se verifica, o que significa que as discrepâncias dos pontos coletados na nuvem de pontos e no MDT apresentaram tendência, o que pode ser confirmado pela Figura 17 e Figura 19 e, portanto, a nuvem de pontos derivada do SVLA possui erros sistemáticos. Isso pode ser justificado pela

presença de tendências nos sistemas de medidas (ângulo de varredura e medida LASER) e nos parâmetros do sistema (*boresight* e desalinhamento entre os componentes do SVLA).

Outro aspecto que pode ser considerado para a existência de tendência nas coordenadas altimétricas é a existência de *bias* entre as faixas, conforme pode ser observado pelos gráficos de agulha nas Figura 20, Figura 21 e Figura 22.

Figura 20 – Discrepâncias altimétricas entre as faixas 1 e 2.

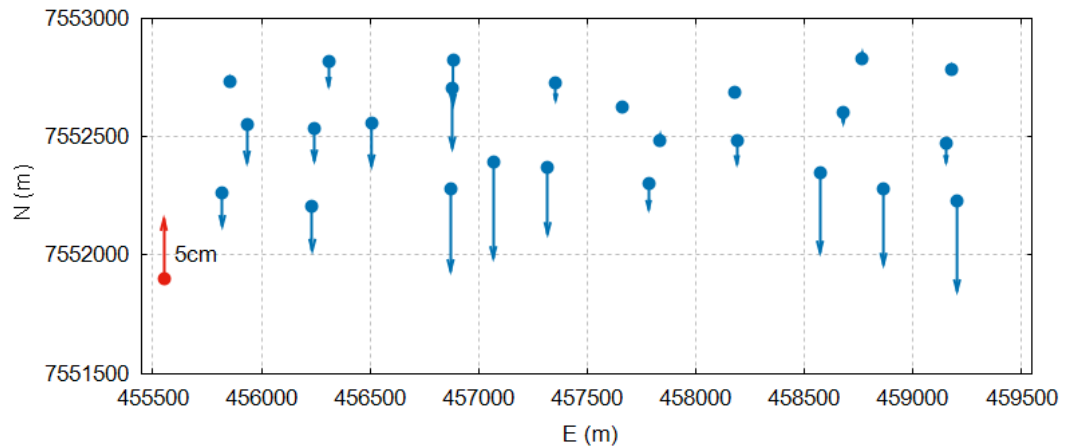


Figura 21 – Discrepâncias altimétricas entre as faixas 2 e 3.

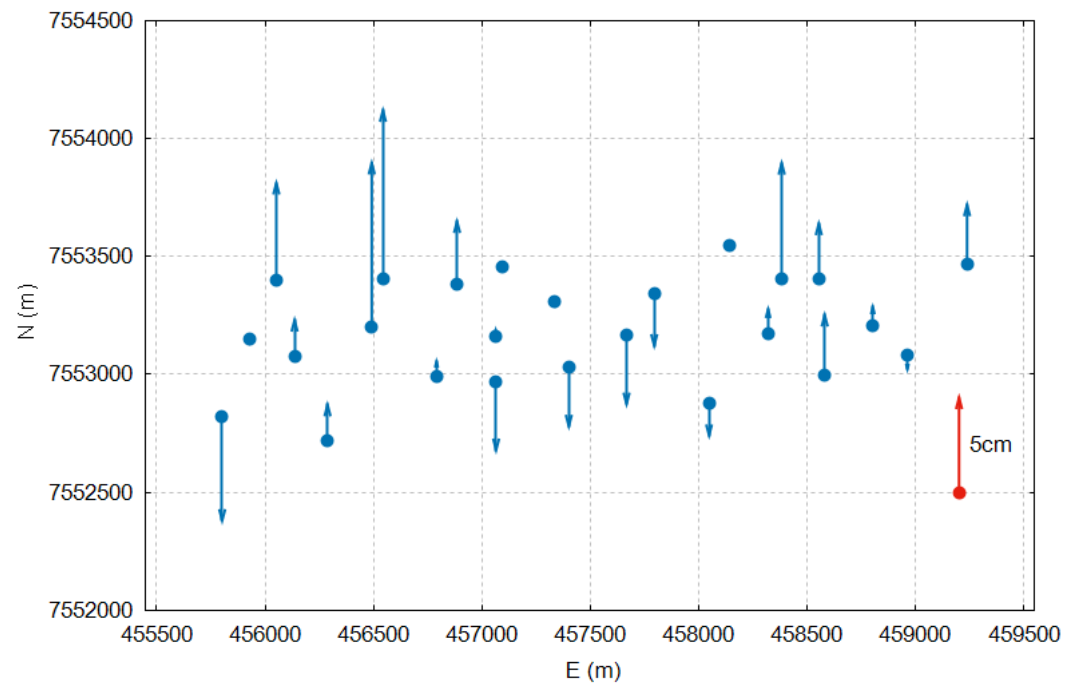
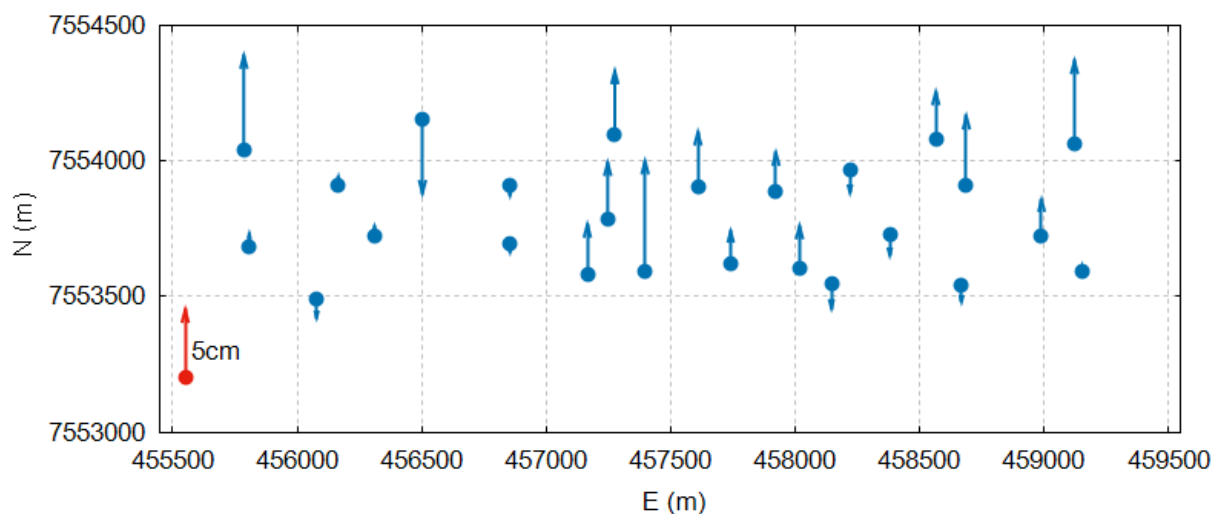


Figura 22 – Discrepâncias altimétricas entre as faixas 3 e 4.



Além disso, ao verificar a existência de tendência de acordo com a metodologia de Galo e Camargo (1994), os resultados obtidos mostram que há tendências entre as faixas 1 e 2 e entre as faixas 3 e 4 (Tabela 17), o que também explica o resultado apresentado para o controle de qualidade absoluto da nuvem de pontos e do MDT.

Tabela 17 – Cálculo da tendência para componente altimétrica.

	Faixa 1 e 2	Faixa 2 e 3	Faixa 3 e 4
t-student calculado	$t_H = -5,554$	$t_H = 1,517$	$t_H = 2,829$
t-student teórico	$t_{(n-1, \frac{\alpha}{2})} = t_{(24; 0,025)} = 2,064$		

Os valores obtidos na Tabela 15 foram submetidos ao controle de qualidade da nuvem de pontos LiDAR pelas normas americana e canadense e do MDT pelas normas brasileira e australiana. De modo geral, pode-se observar que existe tendência quando trata dos dados LiDAR e dos dados de MDT.

Considerando a norma americana (Seção 2.3.1), comparando o valor de $RMSE_Z$ da nuvem LiDAR apresentado na Tabela 15, correspondente a 11,7 cm, com o valor de limiar para área sem vegetação na Tabela 1, observa-se que os dados não se enquadram no nível mínimo de qualidade aceitável QL2, o qual estabelece que a acurácia deve ser melhor que 10 cm. Considerando agora o nível de confiança de 95%, tem-se que a acurácia obtida foi de 22,9 cm, enquanto o limiar estabelece acurácia melhor que 19,6 cm para nível mínimo de

qualidade aceitável QL2 (Tabela 1). Para ambos limiares, os dados apresentados podem ser classificados, conforme Tabela 1, em nível de qualidade QL3.

Comparando agora os resultados obtidos com a nuvem de pontos LiDAR com a norma canadense (Seção 2.3.3), tem-se que a norma estabelece que a acurácia vertical deve ser melhor que 10 cm (Tabela 8), e pelo resultado obtido na Tabela 15, tem-se que acurácia obtida foi de 11,7 cm, não atendendo ao limiar estabelecido pela norma. Levando em conta o nível de confiança de 95%, a norma estabelece como limiar acurácia melhor que 19,6 cm (Tabela 8), entretanto a acurácia obtida foi de 22,9 cm, não se adequando a esta norma.

Levando em conta o valor de $RMSE_z$ para o MDT (Tabela 15), correspondendo a 11,3 cm, o mesmo foi comparado com a norma brasileira (Seção 2.3.2). Por esta norma, para que um produto digital seja aceito em uma determinada classe, pelo menos 90% dos pontos devem apresentar erro altimétrico (e_z) inferior ao EM. Como foram coletados 15 pontos de verificação, 90% dos dados correspondem a 14 pontos. Assim, pela Tabela 15, tem-se que o segundo maior valor de erro altimétrico encontrado nos pontos, em módulo, foi de $e_z = 0,149$ m. Comparando este valor com o erro máximo admissível (EM) apresentado na Tabela 5, verificou-se que o produto pode ser classificado como classe A na escala 1:1.000. Além disso, esta norma indica fazer a comparação do valor de $RMSE_{plan}$ com o erro padrão (EP) para a classe identificada. Comparando o valor de $RMSE_{plan} = 0,113$ m com os valores de EP apresentado na Tabela 5 verificou-se que este se enquadra na classe já encontrada. Portanto, levando em consideração a norma brasileira, tem-se que o MDT pode ser classificado na classe A na escala 1:1.000.

Por fim, considerou-se a norma do ICSM (seção 2.3.4), estabelecendo que em um nível de confiança de 95% a acurácia vertical deve ser melhor que 30 cm e, fazendo uso da Tabela 9, percebe-se que a acurácia vertical foi igual a 22,9 cm, atendendo assim, as exigências da norma.

Com os resultados obtidos, observa-se que o MDT analisado atende ao que preconizam as normas da DSG e do ICSM na melhor qualidade possível. Para as demais normas (USGS/ASPRS e NRCan), que consideram a nuvem de pontos como o produto a ser avaliado, os resultados obtidos não atenderam aos valores de acurácia definidas pelas mesmas. Isso ocorreu pelo fato de as normas brasileira e australiana possuírem limiares mais brandos, uma vez que os valores das discrepâncias obtidos em ambos os produtos apresentaram uma diferença de 0,9 cm e, portanto, se todos os produtos fossem analisados para todas as normas, o MDT também seria reprovado pelas normas americana e canadense,

assim como a nuvem de pontos também atenderia as exigências das normas brasileira e australiana.

4.3 Análise crítica das normas em análise

Para realizar uma análise crítica sobre os resultados obtidos em relação às normas, os valores obtidos nas avaliações da acurácia relativa e absoluta (horizontal e vertical) são apresentados nas Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20, respectivamente.

Tabela 18 – Resumo dos resultados obtidos na análise da acurácia relativa.

Acurácia Relativa				
Normas	USGS (2014) e ASPRS (2015)	NRCan (2017)	DSG (2016)	ICSM (2010)
País	Estados Unidos	Canadá	Brasil	Austrália
Limiares	$\text{RMSD}_z \leq 8,0 \text{ cm}$ e discrepância máxima $\pm 16 \text{ cm}$	$\text{RMSD}_z \leq 8,0 \text{ cm}$ e discrepância máxima $\pm 16 \text{ cm}$	-	-
RMSD_z calculado	4,0 cm (entre faixas 1 e 2) 3,7 cm (entre faixas 2 e 3) 3,6 cm (entre faixas 3 e 4)		-	-
Discrepância máxima calculada	-8,0 cm (entre faixas 1 e 2) 8,9 cm (entre faixas 2 e 3) 8,1 cm (entre faixas 3 e 4)		-	-
Resultado	Atende às especificações	Atende às especificações	-	-

O primeiro fato a ser destacado é que, somente as normas americana e canadense possuem especificações para a acurácia relativa de dados LiDAR, assim como discutido na Seção 4.1, não podendo-se realizar esta análise para as outras normas, brasileira e australiana.

Outro aspecto relevante é que ambas as normas, USGS/ASPRS e NRCan, possuem os mesmos limiares de acurácia e, portanto, como se observa na Tabela 18, as discrepâncias máximas obtidas nos experimentos permitem considerar que as tolerâncias foram atendidas. Entretanto, pode ser verificada a presença de efeitos sistemáticos entre as faixas, o que poderia ser solucionado com um ajustamento destas faixas (que foge do escopo deste trabalho).

Em se tratando da acurácia absoluta horizontal, conforme já descrito detalhadamente na Seção 4.2.1, ao comparar os valores calculados com os limiares das normas, todos atenderam às especificações. Tais resultados encontram-se resumidos na Tabela 19.

Tabela 19 – Resumo dos resultados obtidos na análise da acurácia absoluta horizontal.

Acurácia absoluta horizontal				
Normas	USGS (2014) e ASPRS (2015)	NRCan (2017)	DSG (2016)	ICSM (2010)
País	Estados Unidos	Canadá	Brasil	Austrália
Limiares	RMSE _x e RMSE _y ≤ 17,5 cm e RMSE _{plan} ≤ 24,7 cm	RMSE _{plan} ≤ 35,1 cm e 1,73*RMSE _{plan} ≤ 60 cm	$e_{plan} \leq 56$ cm e RMSE _{plan} ≤ 34 cm (Escala 1:2.000)	1,73*RMSE _{plan} ≤ 80 cm
Valores calculados	RMSE _x = 15,4 cm RMSE _y = 15,9 cm RMSE _{plan} = 22,1 cm 1,73*RMSE _{plan} = 38,2 cm e_{plan} (máximo) = 32,6 cm			
Resultado	Atende às especificações das quatro normas			

Comparando os valores calculados com as normas, como pode-se ver na Tabela 19, fica evidente que todas se baseiam na análise do valor de RMSE_{plan}. Pode-se observar que a norma brasileira estabelece a classificação dos dados em função do erro planimétrico em cada ponto e no valor de Erro Padrão (EP) para a escala do produto cartográfico gerado. A avaliação do erro em cada ponto se torna interessante, pois permite identificar possíveis falhas pontuais, realizando mais que uma análise global sobre os resultados. Entretanto, para nuvem de pontos LiDAR e MDT não faz sentido usar escala. As demais normas apresentam uma abordagem estatística com nível de confiança de 95%, sendo a norma australiana é a que apresenta maior intervalo para aceitação dos dados (80 cm), seguida da norma canadense (60 cm) e por fim a norma americana, a qual apresenta maior flexibilidade no estabelecimento dos limiares de classificação, e assim, estabelecendo classe de acurácia mais adequada ao conjunto de dados.

O ultimo ponto analisado diz respeito à acurácia absoluta vertical, cujos resultados foram discutidos na Seção 4.2.2 e resumidos na Tabela 20.

Tabela 20 – Resumo dos resultados obtidos na análise da acurácia absoluta vertical.

Acurácia absoluta vertical				
Normas	USGS (2014) e ASPRS (2015)	NRCan (2017)	DSG (2016)	ICSM (2010)
País	Estados Unidos	Canadá	Brasil	Austrália
Produto a ser avaliado	Nuvem de pontos LiDAR		MDT	
Limiares	RMSE _z ≤ 10 cm e	RMSE _z ≤	$e_z \leq 27$ cm e	1,96*RMSE _z ≤

	$1,96 \cdot \text{RMSE}_z \leq 19,6 \text{ cm}$	10 cm e $1,96 \cdot \text{RMSE}_z \leq 19,6 \text{ cm}$	$\text{RMSE}_z \leq 17 \text{ cm}$	30 cm
Valores calculados	$\text{RMSE}_z (\text{LiDAR}) = 11,7 \text{ cm}$ $1,96 \cdot \text{RMSE}_z (\text{LiDAR}) = 23 \text{ cm}$		$\text{RMSE}_z (\text{MDT}) = 11,3 \text{ cm}$ $1,96 \cdot \text{RMSE}_z (\text{MDT}) = 22,1 \text{ cm}$ $e_z (\text{máximo}) = -14,9 \text{ cm}$	
Resultado	Não atende à especificação da norma	Não atende à especificação da norma	Atende à especificação da norma	Atende à especificação da norma

Ao analisar os resultados obtidos na Tabela 20, para a avaliação da acurácia absoluta vertical, pode-se notar que, das quatro normas analisadas, duas atenderam às especificações e duas não. Os resultados obtidos com a nuvem de pontos LiDAR não foram compatíveis com o limiares da normas USGS/ASPRS (Estados Unidos) e NRCan (Canadá). Porém os resultados do MDT foram compatíveis com as normas DSG (Brasil) e ICSM (Austrália), devido ao fato de os limiares estabelecidos para o MDT serem maiores do que os limiares determinados para a nuvem de pontos, indicando que as normas em análise nesse trabalho possuem limiares mais rigorosos quando se trata da nuvem de pontos LiDAR. Além disso, quando se trata do controle de qualidade direto sobre a nuvem de pontos LiDAR, tanto o Brasil como a Austrália não possuem especificações para a avaliação da acurácia absoluta vertical, abordando limiares para os produtos derivados da nuvem (MDT) e, portanto, menos rigorosos. Além disso, se os resultados obtidos pela nuvem de pontos LiDAR e pelo MDT fossem comparados com todas as normas, a nuvem de pontos também atenderia aos limiares das normas brasileira e australiana, enquanto que, do mesmo modo, o MDT não atenderias às especificações das normas americana e canadense. Portanto, conforme exposto acima, os resultados calculados foram parecidos, com diferença máxima de 9 mm, porém as normas possuem limiares diferentes, sendo aquelas relativas a nuvem de pontos obtida de um SVLA mais rigorosa e, aquelas relativas ao produto final (gerado a partir da nuvem de pontos) (MDT ou MSD) menos rigorosas.

Outro aspecto importante a ser observado é que não foi possível realizar o controle de qualidade das áreas VVA (com vegetação), uma vez que o intervalo de tempo entre a aquisição da nuvem de pontos LiDAR e o levantamento em campo dos pontos de controle foi superior a 5 anos. Devido a este longo período, ocorreram mudanças das características das regiões de vegetação e conseqüentemente, não haveria correspondência entre os pontos no terreno atualmente medidos e na nuvem de pontos LiDAR original.

Quanto aos efeitos sistemáticos, pode-se perceber que, quanto a acurácia relativa, apenas as discrepâncias entre as faixas 2 e 3 não apresentaram tendência. Com relação as demais faixas, todas apresentaram tendência, podendo ser uma indicação que, as faixas 2 e 3 encontram-se mais “compatíveis” entre si, enquanto que as faixas 1 e 4 encontram-se deslocadas em relação as faixas adjacentes, ou seja, a faixa 1 possui um deslocamento da faixa 2 e a faixa 3 da faixa 4.

Quanto à análise absoluta planimétrica, nenhuma das componentes apresentaram tendência. Já com relação à análise absoluta altimétrica, tanto a nuvem de pontos quanto o MDT apresentaram tendência. Isso pode ser justificado pelo fato de que a nuvem de pontos, conforme apresentado anteriormente, apresenta tendência no controle relativo, o que significa que há deslocamentos entre as faixas e, portanto, isso pode influenciar nos resultados obtidos na análise da precisão, o que aconteceu na análise da acurácia absoluta da nuvem de pontos.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Durante a realização do presente trabalho foi discutida a importância do estabelecimento de normas e padrões para a análise de dados LiDAR aerotransportado. Ao analisar as normas empregadas, pode-se perceber que a ASPRS é utilizada como referência, conforme pode ser observado na norma da USGS/ASPRS (Estados Unidos) e do NRCan (Canadá), uma vez que ambas possuem as mesmas especificações, bem como os mesmos limiares.

O primeiro ponto a destacar foi de que as normas dos Estados Unidos e do Canadá são específicas para dados de nuvem de pontos LiDAR, e por isso seus limiares são mais rigorosos do que as demais normas. Já as normas da DSG (Brasil) e do ICSM (Austrália) não são específicas para esse conjunto de dados (nuvem de pontos LiDAR), sendo estas referentes ao controle de qualidade dos produtos cartográficos (MDS e MDT) gerados a partir da nuvem de pontos.

Em relação ao controle da qualidade relativo (Seção 4.1), observou-se que o mesmo é realizado unicamente sobre a componente altimétrica e que somente as normas USGS/ASPRS e NRCan preveem esse tipo de análise, enquanto as normas da DSG e do ICSM não possuem especificações para a qualidade relativa, visto que estas normas são específicas para o produto final gerado a partir da nuvem de pontos. Foi observado que, tanto a norma americana quanto a canadense, avaliam a acurácia relativa considerando a estatística RMSD e considerando também os valores das discrepâncias ponto a ponto. Tem-se que estas abordagens podem ser utilizadas em conjunto para promover maior nível de acurácia, onde a análise ponto a ponto auxilia na identificação de eventuais erros, e a análise estatística conjunta fornece a qualidade geral dos dados. Além disso, com a análise de tendência da nuvem de pontos, pode-se perceber que apenas as faixas 2 e 3 não apresentaram tendência entre elas, enquanto que a faixa 1 apresentou tendência em relação a faixa 2, e a faixa 3 apresentou tendência em relação a faixa 4. Isso nos mostra que as faixas 2 e 3 encontram-se mais ajustadas uma com a outra, enquanto que há um deslocamento das faixas 1 e 4 em relação a estas.

Se tratando do controle de qualidade absoluto (Seção 4.2), o mesmo pode ser dividido em análise da acurácia planimétrica e análise da acurácia altimétrica. Nesta etapa foi necessária a definição do número de pontos de verificação, onde cada norma apresentou metodologias distintas para isso. As normas da USGS e da ASPRS levam em consideração a área de abrangência do estudo e tipo de cobertura do solo, estabelecendo o mínimo de 25

pontos para uma área até 500 km². A norma do NRCan segue as mesmas especificações da ASPRS, enquanto a ICSM estipula que o número mínimo de pontos deve ser igual a 20. Por fim, a norma da DSG (brasileira) apresenta uma metodologia mais complexa e sofisticada para o estabelecimento do número de pontos de verificação, levando em conta escala do produto, tipo de cobertura e nível de inspeção dos dados. Dos resultados obtidos, tem-se que a norma da DSG apresentou resultados satisfatórios para escala 1:10.000, porém, quando se trata de escalas maiores, 1:1.000, por exemplo, o número de pontos de verificação sugerido pela norma passa a ser inviável.

Em relação à análise da acurácia absoluta planimétrica ou horizontal (Seção 4.2.1), observou-se que, para a nuvem de pontos derivada de um SVLA, as normas abordam apenas a acurácia vertical, sendo a horizontal obtida de normas complementares, como a ASPRS. De modo geral, a análise planimétrica para todas as normas se baseia na análise do valor de $RMSE_{plan}$. Observou-se que a norma da DSG adota como metodologia analisar e classificar os dados inicialmente em função do erro planimétrico ponto a ponto, de forma a identificar possíveis falhas pontuais, e posteriormente analisa o EP, obtendo uma análise geral do produto. Além disso, a norma brasileira leva em consideração a escala do produto. As demais normas apresentam uma abordagem estatística a um nível de confiança de 95%, sendo a norma australiana com maior intervalo para aceitação (80 cm), seguida da norma canadense (60 cm).

Pôde-se observar que a norma americana apresenta maior flexibilidade no estabelecimento dos limiares de classificação. Nos resultados obtidos, em termos planimétricos, os dados LiDAR foram classificados em: classe de acurácia horizontal de 17,5 cm pela norma americana; aptos para produtos classe A na escala 1:2.000 pela norma brasileira; atendem aos requisitos de qualidade no nível 1 pela norma canadense; e categoria 1 de acurácia horizontal pela norma australiana. A respeito da verificação de tendência na planimetria, nenhuma das componentes apresentou tendência.

Em se tratando da acurácia absoluta vertical (Seção 4.2.2), foi evidenciado que as normas americana e canadense realizam a análise da acurácia sobre a nuvem de pontos LiDAR, enquanto as normas brasileiras e australiana efetuam a análise da acurácia sobre o MDT gerado a partir da nuvem de pontos. Similar ao caso planimétrico, a análise da acurácia altimétrica para todas as normas se baseia na análise do valor de $RMSE_z$. Assim como na análise planimétrica, a norma brasileira adota como metodologia analisar e classificar os dados inicialmente em função do erro altimétrico ponto a ponto, de forma a identificar

possíveis falha pontuais, e posteriormente analisa o $RMSE_z$, obtendo uma análise geral do produto. As demais normas fazem uso do nível de confiança de 95% para classificar a acurácia vertical. Nos resultados obtidos, tem-se que o MDT pode ser classificado na classe A na escala 1:1.000 pela norma brasileira e que atingiu a precisão exigida pela norma australiana; já a avaliação da nuvem de pontos LiDAR não atingiu a acurácia estabelecida pelas normas americanas e canadense, onde percebe-se tendência nos resultados, o que pode ter influenciado as análises. Além disso, cabe ressaltar que na análise do MDT os resultados das normas brasileira e australiana foram compatíveis, porque estas são menos rigorosas por serem referentes ao produto final. Quando comparados seus resultados com as normas específicas para dados LiDAR, o mesmo também não atendeu aos limiares, enquanto que a nuvem de pontos, da mesma forma, atendeu aos limiares das normas brasileira e australiana.

Ao analisar a tendência nos processos altimétricos, verificou-se que houve tendência tanto nas discrepâncias altimétricas obtidas pela nuvem de pontos, quanto nas obtidas pelo MDT. Isso pode ter sido ocasionado, conforme já visto anteriormente, pelo fato de serem detectadas tendências entre algumas das faixas analisadas. Além disso, foi verificado a existência de efeitos sistemáticos na nuvem de pontos, podendo estes ser ocasionados por diferentes fontes: erros nas medidas das distâncias, nos ângulos de varredura, tendências presentes nos parâmetros de montagem do sistema (*boresight* e desalinhamento entre GNSS/INS e o sistema da unidade LASER) ou mesmo na posição e orientação da plataforma, que dependem das medidas feitas pelo GNSS/INS.

Além disso, outro aspecto a ser ressaltado se refere às diferenças obtidas entre as áreas NVA do LiDAR e MDT, que são equivalentes e a princípio deveriam ter diferenças nulas. Essas diferenças das discrepâncias chegaram ao valor máximo de 9 mm, sendo isto justificável pelo fato que, os pontos utilizados no CQ da nuvem de pontos foram obtidos de um plano de 4 m², onde alguns encontravam-se nas regiões de sobreposição das faixas, que conforme exposto, apresentaram tendências entre elas.

Uma sugestão que pode ser feita se refere ao intervalo de tempo decorrido entre a geração da nuvem de pontos LiDAR e do levantamento em campo dos pontos de controle, uma vez que, quanto maior esse intervalo de tempo, mais difícil se torna determinar os pontos equivalentes na nuvem LiDAR devido a mudanças das características da região. A exemplo, pode-se considerar as faixas de pedestres e sinalizações de trânsito que são repintadas com certa frequência e, com isso, alteram a correspondência na nuvem, não sendo um bom tipo de alvo para casos de dados coletados com diferença temporal de muitos meses. Outro fator

relevante se refere ao uso de pontos VVA, uma vez que a vegetação se altera rapidamente em pouco tempo e, portanto, devem ser utilizados apenas quando os pontos de verificação do tipo VVA forem adquiridos próximos, temporalmente falando, à geração da nuvem de pontos LiDAR.

Finalizando, foi possível concluir que não há muitas normas específicas para nuvem de pontos derivados de um SVLA e, das encontradas, a americana (USGS) é mais rigorosa e mais adequada para avaliação deste produto. Quanto à norma brasileira, esta é utilizada para avaliação do produto gerado a partir da nuvem de pontos (MDS ou MDT), considerando a escala dos produtos. Ademais, sua sistemática para determinação da quantidade do número de pontos de verificação é inexecutável para escalas maiores. Isso faz com que a norma da DSG seja menos recomendada para avaliação da acurácia deste tipo de dados.

Como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se usar outras metodologias para a realização do controle de qualidade relativo e absoluto, como a análise de pontos obtidos pela intersecção de retas, a análise ponto/plano, linha/plano. Além disso, sugere-se fazer o ajustamento das faixas para melhorar os resultados obtidos na avaliação da acurácia absoluta, bem como fazer a variação do número de pontos de verificação.

Por fim, recomenda-se fazer uma revisão da norma brasileira, de modo a estabelecer limites para os dados LiDAR oriundos de SVLA, bem como reconsiderar sua sistemática para determinação do número de pontos de verificação, sem que estes dependam da escala do produto e que seja viável para o levantamento. Ainda, sugere-se utilizar a norma da USGS como referência, visto que esta é mais rigorosa e adequada para este conjunto de dados.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, F. J.; MILLS, J. P. Accuracy Assessment of Lidar-Derived Digital Elevation Models. **The Photogrammetric Record**, p. 148-169. June, 2008.
- ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing). ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, Vol. 81, No. 3, March 2015, pp. A1-A26. doi: 10.14358/PERS.81.3.A1-A26.
- BANG, K. I. **Alternative Methodologies for LiDAR System Calibration**. 2010. 177 f. Thesis (Doctor of Philosophy) – Department of Geomatics Engineering. University of Calgary, Calgary, 2010.
- BRASIL. Exército. Diretoria de Serviço Geográfico. **Norma da especificação técnica para controle de qualidade de dados geoespaciais (ET-CQDG)**. Brasília, DF, 2016. 94 p.
- CENTENO, J. A. S.; MITISHITA, E. A. Laser scanner aerotransportado no estudo de áreas urbanas: A experiência da UFPR. **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, v. 4, p. 3645-3652, 2007.
- DALMOLIN, Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laserscanner: Conceitos e Princípios de Funcionamento**. Curitiba, UFPR, 2003. 111p.
- DAL POZ, A. P. **Notas de aula – Varredura a Laser Aerotransportado: Fundamentos e Aplicações Cartográficas**. Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas. FCT/Unesp, Presidente Prudente, SP, 2017.
- DASHORA, A.; LOHANI, B. Calculation of propagated errors in airborne LiDAR data. **KanGAL Report**, n. 2013011, 2013. Disponível em: <<https://www.iitk.ac.in/kangal/papers/k2013011.pdf>>. Acesso em: 09 jan. 2020.
- DRESCH, G. **Avaliação Automática da Acurácia Relativa de Dados LiDAR Aerotransportado**. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital terrain modeling: acquisition, manipulation and applications**. (Artech House Remote Sensing Library). 7. ed. Norwood, MA: Artech House, 2005. 257 p.
- GALO, M. **Notas de aula – Fotogrametria III**. Departamento de Cartografia. FCT/Unesp, Presidente Prudente, SP, 2016.
- GALO, M.; CAMARGO, P.O. **Utilização do GPS no controle da qualidade de cartas**. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Florianópolis, 1994.
- GALVANI, E. A. S.; DAL POZ, A. P. Sistema LiDAR e Métodos de Interpolação de Dados. **Revista de Geografia (UFPE)**. v. 30, n. 1, 2013.
- HABIB, A. F.; KERSTING, A. P.; RUIFANGA, Z.; AL-DURGHAM, M.; KIM, C.; LEE, D.

C. Lidar strip adjustment using conjugate linear features in overlapping strips. In: **Proceedings of the XXI ISPRS Congress**, Commission I, Beijing - China, v.37, part B1, 2008.

HABIB, A.; BANG, K. I.; KERSTING, A. P.; CHOW, J. Alternative methodologies for LiDAR system calibration. **Remote Sensing**, n. 2, pp. 874-907, 2010.

HABIB, A. F.; RENS, J. V. Quality Assurance and Quality Control of LiDAR Systems and Derived Data. In: **Advanced Lidar Workshop**, University of Northern Iowa, 2007.

Disponível em: http://www.asprs.org/a/society/committees/lidar/AKAM_LiDAR_Calibration.pdf. Acesso em: 15 fev. 2017.

HODGSON, M. E.; BRESNAHAN, P. Accuracy of Airborne Lidar-Derived Elevation: Empirical Assessment and Error Budget. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing** v. 70, n. 3, p. 331-339, 2004. Disponível em: <https://www.ingentaconnect.com/content/asprs/pers/2004/00000070/00000003/art00005?crawler=true>. Acesso em: 08 jan. 2020.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Avaliação da Qualidade de Dados Geoespaciais**. 2 ed, Rio de Janeiro, 2019.

ICSM – Intergovernmental Committee on Surveying & Mapping. **ICSM Guidelines for Digital Elevation Data**. v. 1, August, 2008.

ICSM – Intergovernmental Committee on Surveying & Mapping. **ICSM LiDAR Acquisition Specifications and Tender Template**. v. 1, November, 2010.

ISO. **ISO 19157:2013**. Geographic information - Data quality. International Organization for Standardization (ISO), 2013.

KRAUS, K. **Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans**. Berlin: Walter de Gruyter, 2007. 2 ed., ISBN 978-3-11-019007-6.

LIU, X. Accuracy assessment of lidar elevation data using survey marks. **Survey Review**. v. 43, 2011. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/11046556.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2020.

LOHANI, B. **Airbone Altimetric LiDAR: Principle, Data Collection, Processing and Applications**. Indian Institute of Technology Kanpur, 2008 Disponível em: http://home.iitk.ac.in/~blohani/LiDAR_Tutorial/Airborne_AltimetricLidar_Tutorial.htm, Acesso em: 15 fev. 2017.

LOHANI, B.; GHOSH, S.; DASHORA, A. A review of standards for Airborne LiDAR data acquisition, processing, QA/QC and delivery. In book: **Geospatial Infrastructure, Applications and Technologies: India Case Studies**, p. 305-312, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328735044_A_Review_of_Standards_for_Airborne_LiDAR_Data_Acquisition_Processing_QAQC_and_Delivery. Acesso em: 07 jan. 2020.

MAAS, H. G. Planimetric and height accuracy of airborne laserscanner data: user requirements and system performance. **Proceedings of 49° Photogrammetric Week 2003** (Ed. D. Fritsch), Wichmann Verlag, 2003, p.117-125.

MALLET, C.; BRETAR, F. Full-waveform Topographic LiDAR: State-of-the-art. In: **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, p. 1-16, 2009.

MAY, N. C.; TOTH, C. K. Point Positioning Accuracy of Airborne Lidar Systems: A Rigorous Analysis. In: **Photogrammetry Image Analysis**, Munich, Germany, 2007. p. 107-111.

MONICO, J. F. G.; DAL PÓZ, A. P.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, p. 469-483, 2009. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/15513/10363>>. Acesso em: 27 mar. 2019.

NRCan - Natural Resources Canada. **Federal Airborne LiDAR Data Acquisition Guideline**. v. 1, 2017.

OLIVEIRA, H. C. **Detecção de áreas de oclusão para geração de ortoimagem verdadeira utilizando dados LASER**. 2013. 95 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, São Paulo, 2013.

SANTOS, A. P.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, N. T.; JUNIOR, J. G. Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais Utilizando Técnicas de Estatística Espacial: Proposta de Método e Exemplo Utilizando a Norma Brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 22, n. 4, p. 630-650. 2016.

SANTOS, R. C. **Extração de Feições Retas e Cálculo de Entidades Pontuais a partir de Dados LASER para o Ajustamento Relativo de Fixas**. 2015. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2015.

SCHIMALESKY, V.; CENTENO, J. A. S. Avaliação da Qualidade da Informação Altimétrica Derivada da Varredura a Laser em Uma Região Coberta por Vegetação: Estudo de Caso. **Floresta**, Curitiba, PR. v. 38, n. 4, p. 597-606. 2008.

SHAN, J.; TOTH, C. K. **Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing**. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2009.

SHINOHARA, T.; XIU H.; MATSUOKA, M. FWNet: Semantic Segmentation for Full-Waveform LiDAR Data Using Deep Learning. **Sensors** 2020, 20, 3568. . Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/12/3568>>. Acesso em: 30 dez. 2020.

SILVA, M. V. **Avaliação da Qualidade Posicional Planimétrica de Dados LiDAR em duas áreas urbanas no município de Recife/PE** 2014. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

TORRES, F. M. **Montagem e Avaliação de um Sistema de Varredura a LASER embarcado em VANT**. 2016. 129 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Presidente Prudente, São Paulo, 2016.

USGS – United State Geological Survey. National Geospatial Program. **Lidar Base Specification**. v. 1.2, November, 2014.

WEHR, A.; LOHR, U. Airborne laser scanning - an introduction and overview. In: **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, p. 68-82, 1999.

ZANARDI, R. P.; SCHNEIDER, A. H.; SALOMONI, T. R.; SALOMONI, C. S.; REISS, M. L. L. Validação da Qualidade do Perfilamento a LASER Aerotransportado da Cidade de Porto Alegre. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Foz do Iguaçu, PR, 2013. p. 6178-6184.

APÊNDICE A – Coordenadas dos pontos utilizados na análise da acurácia relativa

Neste apêndice são apresentadas as coordenadas UTM/Fuso 22 no referencial SIRGAS 2000 dos vinte e cinco (25) pontos medidos nas áreas de sobreposição entre as faixas de pontos LiDAR obtidas por SVLA usados na análise da acurácia relativa.

Na Tabela A.1 são apresentadas as coordenadas (E, N, H) da faixa 1 e a coordenadas H da faixa 2, bem como as discrepâncias na componente H. Nas Tabelas A.2 e A.3 são apresentados dados similares, mas entre as faixas 2 e 3 e 3 e 4, respectivamente.

Tabela A.1 – Coordenadas tridimensionais para controle relativo entre as faixas 1 e 2.

Ponto	Coordenadas na Faixa 1			Coordenadas na Faixa 2	ΔH (m)
	E (m)	N (m)	H (m)	H (m)	
01a	459177,904	7552784,380	462,963	462,965	0,002
02a	458678,686	7552605,580	516,908	516,899	-0,009
03a	458177,494	7552690,509	446,510	446,510	0,000
04a	458188,184	7552484,436	446,819	446,800	-0,019
05a	457836,656	7552485,459	446,015	446,019	0,004
06a	457659,667	7552626,600	449,817	449,816	-0,001
07a	457317,265	7552372,713	418,863	418,807	-0,056
08a	457354,085	7552727,445	438,247	438,233	-0,014
09a	456881,409	7552826,367	416,738	416,700	-0,038
10a	456870,022	7552280,957	435,879	435,810	-0,069
11a	456506,344	7552558,914	422,712	422,676	-0,036
12a	456242,932	7552536,556	423,881	423,854	-0,027
13a	455819,120	7552260,026	433,764	433,737	-0,027
14a	455852,791	7552734,624	436,425	436,427	0,002
15a	456308,373	7552818,710	418,987	418,967	-0,020
16a	456878,487	7552703,778	406,191	406,141	-0,050
17a	458571,090	7552349,104	451,670	451,603	-0,067
18a	458863,685	7552282,669	450,001	449,937	-0,064
19a	457782,161	7552302,646	495,761	495,740	-0,021
20a	456233,775	7552207,101	441,696	441,659	-0,037
21a	457066,841	7552390,989	424,553	424,473	-0,080
22a	458766,308	7552828,542	419,375	419,380	0,005
23a	459151,627	7552470,852	490,314	490,299	-0,015
24a	459202,306	7552230,928	440,588	440,512	-0,076
25a	455932,584	7552554,482	435,886	435,854	-0,032

Tabela A.2 – Coordenadas tridimensionais para controle relativo entre as faixas 2 e 3.

Ponto	Coordenadas na Faixa 2			Coordenadas na Faixa 3	ΔH (m)
	E (m)	N (m)	H (m)	H (m)	
01b	458580,216	7552993,743	414,104	414,136	0,032
02b	458961,836	7553079,557	434,426	434,419	-0,007
03b	459236,880	7553469,111	443,376	443,407	0,031
04b	458553,167	7553404,784	408,053	408,082	0,029
05b	458381,792	7553405,386	414,619	414,680	0,061
06b	458047,144	7552879,014	450,440	450,423	-0,017
07b	458144,831	7553547,515	481,423	481,423	0,000
08b	457794,202	7553339,396	441,417	441,390	-0,027
09b	457666,481	7553163,682	426,242	426,206	-0,036
10b	458319,612	7553170,023	433,133	433,146	0,013
11b	457065,204	7552968,949	451,702	451,666	-0,036
12b	457400,231	7553029,655	438,827	438,796	-0,031
13b	457093,553	7553456,149	428,138	428,138	0,000
14b	457063,127	7553161,565	436,093	436,096	0,003
15b	456543,090	7553404,844	403,852	403,941	0,089
16b	456884,921	7553382,175	428,704	428,737	0,033
17b	456790,114	7552988,636	415,330	415,338	0,008
18b	456491,549	7553198,305	402,522	402,609	0,087
19b	456287,405	7552717,225	413,566	413,585	0,019
20b	456135,373	7553076,141	421,333	421,352	0,019
21b	455926,901	7553151,052	431,370	431,369	-0,001
22b	456051,494	7553401,225	417,658	417,709	0,051
23b	455801,732	7552821,841	433,869	433,814	-0,055
24b	458802,499	7553203,557	423,110	423,120	0,010
25b	457337,172	7553309,602	421,553	421,552	-0,001

Tabela A.3 – Coordenadas tridimensionais para controle relativo entre as faixas 3 e 4.

Ponto	Coordenadas na Faixa 3			Coordenadas na Faixa 4	ΔH (m)
	E (m)	N (m)	H (m)	H (m)	
01c	459151,644	7553590,821	450,926	450,930	0,004
02c	459121,348	7554061,998	416,402	416,463	0,061
03c	458989,197	7553725,433	442,759	442,785	0,026
04c	458564,332	7554077,707	423,991	424,026	0,035
05c	458687,098	7553908,107	429,686	429,737	0,051
06c	458667,775	7553543,403	425,475	425,463	-0,012
07c	458379,228	7553729,482	404,648	404,633	-0,015
08c	458219,259	7553965,207	407,578	407,562	-0,016
09c	458145,164	7553549,368	481,388	481,370	-0,018
10c	457922,566	7553887,927	430,201	430,229	0,028
11c	457740,670	7553618,672	437,901	437,925	0,024
12c	457274,920	7554099,893	397,046	397,092	0,046
13c	457246,423	7553786,743	397,203	397,244	0,041
14c	457608,766	7553904,452	424,081	424,121	0,040
15c	456855,128	7553692,439	421,393	421,388	-0,005
16c	456854,765	7553910,988	408,590	408,583	-0,007
17c	457396,771	7553592,684	410,500	410,581	0,081
18c	456309,879	7553725,353	396,843	396,849	0,006
19c	456502,744	7554152,767	392,235	392,181	-0,054
20c	455807,156	7553684,817	414,415	414,424	0,009
21c	455785,201	7554041,914	389,176	389,245	0,069
22c	456077,760	7553489,505	416,177	416,164	-0,013
23c	457164,673	7553579,183	420,138	420,175	0,037
24c	458016,952	7553603,345	443,580	443,611	0,031
25c	456165,994	7553909,257	401,784	401,790	0,006

APÊNDICE B – Coordenadas dos pontos utilizados na análise da acurácia absoluta planimétrica

Neste apêndice são apresentadas as coordenadas UTM/Fuso 22 no referencial SIRGAS 2000 dos pontos de verificação determinados por levantamento GNSS (Tabela B.1) e também as coordenadas planimétricas dos pontos de verificação extraídos da nuvem de pontos LiDAR (Tabela B.2), usados na análise da acurácia absoluta.

Tabela B.1 – Coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação absoluta, obtidas por meio de levantamento GNSS.

Pto	E (m)	σ_E (m)	N (m)	σ_N (m)	h (m)	σ_h (m)	ΔN (m)	H (m)	σ_H (m)
1	455800,367	0,002	7554044,698	0,001	384,389	0,005	-5,01	389,399	0,15
2	456769,510	0,001	7553758,587	0,001	409,451	0,004	-5,02	414,471	0,15
3	458287,372	0,001	7554072,090	0,001	397,253	0,003	-5,04	402,293	0,15
4	458901,445	0,001	7553970,369	0,001	426,336	0,004	-5,05	431,386	0,15
5	456378,179	0,001	7553458,118	0,002	391,777	0,004	-5,01	396,787	0,15
6	456114,199	0,001	7552805,353	0,001	420,791	0,004	-4,99	425,781	0,15
7	457410,575	0,001	7552864,487	0,001	439,973	0,004	-5,01	444,983	0,15
8	455985,263	0,001	7552869,747	0,002	427,470	0,004	-4,99	432,460	0,15
9	458214,233	0,001	7552610,650	0,001	437,351	0,003	-5,02	442,371	0,15
10	458336,424	0,001	7553501,020	0,001	408,111	0,003	-5,03	413,141	0,15
11	455946,241	0,002	7552522,386	0,002	425,632	0,004	-4,99	430,622	0,15
12	456932,849	0,002	7552693,692	0,002	401,250	0,004	-5,00	406,250	0,15
13	459043,665	0,002	7552483,594	0,002	418,172	0,005	-5,03	423,202	0,15
14	458808,520	0,001	7553205,016	0,001	418,503	0,003	-5,03	423,533	0,15
15	457166,251	0,001	7554019,560	0,001	390,802	0,004	-5,02	395,822	0,15
16	459130,713	0,001	7554071,608	0,001	412,148	0,004	-5,05	417,198	0,15
17	455808,305	0,002	7554035,352	0,001	384,403	0,004	-5,01	389,413	0,15
18	458659,094	0,001	7552816,644	0,001	419,399	0,003	-5,03	424,429	0,15
19	458421,561	0,001	7553466,727	0,001	404,091	0,003	-5,03	409,121	0,15
20	457542,905	0,001	7553203,935	0,001	412,572	0,003	-5,02	417,592	0,15
21	456783,208	0,001	7552543,871	0,002	417,110	0,004	-5,00	422,110	0,15
22	455934,855	0,002	7553146,379	0,001	426,483	0,004	-5,00	431,483	0,15
23	458985,491	0,001	7553577,270	0,001	434,999	0,004	-5,04	440,039	0,15
24	457734,608	0,001	7553388,925	0,001	434,533	0,003	-5,02	439,553	0,15
25	458214,823	0,001	7554037,418	0,001	402,268	0,003	-5,04	407,308	0,15
26	456853,633	0,001	7553813,170	0,001	405,725	0,004	-5,02	410,745	0,15
27	455829,060	0,002	7552818,933	0,002	430,247	0,007	-4,99	435,237	0,15
28	457326,666	0,001	7552448,319	0,001	412,820	0,004	-5,01	417,830	0,15
29	458397,669	0,002	7552333,132	0,002	451,413	0,007	-5,02	456,433	0,15
30	459246,090	0,001	7553208,911	0,001	423,669	0,004	-5,04	428,709	0,15

Tabela B.2 – Coordenadas planimétricas dos pontos de verificação, extraídas a partir da nuvem de pontos LiDAR.

Ponto	E (m)	N (m)
1	455800,519	7554044,452
2	456769,649	7553758,461
3	458287,176	7554072,231
4	458901,509	7553970,094
5	456378,055	7553458,376
6	456114,223	7552805,070
7	457410,250	7552864,511
8	455985,376	7552869,690
9	458214,421	7552610,764
10	458336,629	7553501,029
11	455946,349	7552522,439
12	456932,948	7552693,865
13	459043,727	7552483,499
14	458808,609	7553205,001
15	457166,411	7554019,557

APÊNDICE C - Coordenadas dos pontos utilizados na análise da acurácia absoluta altimétrica

Neste apêndice são apresentadas (na Tabela C.1) as altitudes ortométricas H dos 15 pontos de verificação, medidos na nuvem de pontos LiDAR e no MDT gerado. Estas coordenadas foram usadas na análise da acurácia absoluta.

Tabela C.1 – Coordenadas altimétricas dos pontos de verificação obtidos da nuvem LiDAR e do MDT.

Ponto	H (m) LiDAR	H (m) MDT
16	417,228	417,250
17	389,308	389,317
18	424,328	424,336
19	408,988	408,997
20	417,458	417,443
21	421,976	421,964
22	431,411	431,385
23	439,941	439,928
24	439,425	439,439
25	407,173	407,184
26	410,627	410,627
27	435,399	435,300
28	417,712	417,685
29	456,322	456,335
30	428,589	428,601